VEROSKA DUEÑAS ZAMBRANA

Análise numérica da influência de chuvas extremas na estabilidade de taludes

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

São Paulo

2014

VEROSKA DUEÑAS ZAMBRANA

Análise numérica da influência de chuvas extremas na estabilidade de taludes

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

Área de Concentração:
Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof. Doutor Marcos Massao
Futai

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de novembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Dueñas Zambrana, Veroska

Análise numérica da influência de chuvas extremas na estabilidade de taludes / V. Dueñas Zambrana. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

297 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Taludes (Estabilização) 2.Chuvas 3.Ação da água nas estruturas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

A minha família pelo amor, apoio,
paciência e confiança.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a Deus por ter me cuidado e fortalecido nessa etapa da minha vida.

Ao Professor Doutor Marcos Massao Futai, pela paciência e apoio ao longo do desenvolvimentos desta pesquisa, além de ter sido um ótimo orientador, presente em todo momento.

À Silvia Suzuki pelas sugestões na redação desta pesquisa, pela confiança e amizade durante a etapa de mestrado.

Ao meu pai, Ethel, in memoriam, a minha mãe Carmen pelo amor incondicional, aos meus irmãos Danny, Ana e Lidia, aos meus sobrinhos Mateo e Ian por serem minha motivação e alegria na vida.

A todos os meus amigos, especialmente aos meus amigos de perto: Letícia, Brian, Milagros e Silvana pela amizade e os gratos momentos de convivência, aos meus amigos de longe: Ladi, Amilcar e Yeni pela companhia através de um computador. A meu querido grupo GO pelas sextas feiras diferentes, que além de estudo bíblico, sempre teve palavras de encorajamento e momentos de risadas.

Aos meus colegas da S-25: Dani, Pedro, André, João, Julio, Carla, Norman e Gonzalo.

Aos professores do Departamento de Estruturas e Fundações pelos conhecimentos compartilhados nas salas de aulas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

Tudo tem o seu tempo
determinado, e há tempo
para todo o propósito
debaixo do céu.

RESUMO

Escorregamentos de taludes no Sudeste do Brasil são causados principalmente, pelo efeito da água proveniente das chuvas. Nos últimos anos, vem se incrementando o número de desastres naturais, ao passo são registradas mudanças climáticas, que podem exercer influência na ocorrência de chuvas extremas. Muitas encostas permanecem grande parte do ano com o solo em estado não saturado, porém variações nas condições ambientais podem ocasionar mudanças bruscas da sucção, reduzindo ou até mesmo eliminando-a e gerando pressões neutras positivas. A dissertação apresenta, um estudo sobre a influência das chuvas, consideradas extremas, no processo de infiltração e de este nos eventos de escorregamentos, considerados catastróficos pela sua dimensão, e que causaram prejuízos ambientais, econômicos e sociais no Brasil. Para o estudo foram selecionados dois eventos de escorregamentos translacionais rasos relativamente típicos, considerados catastróficos, um deles aconteceu na região da Serra de Cubatão em janeiro do ano 1985, e o outro na Região Serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011. Estes dois eventos apresentaram características de precipitações e mecanismos de escorregamentos próprios, que permitem ilustrar os diferentes mecanismos atuantes em cada caso.

Palavras-Chave: Infiltração. Estabilidade de taludes. Chuvas extremas.

ABSTRACT

Landslide in southeastern Brazil, are mainly caused by the effect of water from rainfall in infiltration process, in recent years has been increasing the number of natural disasters, while climate change that may exercising influence on the occurrence of extreme rainfall are recorded . Many slopes remain a large part of the year with unsaturated soil condition; however, changes in environmental conditions can cause sudden changes of suction, reducing or even deleting it and generate positive pore pressures. This dissertation presents a study about the influence of rainfall, considered extreme in the infiltration process and this one in the events regarded by their size of catastrophic landslides, which caused environmental, economic and social losses in Brazil. For the study were selected two events of shallow translational landslides relatively typical, considered catastrophic, one of them occurred in the Serra de Cubatão region on January 1985 and the other in the mountainous region of Rio de Janeiro on January 2011. Both events exhibit characteristics of rainfall and sliding mechanisms themselves, allowing illustrate the different mechanisms active in each case.

Keywords: Infiltration. Slope stability. Extreme rainfall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Anomalias da temperatura do ar (Jones, 2013)	33
Figura 2.2 Total de registros de desastres naturais e número total de pessoas afetadas entre 1960-2008. (Goerl et al., 2009)	34
Figura 2.3 Distribuição dos desastres naturais por tipo de fenômeno no Brasil (1948-2006) (Modificado de Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha, 2008).	35
Figura 2.4 Precipitação média diária sazonal período 1981-2000 (OBREGON & MARENGO, 2007).....	36
Figura 2.5 Distribuição espacial de chuvas intensas (OBREGON & MARENGO, 2007).	37
Figura 2.6 Esquema para identificação de eventos extremos (DIAS, 2011)	38
Figura 2.7- Perfil de intemperismo do solo (Vargas, 1953).	40
Figura 2.8- Modelo esquemático da curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).	48
Figura 2.9-Curvas de retenção para solos tropicais (Futai, 2002).	49
Figura 2.10 Curva de condutividade hidráulica para um solo arenoso e outro argiloso (Cardoso Jr. e Futai, 2005).....	51
Figura 2.11-Envoltória de ruptura (Fredlund e Rahardjo, 1993).	55
Figura 2.12 Variação do intercepto de coesão com a sucção (Ignatius et al., 1991)	56
Figura 2.13 Variação de ϕ_b com o Nível de Sucção em Solos Residuais Sedimentares e Residuais Brasileiros: (a) Solos originários de biotita-gnaiss (De Campos & Carrillo, 1995). (b) curva 1a-colúvio; curva 1b-solo residual de migmatito (Abramento & Carvalho, 1989); curvas 2a e 2b-solos saprolíticos de gnaiss kinzigítico (Fonseca, 1991); curva 3-solo sedimentar laterítico (Rohn & Vilar, 1995) (Fonte: De Campos, 1997)	58

Figura 2.14 Variação da resistência ao cisalhamento com a sucção sob diferentes tensões normais de a) argila cinzenta de Madrid b) argila vermelha de Guadalix de laSierra c) areia argilosa de Madrid (Modificado de Escário e Sáez, 1986).....	58
Figura 2.15 Curva de tensão desviadora na ruptura num solo laterítico e um solo saprolítico (Futai et al.,2004)	59
Figura 2.16 Relação entre: a) curva de retenção e b) resistência ao cisalhamento de um solo não saturado (Vanapalli et al., 1996).....	60
Figura 2.17 Ajuste do intercepto de coesão aparente e do ângulo de atrito variando com a sucção (Futai et al., 2004).....	63
Figura 2.18 Influência do clima e a vegetação nas encostas (Rahardjo et al., 2012).....	65
Figura 2.19- Perfil de infiltração do solo (Bodman e Colman, 1944).....	67
Figura 2.20 Processos de infiltração (adaptado de Singh, 1989).	69
Figura 2.21 Variação da sucção ao longo da profundidade num intervalo de tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993).....	70
Figura 2.22- Infiltração em solo não saturado sob infiltração transiente a) $I < k_{sat}$ b) $I \geq k_{sat}$ (Zhang et al., 2004).....	72
Figura 2.23- Perfis de sucção a) solo arenoso b) solo argiloso. (Cardoso e Futai, 2005).	73
Figura 2.24 Variação do fator de segurança ao longo do tempo para diversas precipitações (a) solo arenoso, (b) solo argiloso (Cardoso Jr e Futai, 2005).....	73
Figura 2.25 Fluxo paralelo à encosta (Wolle e Carvalho, 1994)	78
Figura 2.26 Fluxo vertical à encosta (Wolle e Carvalho, 1994).....	78
Figura 2.27 Ilustração conceptual das diferenças entre o cálculo do fator de segurança clássico e não saturado (Lu e Godt, 2008).	85
Figura 2.28 Representação do coeficiente final de os episódios de chuva intensa (Guidicini e Iwasa, 1976)	88

Figura 2.29 Correlação tempo versus intensidade de chuva-condutividade hidráulica saturada (Vargas Jr. et al., 1986)	89
Figura 2.30 Correlação entre chuvas e escorregamentos (Tatizana et al., 1987).....	90
Figura 2.31 Correlação entre precipitação e escorregamentos para a região serrana do Rio de Janeiro (Salles e Amaral, 2013).....	91
Figura 3.1 Serra do Mar (Lacerda, 1997).	93
Figura 3.2 Localização dos locais de estudo.....	94
Figura 3.3 Localização da Serra do Mar em Cubatão	95
Figura 3.4 Variação espacial da precipitação média anual no período de 1975 a 1985 em estações da região de Cubatão.....	98
Figura 3.5 Chuvas ao longo do tempo para a Serra de Cubatão (Estação Curva da Onça)	99
Figura 3.6 Precipitações máximas diárias por ano da estação Curva da Onça da Serra de Cubatão (período 1975-1985)	100
Figura 3.7 Evapotranspiração real para o Município de Cubatão, período 1941-1968 (DAEE)	101
Figura 3.8 Número de cicatrizes por intervalos de declividade (Lopes et al., 2007)	102
Figura 3.9 Seção típica do escorregamento translacional raso (Wolle e Carvalho, 1989)	103
Figura 3.10 Geometria do talude típico na Serra de Cubatão	103
Figura 3.11 Curva de retenção do solo coluvionar - Serra de Cubatão (Abramento, 1988)	108
Figura 3.12 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo da Serra de Cubatão.....	110
Figura 3.13 Condutividade hidráulica num perfil de solo pertencente a Cubatão (Wolle e Carvalho, 1989).....	111

Figura 3.14 Escorregamentos rasos na Serra do Mar – São Paulo (Fonte: Vieira, 2007)	117
Figura 3.15 Locais mais afetados da Região Serrana do Rio de Janeiro (BAGGIO & HORN, 2011)	119
Figura 3.16 Mapa de isoietas das precipitações médias anuais no Estado do Rio de Janeiro (Modificado de Davis e Naghettini, 2000).	120
Figura 3.17 Variação espacial da precipitação média anual no período de 2002 a 2010 em estações da Região Serrana do Rio de Janeiro	121
Figura 3.18 Localização da estação meteorológica auxiliar Teresópolis/RJ (83744) operada pelo INMET	122
Figura 3.19 Chuvas ao longo do tempo para a Região Serrana do Rio de Janeiro (Estação Teresópolis)	122
Figura 3.20 Chuva diária dos meses com maior quantidade de chuva registrada (Período 2002-2011)	123
Figura 3.21 Precipitações máximas diárias por ano hidrológico (Medeiros, 2013)	124
Figura 3.22 Mapa de Isoietas da Região Serrana do Rio de Janeiro (Coelho et al., 2011))	125
Figura 3.23 Evapotranspiração real para o Município de Teresópolis, período 2001-2010 (INMET)	125
Figura 3.24 Perfil típico das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro (Avelar et al., 2011a)	126
Figura 3.25 Geometria da encosta típica da Região Serrana do Rio de Janeiro	127
Figura 3.26 Carta de plasticidade dos solos estudados	129
Figura 3.27 Curva de retenção do solo coluvionar – Região Serrana do Rio de Janeiro (Oliveira, 2013)	132
Figura 3.28 Curva de retenção do solo residual – Região Serrana do Rio de Janeiro (Oliveira, 2013)	132

Figura 3.29 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro	134
Figura 3.30 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro	134
Figura 3.31 Escorregamento de janeiro de 1967 na Serra das Araras (Jones, 1973)	137
Figura 3.32 Distribuição das cicatrizes de escorregamentos em Teresópolis (DRM-RJ, 2011)	138
Figura 3.33 Distribuição das cicatrizes de escorregamentos em Nova Friburgo (DRM-RJ, 2011).....	138
Figura 3.34 Chuvas horária das estações Cachoeiras de Macacú e Nova Friburgo em 11 e 12 de janeiro de 2011	139
Figura 3.35 Escorregamentos no Município de Nova Friburgo a) Condomínio do Lago; b) Prainha (Oliveira, 2013)	140
Figura 4.1 Malha de elementos finitos empregada nas análises de fluxo	143
Figura 4.2 Condições de contorno impostas para os taludes da Serra de Cubatão	145
Figura 4.3 Distribuição das chuvas empregadas nas análises de fluxo (Estação Curva da Onça).....	146
Figura 4.4 Pluviograma da estação Curva da Onça (Serra de Cubatão)	146
Figura 4.5 Pluviograma do ano 1984 da estação Curva da Onça - Serra de Cubatão	147
Figura 4.6 Chuva diária e acumulada do período novembro 1984 a janeiro 1985 (Estação Curva da Onça)	148
Figura 4.7 Pluviograma do mês de janeiro de 1985 da estação Curva da Onça (Cubatão)	148
Figura 4.8 Curva de retenção empregada nas análises de infiltração da Serra de Cubatão.....	149

Figura 4.9 Idealização da variação da permeabilidade saturada média com a profundidade (Wolle, 1988).....	150
Figura 4.10 Estimativa das funções condutividade hidráulica para os solos da Serra de Cubatão	151
Figura 4.11 Malha de elementos finitos empregada nas análises de fluxo.....	152
Figura 4.12 Condições de contorno para os taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro	154
Figura 4.13 Distribuição da chuva empregada nas análises de fluxo (Estação Teresópolis)	154
Figura 4.14 Pluviograma da Estação Teresópolis (Região Serrana do Rio de Janeiro)	155
Figura 4.15 Pluviograma do ano 2010 da estação Teresópolis - Região Serrana do Rio de Janeiro	156
Figura 4.16 Chuva diária e acumulada do período dezembro 2010 a janeiro 2011 (Estação Teresópolis)	156
Figura 4.17 Pluviograma do mês de janeiro de 2011 da estação Teresópolis.....	157
Figura 4.18 Curvas de retenção empregada nas análises de infiltração da Região Serrana do Rio de Janeiro	158
Figura 4.19 Funções condutividade hidráulica para os solos da Região Serrana do Rio de Janeiro	159
Figura 5.1 Variação da sucção com a coesão (Abramento, 1988)	163
Figura 5.2 Variação do ângulo ϕ^b com a sucção (Abramento, 1988)	164
Figura 5.3 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Serra de Cubatão	165
Figura 5.4 Parâmetros de resistência do solo saprolítico da Serra de Cubatão	166
Figura 5.5 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro	167

Figura 5.6 Parâmetros de resistência do solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro	167
Figura 6.1 Perfil de pressão neutra obtida por análise numérica versus perfil de pressão neutra obtida in situ por Carvalho (1989).....	170
Figura 6.2 Exemplo do procedimento numérico baseado em ciclos, para a obtenção da distribuição da sucção inicial, para o talude com inclinação de 40° da Serra de Cubatão.....	173
Figura 6.3 Variação da pressão neutra obtida no ciclo número 11 para o talude com inclinação de 40° da Serra de Cubatão.....	174
Figura 6.4 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C, D de um talude com 30° de inclinação.....	175
Figura 6.5 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 30° de inclinação.....	176
Figura 6.6 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C, D de um talude com 40° de inclinação.....	184
Figura 6.7 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 40° de inclinação.....	185
Figura 6.8 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C e D de um talude com 50° de inclinação.....	194
Figura 6.9 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 50° de inclinação.....	195
Figura 6.10 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias, na variação da pressão neutra do ponto A, do talude com inclinação de 40°, no ano 1984.....	205
Figura 6.11 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto B do talude com inclinação de 40°	206
Figura 6.12 Influencia da chuva acumulada em quatro dias durante o mês de janeiro de 1984, no talude com inclinação de 30°	207

Figura 6.13 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 30°	210
Figura 6.14 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°	211
Figura 6.15 Influência da posição dos pontos localizados, na porção alta e baixa do talude com inclinação de 50°	212
Figura 6.16 Influência do ângulo de inclinação do talude nos pontos A e B	214
Figura 6.17 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos C e D. ...	215
Figura 6.18 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 30°.....	216
Figura 6.19 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 40°.....	216
Figura 6.20 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 50°.....	217
Figura 6.21 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	219
Figura 6.22 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	219
Figura 6.23 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	220
Figura 6.24 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	221
Figura 6.25 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 50°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	222
Figura 6.26 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 50°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.....	222
Figura 6.27 Sentido do fluxo no talude da Serra de Cubatão	223

Figura 6.28 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 30°	224
Figura 6.29 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 40°	225
Figura 6.30 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 50°	225
Figura 6.31 Variação do fator de segurança em janeiro de 1985 na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°	226
Figura 6.32 Variação do fator de segurança em janeiro de 1985 na porção alta e baixa do talude com inclinação de 50°	227
Figura 6.33 Exemplo do procedimento numérico baseado em ciclos, para a obtenção da distribuição da sucção inicial, para o talude com inclinação de 30° da Região Serrana do Rio de Janeiro	229
Figura 6.34 Variação da pressão neutra obtida na iteração número 9 do exemplo analisado.....	230
Figura 6.35 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 20° de inclinação.....	231
Figura 6.36 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 20° de inclinação.....	232
Figura 6.37 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 30° de inclinação.....	237
Figura 6.38 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 30° de inclinação.....	238
Figura 6.39 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 40° de inclinação.....	243
Figura 6.40 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 40° de inclinação.....	244

Figura 6.41 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto A do talude com inclinação de 30°	250
Figura 6.42 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto B do talude com inclinação de 30°	251
Figura 6.43 Influência das chuvas acumuladas em 4 dias no mês de outubro de 2010	252
Figura 6.44 Influência das chuvas acumuladas em 4 dias no mês de dezembro de 2010.....	253
Figura 6.45 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 20°	255
Figura 6.46 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 30°	256
Figura 6.47 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°	257
Figura 6.48 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos A e B.....	259
Figura 6.49 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos C e D	260
Figura 6.50 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 20°	261
Figura 6.51 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 30°	261
Figura 6.52 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 40°	262
Figura 6.53 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 20°	263
Figura 6.54 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 30°	264

Figura 6.55 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 40°	264
Figura 6.56 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 20°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	265
Figura 6.57 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 20°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	266
Figura 6.58 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	266
Figura 6.59 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	267
Figura 6.60 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	267
Figura 6.61 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011	268
Figura 6.62 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 20°	269
Figura 6.63 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 30°	270
Figura 6.64 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 40°	271
Figura 6.65 Sentido de fluxo no talude da Região Serrana do Rio de Janeiro	272
Figura 6.66 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 20°	273
Figura 6.67 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 30°	273
Figura 6.68 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 40°	274

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Equações para a obtenção da curva característica (Leong e Rahardjo, 1997).....	49
Tabela 2.2 Parâmetros de resistência de Solos Naturais Brasileiros (De Campos, 1997).....	57
Tabela 2.3 Agentes e causas dos movimentos de massa (GUIDICINI & NIEBLE, 1976).....	75
Tabela 2.4 Classificação dos movimentos de massa de Varnes (1978).....	80
Tabela 2.5 Classificação dos movimentos de massa de Augusto Filho (1992)	81
Tabela 2.6 Métodos para o cálculo da estabilidade de taludes (GEO-RIO, 2000)....	83
Tabela 2.7 Valores do parâmetro K	90
Tabela 3.1 Peso específico natural do solo da Serra de Cubatão	106
Tabela 3.2 Índices de consistência do solo coluvionar da Serra de Cubatão	106
Tabela 3.3 Índices físicos do solo coluvionar da Serra de Cubatão	106
Tabela 3.4 Granulometria do solo coluvionar da Serra de Cubatão	107
Tabela 3.5 Permeabilidade saturada do solo coluvionar da Serra de Cubatão	109
Tabela 3.6 Parâmetros de resistência do solo da Serra de Cubatão.....	111
Tabela 3.7 Peso específico dos grãos do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro	128
Tabela 3.8 Índices de consistência do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro	129
Tabela 3.9 Índices físicos do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro	130
Tabela 3.10 Granulometria do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro.....	130
Tabela 3.11 Permeabilidade saturada do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro	133

Tabela 3.12 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro.....	135
Tabela 3.13 Parâmetros de resistência do solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro	135
Tabela 4.1 Localização dos pontos de referência nos taludes da Serra de Cubatão	144
Tabela 4.2 Valores de permeabilidade saturada empregadas para as análises da Serra de Cubatão	150
Tabela 4.3 Localização dos pontos de referência nos taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro	152
Tabela 4.4 Valores de permeabilidade saturada empregadas nas análises para a Região Serrana do Rio de Janeiro	158
Tabela 5.1 Parâmetros de resistência dos solos da Serra de Cubatão.....	166
Tabela 5.2 Parâmetros de resistência dos solos da Região Serrana do Rio de Janeiro	168

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Mudanças climáticas	31
2.2	Chuvas Extremas	35
2.3	Solos Tropicais	39
2.3.1	Solo Laterítico	42
2.3.2	Solo Residual ou Saprolítico	43
2.3.3	Solo Coluvionar	44
2.4	Solos não saturados	46
2.4.1	Curva Característica ou Curva de Retenção da água do solo	47
2.4.2	Curva de Condutividade Hidráulica ou Função Permeabilidade	50
2.4.3	Resistência dos solos não saturados.....	53
2.5	Água no solo.....	63
2.5.1	Fluxo de água	65
2.5.2	Infiltração.....	67
2.6	Movimentos de massa.....	73
2.6.1	Agentes e causas dos movimentos de massa	74
2.6.2	Mecanismos dos movimentos de massa.....	76
2.6.3	Tipos de Movimentos de Massa.....	79
2.7	Estabilidade de Taludes	82
2.8	Estudos de correlação entre precipitação e escorregamentos	86
2.9	Pluviometria.....	92
3	DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	93
3.1	Serra de Cubatão	95

3.1.1	Pluviometria e evapotranspiração.....	97
3.1.2	Geometria das encostas.....	101
3.1.3	Parâmetros do solo.....	104
3.1.4	Tipos de movimento de massas	113
3.1.5	Histórico de casos	114
3.1.6	Escorregamentos em 1985.....	116
3.2	Região Serrana do Rio de Janeiro	118
3.2.1	Pluviometria e evapotranspiração.....	119
3.2.2	Geometria das encostas.....	126
3.2.3	Parâmetros do solo.....	127
3.2.4	Tipos de movimento de massa.....	135
3.2.5	Histórico de casos	136
3.2.6	Escorregamentos em 2011.....	138
4	CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFILTRAÇÃO	141
4.1	Serra de Cubatão.....	142
4.1.1	Geometria dos taludes modelados	142
4.1.2	Condições de contorno.....	144
4.1.3	Pluviometria.....	145
4.1.4	Parâmetros hidráulicos do solo.....	149
4.2	Região Serrana do Rio de Janeiro	151
4.2.1	Geometria dos taludes modelados	151
4.2.2	Condições de contorno.....	153
4.2.3	Pluviometria.....	154
4.2.4	Parâmetros hidráulicos do solo.....	157
5	CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE	163
5.1	Serra de Cubatão.....	163
5.2	Região Serrana do Rio de Janeiro	166

6	RESULTADOS	169
6.1	Serra de Cubatão	169
6.1.1	Perfis de sucção.....	169
6.1.2	Fator de segurança ao longo do tempo	223
6.2	Região Serrana do Rio de Janeiro.....	227
6.2.1	Perfis de sucção.....	227
6.2.2	Fator de segurança ao longo do tempo	272
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	279
7.1	Recomendações para futuras pesquisas.....	282
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	283

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, nas últimas décadas, tem se registrado desastres naturais causados principalmente por fatores hidrológicos como enchentes e escorregamentos, os quais geraram intensos transtornos naturais e sociais.

Os escorregamentos de taludes, em diversos locais do Brasil, tornaram-se eventos catastróficos, devido ao seu impacto na sociedade (grandes perdas econômicas e humanas) ou na natureza (modificações bruscas do entorno). Esses escorregamentos em sua maioria estão concentrados na região da Serra do Mar.

Os taludes naturais na Serra do Mar são compostos principalmente de solos residuais e coluvionares típicos de ambientes tropicais úmidos como o Brasil.

As análises de estabilidade de taludes são feitas considerando que o solo encontra-se saturado ou seco, na atualidade torna-se importante o estudo dos solos não saturados, em virtude da grande porcentagem de taludes que se mantêm estáveis devido à sucção.

Como estudado por Wolle (1988), De Campos et al. (1991), Godt et al. (2007), dentre outros, nos solos coluvionares bem drenados, os escorregamentos translacionais podem ocorrer dentro da zona não saturada, sendo a condição saturada válida só para em algumas condições específicas.

Diversos pesquisadores como Vargas e Pichler (1957), Wolle (1980, 1988), Carvalho (1989), Lacerda(1997a), estudaram as causas da instabilização de taludes em regiões tropicais concluindo que os escorregamentos aconteceram principalmente durante ou no final dos períodos chuvosos, e iniciaram-se após chuvas intensas registradas no mesmo dia do evento (agente deflagrador) ou dias antes dele (agente preparatório).

Wolle (1980) concluiu que um dos principais mecanismos de instabilização encontrados na Serra do Mar pertencente à região de Cubatão, está associado à redução da sucção.

O presente trabalho visa contribuir no entendimento da influência das chuvas nos processos de escorregamentos de taludes pertencentes a duas regiões específicas

da Serra do Mar, referido aos relativamente mais típicos escorregamentos translacionais rasos ocorridos nos locais da Serra de Cubatão (1985) e da Região Serrana do Rio de Janeiro (2011); para este estudo, será realizada uma análise numérica focada na influência das chuvas consideradas extremas nos processos de escorregamentos.

A organização deste trabalho está estruturada em 6 capítulos, da seguinte forma:

Capítulo 2 – **Revisão bibliográfica** - abrange temas como mudanças climáticas, chuvas extremas, resistência dos solos, estabilidade de taludes, estudos de correlação entre precipitação e escorregamentos, tipos de movimentos de massa e conceitos básicos para o entendimento e aplicação de solos não saturados.

Capítulo 3 – **Descrição das áreas de Estudo** – são apresentados os parâmetros dos solos, a geometria dos taludes, assim como os dados pluviométricos a serem utilizados nas análises. Também é feita uma revisão dos tipos de movimentos que ocorrem nessas regiões e uma descrição dos eventos mais importantes.

Capítulo 4 – **Considerações para a análise da Infiltração** – são apresentados os dados de entrada para as análises numéricas feitas com o software SEEP/W

Capítulo 5 – **Considerações para a análise da Estabilidade** – são apresentados os dados de entrada para o cálculo do fator de segurança pelo método do talude infinito.

Capítulo 6 – **Resultados** – é feita uma análise dos resultados dos processos de infiltração gerada pelas chuvas que conduzem aos escorregamentos de taludes.

Capítulo 7 – **Conclusões** – são apresentadas as conclusões das análises numéricas e recomendações para futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas algumas considerações a respeito de mudanças climáticas e chuvas extremas, será feita uma revisão dos principais conceitos envolvidos nos movimentos de massa e na estabilidade de taludes, assim como uma pequena abordagem sobre solos não saturados.

2.1 Mudanças climáticas

Mudança climática indica uma mudança identificável no estado do clima, a mesma que persiste por um período prolongado de tempo, essa mudança pode ser natural ou consequência da atividade humana (IPCC, 2007).

Segundo Egler e Gusmão (2011), ao longo do tempo são observadas mudanças climáticas, principalmente, devido ao aumento da temperatura na atmosfera gerando ventos intensos, períodos secos mais prolongados, assim como modificações na duração, frequência e intensidade das chuvas.

Estas mudanças climáticas produzem inúmeras consequências, como furacões, enchentes, escorregamentos, etc., os quais em grandes cidades podem ser agravados devido à ocupação indevida de vales, encostas e áreas naturais não destinadas para áreas urbanas, ocasionando verdadeiros desastres.

Segundo o relatório do IPCC (2007), as mudanças climáticas são influenciadas pelas atividades humanas, no entanto, segundo Marengo (2007) não se comprova que haja um novo regime de mudança climática, ao contrário do que afirma o relatório do IPCC. Assim também Maruyama (2009), apoia a teoria de que a terra apresenta ciclos naturais de aquecimento e resfriamento, considerando exagerados os prognósticos alarmistas para os próximos anos.

Como exemplos de mudanças climáticas podem ser citados: as enchentes e ondas de calor na Europa em 2002 e 2003, o furacão Catarina no Brasil em 2004, os furacões

no Atlântico Tropical Norte em 2005, as secas no Sudeste do Brasil em 2001, no Sul em 2004, 2005 e 2006 (MARENGO, 2007).

São muitas as controvérsias ao respeito das mudanças climáticas, devido a fatores como a dificuldade de analisar eventos passados, muitos dos quais não foram registrados, possivelmente devido ao fator tecnológico da época; ou predizer eventos naturais que sempre sobrevieram, mas que nos últimos anos têm se agravado devido à ação antrópica ou que devido ao avanço tecnológico podem ser registrados, quantificados e difundidos.

O regime de precipitação é influenciado pela temperatura da superfície do mar, como comprovaram Diaz et al. (1998), que fizeram uma análise dos dados de precipitação entre os anos 1917-1980 para o Sul do Brasil, e Liebmann et al. (2001) que analisaram o período de precipitação entre 1947 a 1995 para o Estado de São Paulo, mostrando que com o aumento da temperatura da superfície do mar há um aumento do número de eventos extremos de chuva; e que este incremento da temperatura vem se intensificando ano após ano.

As estimativas feitas pelo IPCC (2007) indicaram um aumento médio de 3°C na temperatura global produzido, muito provavelmente, pelas atividades humanas, lideradas pela queima de combustível fóssil.

Na Figura 2.1 apresentada por Jones (2013) baseado em observações da temperatura na superfície terrestre e do mar no período 1850 a 2012, observa-se ao respeito da temperatura que, o período 2001 a 2010 foi 0,21 °C mais quente que o período 1991 a 2000 e que ambos os períodos estão acima da normal climatológica de 1961-1999 em 0,47 e 0,27°C, respectivamente. Assim também pode ser observado que os anos mais quentes foram os anos 1998, 2004 e 2010 com 0,54°C acima da normal climatológica.

Figura 2.1 Anomalias da temperatura do ar (Jones, 2013)

Frich et al. (2002) analisaram mudanças globais na temperatura e na precipitação no período 1946-1999, mostrando mudanças significativas dos índices climáticos, como por exemplo, a diminuição dos dias com geadas, incremento na temperatura e chuvas intensas.

Haylock et al. (2006) investigaram tendências de extremos de chuva na América do Sul no período de 1960-2000, mediante análise de correlações dos índices de precipitação com a temperatura da superfície do mar e mostraram a contribuição de El Niño Oscilação Sul (ENSO) no regime das precipitações. Eles encontraram um incremento das condições úmidas no Equador, Norte do Peru, Sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e o Norte e Centro da Argentina.

Os períodos estudados por Liebmann et al. (2001), Frich et al. (2002) e Haylock et al. (2006), compreendem o ano de 1985, ano em que ocorreram os escorregamentos na Serra de Cubatão (SP); e as observações de Jones (2013), abrangem os anos em que ocorreram os escorregamentos tanto na Serra de Cubatão (1985) como na Região Serrana do Rio de Janeiro (2011).

Goerl et al. (2009) baseados em registros do Emergency Disaster Data Base (EM-DAT), apresentaram a Figura 2.2 referente ao número de registro de desastres naturais no período 1960-2008, no qual se observa o incremento de desastres naturais após 1975, bem como o número de pessoas afetadas pelos mesmos.

Figura 2.2 Total de registros de desastres naturais e número total de pessoas afetadas entre 1960-2008. (Goerl et al., 2009)

Os desastres naturais considerados por Goerl et al. (2009) na Figura 2.2, pertencem aos diversos tipos de desastres naturais como terremotos, enchentes, furacões, etc. Nesta figura observa-se que no período 1998 a 2008 houve um crescimento maior do número de desastres naturais quando comparado com períodos anteriores desde 1960, principalmente após o ano 1975.

Na Figura 2.2 o aumento de pessoas afetadas pelos desastres naturais pode estar também ligado ao aumento populacional, que ocasiona maior quantidade de pessoas que podem ser afetadas, portanto há uma tendência de crescimento tanto no número de desastres naturais como no número de pessoas afetadas.

Segundo o Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil apresentado pelo Ministério do Meio Ambiente, na distribuição dos desastres naturais no período 1948 a 2006, a maior porcentagem pertence às inundações e em segundo lugar encontram-se os movimentos de terra, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 Distribuição dos desastres naturais por tipo de fenômeno no Brasil (1948-2006) (Modificado de Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha, 2008).

2.2 Chuvas Extremas

Como visto anteriormente enchentes e movimentos de terra são os desastres naturais que ocorrem com maior frequência no Brasil. Sendo o foco da presente dissertação os movimentos de massa causados por chuvas extremas. Será feita uma revisão bibliográfica para entender o que se entende por chuvas extremas.

Obregon e Marengo (2007) fizeram uma compilação de registros de chuvas no Brasil no período de 1981 a 2000, obtendo a distribuição da precipitação média diária sazonal, assim como a distribuição espacial de probabilidades de precipitações maiores que 25 mm/dia (precipitações intensas) para o Brasil, as quais estão mostradas na Figura 2.4 e Figura 2.5.

Figura 2.4 Precipitação média diária sazonal período 1981-2000 (OBREGON & MARENGO, 2007)

Como mostrado na Figura 2.4 a precipitação média diária normalmente não ultrapassa os 50 mm no período chuvoso e na época seca as chuvas não são maiores aos 30 mm, além disso, pode ser observado que as máximas precipitações ocorrem na região Norte do Brasil, especificamente na Amazônia. Na região Serrana de Cubatão e do Rio de Janeiro, podem ser observadas precipitações médias entre 10 a 30 mm/dia no período chuvoso e de entre 5 a 10 mm/dia no período seco.

Na Figura 2.5 observam-se valores altos, na proporção de dias com precipitação intensa (maiores a 25 mm/dia) em relação ao total de dias úmidos, na região Sudeste do Brasil, onde estão localizados as áreas do nosso interesse.

Figura 2.5 Distribuição espacial de chuvas intensas (OBREGON & MARENGO, 2007).

Ao analisar as chuvas apresentadas na Figura 2.4 e Figura 2.5 deve ser considerado o carácter variável das chuvas, no período de um mês ocorrem chuvas de diversas intensidades e frequências.

Segundo a classificação de intensidade da precipitação, feita pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), podem ocorrer chuvas de intensidade fraca (1 a 5 mm/h), moderada (5,1 a 60 mm/h) ou forte (>60 mm/h); segundo a frequência podem ocorrer chuvas isoladas ou contínuas.

Segundo Zhu e Toth (2001), a definição comumente usada de evento meteorológico extremo é baseada na distribuição estatística de frequência climatológica. Um evento extremo encontra-se em quaisquer dos extremos da distribuição de frequência (Figura 2.6).

Figura 2.6 Esquema para identificação de eventos extremos (DIAS, 2011)

Para determinar um evento de chuva extrema, devem ser levadas em conta a quantidade de chuva num intervalo de tempo e a abrangência espacial dessa chuva (TEIXEIRA, 2004).

Por exemplo, Carvalho et al. (2002) baseados em dados de chuva no período de 1979 a 1996, para o estado de São Paulo, definiram chuva extrema àquela igual ou acima de 20% do total de chuva em uma estação meteorológica em um tempo de 24 horas.

Chaves e Cavalcanti (2000), analisaram eventos de chuva no Sul do Nordeste do Brasil, na qual consideraram como chuva extrema à chuva diária acima de 300% da média diária climatológica, com duração de três dias e comum a mais de duas áreas homogêneas.

Segundo o relatório do IPCC (2007), chuvas diárias acima de 25 mm podem ser consideradas como extremas, assim também alerta que os eventos extremos de precipitação podem aumentar ainda mais do que a média atual, podendo gerar eventos mais severos que os atuais.

No referente a intensidade de chuva, nota-se que o INMET estabelece chuvas de intensidade moderada àquelas no intervalo de 5,1 mm/h a 60 mm/h, em quanto para o IPCC chuvas de 25 mm/dia podem ser consideradas extremas; esta diferença pode ser explicada pelo fator espacial das chuvas, porque o IPCC analisa valores médios de precipitação baseado em indicadores a nível mundial, em quanto os valores de intensidade de chuva analisados pelo INMET são validos para o território brasileiro, que apresenta chuvas próprias de clima tropical, apresentando chuvas com intensidades acima dos valores médios mundiais.

2.3 Solos Tropicais

O Committee on Tropical Soils of the ISSMFE (1985), define solo tropical como aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento ao respeito dos solos não tropicais, as particularidades nesses solos geram-se devido aos processos geológicos e/ou pedológicos característicos das regiões tropicais.

O Brasil apresenta predominância de clima tropical úmido, com umidade comumente acima de 85%, temperaturas médias anuais geralmente superiores a 20°C, sem ocorrência de congelamento do subsolo, e elevada pluviosidade, superior a 1000 mm/ano; assim os solos tropicais recobrem cerca de 65% do território (NOGAMI; VILLIBOR, 1995; LOPES, 2006).

Segundo Medina (1983), solo tropical é aquele que resulta de intensa meteorização com temperatura, umidade e pluviosidade elevadas, com formação de espessos mantos de intemperização, e do processo pedogenético de laterização.

O intemperismo que dá lugar aos solos tropicais pode ser físico ou químico. O intemperismo físico é associado com a decomposição da rocha em pequenos fragmentos, o intemperismo químico produz mudanças na composição mineralógica da rocha e redução da resistência das cimentações entre as partículas (TOWNSEND, 1985).

Como citado por Vargas (1973), quando o solo residual tem um elevado teor de óxido de ferro nos poros, os solos são chamados de solos lateríticos e tem uma predominância da caolinita e gibbsita.

Os solos residuais tropicais jovens, apresentam arranjos estruturais peculiares com descontinuidades, juntas e superfícies reliquiares herdadas da rocha matriz (WOLLE, 1988).

Nos solos tropicais devido à grande espessura das camadas saprolíticas e lateríticas, o nível d'água encontra-se a uma grande profundidade; a grande espessura da camada saprolítica é atribuída em grande parte ao abaixamento sucessivo do nível d'água, na medida em que o processo de intemperismo evolui. Nas regiões tropicais

úmidas o nível d'água raramente aparece a menos de cerca de 5m da superfície do terreno (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Os solos tropicais estão presentes em regiões com clima tropical úmido, tais como Hong Kong, Singapura, Itália, Brasil, etc., sendo os solos residuais os mais representativos das regiões tropicais.

No Brasil existem solos residuais provenientes de granitos e gnaisses ao longo da Serra do Mar, de basaltos e arenitos ao longo do Centro-Sul, de xistos e filitos em Minas Gerais, de calcáreos no Nordeste, dentre outros (BARATA, 1981).

Vargas (1953) apresentou a primeira classificação dos solos tropicais brasileiros, produto de intemperismo de gnaisses, basaltos e arenitos (Figura 2.7).

- ♦ a primeira camada do perfil do solo é chamada de solo residual maduro ou simplesmente solo residual, é um solo arenoso, argiloso ou areno-argiloso, muito poroso, apresenta alto grau de intemperismo e é altamente homogêneo. Caracteriza-se pela ausência da estrutura da rocha matriz e o mineral presente mais comum é o quartzo;
- ♦ a segunda camada é o saprolítico ou solo residual jovem, sendo classificado este solo como silto-arenoso com presença de estruturas reliquias e rocha alterada, é comumente heterogêneo;
- ♦ a terceira camada é formada de rocha alterada a qual apresenta fraturas devido ao processo de intemperismo;
- ♦ finalmente a uma maior profundidade, encontra-se a rocha sã à qual o solo residual deve a sua composição mineralógica.

Figura 2.7- Perfil de intemperismo do solo (Vargas, 1953).

Barata (1969) apresentou o perfil de solo proveniente de gnaiss, distinguindo cinco horizontes:

- ◆ solo residual maduro;
- ◆ solo residual jovem;
- ◆ rocha muito alterada;
- ◆ rocha fraturada ou fissurada;
- ◆ rocha mãe.

Deere e Patton (1971) apresentaram uma classificação baseada em três horizontes de solo e três horizontes de rocha:

- ◆ horizonte I de solo residual, podendo ser esta camada solo orgânico, solo laterítico ou solo saprolítico;
- ◆ horizonte II de rocha alterada, com duas subdivisões: transição com presença de matacões e rocha alterada;
- ◆ rocha sã.

Mello (1972) dividiu o perfil de solo em três horizontes:

- ◆ horizonte maduro;
- ◆ horizonte intermediário de solo residual, composto por solos saprolíticos e saprólitos, com extremas heterogeneidades e descontinuidades da estrutura reliquiar;
- ◆ horizonte de rocha decomposta.

Wolle (1988) especificou cinco horizontes de intemperismo:

- ◆ solo superficial que pode ser residual maduro, coluvionar ou sedimentar;
- ◆ solo saprolítico ou residual jovem;
- ◆ saprólito de transição entre o solo e a rocha;
- ◆ rocha alterada;
- ◆ rocha sã.

Vaz (1996) propôs um perfil de intemperismo com os seguintes horizontes de solo e rocha:

- ♦ classe S1 de solo eluvial ou eluvionar, denominado de solo residual maduro por outros pesquisadores citados acima;
- ♦ classe S2 de solo de alteração (saprólito);
- ♦ classe R3 de rocha alterada mole;
- ♦ classe R2 de rocha alterada dura;
- ♦ classe R1 de rocha sã.

Como visto acima existem diversas classificações dos horizontes ou das camadas que fazem parte do solo tropical, mas ainda não existe uma classificação padronizada aplicada aos solos tropicais, porém há uma convergência em chamar ao horizonte superficial de solo residual maduro, e de solo residual jovem à camada localizada embaixo desta; no nosso estudo, a camada superficial de solo residual maduro cobra interesse, devido a que os escorregamentos atingem dita camada na maioria dos casos.

Conforme citado por Wolle (1988) e Lacerda (1997a), os solos tropicais em sua maioria apresentam maior grau de intemperismo na superfície, e em alguns casos uma permeabilidade crescente com a profundidade (devido ao fraturamento do substrato rochoso). A granulometria desses solos é mais grossa quanto mais próxima à rocha sã, além disso, Wolle (1988) observou a presença de rocha muito fraturada que tornaria a permeabilidade crescente com a profundidade.

Em outros casos os solos tropicais apresentam uma camada intermediária impermeável logo em seguida da camada de solo residual, podendo esta condição gerar fluxo confinado permanente na região abaixo da camada impermeável (LACERDA, 1997a).

Segundo Nogami e Villibor (1995), dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

2.3.1 Solo Laterítico

É uma variedade de solo superficial pedogenético, típico das partes bem drenadas das regiões tropicais úmidas. Esses solos constituem perfis naturais, caracterizados pedologicamente como latossolos, solos podzólicos e terras roxas estruturadas (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

Os latossolos podem apresentar grande espessura, elevada porosidade, elevada permeabilidade, as cores predominantes são vermelho, amarelo e marrom, tem variedade granulométrica.

Os solos podzólicos apresentam agregados bem desenvolvidos nas variedades argilosas e presença de cerosidade, a espessura varia desde menos de um metro até alguns metros, a drenagem é frequentemente prejudicada pela presença do horizonte argiloso.

As terras roxas estruturadas tem cor semelhante aos latossolos roxos, há um enriquecimento de argila nesse horizonte, a porosidade e a permeabilidade são elevados.

Como ressaltado por Wolle (1981), nas regiões de encostas e escarpas os solos lateríticos estão geralmente, restritos a ocorrências superficiais, de modo que a maioria dos processos de instabilização de taludes, envolvendo materiais subjacentes, pouco são influenciados pela presença ou não dos solos lateríticos.

Sendo o escopo deste trabalho as encostas da Serra de Cubatão e da Região Serrana do Rio de Janeiro, formadas por solos residuais e coluvionares, não será dada maior ênfase aos solos lateríticos.

2.3.2 Solo Residual ou Saprolítico

É aquele que resulta da decomposição e/ou desagregação (intemperismo) “in situ” da rocha, mantendo a estrutura da rocha que lhe deu origem. É, portanto, um solo genuinamente residual (ISSMFE, 1985).

Segundo Wesley (1990), os principais fatores que influem no comportamento dos solos residuais são a composição (tamanho, forma e composição mineralógica), e a estrutura (ligação entre as partículas e cimentação).

Vargas (1971) descreveu solos superficiais residuais como sendo argilas siltosas ou argilas arenosas, em alguns casos areias pouco argilosas normalmente não saturadas devido a que o lençol freático encontra-se a profundidades consideráveis, como constatado por Wolle (1988), Abramento (1988) e Carvalho (1989).

Aleva (1982) definiu o solo residual como rocha branda, terrosa, rica em argila, completamente decomposta, que se formou in situ por intemperização química de rochas ígneas e metamórficas, é usualmente de cor avermelhada ou acastanhada.

Devido ao processo de intemperismo mediante o qual são gerados, os solos residuais possuem estruturas muito mais complexas do que a rocha originária (ISSMFE, 1985).

Um solo residual de granito é uma mistura de pedregulho ou matacões, areia e mais um mineral argila; um solo residual de basalto será predominantemente um solo argiloso (VARGAS, 1971).

Sendo os processos de formação de solos residuais muito complexos, na geotecnia interessa saber que esses processos dependem das condições climáticas de umidade e temperatura, e da natureza da rocha mãe; como exposto por Vargas (1971).

Singh e Huat (2004) apresentam alguns dos fatores responsáveis pela formação do solo residual:

- ♦ Climáticos, relacionado ao efeito da temperatura e da precipitação sobre a superfície;
- ♦ geológicos, atribuídos à rocha matriz que é transformada por processos químicos e desintegração física;
- ♦ geomorfológicos e topográficos, referentes à configuração da superfície evidenciada em aspectos da encosta e drenagem;
- ♦ biológicos, composto pelas plantas e animais bem como matéria orgânica;
- ♦ cronológicos, referido ao espaço de tempo sobre o qual interatuam os processos acima mencionados.

As características dos solos residuais tornam-se condições favoráveis para os problemas de estabilidade de taludes, principalmente, durante o processo de infiltração na época de chuvas intensas características das regiões tropicais.

2.3.3 Solo Coluvionar

Lacerda e Sandroni (1985) definiram o colúvio como depósito composto por blocos de rocha ou grãos minerais de qualquer dimensão, transportados por gravidade e depositados a uma curta distância da porção alta do talude; no Brasil, cerca de 70% das regiões são cobertas por colúvio.

O solo coluvionar encontrasse também ao sopé das escarpas rochosas, tem aparência de solo residual, tornando difícil distinguir entre os dois tipos de solos (BARATA, 1969).

Os solos coluvionares tem maior índice de vazios do que o solo residual quando pertencentes à mesma encosta, apresentam condutividade hidráulica entre 10^{-3} e 10^{-5} cm/s, devido ao fato das partículas ficarem agrupadas em grumos e à formação de macroporos (SOARES, 2006).

Segundo Vaz (1996), os solos coluvionares apresentam propriedades similares e características singulares devido à isotropia e homogeneidade mineralógica e granulométrica.

Podem se diferenciar duas classes de colúvio; o colúvio desestruturado resultado do depósito de material escorregado que está quebrado ou desintegrado; e o colúvio resultado da formação de uma superfície escorregada sobre um solo residual (apenas perceptível através de inclinômetros) (LACERDA, 2004).

Os pedregulhos que fazem parte dos solos coluvionares são ligeiramente arredondados devido ao desgaste sofrido no transporte, quando o solo coluvionar tem fragmentos de grandes dimensões (matacões) pode ser chamado de tálus (VARGAS, 1994).

Os tálus da região da Serra do Mar, comumente se acumulam no sopé das encostas, são constituídos por uma matriz de solo argilo-arenoso, tem caráter plástico, a maioria deles encontram-se em estado saturado devido à sua posição, obstruindo drenagens naturais (WOLLE; CARVALHO, 1994).

Segundo Lacerda (1997a), uma diferença de comportamento entre o solo residual e o colúvio é observado no processo de deformação, com o incremento da pressão da água ocorre certo valor de tensão a partir do qual as deformações crescem mais rapidamente no solo residual do que no colúvio.

2.4 Solos não saturados

O solo é um sistema de três fases: a fase sólida, a fase líquida e a fase ar, estas criam diferentes interações e interfaces entre as mesmas, influenciando o comportamento da água no interior do solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993; ALI; RAHARDJO, 2004).

A fase sólida está constituída por partículas minerais e matéria orgânica; a fase líquida está composta por água, sais minerais e ar dissolvido; a fase ar pode se encontrar em canalículos ou em forma de bolhas oclusas, dependendo do grau de saturação (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977).

Uma massa de solo é considerada não saturada quando ar e água coexistem dentro dos poros do solo; ao respeito pesquisadores como Fredlund e Morgenstern (1977), Fredlund et al. (1978) consideraram como uma quarta fase do solo a membrana contrátil formada pela interfase ar-água.

A interface ar-água se comporta como se fosse uma membrana sujeita a tração, comportamento que é medido pela tensão superficial. A tensão superficial faz com que o contato entre a água e o solo apresente uma curvatura a qual indica que a pressão nos dois fluidos não é a mesma, dando lugar à denominada tensão de sucção (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Como descrito por Fredlund e Rahardjo (1993) são conhecidos dois tipos de sucção, a matricial e a osmótica, que somadas dão lugar à sucção total.

A sucção matricial está associada aos fenômenos de capilaridade e adsorção, dando como resultado uma pressão abaixo da atmosférica; ela é definida como a diferença entre a pressão do ar e a pressão da água atuando na película contrátil gerada na interface ar-água.

A sucção osmótica comumente não é considerada porque sofre pouca alteração ante as mudanças na umidade do solo, portanto o termo sucção será entendido como a sucção matricial.

Num solo não saturado predominam fenômenos transientes, precisam-se então do conhecimento da função de condutividade hidráulica e da curva de retenção de água, os mesmos que determinam o comportamento do fluxo da água nos vazios do solo.

Nos solos não saturados as propriedades hidráulicas, resistência ao cisalhamento e cambio no volume do solo, mudam em resposta às mudanças climáticas. A evapotranspiração produz secagem gradual, fraturamento e ressecamento (ALI; RAHARDJO, 2004).

Em regiões tropicais, devido às condições climáticas e à densa vegetação, os solos se apresentam no estado não saturado, produzindo uma coesão aparente resultado do efeito de capilaridade (MAAIL; HUAT; JAMALUDIN, 2004).

2.4.1 Curva Característica ou Curva de Retenção da água do solo

A curva característica ou curva de retenção representa uma propriedade fundamental para o entendimento do comportamento dos solos não saturados. Esta mostra uma relação entre o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou do grau de saturação e a sucção matricial. A curva de retenção estabelece a variação da sucção com a capacidade de retenção da água nos macro e micro poros no interior do solo (FREDLUND; XING, 1994).

A forma da curva de retenção depende da mineralogia do solo, granulometria e arranjo estrutural, os quais estão intrinsecamente relacionados com os efeitos de capilaridade e adsorção, assim um solo arenoso dessatura mais rapidamente do que um solo siltoso, e um solo argiloso dessatura mais lentamente (HILLEL, 1971).

Fredlund e Xing (1994) mostraram a Figura 2.8 com as principais componentes da curva de retenção típica. A entrada de ar corresponde ao valor da sucção a partir do qual o ar começa a entrar nos vazios do solo e a umidade volumétrica começa decrescer. A umidade volumétrica residual é aquela em que uma grande quantidade de sucção é necessária para remover água do solo.

A obtenção da curva de retenção mediante ensaios de laboratório pode ser feita por secagem ou por molhagem, mas estas curvas diferem uma da outra devido ao fenômeno de histerese.

A histerese é um fenômeno pelo qual para um mesmo valor de sucção, uma quantidade maior de água é retida pelo solo durante o processo de secagem que a adsorvida pelo solo no processo de umedecimento (PRESA, 1982).

Figura 2.8- Modelo esquemático da curva de retenção (Fredlund e Xing, 1994).

A sucção total do solo é influenciada pela variação da umidade, produzindo-se uma diminuição da sucção total quando a umidade é incrementada (HILLEL, 1971).

A Figura 2.9 mostra curvas de retenção de solos tropicais apresentadas por Futai (2002), na qual se observa que solos lateríticos mostram perda de umidade para valores relativamente baixos de sucção, e solos saprolíticos mostram variações de sucção menos acentuadas.

Nota-se também que o valor de entrada de ar num solo laterítico é menor do que no solo saprolítico, ainda que o solo laterítico seja mais argiloso que o solo saprolítico, outra peculiaridade no comportamento do solo laterítico é a marcada variação da umidade volumétrica, para valores de sucção próximos aos 10 kPa e para sucções entre 3000 e 10000 kPa, podem ser assim obtidos dois valores para a umidade volumétrica residual.

Figura 2.9-Curvas de retenção para solos tropicais (Futai, 2002).

A curva característica pode ser obtida mediante o emprego das equações mostradas na Tabela 2.1, as quais são baseadas na premissa de que a distribuição dos poros do solo define a forma da curvatura da curva característica.

Tabela 2.1 Equações para a obtenção da curva característica (Leong e Rahardjo, 1997)

Referência	Equação	Parâmetros de ajuste
GARDNER (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q\psi^n} \quad (2.1)$ $\theta = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.2)$	θ = Teor de umidade volumétrico normalizado θ_w = Teor de umidade volumétrico θ_r = Teor de umidade residual θ_s = Teor de umidade saturado ψ = Sucção n, q = Parâmetros de ajuste
VAN GENUCHTEN (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad (2.3)$	θ = Teor de umidade volumétrico normalizado ψ = Sucção α, n, m = Parâmetros de ajuste
FREDLUND & XING (1994)	$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m} \quad (2.4)$ $C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad (2.5)$	θ = Teor de umidade volumétrico θ_s = Teor de umidade saturado ψ = Sucção ψ_r = Sucção do teor de umidade residual a, n, m = Parâmetros de ajuste

2.4.2 Curva de Condutividade Hidráulica ou Função Permeabilidade

A condutividade hidráulica é definida como a capacidade do solo para transferir volumes de água através dos seus poros; tem influência direta na rapidez com que a água flui através dos poros do solo.

A curva de condutividade hidráulica é a função que relaciona a permeabilidade do solo não saturado (condutividade hidráulica) com a sucção; o coeficiente de permeabilidade é função do índice de vazios e o teor de umidade do solo (LEONG; RAHARDJO, 1997).

Segundo Lambe e Whitman (1979), a condutividade hidráulica é influenciada pelas seguintes propriedades dos solos:

- Tamanho das partículas;
- índice de vazios;
- composição mineralógica: a condutividade hidráulica é fortemente influenciada pela fração argila devido a que na argila estão presentes argilominerais com estrutura muito complexa;
- estrutura do solo;
- grau de saturação.

Cardoso e Futai (2005) apresentaram curvas de condutividade hidráulica para um solo arenoso (solo A) e um solo argiloso (solo B), as curvas estão mostradas na Figura 2.10.

Figura 2.10 Curva de condutividade hidráulica para um solo arenoso e outro argiloso (Cardoso Jr. e Futai, 2005).

As curvas mostradas na Figura 2.10, refletem a baixa permeabilidade dos solos argilosos e a rápida dessaturação com valores baixos de sucção dos solos arenosos.

Num solo não saturado a capacidade da água para fluir através do solo diminui devido à quantidade de ar contida nos vazios, por isto, quanto maior a sucção menor a condutividade hidráulica do solo.

Assim como a curva de retenção do solo, a curva de condutividade hidráulica também apresenta histerese, sendo ela mais pronunciada quando expressa em termos da sucção matricial.

Por vezes a função condutividade hidráulica é gerada através de modelos baseados na curva de retenção do solo e na permeabilidade saturada do solo, estes modelos estão baseados no fato de que a curva de retenção e a função permeabilidade são função da distribuição do tamanho dos poros.

Van Genuchten (1980) propôs a seguinte equação para descrever a condutividade hidráulica do solo como função da sucção:

$$k_w = k_s \frac{[1 - (a\Psi^{(n-1)})(1 + (a\Psi^n)^{-m})]^2}{((1 + a\Psi^n)^{\frac{m}{2}})} \quad (2.6)$$

Onde:

k_s = condutividade hidráulica saturada

a, n, m = parâmetros de ajuste da curva ($n = \frac{1}{(1-m)}$)

Ψ = faixa de sucção necessária

Outra proposta para a determinação da curva de condutividade hidráulica foi sugerida por Fredlund et al. (1994), sendo a seguinte:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (2.7)$$

Onde:

k_w = condutividade calculada para um teor de umidade específico ou pressão neutra negativa (m/s)

k_s = condutividade saturada medida (m/s)

θ_s = teor de umidade volumétrico

e = número natural 2,71828

y = variável de integração que representa o logaritmo da pressão neutra negativa.

i = intervalo entre a gama de j a N

j = pressão neutra negativa mínima a ser descrita pela função final.

N = pressão neutra negativa máxima a ser descrita pela função final

ψ = sucção correspondente ao j^{th} intervalo

θ' = primeira derivada da equação:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (2.8)$$

Onde:

a = valor aproximado de entrada de ar do solo

n = parâmetro que controla a inclinação no ponto de inflexão na curva de retenção

m = parâmetro relacionado ao teor de umidade residual

$C(\psi)$ = função de correção definida como:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{c_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1.000.000}{c_r} \right)} \quad (2.9)$$

Onde

c_r = constante relacionada à sucção matricial correspondente ao teor de umidade residual

2.4.3 Resistência dos solos não saturados

Os solos estão sujeitos a esforços gerados pelo peso próprio e pelas forças externas atuando nele. Esses esforços podem ser normais ou tangenciais, dando lugar à tensão normal e à tensão de cisalhamento.

Nos solos saturados, pelo princípio das tensões efetivas proposta por Terzaghi em 1943, uma quantidade da tensão normal é transmitida aos grãos e uma outra quantidade é transmitida à água; a tensão de cisalhamento é transmitida só aos grãos do solo, devido a que a água não resiste tensões de cisalhamento; é por isso que a resistência do solo depende da tensão efetiva.

O comportamento das tensões em solos não saturados difere devido à presença de ar além de água e sólidos. Nos solos não saturados está presente a sucção, que gera uma ação intergranular na qual as partículas se mantêm mais fortemente unidas, aumentando a rigidez do solo produzindo, por tanto, um aumento da coesão aparente.

Bishop et al. (1960) propuseram uma equação de tensões efetivas para solos não saturados, incluindo uma parcela correspondente à tensão de sucção afetada pelo fator χ .

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2.10)$$

sendo χ um parâmetro que depende do grau de saturação (1 para solos saturados e 0 para solos secos) e de outros fatores específicos de cada solo, a expressão $(u_a - u_w)$ é a tensão de sucção formado pela pressão no ar u_a e pressão na água u_w .

Bishop et al. (1960) definiram também a equação para a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, sendo a seguinte:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (2.11)$$

Fredlund e Morgenstern (1977) examinaram o comportamento do estado de tensões no solo não saturado dentro do contexto da mecânica da multifase continua, onde as fases água e ar coexistem nos poros do solo e podem ser classificados como fluidos, a multifase deixa de ser continua quando existe água intersticial ou bolhas de ar oclusas no solo; assim as tensões associadas com cada fase podem ser escritas em termos das tensões fisicamente mensuráveis (tensões totais σ , pressões de ar nos poros u_a , pressões na água u_w), as análises indicaram que cada duas de três variáveis do estado de tensão podem ser usadas para definir o estado de tensão, sendo as possíveis combinações as seguintes:

$$(\sigma - u_w) \text{ e } (u_a - u_w) \quad (2.12)$$

$$(\sigma - u_a) \text{ e } (u_a - u_w) \quad (2.13)$$

$$(\sigma - u_a) \text{ e } (\sigma - u_w) \quad (2.14)$$

A combinação $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$ é a mais empregada, segundo Fredlund et al. (1978) devido a que a mudança da pressão da água afeta só uma das duas variáveis.

A resistência de solos não saturados proposta por Fredlund e Rahardjo (1993) está representada na Figura 2.11, ela é representada num espaço tridimensional tendo

como ordenada a tensão cisalhante (τ) e como abscissas as variáveis de estado de tensão $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$.

Figura 2.11-Envoltória de ruptura (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Fredlund et al. (1978) propuseram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento dos solos não saturados:

$$\tau = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.15)$$

Sendo:

c' = intercepto da coesão do solo quando as variáveis do estado de tensão $(\sigma - u_a)$ e $(u_a - u_w)$ são nulas.

ϕ' = ângulo de atrito interno do solo com relação à variação de $(\sigma - u_w)$.

$(u_a - u_w)$ = sucção matricial na ruptura no plano de ruptura

ϕ^b = ângulo que indica a taxa do incremento da tensão de cisalhamento em relação à sucção matricial.

A equação descrita acima é comumente escrita como:

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (2.16)$$

Onde:

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2.17)$$

Sendo c o intercepto de coesão total.

Vargas (1981) estudou a resistência ao cisalhamento de solos residuais, compostos por grãos grossos, com resistência típica de um solo arenoso. Observou que quando o solo encontra-se seco apresenta uma coesão considerável, mas que quando saturado apresenta pressões neutras produzindo um comportamento típico de argilas compressíveis.

Para Wolle (1983) a resistência do solo é influenciada pela estrutura do solo, assim, por exemplo, os solos saprolíticos ou residuais jovens provenientes de gnaisses apresentam estrutura de arcabouço e preenchimento com materiais fofos, absorvendo tensões muito menores; os solos coluvionares e residuais maduros tem estrutura mais ou menos homogênea, com desenvolvimento tensão-deformação nas mesmas condições; finalmente os talus têm estruturas mais rígidas e resistentes.

Ignatius et al. (1991) apresentaram resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada, para um saprólito da Serra do Mar e para latossolos do interior de São Paulo (Figura 2.12).

Figura 2.12 Variação do intercepto de coesão com a sucção (Ignatius et al., 1991)

De Campos (1997) apresentou a Tabela 2.2, considerando a envoltória de resistência linear na faixa de variação de sucção indicada para cada solo, nota-se a variabilidade nos parâmetros do solo de um mesmo local porém existe uma ampla faixa de valores do ângulo ϕ^b .

Tabela 2.2 Parâmetros de resistência de Solos Naturais Brasileiros (De Campos, 1997)

Solo	IP %	c' kPa	ϕ' °	ϕ^b °	$\sigma-u_w$ kPa	u_a-u_w kPa	Fonte
Residual de migmatito (granítico), arenoso	14	0	40	11,5	10	10 a 60	Abramento e Carvalho (1989)
Colúvio arenoso	-	0	38	14,4			
Residual Gnaiss Kinzigítico - areia siltosa	NP	29,8	28,8	28,0	68	50 a 200	Fonseca (1991)
Residual Gnaiss Kinzigítico - areia siltosa	10	12,4	30,6	29,3			
Colúvio amarelo, areno-argiloso	23	0	26,4	6,7	56	25 a 200	Carrillo (1993)
Colúvio vermelho areno-argiloso	17	11,1	26,8	5,5	55		
Residual de Biotita Gnaiss, areia argilo-siltosa	18	8,6	30,4	6,8	58		
Residual de Biotita Gnaiss, areia silto-argilosa	NP	13,7	28,7	4,6	53		
Residual de granulito, argila silto-arenosa	35	33,3	28,4	10,3	60	40 a 140	Fonseca et al. (1994), Campos (1997)
Residual de granulito, areia silto-argilosa	24	21,8	31,9	6,9			
Residual de granulito, areia argilo-siltosa	12	21,8	31,9	7,3			
Sedimentar laterítico, arenoso	14	25,3	27,9	18,4	50	50 a 250	Rohm e Vilar (1995)

De Campos (1997) compilou resultados de ensaios feitos por diversos autores que mostraram variações do ângulo ϕ^b com a sucção, para diferentes solos residuais brasileiros (Figura 2.13). Observa-se o comportamento não linear de dito ângulo, ainda mais acentuado para elevados valores de sucção, na parte b da figura destaca-se o fato da possibilidade de se encontrar valores de ϕ^b maiores que ϕ' , para níveis de sucção baixos.

Figura 2.13 Variação de ϕ^b com o Nível de Sucção em Solos Residuais Sedimentares e Residuais Brasileiros: (a) Solos originários de biotita-gnaiss (De Campos & Carrillo, 1995). (b) curva 1a-colúvio; curva 1b-solo residual de migmatito (Abramento & Carvalho, 1989); curvas 2a e 2b-solos saprolíticos de gnaiss kinzigítico (Fonseca, 1991); curva 3-solo sedimentar laterítico (Rohn & Vilar, 1995) (Fonte: De Campos, 1997)

A equação de resistência formulada por Fredlund et al. (1978) considera o valor do ângulo ϕ^b constante, obtido da envoltória linear de ruptura, porém diversos pesquisadores como Escário e Sáez, 1986; Abramento (1988); Abramento e Carvalho (1989); Futai (2002); Futai et al. (2004); mostraram que o valor de ϕ^b não é constante.

Resultados experimentais para três tipos de argila foram obtidos por Escário e Sáez (1986), onde se observa que a resistência ao cisalhamento varia de forma não linear, para diferentes valores de sucção sob diferentes níveis de tensão, porém o valor de ϕ^b não é constante (Figura 2.14).

Figura 2.14 Variação da resistência ao cisalhamento com a sucção sob diferentes tensões normais de a) argila cinzenta de Madrid b) argila vermelha de Guadalix de laSierra c) areia argilosa de Madrid (Modificado de Escário e Sáez, 1986)

Futai et al. (2004) fizeram ensaios triaxiais em solos tropicais (lateríticos e saprolíticos) coletados em Santo Antônio de Leite – Ouro Preto, nos quais perceberam um ganho de resistência com o aumento da sucção, como mostrado na Figura 2.15.

Figura 2.15 Curva de tensão desviadora na ruptura num solo laterítico e um solo saprolítico (Futai et al., 2004)

Em concordância com Vanapalli et al. (1996), os resultados obtidos por Futai et al. (2004) em solos lateríticos e saprolíticos, mostram a variação não linear da resistência ao cisalhamento com a sucção.

Mais tarde Fredlund et al. (1995) propuseram que o parâmetro ϕ^b torna-se constante para baixos níveis de sucção, isto é, menores que o correspondente à entrada de ar do solo.

Para a obtenção da resistência ao cisalhamento de solos não saturados, diversos pesquisadores como Vanapalli et al. (1996), Fredlund et al. (1995), Futai (2002), desenvolveram modelos para a previsão da resistência dos solos não saturados.

Vanapalli et al. (1996) descreveram a relação entre a curva de retenção do solo e a resistência ao cisalhamento do solo não saturado com respeito à sucção matricial; fazendo uso da curva de retenção e dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo saturado (Figura 2.16).

Figura 2.16 Relação entre: a) curva de retenção e b) resistência ao cisalhamento de um solo não saturado (Vanapalli et al., 1996)

O modelo de Vanapalli et al. (1996), apresenta três zonas:

- A zona efeitos de contorno: representada pela reta AB na Figura 2.16 b, apresenta comportamento de solo saturado, o incremento da resistência ao cisalhamento com a sucção varia linearmente.
- A zona de dessaturação: trecho BC na Figura 2.16 b, inicia-se com o valor de entrada de ar do solo, a variação da resistência ao cisalhamento com a sucção do solo gera uma curva não linear.
- A zona residual: trecho CD, começa com o valor de umidade residual, apresenta pouca ou nenhuma variação de resistência ao cisalhamento frente a elevados valores de sucção.

Segundo Vanapalli et al. (1996), uma vez alcançada a condição de sucção residual pode se esperar a diminuição da resistência ao cisalhamento em solos arenosos e siltosos, isto devido à pouca quantidade de água nos poros do solo, os mesmos que não são capazes de transmitir sucção efetiva entre as partículas de solo. Em contraste, solos argilosos podem, mesmo na condição de sucção residual, ter quantidades consideráveis de água capazes de transmitir sucção entre as partículas do solo.

O modelo proposto por Vanapalli et al.(1996) está fundamentado na equação de resistência ao cisalhamento de solos não saturados proposto por Fredlund et al. (1978); na razão em que a sucção contribui na resistência ao cisalhamento, relacionada pela área normalizada de água (a_w).

Escrevendo a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento em termos de área normalizada temos:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w)(a_w \tan \phi') \quad (2.18)$$

Devido à similaridade entre o valor de a_w e o valor da umidade volumétrica normalizada θ , a seguinte equação pode ser escrita:

$$a_w = (\theta^\kappa) \quad (2.19)$$

onde: κ é um parâmetro de ajuste.

A contribuição na resistência ao cisalhamento devido à sucção τ_{us} , em termos da área normalizada de água a_w queda expressada matematicamente como:

$$\tau_{us} = (u_a - u_w)[(\theta^\kappa)(\tan \phi')] \quad (2.20)$$

Finalmente propuseram que a resistência ao cisalhamento de solos não saturados, em qualquer dado valor de sucção pode ser escrito como:

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w)[(\theta^\kappa)(\tan \phi')] \quad (2.21)$$

Vanapalli et al. (1996) apresentaram também a equação de previsão da resistência ao cisalhamento de solos não saturados sem o uso do parâmetro κ , que pode ser representada como mostrado a continuação:

$$\tau = [c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi'] + (u_a - u_w) \left[(\tan \phi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (2.22)$$

onde: θ é a umidade volumétrica, θ_r é a umidade volumétrica na condição residual, θ_s é a umidade volumétrica na condição saturada

Outro modelo de ajuste dos parâmetros de resistência de solos tropicais não saturados foi desenvolvido por Futai et al. (2004), mediante ajustes hiperbólicos dos parâmetros de resistência, empregando as seguintes expressões propostas por Futai (2002):

$$c_{(s)} = c' + (c_{(u_a - u_w = \infty)} - c')(1 - 10^{a(u_a - u_w)}) \quad (2.23)$$

sendo:

$c_{(s)}$ = intercepto de coesão aparente;

c' = a coesão efetiva para o solo na condição saturada;

$c_{(u_a - u_w = \infty)}$ = a máxima coesão do solo;

a = parâmetro de ajuste da coesão aparente.

Expressão válida para solos que apresentem coesão sempre crescente com a sucção.

Os resultados experimentais de Futai et al. (2004) mostraram que a tendência da variação do ângulo de atrito foi sempre crescente com a sucção, para o ajuste do ângulo de atrito foi usada a seguinte expressão:

$$\phi(S) = \phi' + (\phi_{(u_a - u_w = \infty)} - \phi')(1 - 10^{b(u_a - u_w)}) \quad (2.24)$$

sendo:

$\phi(S)$ = ângulo de atrito variável com a sucção;

ϕ' = ângulo de atrito efetivo para o solo na condição saturada;

$\phi_{(u_a - u_w = \infty)}$ = máximo valor do ângulo de atrito do solo;

b = parâmetro de ajuste do ângulo de atrito.

Os ajustes obtidos por Futai et al. (2004) estão mostrados na Figura 2.17

Figura 2.17 Ajuste do intercepto de coesão aparente e do ângulo de atrito variando com a sucção (Futai et al., 2004).

O modelo de previsão apresentado por Vanapalli et al. (1996) é de muita utilidade, quando não se tem resultados experimentais para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

2.5 Água no solo

A água desenvolve um papel determinante na instabilidade dos taludes, muitas vezes o mecanismo depende da quantidade de água presente no processo.

Wolle (1988), Lacerda (1997), GEO-RIO (2000), Futai et al. (2011), relataram que os principais mecanismos de escorregamentos nos quais atua a água são:

- Geração ou acréscimo das pressões neutras as quais reduzem a resistência ao cisalhamento do solo;

- incremento do grau de saturação, causando redução das tensões de sucção devido à redução da coesão aparente na massa do solo não saturado;
- elevação da coluna de água em descontinuidades, diminuindo as tensões normais efetivas;
- erosão superficial e interna devido ao escoamento da água, alterando a geometria da encosta;
- pressões hidrostáticas devido ao preenchimento de fendas pela água em taludes de saprólitos e solos saprolíticos;
- aumento do peso específico devido ao aumento de umidade.

Segundo diversos autores (Wolle, 1980, 1983, 1988; Avelar et al., 2011; Futai et al., 2012 de entre outros), os escorregamentos estão diretamente ligados à infiltração das águas das chuvas.

A água proveniente das chuvas pode também ter efeitos de erosão no solo, podendo ser erosão superficial ou erosão interna, a erosão produz mudança na geometria ou formação de regiões enfraquecidas, assim a erosão é considerada como um evento preparatório para os escorregamentos (WOLLE, 1983).

O clima e a vegetação têm grande influência no comportamento dos solos, principalmente no que se refere à estabilidade de encostas. A água é removida da superfície do solo por evaporação ou por evapotranspiração da cobertura vegetal. Estes processos produzem fluxo ascendente de água para fora do solo; por outro lado chuvas e outros tipos de precipitação produzem fluxo descendente dentro do solo (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Estes dois processos geram variações nas condições das pressões neutras nas camadas de solo da encosta. A Figura 2.18 mostra claramente os processos gerados pelo clima e a vegetação no solo.

Figura 2.18 Influência do clima e a vegetação nas encostas (Rahardjo et al., 2012)

2.5.1 Fluxo de água

A água num solo saturado pode ser vista como fluindo através dos poros preenchidos por água. Num solo não saturado os poros preenchidos com ar dificultam o fluxo da água, sendo o ar barreira para o fluxo.

A equação de fluxo em solos saturados está governada pela lei de Darcy (1856)

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.25)$$

A equação que governa o fluxo em solos não saturados é conhecida como a equação de Richards (1931):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_2^w \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (2.26)$$

Onde:

k_x, k_y = são os coeficientes de permeabilidade do solo nas direções x e y respectivamente.

h_w = a carga hidráulica disponível para o fluxo.

m_2^w = o coeficiente de variação volumétrica da água em relação à variação na sucção e é igual à inclinação da curva de retenção de água do solo.

ρ_w = densidade da água

g = aceleração da gravidade

O lado esquerdo da equação representa o fluxo através de um elemento de solo na direção x , y baseado na lei de Darcy. Esse fluxo de água é igual à variação de volume da água no elemento de solo por unidade de tempo, como visto ao lado direito da equação mostrada acima.

A equação de Richards (1931), claramente é uma equação não linear porque a carga hidráulica e o coeficiente de permeabilidade são função do teor volumétrico de água no solo, precisa-se assim do conhecimento das propriedades hidráulicas do solo (condutividade hidráulica e curva característica).

Quando a água é removida dos espaços vazios de um solo saturado se desenvolvem pressões de água negativas entre as partículas do solo, quanto maior quantidade de água é removida, a sucção matricial aumenta e a interface ar-água exerce uma força de tensão nas partículas do solo, proporcionando ao solo maior resistência ao cisalhamento. Quando a infiltração acontece, a sucção matricial diminui e a resistência ao cisalhamento sofre uma diminuição (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

O coeficiente de permeabilidade num solo saturado pode ser considerado constante, mas num solo não saturado ele depende da sucção matricial.

No processo de fluxo transiente onde existem mudanças das cargas hidráulicas o coeficiente de permeabilidade de um solo não saturado varia com o tempo.

Na Serra do Mar muitos dos escorregamentos acontecidos estão associados às condições de fluxo da água no talude (Tatizana et al., 1987; Wolle, 1988). O fluxo no talude pode ser paralelo, vertical ou horizontal, dependendo principalmente da condição de permeabilidade das camadas de solo no talude.

Vargas Jr. et al. (1990) fizeram análises de fluxo com o uso dos elementos finitos em encostas íngremes com pouca espessura da cidade do Rio de Janeiro, mostrando que quando a base é permeável, pressões neutras positivas são geradas no pé do talude;

em quanto em encostas com base impermeável as pressões neutras se mantêm negativas no pé do talude e pressões neutras positivas baixas se desenvolvem na crista do talude.

2.5.2 Infiltração

O processo de entrada de água no solo é denominado de infiltração, é gerada por água na superfície e transportada verticalmente através do solo principalmente por duas forças: capilaridade e gravidade. A quantidade de água infiltrada depende da quantidade de água gerada na superfície, da capacidade de infiltração e da condutividade hidráulica, entre outros fatores (FORMIGA et al., 2012).

A infiltração é o principal mecanismo natural de instabilização nos taludes constituídos de solos tropicais. Estudos de diversos pesquisadores (Vaughan, 1985; Wolle, 1988; Carvalho, 1989; Vargas Jr. et al., 1990) mostraram que os taludes encontraram-se parcialmente saturados antes do período chuvoso.

Segundo estudos empíricos feitos por Bodman e Colman (1944), num processo de infiltração é comum identificar cinco zonas, baseadas em medidas da distribuição do teor de umidade numa coluna vertical do terreno durante a infiltração; a zona de saturação, a zona de transição, a zona de transmissão, a zona de umedecimento e a frente de saturação (Figura 2.19).

Figura 2.19- Perfil de infiltração do solo (Bodman e Colman, 1944)

A zona de saturação se caracteriza por ter pouca espessura imediatamente abaixo da superfície do solo; a zona de transição é uma região de decréscimo de umidade e

localiza-se entre a zona saturada e a zona de transmissão; a zona de transmissão é a mais representativa no processo de infiltração. Esta zona contém bolhas de ar nos vazios as quais evitam a saturação; a zona de umedecimento na qual ocorrem reduções bruscas de umidade e é o limite visível da infiltração de água no solo.

Como descrito por Tatizana et al. (1987), o avanço da frente de saturação depende de uma série de fatores:

- textura e estrutura do substrato
- declividade da encosta
- cobertura vegetal
- estado prévio de saturação
- tipologia das chuvas

Carvalho (1989) analisou a infiltração em encostas típicas da Serra do Mar do Vale do Rio Cubatão, concluindo que a equação de infiltração proposta por Lumb (1975), pode ser aplicada para a Serra do Mar. A equação pode ser escrita como:

$$z = \frac{k_s \cdot t}{\theta_{in} - \theta_f} \quad (2.27)$$

onde:

z = profundidade da frente de saturação

k_s = coeficiente de condutividade hidráulica do solo saturado

t = tempo de duração da precipitação

θ_{in} = umidade em volume anterior à precipitação

θ_f = umidade em volume no interior da frente de saturação

Assim também Carvalho (1989), especificou que a intensidade pluviométrica mínima para propiciar a frente de saturação é numericamente igual à condutividade hidráulica saturada.

Lim et al. (1996) ao respeito da cobertura vegetal, baseados em medições de campo concluíram que um solo coberto por vegetação dificulta a infiltração da água mediante

os processos da evapotranspiração, e num solo nu o avanço da frente de saturação provoca incremento da pressão da água em 1,5 m de profundidade.

Singh (1989) mostra os processos de infiltração relacionando a taxa de infiltração com o tempo (Figura 2.20). Assumindo um solo seco, no começo da chuva a capacidade de infiltração (I) é superior à intensidade da chuva (R); quando a chuva continua aumenta a espessura da zona umedecida e o gradiente de potencial cai, ocorrendo uma redução da capacidade de infiltração do solo, que em determinado momento ficará menor do que a intensidade de chuva, produzindo escoamento superficial. Com a continuação da chuva o potencial hidráulico na superfície permanece diminuindo. Sob essas condições a taxa de infiltração se aproximará da condutividade hidráulica saturada (K_s) (FORMIGA et al., 2012).

Figura 2.20 Processos de infiltração (adaptado de Singh, 1989).

No caso de solos não saturados a água intersticial permanece sob ação das forças capilares, pelo tanto aparece pressão neutra negativa (sucção). Com o início da estação chuvosa, sob chuvas suficientemente intensas, a superfície do solo absorve água aumentando a condutividade hidráulica, logo em seguida há um avanço da frente de umedecimento, este avanço depende do grau de saturação (antes da infiltração), do índice de vazios do solo e da intensidade e duração da chuva (WOLLE, 1988).

Após a chuva ter cessado ocorre a redistribuição da água já infiltrada, então uma nova chuva produzirá um avanço mais rápido da frente de umedecimento. O avanço da frente de umedecimento provoca diminuição e até eliminação das tensões de sucção ao longo do seu percurso (WOLLE, 1988).

Segundo Ng e Shi (1998), no início da precipitação, a infiltração é influenciada pelo gradiente hidráulico, que pode ocasionar taxas de infiltração superiores à condutividade hidráulica saturada.

Lumb (1975) fez estudos analíticos nos solos residuais provenientes de granito e de rochas vulcânicas, predominantes nas encostas de Hong Kong e sugere que a infiltração da água da chuva em um solo homogêneo, na ausência de lâmina de água, é numericamente igual à condutividade hidráulica saturada desse solo.

Quando a intensidade da precipitação é menor que a permeabilidade saturada, a taxa de infiltração inicial é muito menor que a permeabilidade saturada, ocorrendo um incremento gradual até atingir o valor da permeabilidade saturada. Já quando a intensidade da precipitação é maior que a permeabilidade saturada, a taxa de infiltração inicial é maior que a permeabilidade saturada e decresce até chegar ao valor da permeabilidade saturada (MEIN; LARSON, 1973).

Análises de infiltração feitas por Fredlund e Rahardjo (1993) num talude heterogêneo de granito de Hong Kong, com 60° de inclinação, 38 m de altura, chuva com intensidade de aproximadamente 47 mm/h e duração de 480 min, com sucção inicial de 65 kPa, mostrou que a sucção foi anulada após a chuva, porém após o fim da chuva houve na superfície do talude uma tendência de recuperação da sucção ao valor inicial, no entanto ao longo da profundidade a sucção diminui gradualmente (Figura 2.21).

Figura 2.21 Variação da sucção ao longo da profundidade num intervalo de tempo (Fredlund e Rahardjo, 1993)

Segundo Brandão et al.(2006) num perfil de solo, se tiver aporte de água este tende à saturação, ocorrendo primeiro este processo na camada superficial e quando o aporte cessa, a umidade no interior do solo se redistribui convertendo-se em um perfil inverso, sendo que as camadas superficiais terão umidades menores que as camadas mais profundas.

Na Cingapura Gasmo et al. (2000), adotando um perfil de solo argilo-siltoso homogêneo com permeabilidade saturada de $8,3 \times 10^{-7}$ m/s, usando modelos numéricos, estimaram a porcentagem de chuva que infiltra num talude e a variação na taxa de infiltração, dependendo da intensidade da precipitação, tempo e posição no talude, os resultados de Gasmo et al. (2000) mostraram que a maior taxa de infiltração ocorre na crista do talude, como observado também por Johnson e Sitar (1990).

Rahardjo et al. (2005) mediante simulações de precipitação em taludes compostos de solo residual, observaram que a porcentagem de água infiltrada varia entre 40 a 100% do total de precipitação.

As análises numéricas feitas por Gasmo et al. (2000) mostraram também um ganho de estabilidade de 30% num talude após duas semanas sem precipitação, atribuindo esse ganho na estabilidade ao efeito da evaporação, assim também mostraram que uma chuva com intensidade de 80 mm/dia, reduz a estabilidade de um talude em aproximadamente 25%, em um período de aproximadamente 12 horas.

Como relatado por Lacerda et al. (1997a), em um talude composto de solo residual no estado não saturado, quando submetido à infiltração de água proveniente das precipitações, sofre redução na tensão de sucção, pelo tanto terá uma diminuição nas tensões efetivas e conseqüentemente uma diminuição na resistência ao cisalhamento do solo; no caso de um solo saturado, a infiltração da água proveniente das chuvas provoca uma elevação do nível de água, provocando da mesma forma que no caso do talude não saturado, uma diminuição da resistência ao cisalhamento.

Ao igual que Mein e Larson (1973), Zhang et al. (2004) apresentaram perfis de sucção ao longo do tempo, tendo dois cenários nos quais se desenvolve a infiltração, como mostrado na Figura 2.22:

- A intensidade pluviométrica é menor do que o coeficiente de permeabilidade saturado ($I < K_s$), não sendo a chuva suficientemente forte para formar uma frente de saturação, por tanto a sucção não se anula.
- A intensidade pluviométrica é maior do que o coeficiente de permeabilidade saturado ($I \geq K_s$), neste caso a chuva forma uma frente de saturação, a sucção se anula na superfície e há escoamento superficial se a chuva excede a capacidade de infiltração do solo.

Figura 2.22- Infiltração em solo não saturado sob infiltração transiente a) $I < k_{sat}$ b) $I \geq k_{sat}$ (Zhang et al., 2004)

Cardoso e Futai (2005) analisaram o efeito da infiltração gerada por diferentes durações de chuva (1h até 150 dias), fazendo uso da relação entre intensidade e duração da precipitação, para o local de São Paulo; as análises foram feitas adotando dois solos homogêneos, um arenoso e outro argiloso.

Admitindo a condição hidrostática, obtiveram os perfis de sucção mostrados na Figura 2.23. Na Figura 2.23(a) o perfil de sucção foi obtido para uma precipitação de $1,88 \times 10^{-6}$ m/s e na Figura 2.23(b) foi gerada com uma chuva de $4,72 \times 10^{-8}$ m/s.

Figura 2.23- Perfis de sucção a) solo arenoso b) solo argiloso. (Cardoso e Futai, 2005).

Cardoso e Futai (2005) confrontaram os valores do fator de segurança obtidos na Figura 2.24, com os perfis de sucção obtidos em seções diferentes do talude, verificaram valores de sucção mínimos após a chuva ter cessado, mas esses valores de sucção não se anulam, assim também se observa que um solo argiloso apresenta maior possibilidade de ruptura.

Figura 2.24 Variação do fator de segurança ao longo do tempo para diversas precipitações (a) solo arenoso, (b) solo argiloso (Cardoso Jr e Futai, 2005).

2.6 Movimentos de massa

Os primeiros estudos encontrados na literatura sobre movimentos de massa em solos residuais foram feitos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), que estudaram os escorregamentos nos morros de Santos em março de 1956; mais

tarde Terzaghi realizaria importantes contribuições nesse campo, baseado no escorregamento de tálus ocorrido em Cubatão em 1939 (VARGAS, 1981).

Fernandes e Amaral (1996), Augusto Filho e Virgili (1998), indicaram que os movimentos de massa são controlados por eventos iniciados pela formação da rocha, seguida pelos processos geológico-geomorfológico.

Johnson e Sitar (1990) indicaram que as condições hidrológicas como a intensidade e a duração das chuvas, têm um papel importante no escorregamento e no tipo de escorregamentos, assim chuvas intensas num curto período desencadeiam escorregamentos superficiais e chuvas de longa duração desencadeiam escorregamentos profundos, além disso, a infiltração nos solos não saturados depende do grau de saturação e das características de permeabilidade do solo, as mesmas que são influenciadas, principalmente, pelas águas provenientes das chuvas antecedentes.

As propriedades hidráulicas do solo (capacidade de retenção do solo e função condutividade hidráulica), o perfil geotécnico do talude e as condições pluviométricas do local, tem influência no tempo em que acontecem os movimentos de massa, após um evento de chuva (ALONSO et al., 1995; CARDOSO; FUTAI, 2005).

Os movimentos de massa podem ser isolados ou generalizados, os movimentos isolados são gerados por ações antrópicas, os movimentos generalizados são geralmente deflagrados por chuvas intensas e afetam grandes áreas (LOPES, 2006).

2.6.1 Agentes e causas dos movimentos de massa

Existem diversos fatores que influem nos escorregamentos translacionais; conforme citado por autores como: Guidicini e Nieble (1976), Augusto Filho e Virgili (1998), os agentes de maior importância são os agentes predisponentes e os agentes efetivos. Os agentes predisponentes são aqueles que tornam a encosta suscetível ao movimento de massa, os agentes efetivos são os que iniciam o movimento tornando a encosta instável.

Augusto Filho e Virgili (1998), citam os seguintes como fatores que comumente tem influência nos escorregamentos:

- fatores climatológicos;

- características dos solos;
- geomorfologia;
- ocupação e uso do solo.

No que refere às causas dos movimentos de massa, Terzaghi (1950) dividiu-as em: internas, externas e intermediárias.

Guidicini e Nieble (1976), indicaram que as causas internas levam à ruptura sem mudanças na geometria e com diminuição da resistência do material, as causas externas provocam o acréscimo das tensões cisalhantes sem diminuição da resistência e, as causas intermediárias resultam dos efeitos de agentes externos no interior da encosta, segundo estas considerações dividiram os fatores condicionantes dos escorregamentos translacionais superficiais como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Agentes e causas dos movimentos de massa (GUIDICINI & NIEBLE, 1976).

Agentes	Predisponentes	Complexo geológico, morfológico e climático – hidrológico; gravidade, calor solar, vegetação.	
	Efetivos	Preparatórios	Pluviosidade, erosão pela água e vento, congelamento e degelo, variação da temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilação do nível de Laos e mares e do lençol freático, ação de animais e humana, inclusive desflorestamento.
		Imediatos	Chuvas intensas, fusão de gelo e neves, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem.
Causas	Internas	Efeito das oscilações térmicas; diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo.	
	Externas	Mudanças na geometria do sistema; efeitos de vibrações; mudanças naturais na inclinação das camadas.	

	Intermediárias	Elevação do nível piezométrico em massas homogêneas; elevação da coluna d'água em descontinuidades; rebaixamento rápido do lençol freático; erosão subterrânea retrogressiva (piping); diminuição do efeito da coesão aparente.
--	----------------	---

Para Townsend (1985), os fatores climáticos são os mais influentes no processo de intemperismo, assim as chuvas controlam a umidade que produz as reações químicas e a lixiviação de componente solúveis dos minerais, enquanto a temperatura influencia as taxas de reação desses processos

2.6.2 Mecanismos dos movimentos de massa

Vargas e Pichler (1957) estudaram dois escorregamentos em solos residuais em Santos e concluíram que, durante a estação seca os taludes de solo residual permaneciam estáveis, provavelmente porque o solo não saturado adquiria uma coesão elevada. Com as chuvas o solo tendia a saturar-se se reduzindo, assim, sua coesão a valores mínimos. No fim da estação chuvosa, estando ele já saturado, uma eventual forte precipitação induziria pressões neutras de percolação nos terrenos das encostas da qual resultaria instabilidade, a mesma que seria agravada por aparecimento de pressões neutras de deformação por cisalhamento.

Barata (1969) atribui à água como a principal causa atuante nos mecanismos de movimentos, detalhando o seguinte:

- ♦ devido à elevada permeabilidade dos solos residuais e coluvionares, estes se tornam saturados com bastante facilidade, provocando aumento do peso específico;
- ♦ a água que penetra pelas fendas superiores, atinge uma profundidade mais rapidamente do que a infiltração uniforme através da superfície, assim nas zonas de ruptura potencial pressões de água maiores são desenvolvidas, além da diminuição de resistência ao cisalhamento, e os movimentos são consequentemente gerados;
- ♦ o movimento de um solo coluvionar tem normalmente as características de um fluxo extremamente lento, com incrementos de velocidade cíclica, assim o

movimento é intensificado no período de chuvas e é processado ao longo do período seco, com amortecimento progressivo, até que a próxima chuva acelera novamente o processo.

O mecanismo de movimento de massa mencionado produz escorregamento superficial, porque a redução da resistência se processa paralela à geometria da encosta (FREDLUND et al., 1978).

Wolle (1988) diferenciou os fenômenos de instabilização em: escorregamentos em solo e escorregamentos em rocha. Dentre os escorregamentos em solo, descreveu dois tipos de mecanismos:

- mecanismo clássico no qual ocorre uma elevação do nível de água pré-existente, devido ao fluxo da água infiltrada, acontece uma queda brusca da sucção, acarretando a diminuição das tensões confinantes efetivas. A ruptura do talude é determinada pela elevação quase que instantânea do nível freático.
- mecanismo alternativo ocorre uma infiltração das águas das chuvas com a formação de uma frente de umedecimento, a infiltração reduz a sucção provocando anulação do intercepto de coesão. A ruptura do talude ocorre quando a frente de umedecimento atinge uma profundidade crítica, onde os parâmetros de resistência não mais garantem a estabilidade do talude.

Mais tarde Wolle e Carvalho (1994), estudando os escorregamentos da Serra do Mar no Vale do Rio Cubatão, apresentaram os mecanismos de movimentos de massa governados pela variação da permeabilidade saturada, ao longo da profundidade num perfil de solo.

- Mecanismo 1: Acréscimo da pressão neutra no interior da massa de solo, devido à formação de fluxo paralelo à encosta. Esse mecanismo é gerado pela existência de camadas menos permeáveis sob outras mais permeáveis, sujeitas a possíveis instabilizações. A probabilidade de ruptura será maior quanto mais próxima à superfície esteja a linha freática. Desenvolvem-se pressões neutras de percolação (Figura 2.25).

Figura 2.25 Fluxo paralelo à encosta (Wolle e Carvalho, 1994)

- Mecanismo 2: Perda da sucção devido ao fluxo vertical à encosta, a permeabilidade cresce com a profundidade devido normalmente ao intenso fraturamento da camada rochosa subjacente às camadas de solo menos permeáveis. Ocorrem geralmente na alta e média encosta da Serra do Mar no Estado de São Paulo (Figura 2.26).

Figura 2.26 Fluxo vertical à encosta (Wolle e Carvalho, 1994)

- Mecanismo 3: Encontro de frente de saturação com o nível da água pré-existente, associada a eventos excepcionais de chuva, que geram um avanço contínuo da frente de saturação, ocorrendo depois um encontro da frente de saturação com o nível da água, e por conseguinte um violento aumento das pressões neutras. Este mecanismo foi idealizado por Vaughan (1985), baseado em observações de escorregamentos nas Ilhas Fidji.

Lacerda (1997) descreveu os mecanismos para deflagração de escorregamentos sendo:

- Redução da sucção;
- flutuações do lençol freático;
- queda de rochas e blocos;
- fluxo de detritos.

2.6.3 Tipos de Movimentos de Massa

Os tipos de movimentos de massa são baseados na cinemática do movimento, no tipo do material envolvido e na geometria das massas mobilizadas, baseados nesses princípios diversos autores e pesquisadores como: Terzaghi, 1967; Guidicini e Nieble, 1976; Varnes, 1978; Wolle, 1988; Vargas, 1966, 1989; Augusto Filho, 1992; entre outros, apresentaram diversas classificações, neste trabalho serão citadas as comumente adotadas mundialmente e no Brasil.

A classificação apresentada na Tabela 2.4 é a mais empregada internacionalmente devido ao uso oficial pela IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment).

Esta classificação está baseada no tipo do material envolvido no movimento, seja rocha, solo grosso ou solo fino; e no tipo de movimento observado.

Tabela 2.4 Classificação dos movimentos de massa de Varnes (1978)

Tipo de movimento			Tipo de material		
			Rocha	Solos (engenharia)	
				Predominante mente grosso	Predominante mente fino
Quedas			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de solo
Tombamentos			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de solo
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamento em rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento em solo
	Translacional	Muitas unidades			
Espalhamentos			Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Corridas			Corrida de rocha	Corrida de detritos	Corrida de lama
Complexo			Combinação de dois ou mais tipos principais de movimento		

A classificação proposta por Augusto Filho (1992) apresentada na Tabela 2.5, descreve as características do movimento, o material e a geometria do talude, é também o que melhor se ajusta para os casos brasileiros.

Tabela 2.5 Classificação dos movimentos de massa de Augusto Filho (1992)

Tipo de movimento	Características do movimento, material e geometria.
Rastejos	<ul style="list-style-type: none"> • Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes. • Olhos, depósitos, rocha alterada/fraturada. • Geometria indefinida
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material • Geometria e materiais variáveis • Planares – solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza. • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> • Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Segundo Vargas e Pichler (1957), Vargas (1989) os tipos de movimentos de massa mais comuns na Serra do Mar são os rastejos das camadas superficiais de solos residuais, os movimentos de tálus, os escorregamentos súbitos devido à ruptura do manto de solo residual, os escorregamentos de rocha e as corridas de lama.

Wolle, 1988; Abramento, 1988 e Carvalho, 1989, estudaram os escorregamentos nas encostas da Serra de Cubatão concluindo que a maior parte deles são do tipo planar e circular.

Segundo Sobirno e Nicotera (2012) escorregamentos lentos são mais comuns em encostas composta por solos finos com superfícies de ruptura pré-existent; já encostas compostas por solos grossos desenvolvem movimentos do tipo corridas, produzidas principalmente pela infiltração de água das chuvas causando o incremento da pressão da água.

2.7 Estabilidade de Taludes

Existem diversos métodos para a análise de estabilidade de taludes, dentre eles Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973), Fredlund (1980).

Os métodos aqui apresentados estão baseados no conceito de equilíbrio limite

- Taylor
- Talude infinito
- Método das cunhas
- Bishop simplificado (1955)
- Bishop e Morgenstern (1960)
- Janbu (1972)
- Morgenstern e Price (1965)
- Sarma (1973,1979)

Os métodos para a análise de estabilidade de taludes diferenciam-se pela adoção das forças entre fatias e pela direção em que é feito o equilíbrio de forças.

Na sequência, na Tabela 2.6 é apresentado um resumo dos métodos para o cálculo da estabilidade de taludes.

Tabela 2.6 Métodos para o cálculo da estabilidade de taludes (GEO-RIO, 2000)

Método	Superfície	Considerações	Fator de Segurança
Taylor (1948)	Circular	Método do círculo de atrito. Análise em termos de tensões totais. Taludes homogêneos.	<p>Determinação do valor da altura crítica H_c</p> $H_c = N s \frac{c}{\gamma} \quad (2.28)$ $FS = \frac{H_c}{H} \quad (2.29)$
Talude infinito	Plana	Estabilidade global representada pela estabilidade de uma fatia vertical.	$FS = \frac{c'}{\gamma \cdot z} B + \left(\frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} \right) A \quad (2.30)$ $B = \sec \alpha \cdot \csc \alpha \quad (2.31)$ $A = (1 - r_u \cdot \sec \alpha^2) \quad (2.32)$ $r_u = \frac{u}{\gamma \cdot z} \quad (2.33)$
Método das cunhas	Superfície poligonal	Equilíbrio isolado de cada cunha, compatibilizando-se as forças de contato entre cunhas.	Determinação gráfica dos erros em polígonos de força para fatores F arbitrados. Cálculo de FS por interpolação para erro nulo.
Bishop simplificado (1955)	Circular	Considera o equilíbrio de forças e momentos entre as fatias. Resultante das forças verticais entre fatias é nula.	$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \frac{\sum [c' b + (W - ub) \tan \phi']}{m_\alpha} \quad (2.34)$ $m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F} \right] \quad (2.35)$
Bishop e Morgenstern (1960)	Circular	Aplica o método simplificado de Bishop.	Retirado diretamente de ábacos.
Hoek e Bray (1981)	Circular	Massa instável considerada como um corpo rígido. Solução pelo limite inferior.	Retirado diretamente de ábacos

Janbu (1972)	Não circular	Satisfaz o equilíbrio de forças e momentos em cada fatia, porém despreza as forças verticais entre as fatias.	Pode ser calculado manualmente, com o auxílio de ábacos, ou por programas de computador.
Morgenstern e Price (1965)	Não circular	Satisfaz todas as condições de equilíbrio estático. Resolve o equilíbrio geral do sistema. É um método rigoroso.	Calculado por interações, com o uso de computadores.
Sarma (1973, 1979)	Não circular	Método rigoroso atende as condições de equilíbrio. Considera forças sísmicas (terremotos)	Calculado por iterações, com o uso de computadores.

No caso dos movimentos de massa acontecidos na Serra de Cubatão (1985) e na Região Serrana do Rio de Janeiro (2011), os métodos de Talude Infinito, Janbu (1972), Morgenstern e Price (1965) e Sarma (1973, 1979) tomam importância, devido a que a maioria dos escorregamentos tiveram superfície de ruptura não circular.

Quando o solo se encontra em estado não saturado, a sucção toma importância no cálculo do fator de segurança, Lu e Godt (2008) mostraram esquematicamente a diferença entre as parcelas que intervêm no cálculo do fator de segurança clássico, considerando o solo em estado saturado, e no caso de considerar o solo em estado não saturado (Figura 2.27).

Figura 2.27 Ilustração conceitual das diferenças entre o cálculo do fator de segurança clássico e não saturado (Lu e Godt, 2008).

Na Figura 2.27, o valor do fator de segurança para o estado não saturado é maior do que o fator de segurança para o estado saturado, devido principalmente à parcela de coesão, a mesma que no estado saturado é anulada. Na Figura 2.27 observa-se também a diferença do ângulo de atrito no estado saturado e no estado não saturado, como explicado por Lu e Godt (2008), o ângulo de atrito no estado saturado é constante, mas no estado não saturado varia ao longo da profundidade devido ao intemperismo.

No método de talude infinito, que será usado nas análises de estabilidade de taludes, considerando o solo em estado não saturado que considera a contribuição da parcela da sucção afetado pelo ângulo ϕ^b , a equação fica da forma:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \alpha) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} \quad (2.36)$$

onde:

c' = coesão efetiva (kPa)

γ = peso específico do solo (kN/m³)

H = altura da camada analisada (m)

α = ângulo de inclinação do talude (graus)

ϕ' = ângulo de atrito (graus)

$(u_a - u_w)$ = sucção (kPa)

ϕ^b = ângulo que indica a taxa do incremento da tensão de cisalhamento em relação à sucção matricial.

2.8 Estudos de correlação entre precipitação e escorregamentos

Os escorregamentos caracterizam-se por serem eventos de difícil previsão devido à influência de diversos fatores, que servem como agentes preparatórios ou deflagradores do evento como visto anteriormente.

Ao longo do tempo foram desenvolvidos diferentes métodos procurando correlacionar precipitações (duração e intensidade) com escorregamentos, os primeiros trabalhos de correlação entre intensidade de chuva e instabilização de encostas para o território Brasileiro foram feitos por Vargas e Pichler (1957), Vargas (1971), Morgenstern e Matos (1975), Guidicini e Iwasa (1976), Costa Nunes et al. (1983), Tatizana et al. (1987) dentre outros.

Vargas e Pichler (1957) estudaram escorregamentos nos morros de Santos em 1956, concluindo que os escorregamentos foram deflagrados por chuvas acima de 50 mm/h.

Vargas (1971) considerou chuvas de 50 mm/h como responsáveis pelos escorregamentos no Rio de Janeiro, assim as chuvas foram aplicadas em um campo experimental e observado o comportamento, com isso definiu índices de correlação, porém neste caso não foram levadas em conta as chuvas antecedentes.

Morgenstern e Matos (1975) atribuíram os escorregamentos à drástica redução da coesão efetiva devido à infiltração da água da chuva, e a eliminação da sucção nos solos não saturados.

Guidicini e Iwasa (1976) estudaram a influência das chuvas na estabilidade das encostas para nove regiões do território Brasileiro, correlacionando escorregamentos

com o histórico de precipitações e a precipitação durante o escorregamento, eles definiram um coeficiente final (Cf), que é a soma do coeficiente de ciclo (Cc) que representa a chuva antes do evento, e do coeficiente de episódio (Ce) que representa a chuva no dia do escorregamento, ambos em relação à precipitação média anual. Após as análises eles chegaram às seguintes conclusões:

- episódios de chuva extremamente intensos, com índices superiores à faixa de 12% da pluviosidade média anual, em períodos de 24 a 72 horas, são capazes, independentemente do histórico da pluviosidade anterior, de conduzir o meio a um grau de saturação crítico e de desencadear, na grande maioria dos casos, fenômenos de instabilidade;
- episódios de chuva compreendidos entre 8% e 12% da pluviosidade média anual, em igual período, incidindo sobre um meio que possua um histórico de pluviosidade elevado, poderão facilmente ocasionar o grau crítico de saturação do meio e levar ao aparecimento de fenômenos de instabilização, em virtude de elevada condutividade hidráulica do meio;
- episódios de chuva com as mesmas características anteriores, incidindo sobre um meio caracterizado por um reduzido histórico de pluviosidade, dificilmente levarão ao aparecimento de escorregamentos, devido à baixa condutividade hidráulica do meio;
- sem a ocorrência de episódios de chuva intensa (maiores que 8% da pluviosidade média anual), o contínuo e gradual aumento do grau de saturação do meio, por ocasião de uma estação de chuva (por mais intensa que esta seja), não chega a atingir um ponto que possa ser considerado crítico.

Assim elaboraram cartas de periculosidade mostrando a curva acumulada média anual de pluviosidade associada a quatro faixas de risco determinadas (Figura 2.28).

Figura 2.28 Representação do coeficiente final de os episódios de chuva intensa (Guidicini e Iwasa, 1976)

Vargas Jr. et al. (1986) estudaram a importância da chuva numa encosta típica do Rio de Janeiro (inclinação de 60° e altura de 20 m), chegaram a obter uma correlação entre a variação do tempo para a frente de saturação atingir a profundidade de 4m (profundidade crítica do avanço da frente de umedecimento), versus a relação intensidade de chuva – condutividade hidráulica saturada, para diversos valores de grau de saturação inicial, para solo argiloso e arenoso (Figura 2.29).

Ao respeito das chuvas necessárias para deflagrar escorregamentos, como visto na Figura 2.29, para solos argilosos (menos permeáveis) precisam-se chuvas longas (entre 50 a 60 horas); para solos arenosos (mais permeáveis) precisam-se chuvas de pouca duração (entre 4 a 6 horas), porém, de grande intensidade. Assim também segundo os autores o tempo necessário para a frente de umedecimento atingir a profundidade crítica é função do grau de saturação inicial do solo, o tempo diminui na medida que o grau de saturação inicial é maior, e para relações intensidade-coeficiente de permeabilidade saturada maior do que 1, a influência da intensidade da precipitação é pequena em comparação com o grau de saturação inicial do solo.

Figura 2.29 Correlação tempo versus intensidade de chuva-condutividade hidráulica saturada (Vargas Jr. et al., 1986)

Tatizana et al. (1987) fizeram um estudo dos deslizamentos registrados durante 30 anos na Serra do Mar, na região de Cubatão, assim baseados em observações concluíram que, a chuva acumulada de 4 dias tem influência efetiva no processo de escorregamento. Esse acumulado é responsável pela desestabilização do terreno, principalmente, em relação à redução da resistência ao cisalhamento e aumento das forças solicitantes.

Assim elaboraram um gráfico relacionando a chuva acumulada em 4 dias e a intensidade da chuva (Figura 2.30), obtendo a seguinte função:

$$I(Ac) = KxAc^{-0,933} \quad (2.37)$$

Onde

$I(Ac)$ = intensidade suficiente para desencadeamento de escorregamento

Ac = pluviometria acumulada de quatro dias antes da ocorrência de escorregamento

K = parâmetro dependente das condições geotécnicas da encosta e da intensidade de escorregamentos

Tabela 2.7 Valores do parâmetro K

K	Tipo de ruptura
2.603	Escorregamentos induzidos
3.579	Escorregamentos localizados
5.466	Escorregamentos generalizados
10.646	Corrida de lama

Figura 2.30 Correlação entre chuvas e escorregamentos (Tatizana et al., 1987).

A proposta de correlação entre chuvas e escorregamentos de Tatizana et al. (1987), adequa-se melhor aos solos não saturados porque leva em conta as chuvas que antecedem aos escorregamentos, considerando então ditas chuvas como preparatórias, pois elas promovem o aumento do grau de saturação ou a redução da sucção que somado a uma chuva intensa pode deflagrar um escorregamento.

Wolle e Hachich (1989) baseados em estudos de escorregamentos, concluíram que as chuvas intensas por se mesmas não podiam causar escorregamentos e que as

chuvas antecedentes produziam incremento da umidade do solo, devendo ser levado em conta nas análises de estabilidade.

Análises feitas por Tatizana et al. (1987) e Cai e Ugai (2004), indicaram que quanto maior a quantidade de chuva antecedente, menor a quantidade de chuva necessária para desencadear um escorregamento, mas a chuva é só um dentre muitos outros fatores do processo de instabilização.

Salles e Amaral (2013) fazendo uso de informações referentes a escorregamentos ocorridos em encostas dos municípios de Teresópolis, Petrópolis e Nova Friburgo, além de dados de precipitação das estações Conselheiro Paulino, Nova Friburgo, Olaria, Pico Caledônia e Ypu localizadas em Nova Friburgo; fizeram um estudo de correlação entre precipitação pluviométrica e deflagração de escorregamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro, a correlação que apresentou melhor ajuste foi a pertencente à curva de intensidade horária (1h) versus a precipitação acumulada em 24h como mostrado na Figura 2.31.

Figura 2.31 Correlação entre precipitação e escorregamentos para a região serrana do Rio de Janeiro (Salles e Amaral, 2013)

Os cenários A, B e C estão referidos ao número de ocorrências dos escorregamentos. O cenário A apresenta de 0 a 5 escorregamentos ocasionais com chuvas acima de 55

mm/h ou 120 mm/24h; o cenário B apresenta escorregamentos esparsos na quantidade de 5 a 25 escorregamentos com combinação de chuvas da ordem de 30 mm/h + 100 mm/24h + 115 mm/96h + 270 mm/mês; e o cenário C de escorregamentos generalizados com mais de 25 escorregamentos com combinação de chuvas de 50 mm/h + 120 mm/24h + 130 mm/96h + 300 mm/mês.

2.9 Pluviometria

A topografia e a localização podem aumentar a atividade de sistemas convectivos de mesoescala, as quais junto com condições ambientais podem gerar precipitações intensas (CARVALHO et al., 2002).

A Serra do Mar apresenta os maiores índices pluviométricos no Brasil, sendo estes mais intensos nos meses de novembro a março (verão). As chuvas na região da Serra de Cubatão são geralmente chuvas orogênicas, provocadas pela ascensão das massas úmidas ante um obstáculo montanhoso, no caso, devido às escarpas montanhosas, estas chuvas são contínuas ou intermitentes e são comumente associadas aos escorregamentos na região; outro tipo de chuva presente na região é a chuva convectiva, que ocorre quando uma massa úmida sobe pelo aquecimento da superfície (TATIZANA et al., 1987).

Deve-se tomar especial cuidado na análise dos dados pluviométricos, sendo que as variações espaciais entre os postos pluviométricos podem ser muito significativas. Tatizana et al. (1987) indicaram uma variação de cerca de 50% das chuvas registradas em postos no alto da encosta e chuvas em postos da baixada litorânea.

Segundo Carvalho et al. (2002), 65% das atividades convectivas na América do Sul e das características dos eventos, dependem da intensidade e extensão da radiação de onda longa; e um 35% das chuvas extremas, ocorrem quando o sistema modulador de precipitação ZCAS encontra-se ao longo da zona tropical da América do Sul.

Climatologicamente a ZCAS é definida como uma banda de nebulosidade estendendo-se no sentido noroeste-sudeste desde o sul da região Amazônica, centro e sudeste do Brasil até a região central do Atlântico Sul (KOUSKY, 1988).

3 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram selecionadas duas regiões, localizadas na Serra do Mar, onde foram registrados grande número de escorregamentos do tipo translacional raso.

A Serra do Mar estende-se por mais de 1.000 km (aproximadamente 1500 km), desde o estado de Santa Catarina até o estado de Espírito Santo atravessando cinco estados Brasileiros, incluindo os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, como mostrado na Figura 3.1 (Kanji et al., 2008; Lacerda, 1997).

A Serra do Mar é formada por um conjunto de escarpas de considerável altitude, chegando alguns trechos a mais de 1.000 m de elevação, existindo escarpas com 2316 m de elevação, sendo atingidas por intensas precipitações.

Figura 3.1 Serra do Mar (Lacerda, 1997).

Os locais a serem estudados serão: a Serra de Cubatão e a Região Serrana do Rio de Janeiro (Figura 3.2), embora a escolha destes dois locais tenha sido devido à ocorrência de grande número de escorregamentos translacionais rasos, deflagrados

pela água proveniente das chuvas, os mecanismos de escorregamentos foram diferentes em virtude das condições geológicas e climáticas de cada local.

Os escorregamentos translacionais rasos estudados nesta pesquisa, são os relativamente típicos ocorridos nas porções alta e média das encostas, em trechos importantes da Serra de Cubatão e da Região Serrana do Rio de Janeiro; sendo que existem outros tipos e mecanismos de escorregamentos, sob condições topográficas e geotécnicas diferentes às abordadas nesta pesquisa, que não faram parte do escopo deste trabalho.

Figura 3.2 Localização dos locais de estudo

Como dito por Teixeira (2004) é importante ter em consideração o fator espacial e temporal ao fazer a análise das chuvas, por exemplo, a porção de Cubatão que faz parte da Serra do Mar apresenta índices pluviométricos em média de 3000 mm por ano já a Região Serrana do Rio de Janeiro na porção pertencente à Serra do Mar, apresenta índices pluviométricos em média de 1750 mm por ano; embora os dois locais pertençam à Serra do Mar, apresentam diferentes valores de precipitação.

3.1 Serra de Cubatão

A Serra de Cubatão estende-se pela costa sudeste do Brasil, apresenta-se como uma escarpa de falha recuada com desnível superior a 800 m e alta declividade (TATIZANA et al., 1987).

O município de Cubatão situado ao leste do estado de São Paulo é considerado uma zona de intensa atividade industrial, desenvolvida basicamente nas décadas de 1970 e 1980, com a construção de refinarias e petroquímicas (VIEIRA, 2007).

A região apresenta condições geomorfológicas, climáticas e antrópicas favoráveis aos movimentos de massa, além da ocupação indevida das encostas e degradação da vegetação produto da intensa atividade industrial (WOLLE, 1988).

Como citado por Wolle (1988), na década de 80 a vegetação estava muito degradada, podendo ter sido um agravante para a ocorrência dos escorregamentos generalizados de janeiro de 1985.

Figura 3.3 Localização da Serra do Mar em Cubatão

A Serra de Cubatão é composta de rochas metamórficas, constituída por gnaisses, gnaisses graníticos e em menor quantidade alguns micaxistos e rochas calcárias; a xistosidade é geralmente paralela à serra (KANJI et al., 2008).

Especificamente a Serra do Mar pertencente ao Vale do Rio Cubatão, onde aconteceram os escorregamentos, é formada por migmatitos homogêneos com neossoma granítico dominante (CARVALHO, 1989).

Como descrito por Tatizana et al., 1987; Wolle, 1988; Kanji et al., 2008; a Serra de Cubatão, apresenta clima tropical de altitude (quente e úmido) e elevado índice de pluviosidade (médias de 3040 mm/ano), que produzem intenso intemperismo da rocha.

No que se refere à vegetação, segundo Carvalho (1989), o Vale do Rio Moji pertencente à região de Cubatão apresenta cobertura vegetal intensamente degradada devido à atividade industrial, já o Vale do Rio Cubatão apresenta vegetação mais preservada.

O aporte da cobertura vegetal na estabilidade de taludes se dá principalmente, através do sistema radicular que produz incremento da resistência ao cisalhamento do solo e através da interceptação de água proveniente das chuvas diminuindo a quantidade de água no processo de infiltração (PRANDINI, 1984).

Wolle (1986) salienta a relação da vegetação ao balanço hídrico, onde a vegetação diminui o escoamento superficial, diminuindo ou até eliminando os processos erosivos, e reduz a parcela de água que infiltra efetivamente no maciço.

Com a degradação da cobertura vegetal ocorre o apodrecimento das raízes remanescentes, gerando a diminuição na resistência ao cisalhamento do maciço enraizado; além disso ocorre maior incidência de água sobre a encosta e ausência de sucção gerada pelas raízes, estes dois efeitos provocam a médio ou longo prazo, a redução da estabilidade do talude (WOLLE, 1988).

Como observado por Wolle (1988), os taludes da região do vale de Cubatão e do vale do rio Moji que sofreram escorregamentos generalizados em janeiro de 1985 apresentaram, na camada de solo coluvionar raízes pouco profundas até os 0,50 m, diminuindo notavelmente na profundidade de 1,0 m; nas camadas de solo saprolítico e saprolito a ocorrência de restos de raízes é isolada.

Wolle e Carvalho (1994) salientam o fato de que nas encostas da Serra de Cubatão, ainda havia predominância dos processos de instabilização em encostas naturais não ocupadas.

3.1.1 Pluviometria e evapotranspiração

A Serra do Mar apresenta um dos maiores índices pluviométricos no Brasil, com chuvas durante todo o ano e chuvas mais intensas nos meses de verão, segundo relatado por Wolle (1988), na região de Cubatão, há registros mensais de precipitação de 1000 mm (33% da precipitação média anual).

Fica evidente a variabilidade dos índices pluviométricos anuais, devido principalmente à distribuição espacial das chuvas, tendo maior influência no caso das chuvas orogênicas na qual a presença das escarpas provoca ascensão das massas de ar com o conseguinte desenvolvimento das chuvas (TATIZANA et al., 1987).

Na Figura 3.4 é observada a variação espacial das chuvas para o período 1975 a 1985 de quatro estações pluviométricas localizadas na Serra de Cubatão, a elevação das estações Cubatão, Pilões, Rodovia Anchieta (Cota 400) e Curva da Onça é de 6, 100, 400 e 500m respectivamente. Os maiores registros de precipitação tem lugar nas estações instaladas nas cotas mais elevadas.

Figura 3.4 Variação espacial da precipitação média anual no período de 1975 a 1985 em estações da região de Cubatão

A presença de escarpas na Serra do Mar, provoca ascensão de massas de ar frias que permanecem de 2 a 4 dias, gerando chuvas contínuas (estado estacionário) ou intermitentes (estado semi-estacionário). Tatziana et al. (1987) associa a maior parte dos escorregamentos às chuvas provocadas pelo estado estacionário, que produzem chuvas mais frequentes e longas.

Nas análises de chuvas serão empregados os registros de precipitação da Estação Curva da Onça operada pela Agência Nacional de Águas (ANA), localizada em Cubatão. Esta estação foi escolhida devido à sua proximidade ao local dos escorregamentos, à elevação da mesma, assim como a consistência de dados da estação.

Na Figura 3.5, elaborada para um período de tempo de 10 anos precedentes aos escorregamentos de janeiro de 1985, observa-se que os meses com maior precipitação são de novembro a abril com acumulados mensais de 250 mm a 400 mm, sendo janeiro o mês com a maior quantidade de chuva (400 mm) e os anos 1975 e 1976 os mais chuvosos com chuvas intensas de 773 mm e 970 mm, respectivamente, seguido pelo ano 1985 com um acumulado mensal de 632 mm no mês de janeiro.

Os meses com menor quantidade de chuva são os meses de maio a agosto com registros de entre 80 a 200 mm mensais, observando até mesmo valores abaixo da precipitação média 1975-1985 em alguns anos (1978, 1979, 1981). Contudo a quantidade de chuva acumulada mensal fica próxima dos 100 mm, mesmo durante o período seco (maio a outubro), refletindo a elevada pluviosidade da região.

Figura 3.5 Chuvas ao longo do tempo para a Serra de Cubatão (Estação Curva da Onça)

Na Figura 3.5 observa-se que nos meses de janeiro de 1975, 1976 e 1985, assim como novembro e dezembro de 1975, e novembro de 1979, a precipitação foi muito acima da precipitação média de 1975-1985.

Para avaliar se a chuva de janeiro de 1985 pode ser considerada extrema, foi feito o estudo da série histórica de 10 anos de chuvas (1975 a 1985), da estação pluviométrica Curva da Onça; foram plotadas as chuvas máximas diárias de cada ano (Figura 3.6), observou-se chuvas maiores à ocorrida no dia 23 de janeiro, motivo pelo qual optou-se por fazer análise de chuvas acumuladas em quatro dias, como proposto por Tatizana et al. (1987).

A análise de chuvas acumuladas em quatro dias, diminuiu a três o número de eventos que sobressaem na série histórica, podendo por tanto considerar estas chuvas, como chuvas extremas. As chuvas acumuladas em destaque, correspondem aos dias 29 de janeiro de 1976, 11 de novembro de 1979 e 23 de janeiro de 1985.

Figura 3.6 Precipitações máximas diárias por ano da estação Curva da Onça da Serra de Cubatão (período 1975-1985)

Cabe lembrar que há estações pluviométricas que registraram precipitações maiores às registradas na estação Curva da Onça, como por exemplo, a estação Paranapiacaba, que no dia 22 de janeiro de 1985 registrou 210 mm de chuva.

Wolle (1988) relata que nos dias 29 de janeiro de 1976, 08 a 10 de novembro de 1979 e 23 de janeiro de 1985 foram registrados escorregamentos. Em 29 de janeiro de 1976 e 23 de janeiro de 1985, ocorreram escorregamentos generalizados no vale do Cubatão, Moji e Perequê, principalmente, ao longo da Rodovia dos Imigrantes e da Via Anchieta, podendo atribuir às chuvas o papel de agente preparatório ou deflagrador dos escorregamentos.

Os escorregamentos de novembro de 1979 ocorreram no vale do rio das Pedras, na época foram observadas um total de 14 cicatrizes de escorregamentos na encosta (Wolle, 1988).

Wolle (1988) constatou que chuvas intensas (maiores a 180 mm/24 horas), tornam-se condições típicas de deflagração de escorregamento nas encostas da Serra de

Cubatão, precedidas por períodos chuvosos moderados dos dias antecedentes, que permitem um prévio aumento do grau de saturação dos solos das encostas.

No que tange a evapotranspiração, devido à ausência de dados de evapotranspiração da estação Curva da Onça, serão empregados os dados fornecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) para o Município de Cubatão, os mesmos que são mostrados na Figura 3.7.

Figura 3.7 Evapotranspiração real para o Município de Cubatão, período 1941-1968 (DAEE)

Como é de esperar os maiores índices de evapotranspiração se registram no período de verão, quando acontecem as maiores temperaturas e ocorrem fortes precipitações.

3.1.2 Geometria das encostas

Os trechos superiores das encostas da Serra do Mar são íngremes e retilíneos apresentando pequena espessura e com contato subparalelo à superfície do terreno; sendo estas características as que favorecem a ocorrência dos escorregamentos. Já nos trechos inferiores encontram-se camadas de centenas de metros de espessura (WOLLE et al., 1978; LOPES, 2006).

Carvalho (1989) realizou investigações nas encostas da Serra do Mar, em duas áreas localizadas entre os vales dos rios Cubatão e Moji, observando que as encostas são bastante íngremes (ângulo de inclinação maior a 30°).

As encostas pertencentes à Serra de Cubatão apresentam inclinações entre 25° e 50°, sendo observados maior número de cicatrizes de escorregamentos em encostas com inclinação entre 30° e 50° (WOLLE, 1988; IGNATIUS et al., 1991; LOPES, 2006; LOPES et al., 2007; NERY E VIEIRA, 2009).

Lopes et al. (2007) mediante sensoriamento remoto de imagens aéreas da Serra de Cubatão, tiradas em datas próximas ao evento de escorregamentos de 1985, observaram 1742 cicatrizes, a maioria delas ocorrem em encostas com inclinação entre 25° e 50°, como pode ser observado na Figura 3.8.

Figura 3.8 Número de cicatrizes por intervalos de declividade (Lopes et al., 2007)

Segundo Wolle (1988) os comprimentos das encostas no Vale de Cubatão variam entre 20 e 150 m, e no Vale de Moji entre 50 e 140 m. Na Figura 3.9, apresentada por Wolle e Carvalho (1989) é mostrada a secção típica das encostas da Serra de Cubatão.

Figura 3.9 Seção típica do escorregamento translacional raso (Wolle e Carvalho, 1989)

Com base nas descrições da geometria das encostas da Serra de Cubatão feitas anteriormente, foi desenhada a secção mostrada na Figura 3.10. A encosta tem 75 m de altura, inclinação variável de 30°, 40° e 50°, com espessura do solo de 5m e espessura da camada rochosa intensamente fraturada de 10 m.

Figura 3.10 Geometria do talude típico na Serra de Cubatão

A geometria mostrada na Figura 3.10, corresponde ao caso mais típico das encostas que sofreram escorregamentos na Serra de Cubatão, a mesma que para fins de estudo foi simplificada no referente a variações na espessura da camada do solo, sendo que há encostas mais íngremes com espessura de solo menor que 5 m, e encostas com menor declividade com espessura de solo maior que 5 m.

3.1.3 Parâmetros do solo

As propriedades do solo foram obtidas de resultados de pesquisas desenvolvidas por Wolle (1988), Abramento (1988) e Carvalho (1989), nas escarpas da Serra do Mar, próxima à Rodovia dos Imigrantes.

Wolle (1988) e Abramento (1989), estudaram amplamente os escorregamentos acontecidos nas encostas da Serra do Mar, no trecho compreendido entre os vales dos rios Cubatão e Moji, baseados em estudos realizados em campo apresentaram a seguinte caracterização geral dos horizontes superficiais:

- serapilheira: sendo uma camada composta por matéria orgânica com espessura de poucos centímetros;
- solo coluvionar ou residual maduro: classificado como solo areno-argiloso, com predominância de material arenoso, com espessuras em torno de 1,0 m, cor marrom amarelado;
- solo saprolítico ou residual jovem: caracterizado como silte arenoso ou areia siltosa, a espessura média varia entre 1,0 a 1,5 m;
- saprólito: representa uma transição entre os horizontes terrosos e o maciço rochoso, caracteriza-se pela presença de blocos de rocha alterada;
- rocha: o maciço rochoso apresenta-se muito irregular com fraturamento muito intenso.

Carvalho (1989) realizou sondagens nos vales dos rios Moji e Cubatão e identificou os seguintes horizontes de solo:

- solo superficial coluvionar: apresenta estrutura areno-argilosa e blocos de rocha parcialmente alterada, a espessura média é de um metro;
- solo saprolítico de migmatito: com textura arenosa e espessuras de 3 a 4 metros;

- rocha migmatítica: apresenta intenso fraturamento.

O nível freático não foi localizado nas sondagens realizadas pelos citados autores, presumindo que ele se encontra a uma profundidade considerável maior aos 10 m, dita ausência do nível freático pode ser atribuído à condição da rocha fraturada, ocorrendo a infiltração da água a maiores profundidades, não perceptíveis por instrumentação; e como ressaltado por Ignatius et al. (1991) o nível freático não foi detectado nem mesmo na época de chuvas intensas.

Como mencionado na caracterização geotécnica feita por Abramento (1988), a heterogeneidade do solo da região é visível; já na amostragem foi observado o teor de umidade extremamente variável, alguns corpos de prova apresentavam maior quantidade de fragmentos de rocha em decomposição, bem como apresentavam em determinados locais, uma estrutura menos porosa em relação à amostra como um todo, a heterogeneidade foi constatada também através da grande variação de valores dos índices físicos das diversas amostras; por exemplo, foram encontrados teores de umidade de 18% até 35% e pesos específicos aparentes secos desde 11 até 14 kN/m³, correspondendo a índices de vazios de 1,5 a 0,9.

Os escorregamentos na região atingiram na sua maioria a camada de solo coluvionar, sendo observado que a superfície de ruptura desenvolveu-se no horizonte coluvionar não expondo o solo saprolítico, como relatado por os diversos pesquisadores (Wolle, 1988; Abramento, 1988; Carvalho, 1989; Ignatius, 1991), assim o solo envolvido apresenta textura areno-argilosa, com fração fina de baixa a média plasticidade.

O fato de que os escorregamentos se desenvolvam no solo coluvionar reflete na disponibilidade dos estudos geotécnicos, feitos principalmente na camada de solo coluvionar.

Resultados de ensaios de caracterização feitos por Wolle (1988), Abramento (1988) e Carvalho (1989) estão mostrados nas tabelas Tabela 3.1 a Tabela 3.4. Cabe lembrar que as tabelas a seguir contém valores médios, de uma série de ensaios feitos pelos pesquisadores, entre abril de 1986 e outubro de 1987.

Tabela 3.1 Peso específico natural do solo da Serra de Cubatão

SOLO	Wolle et al. (1978)	Wolle (1988)	Abramento (1988)	Carvalho (1989)
COLUVIONAR (kN/m^3)	14,0	16,5	16,65	17,2
SAPROLÍTICO (kN/m^3)	18,0	18,5	-	-

Tabela 3.2 Índices de consistência do solo coluvionar da Serra de Cubatão

Referência	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)
Wolle et al. (1978)	46	27	19
Abramento (1988)	39	25	14
Carvalho (1989)	36	25	11

Tabela 3.3 Índices físicos do solo coluvionar da Serra de Cubatão

Referência	Teor de umidade (%)	Índice de vazios
Wolle et al. (1978)	25	-
Abramento (1988)	26	1,2
Carvalho (1989)	35	1,3

Tabela 3.4 Granulometria do solo coluvionar da Serra de Cubatão

Referência	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Wolle et al. (1978)	69	12	15
Abramento (1988)	74	13	13
Carvalho (1989)	69	12	18

No que tange aos parâmetros hidráulicos; Abramento (1988) e Carvalho (1989) fizeram ensaios com solo superficial, situado na profundidade da ordem de 1,0 m; os dados apresentados por ditos autores correspondem a ensaios de câmara de pressão e ensaios de permeabilidade.

Os pontos experimentais obtidos no ensaio da câmara de pressão, fornecem os pontos para a obtenção da curva de retenção do solo da região da Serra de Cubatão, estes pontos foram ajustados no programa RETC, fazendo uso da equação de Van Genuchten (1980) apresentada na equação (2.3 (Tabela 2.1), obtendo-se assim as curvas de retenção mostradas na Figura 3.11.

Os parâmetros de ajuste obtidos mediante a equação de Van Genuchten, estão mostrados na Figura 3.11 e são compatíveis com valores correspondentes a um solo areno-argiloso.

Figura 3.11 Curva de retenção do solo coluvionar - Serra de Cubatão (Abramento, 1988)

Na curva de retenção apresentada por Abramento (1988), o valor do teor de umidade volumétrica saturado é de 0,54, o valor de sucção correspondente à entrada de ar é de 0,4 kPa, valor muito baixo porque o solo é uma areia argilosa porosa; a variação do teor de umidade para baixos valores de sucção, deve-se à presença de macroporos que permitem a rápida dessaturação.

Como indicado por Abramento (1988), o solo coluvionar da Serra de Cubatão apresenta microporos e macroporos, esta distribuição bimodal de poros reflete na capacidade de retenção de água do solo, desta forma a curva de retenção também é bimodal; porém, os dados apresentados na Figura 3.11 não atingiram valores de sucção que permitam fazer essa avaliação.

Por outro lado, para a obtenção do teor de umidade volumétrico para níveis de sucção maiores aos 100 kPa, seria necessária a extrapolação da curva de retenção, no entanto, os níveis de sucção de campo são compatíveis aos valores ajustados, não sendo necessário usar a extrapolações.

As curvas de retenção mostradas na Figura 3.11, ainda que sendo do mesmo solo, mostram um ligeiro afastamento de umidade volumétrica para valores de sucção acima de 2 kPa.

Tendo a curva de retenção do solo pode ser gerada a curva de condutividade hidráulica para as camadas de solo, empregando o método de Van Genuchten descrito no item 2.4.2, para isso foram coletados os valores de permeabilidade saturada obtidas por Wolle (1988), Abramento (1988) e Carvalho (1989), na camada de solo superficial na profundidade média de 1,0 m. Na Tabela 3.5 estão mostrados os valores médios de permeabilidade saturada do solo, apresentados pelos pesquisadores citados. A partir dos quais foram geradas as curvas de condutividade hidráulica do solo, mostradas na Figura 3.12.

Tabela 3.5 Permeabilidade saturada do solo coluvionar da Serra de Cubatão

Solo	Wolle (1988)	Abramento (1988)	Carvalho (1989)
Coluvionar (cm/s)	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$
Saprolítico (cm/s)	$5,0 \times 10^{-4}$	-	-

Figura 3.12 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo da Serra de Cubatão

Abramento (1988) e Carvalho (1989), salientaram o fato da elevada dispersão dos resultados dos ensaios de permeabilidade feitos, atribuindo dita dispersão a fatores como: às discontinuidades nos corpos de prova ensaiados, estrutura menos porosa das amostras em relação à amostra como um todo e presença de fragmentos de rocha em decomposição em alguns corpos de prova.

Como constatado por diversos pesquisadores (Wolle, 1988; Abramento, 1988; Carvalho, 1989; Wolle e Carvalho, 1989) a condutividade hidráulica cresce ao longo da profundidade (Figura 3.13), o qual ocorre pela presença de discontinuidades, fissuras e fendas na rocha que funcionam como drenos para os horizontes superiores, sendo esta uma condição peculiar dessas encostas.

Figura 3.13 Condutividade hidráulica num perfil de solo pertencente a Cubatão (Wolle e Carvalho, 1989)

Em quanto aos parâmetros de resistência, podem ser encontrados na literatura os valores obtidos por Abramento (1988) e Wolle (1988), que realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas, tanto no estado natural como no estado inundado.

Wolle (1988) salientou o fato da ampla faixa de variação de valores dos parâmetros de resistência do solo coluvionar e saprolítico, isso devido à heterogeneidade característica dos solos tropicais, observou também a grande queda dos valores de resistência do solo quando inundado.

Na Tabela 3.6 são apresentados os valores médios dos parâmetros de resistência obtidos por Wolle (1988) e Abramento (1988), para o solo com umidade natural e no estado inundado.

Tabela 3.6 Parâmetros de resistência do solo da Serra de Cubatão

SOLO	Wolle (1988)				Abramento (1988)			
	Com umidade natural		Inundado		Com umidade natural		Inundado	
	c' (kPa)	φ'	c' (kPa)	φ'	c' (kPa)	φ'	c' (kPa)	φ'
COLUVIONAR	9,5	40°	1,0	36°	10	40°	0	38°
SAPROLÍTICO	11,0	45°	3,5	39°	—	—	—	—

Abramento (1988), baseado nas curvas de deslocamento vertical por deslocamento horizontal, caracterizou o comportamento do solo em estado natural como uma areia compacta, com expansão sob pressões normais de 10 e 25 kPa; e quando em estado inundado como uma areia fofa, com redução de volume com pressões normais de 50 e 100 kPa.

Como observado na Tabela 3.6, no estado inundado o solo sofre uma diminuição do ângulo de atrito e do intercepto de coesão, quando comparado com os parâmetros de resistência ensaiados com umidade natural.

Abramento (1988) estudou a influência da sucção na resistência do solo, para tal fim realizou ensaios triaxiais drenados com sucção controlada, onde verificou que o ajuste da equação que representa o incremento das pressões de sucção com o aumento da resistência do solo (intercepto de coesão total) não é linear, e se ajusta melhor a uma equação exponencial da seguinte forma:

$$c = c' + \alpha(u_a - u_w)^\beta \quad (3.1)$$

onde:

c = intercepto de coesão total

c' = intercepto de coesão efetiva obtida através de ensaios CU

$(u_a - u_w)$ = pressão de sucção

α, β = parâmetros a serem determinados

Assim para o solo coluvionar de Cubatão, Abramento (1988) obteve a equação da resistência em função da sucção matricial, para uma faixa de sucção entre 0 a 60 kPa, dado por:

$$c = 2,5 (u_a - u_w)^{0,5} \quad (3.2)$$

A equação de resistência ao cisalhamento para o solo de Cubatão para um ângulo de atrito de 38° e intercepto de coesão nula seria:

$$\tau = (\sigma - u_a) \tan 38^\circ + 2,5(u_a - u_w)^{0,5} \quad (3.3)$$

Para um ângulo de atrito de 40° e intercepto de coesão nula, a equação de resistência ao cisalhamento fica da forma:

$$\tau = (\sigma - u_a) \tan 40^\circ + 2,1(u_a - u_w)^{0,5} \quad (3.4)$$

Por outro lado, resultados de ensaios de cisalhamento direto obtidos por Wolle (1988) mostram que a envoltória de resistência pode ser expressa sob a forma:

$$\tau = 1,0 + (\sigma - u_a) \tan 36^\circ + 3,1(u_a - u_w)^{0,5} \quad (3.5)$$

Os resultados dos parâmetros de resistência no referente à variação da coesão aparente com a pressão de sucção obtidas por Abramento (1988) e Abramento e Carvalho (1989) em solos da Serra do Mar do Vale do Rio Cubatão, confirmam os resultados obtidos por Escário e Sáez (1986) que mediante ensaios de cisalhamento direto em areias e argilas compactadas obtiveram comportamento não linear entre a resistência ao cisalhamento e a sucção, principalmente para sucções baixas.

3.1.4 Tipos de movimento de massas

Os escorregamentos desenvolveram-se principalmente no horizonte de solo superficial coluvionar (WOLLE, 1988; ABRAMENTO, 1988; CARVALHO, 1989), Tatizana et al. (1987) observaram que a superfície de escorregamento coincidia com a separação entre solo coluvial e solo residual sobrejacente.

Wolle (1983) baseado em estudos nas encostas da Serra do Mar pertencentes a Cubatão afirma que muitos dos escorregamentos podem ser atribuídos à perda de resistência pela saturação das camadas superficiais. Nessas encostas os horizontes inferiores são considerados como drenantes e os escorregamentos ocorrem segundo o mecanismo alternativo descrito no item 2.6.2.

Abramento e Carvalho (1989) indicaram que os escorregamentos nesta região são em sua maioria movimentos translacionais superficiais, atingindo o horizonte coluvionar e em alguns casos o horizonte saprolítico (residual), ocorrem geralmente nas porções alta e média das encostas, localizados muito acima do nível freático.

Os escorregamentos translacionais na Serra de Cubatão, segundo Wolle e Carvalho (1994) ocorreram em encostas com inclinações entre 40° e 50° , larguras relativamente reduzidas entre 7 e 20 m, e comprimentos longos de 40 a 150 m.

Wolle e Carvalho (1994) observaram os seguintes tipos de movimentos de massa:

- escorregamentos translacionais; são os mais frequentes nas encostas da Serra de Cubatão, atingem o horizonte coluvionar superficial, e em alguns casos o horizonte de solo saprolítico sotoposto ao solo coluvionar. A espessura depende de fatores como o mecanismo de instabilização, as condições de fluxo e a permeabilidade;
- escorregamentos rotacionais; estes ocorrem com pouca frequência devido à homogeneidade e espessura necessárias para sua ocorrência. Os escorregamentos de este tipo apresentam rupturas conchoidais de pequenas dimensões, com 10 a 20m de arco. Ocorrem geralmente junto ao topo das encostas e em espigões.

Wolle e Carvalho (1994) fizeram menção de três tipos de movimentação lentos (rastejos), porém de pouca relevância, sendo estes:

- movimentos contínuos: devido à ação da gravidade e com velocidades ligeiramente maiores nas épocas chuvosas;
- movimentos pulsantes: causados pelas alterações sazonais de temperatura e umidade do solo ou por forças de percolação na época de chuvas;
- movimentos bruscos ou micro-escorregamentos: gerados por pressões hidrostáticas produto da água nas fendas.

Na Serra de Cubatão os escorregamentos de janeiro de 1985 foram em sua maioria escorregamentos translacionais rasos, motivo pelo qual o foco do presente trabalho é o estudo do mecanismo desenvolvido por escorregamentos translacionais rasos.

3.1.5 Histórico de casos

Os primeiros casos de escorregamentos em Cubatão, na região pertencente à Serra do Mar, aconteceram devido às ações antrópicas principalmente escavações. Em janeiro de 1947 chuvas intensas da ordem de 225 mm/dia provocaram rupturas nas paredes das escavações na Usina Hidroelétrica Henry Borden. Neste escorregamento corpos de talus e depósitos coluvionares de meia encosta apresentaram níveis piezométricos ao longo da superfície de contato com as massas de terreno subjacente (WOLLE, 1983, 1988; VARGAS, 1989).

Outro caso de escorregamento que ocorreu na construção da Via Anchieta foi devido aos cortes na base de tálus em novembro de 1964, na área conhecida como cota 500 ou Curva da Onça. Naquela época foram notados movimentos de massa que levaram a um estudo mais aprofundado das causas dos escorregamentos nessa região.

Os dois casos de escorregamentos envolvendo tálus mencionados anteriormente, ocorreram devido a ações antrópicas, sendo que o mecanismo desenvolvido por estes não estão relacionados aos mecanismos estudados no item 2.6.2, não será feito o estudo aprofundado destes escorregamentos.

Como relatado por Wolle (1988), em janeiro de 1976 e janeiro de 1985 ocorreram os maiores escorregamentos, que geraram um grande número de cicatrizes e causaram notáveis danos materiais.

Em 27 e 28 de janeiro de 1976, escorregamentos generalizados aconteceram nas encostas do vale do Rio Cubatão próxima ao emboque do túnel TA-7 da rodovia dos Imigrantes, e no vale do Rio das Pedras entre a barragem das Pedras e os oleodutos da Petrobrás; os registros pluviométricos correspondentes à estação Curva da Onça, foram os maiores registrados nessa década, como visto na Figura 3.5 e Figura 3.6, em outras estações como a estação Cota 400 foram registradas chuvas de 364,8 mm em 24 horas e na estação Barragem das Pedras foram registrados 456 mm em 48 horas e 541,2 mm em 72 horas (Wolle, 1988).

No evento de janeiro de 1976 foi importante o papel das chuvas precedentes, pois como relatado por Wolle (1988) uma semana antes ocorreram chuvas muito intensas atingindo valores acumulados de 460 mm em 15 dias e de 819,1 mm em 30 dias, sendo recordes mensais na região.

Os escorregamentos em janeiro de 1976 foram generalizados provocando grandes danos na rodovia dos Imigrantes e danos com menor intensidade nas instalações industriais situadas próximas ao sopé da Serra como a refinaria Presidente Bernardes e a Copebrás.

Em novembro de 1979, como relatado por Wolle (1988), ocorreram vários escorregamentos no vale do rio das Pedras e nas encostas do vale do rio Moji, na região das rodovias Anchieta e Imigrantes ocorreram escorregamentos esparsos.

Outro evento importante de escorregamento aconteceu entre os dias 22 e 23 de janeiro de 1985, principalmente nas regiões do Vale do rio Moji, Vale de rio Cubatão e Vale do Perequê, chuvas de 159,5 mm em 24 horas e 277,1 mm em 48 horas, registrados na estação Curva da Onça, deflagraram inúmeros escorregamentos que movimentaram consideráveis massas de solo (600 a 1000 m³) em sua maioria solo coluvionar.

Como relatado por Wolle e Carvalho (1994), em fevereiro de 1994 ocorreu uma corrida de massas que atingiu a refinaria Presidente Bernardes, causando danos consideráveis. A precipitação registrada nesse evento foi de 248,8 mm em 24 horas, o material mobilizado foi estimado em cerca de 100 a 150.000 m³.

A corrida de massa de 1994, como relatado por Lopes et al. (2007), foi gerado após da ocorrência de uma centena de escorregamentos no terço superior das encostas nas cabeceiras do Rio das Pedras.

3.1.6 Escorregamentos em 1985

Em 23 de janeiro de 1985 uma grande quantidade de escorregamentos afetou a porção alta e média das encostas das vertentes do Vale do Rio Moji – Município de Cubatão (Figura 3.14), retroanálises feitas pelo IPT (1988) mostraram que a maioria dos escorregamentos translacionais foram causados pela eliminação da coesão aparente do solo superficial, e outros tipos de escorregamentos nos quais a ruptura não poderia ter sido causada apenas pela eliminação da coesão aparente. Encontraram também evidências de fluxo superficial e sub-superficial (WOLLE, 1988).

Em relação aos escorregamentos de janeiro de 1985 na Serra de Cubatão, Wolle (1988) observou que estes ocorrem em rocha alterada fissurada ou nos horizontes de transição para o saprolítico, encontrando-se a superfície de ruptura entre o solo coluvionar e o horizonte saprolítico. A maior parte dos escorregamentos ocorre nas porções alta e média das encostas, em horizontes pouco espessos entre 1,0 a 1,5m. As cicatrizes tinham largura entre 10 a 20m e comprimentos entre 100 a 200m.

Figura 3.14 Escorregamentos rasos na Serra do Mar – São Paulo (Fonte: Vieira, 2007)

Os escorregamentos de janeiro de 1985 foram considerados como o evento em que foi mobilizada a maior quantidade de massas das encostas (Wolle, 1988).

Os escorregamentos de janeiro de 1985 foram atribuídos não somente às condições de chuva, se não também à degradação da cobertura vegetal (apodrecimento do sistema radicular das antigas árvores) produto da poluição atmosférica gerada pelo crescimento industrial da época (Wolle, 1988).

Wolle (1986) baseado em vistorias feitas após os escorregamentos de janeiro de 1985, evidenciou o fato de os escorregamentos terem atingido com maior intensidade as encostas com vegetação degradada, pertencentes ao vale do rio Mogi.

Estudando o papel das chuvas antecedentes (Figura 3.5), podem se observar que as chuvas de dezembro de 1984 foram inferiores à precipitação média de 1975 a 1985, porém, poderiam ter gerado níveis de sucção elevados no solo, fato que será avaliado mais adiante, mediante análises de infiltração; portanto será estudada a variação da sucção ao longo do ano 1984, sendo que os escorregamentos de janeiro de 1985 poderiam ter ocorrido por efeito combinado de chuvas antecedentes e queda brusca da sucção nos dias 23 e 24 de janeiro.

3.2 Região Serrana do Rio de Janeiro

O Estado do Rio de Janeiro localiza-se ao Sudeste do Brasil, apresenta relevo bastante acidentado, composto por baixadas (regiões planas), maciços litorâneos (altura entre 200 a 500 m) e planaltos (elevações até 1000 m).

O planalto ocupa a maior parte do território e é formado pela Serra do Mar, ao longo do seu recorrido pelo estado do Rio de Janeiro recebe diferentes denominações, como Serra da Bocaina ao sul do estado, Serra da Estrela e Serra dos Órgãos ao fundo da baía de Guanabara, Serra da Mantiqueira na divisa com Minas Gerais (DAVIS; NAGHETTINI, 2000).

A Região Serrana do Rio de Janeiro é uma escarpa serrana com cerca de 1000 m de altitude e níveis pluviométricos de 1200 mm/ano na média, essas características somadas à geologia da região, além da ocupação indevida de encostas resultado do acelerado crescimento populacional, a tornam susceptível aos movimentos de massa.

Coelho Neto (2005), menciona o papel hidrológico desempenhado pelas escarpas rochosas do Rio de Janeiro, que funcionam como zonas de recarga de água em profundidade no solo, portanto, as encostas no sopé dessas escarpas recebem uma carga de água subsuperficial maior.

Como mostrado na Figura 3.15 a Região Serrana do Rio de Janeiro que resultou mais afetada pelos eventos de chuvas de janeiro de 2011, está conformada pelos municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis.

Figura 3.15 Locais mais afetados da Região Serrana do Rio de Janeiro (BAGGIO & HORN, 2011)

A Região Serrana do Rio de Janeiro é composta de granitos homogêneos constituídos por quartzo, feldspato e biotita; rochas ortoderivadas constituídas por ortognaisses; e rochas paraderivadas constituídas por paragnaisses (DMR-RJ, 2008).

O Município de Nova Friburgo segundo a classificação Koppen possui clima Cwb com temperatura média de 16°C.

No referente a vegetação, segundo Davis e Naghettini (2000), a Região Serrana do Rio de Janeiro apresenta floresta ombrófila densa, porém como observado por Avelar et al. (2011) houve considerável remoção da vegetação, devido ao crescimento urbano aumentando a vulnerabilidade aos escorregamentos.

Coelho Neto (2005), ressalta o papel favorável da vegetação na estabilidade de taludes, no qual os blocos de rochas embutidos na matriz de solo são contornados pelas raízes arbóreas e fixados nas encostas.

Em janeiro de 2011 ocorreu na Região Serrana do Rio de Janeiro o maior desastre natural registrado no Brasil, dando como resultado 900 pessoas mortas e aproximadamente 18,000 desabrigados. Em janeiro de 1967, 44 anos antes, ocorreu um desastre de magnitude similar deixando um aproximado de 300 mortos (BAGGIO & HORN, 2011).

3.2.1 Pluviometria e evapotranspiração

A pluviometria da Região Serrana do Rio de Janeiro é determinada por fatores dinâmicos (circulação da massa Tropical Atlântica) e estáticos (posição latitudinal e

localização na borda do oceano), que determinam os elevados índices pluviométricos da região (DAVIS; NAGHETTINI, 2000).

A Serra do Mar atua como barreira dos ventos exercendo marcada influência no acréscimo das precipitações. Na Figura 3.16 pode se observar a concentração dos maiores índices pluviométricos, na região pertencente à Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (DAVIS; NAGHETTINI, 2000).

Figura 3.16 Mapa de isoietas das precipitações médias anuais no Estado do Rio de Janeiro (Modificado de Davis e Naghettini, 2000).

As chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro distribuem-se no ano todo, porém concentram-se nos meses de verão (MENDONÇA et al., 2012).

Na Figura 3.17 observa-se a variação espacial das chuvas para o período 2002 a 2010, de quatro estações pluviométricas localizadas na Região Serrana do Rio de Janeiro, as estações Fazenda Sobradinho e Teresópolis localizadas a 650 m e 980 m de elevação em Teresópolis, a estação Fazenda Mendes localizada a 1010 m de elevação em Nova Friburgo e a estação Itamarati localizada a 1085 m de elevação em Petrópolis.

Os registros pluviométricos apresentam pouca variabilidade, porém observa-se que a estação com menores valores de precipitação pertence à estação Fazenda Sobradinho, que se localiza na cota menos elevada.

Figura 3.17 Variação espacial da precipitação média anual no período de 2002 a 2010 em estações da Região Serrana do Rio de Janeiro

Nas análises de chuvas serão empregados os registros de precipitação da Estação Teresópolis operada pelo INMET (Figura 3.18), esta estação foi escolhida porque disponibiliza dados de chuvas diárias e está situada na região onde aconteceram os escorregamentos.

É importante notar na Figura 3.19, que os valores da normal climatológica 1961-1990 são muito parecidos à precipitação média 2002-2011, sendo muito provável, que a defasagem ocorra devido às mudanças climáticas observadas na atualidade.

Embora a quantidade de chuva no mês de janeiro de 2011 não seja uma dos meses com maior quantidade de chuva, fazendo um comparativo da chuva diária dos meses com maior quantidade de chuva e do mês de janeiro de 2011 (Figura 3.20), pode ser observado que a chuva de 124,6 mm do dia 12 de janeiro de 2011 é uma das maiores registradas e representa um terço da chuva acumulada no mês.

Figura 3.20 Chuva diária dos meses com maior quantidade de chuva registrada (Período 2002-2011)

Medeiros (2013) estudou séries históricas de sete estações pluviométricas desde o ano 1935 até o ano 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, ressaltando que em quatro das sete estações, as chuvas de janeiro de 2011 ficaram bem acima da média das chuvas máximas diárias anuais (Figura 3.21).

Figura 3.21 Precipitações máximas diárias por ano hidrológico (Medeiros, 2013)

As maiores precipitações ocorreram entre os dias 11 e 12 de janeiro de 2011 nas estações localizadas em Nova Friburgo, seguidas pelas estações em Teresópolis e finalmente nas estações em Petrópolis; dentre estas a precipitação de 271,5 mm foi a maior registrada no dia 12 de janeiro de 2011 na estação Vargem Alta de Nova Friburgo (Medeiros, 2013).

Os dias 11 e 12 de janeiro de 2011, em que aconteceram as maiores precipitações (Figura 3.21), coincidem com os dias em que aconteceram os escorregamentos generalizados na Região Serrana do Rio de Janeiro.

Coelho et al. (2011) apresentaram o mapa de isoietas para a Região Serrana do Rio de Janeiro, gerado devido aos eventos de 11 e 12 de janeiro de 2011 (Figura 3.22), este mapa confirma que as áreas mais afetadas pertencem aos Municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis.

Figura 3.22 Mapa de Isoietas da Região Serrana do Rio de Janeiro (Coelho et al., 2011)

Os valores de evapotranspiração a serem empregados nas análises de infiltração são os mostrados na Figura 3.23, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o Município de Teresópolis.

Figura 3.23 Evapotranspiração real para o Município de Teresópolis, período 2001-2010 (INMET)

Como observado na Figura 3.23 a evapotranspiração apresenta valores maiores aos 80 mm na maior parte do ano, diminuindo só no período de inverno.

3.2.2 Geometria das encostas

A Região Serrana do Rio de Janeiro apresenta vales alongados, maciços graníticos, linhas de cristas e cumeadas paralelas, relevos com desníveis altimétricos e escarpas íngremes (MENDONÇA et al., 2012).

Um dos municípios que pertencem à região Serrana do Rio de Janeiro é o Município de Petrópolis, este apresenta maciços rochosos, encostas com massas de colúvio, contato solo-rocha abrupto e descontinuidades litológicas (MENDONÇA et al., 2012).

A análise de imagens de satélites feitas por Avelar et al. (2011a), mostraram que a inclinação média das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro na porção de Nova Friburgo, Teresópolis e Sumidouro é de 17° e que a maior parte dos escorregamentos ocorreram em encostas com inclinação média de 20° .

Coelho Neto et al. (2011) observaram que a maior parte dos escorregamentos ocorreram em encostas com inclinação média de 19° e inclinação máxima de 65° . Avelar et al. (2011a), apresentou o perfil típico das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro, que sofreram escorregamentos em janeiro de 2011 (Figura 3.24).

Figura 3.24 Perfil típico das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro (Avelar et al., 2011a)

Cabe ressaltar que o perfil apresentado por Avelar et al. (2011a), corresponde ao perfil de encosta típico, onde foram observados escorregamentos translacionais rasos, com mecanismo de escorregamento gerado pela elevação do nível da água, existindo outros mecanismos na região, que se tornam diferentes devido à configuração topográfica e às propriedades geotécnicas das encostas.

Com base nas descrições da geometria das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro, foi desenhada a secção mostrada na Figura 3.25. A encosta tem 35 m de altura, inclinação variável de 20°, 30° e 40°, com espessura de camada de solo coluvionar de 2,0 m e espessura de camada de solo residual de 3,0 m.

Figura 3.25 Geometria da encosta típica da Região Serrana do Rio de Janeiro

3.2.3 Parâmetros do solo

Os solos da Região Serrana do Rio de Janeiro são produto principalmente do intemperismo do granito, o mesmo que dá lugar aos solos saprolíticos de baixa coesão (Avelar et al., 2011).

Os parâmetros dos solos foram obtidos de resultados de ensaios de laboratório feitos por Santos (2008), Avelar et al. (2011a), Pinto (2013), Oliveira (2013) e Melo (2014) em solos pertencentes à Região Serrana do Rio de Janeiro.

Santos (2008) descreveu os seguintes horizontes de solo:

- Solo Coluvionar superficial: composto por material areno-argiloso, com uma espessura de 0,5 m, com coloração marrom devido à presença de matéria orgânica e raízes.
- Solo Coluvionar: solo predominantemente areno-argiloso, com espessura de 1,50 m, coloração amarelada, textura média, com fragmentos e seixos provenientes da rocha original.
- Solo Residual: classificado como areno-siltoso, com espessura de 3,0 m, coloração avermelhada, estrutura granular e textura arenosa.

Avelar et al. (2011a) estudaram solos pertencentes à Região Serrana do Rio de Janeiro dividindo eles em quatro tipos:

- Coluvio do vale;
- Coluvio vermelho;
- Saprólito rosa: solo arenoso com presença de silte apresenta maior intemperismo;
- Saprólito cinza: apresenta pouco intemperismo, muito arenosa;

Os solos estudados por Escobar et al. (2012), Pinto (2013) e Oliveira (2013) em taludes que sofreram escorregamentos em Nova Friburgo, apresentaram os seguintes horizontes:

- solo residual maduro: classificados como areias argilosas de cor marrom claro;
- solo residual jovem: classificados como areias bem graduadas, areias siltosas e silte arenoso, de cor rosado;
- solo saprolítico.

O nível freático foi localizado ao pé do talude, como apresentado por Avelar et al. (2011a), assim o nível freático varia segundo a os níveis de precipitação, crescendo na estação de verão, quando as chuvas ocorrem com maior intensidade e frequência, e diminuindo na época de inverno quando as chuvas diminuem.

Nas tabelas Tabela 3.7 a Tabela 3.10 estão apresentados os resultados dos índices físicos dos solos coluvionar e residual da Região Serrana do Rio de Janeiro.

Tabela 3.7 Peso específico dos grãos do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro

SOLO	Santos (2008)	Pinto (2013)	Escobar et al. (2012)	Oliveira (2013)	Avelar et al. (2011)	Melo (2014)
Coluvionar (kN/m^3)	25,8	26,4	26,4	26,1	26,8	26,6
Residual (kN/m^3)	26,0	26,8	26,9	27,1	27,6	26,6

Tabela 3.8 Índices de consistência do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro

SOLO	Referência	W _L (%)	W _P (%)	IP (%)
Coluvionar	Pinto (2013)	44	28,5	15,5
	Escobar et al. (2012)	43,3	26,3	17,0
	Oliveira (2013)	43,1	24,7	18,4
	Melo (2014)	53,6	36,3	17,3
Residual	Pinto (2013)	32,8	30,5	1,7
	Escobar et al. (2012)	38,5	34,5	4,0
	Oliveira (2013)	43,3	36,5	6,8
	Melo (2014)	36,4	30,9	5,5

Figura 3.26 Carta de plasticidade dos solos estudados

Tabela 3.9 Índices físicos do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro

Solo	Referência	Teor de umidade (%)	Índice de vazios	Porosidade	Grau de Saturação (%)
Coluvionar	Pinto (2013)	-	0,67	0,40	-
	Escobar et al. (2012)	16,2	1,2	0,55	36
	Oliveira (2013)	21,7	1,1	0,52	52
	Avelar et al. (2011)	-	1,2	0,55	-
	Melo (2014)	26,1	1,0	0,50	70
Residual	Pinto (2013)	-	0,72	0,42	-
	Escobar et al. (2012)	15,64	0,8	0,44	53
	Oliveira (2013)	16,5	0,9	0,49	50
	Avelar et al. (2011)	-	0,9	0,47	-
	Melo (2014)	13,0	1,1	0,52	31

Tabela 3.10 Granulometria do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro

Solo	Referência	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Coluvionar	Pinto (2013)	49,5	11,9	30
	Escobar et al. (2012)	44,8	10,3	34,7

	Oliveira (2013)	62,5	9,1	28,5
	Avelar et al. (2011)	52,0	19,0	27,0
	Melo (2014)	47,0	30,0	23,0
Residual	Pinto (2013)	53,7	34,5	10,9
	Escobar et al. (2012)	48,9	33,5	17,1
	Oliveira (2013)	40,2	38,5	21,3
	Avelar et al. (2011)	46,0	35,0	16,0
	Melo (2014)	66,0	29,0	5,0

Segundo os índices de consistência do solo, tanto o solo coluvionar como o residual, se encaixam na região das argilas de baixa plasticidade, segundo a granulometria do solos, estes são predominantemente arenosos com menor conteúdo de argila e silte. Em quanto ao grau de saturação, observa-se uma grande variabilidade nos resultados, variando desde 36% até 70% na camada de solo coluvionar e de 31% a 53% na camada de solo residual.

No referente aos parâmetros hidráulicos; as curvas de retenção dos solos coluvionar e residual da Região Serrana do Rio de Janeiro, foram obtidos mediante ensaios de papel filtro feitos por Oliveira (2013). Os pontos experimentais apresentados por Oliveira (2013) pertencem ao município de Nova Friburgo e foram obtidos em amostras de solo coluvionar, na profundidade de 1,5 a 2 m e de solo residual, na profundidade de 2 a 3m.

A distribuição dos pontos experimentais mostrados na Figura 3.27 e Figura 3.28 apresentam tendência de distribuição de poros bimodal, no entanto para efeitos de simplificação de dados de entrada no programa SEEP/W, será adotado o ajuste unimodal da curva de retenção.

Foi feito o ajuste dos pontos experimentais no programa RETC, fazendo uso da equação de Van Genuchten (1980) apresentada na equação (2.3 (Tabela 2.1),

obtendo-se assim as curvas de retenção mostradas na Figura 3.27 e Figura 3.28. O valor de entrada de ar do solo coluvionar é de 0,1 kPa e no solo residual é de 1 kPa.

Figura 3.27 Curva de retenção do solo coluvionar – Região Serrana do Rio de Janeiro (Oliveira, 2013)

Figura 3.28 Curva de retenção do solo residual – Região Serrana do Rio de Janeiro (Oliveira, 2013)

As curvas de retenção mostradas na Figura 3.27 e Figura 3.28 são muito próximas para valores de sucção acima de 1 kPa, para sucções entre 0,01 kPa e 1 kPa ocorre um pequeno afastamento.

As curvas de retenção da Figura 3.27 e Figura 3.28 refletem que o solo coluvionar é mais poroso do que o solo residual, fato que já foi evidenciado nos valores de índices físicos mostrados na Tabela 3.9.

Para a obtenção da curva de condutividade hidráulica foi empregada a equação de Van Genuchten descrita no item 2.4.2, para isso foram coletados valores de permeabilidade saturada obtidas por Santos (2008), Escobar et al. (2012), Pinto (2013) e Oliveira (2013). Na Tabela 3.11 estão mostrados os valores de permeabilidade saturada das camadas de solo que compõem os taludes da região.

Tabela 3.11 Permeabilidade saturada do solo da Região Serrana do Rio de Janeiro

Solo	Santos (2008)	Escobar et al. (2012)	Pinto (2013)	Oliveira (2013)
Coluvionar (cm/s)	$4,5 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-4}$ a $2,6 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Residual (cm/s)	$1,8 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-5}$ a $5,4 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-4}$ a $5,0 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$

Existem na bibliografia, casos nos quais a permeabilidade saturada do solo coluvionar pode ser menor do que a permeabilidade saturada do solo residual, porém, estes casos não fazem parte dos casos estudados na presente pesquisa, não sendo aprofundada a avaliação de ditos valores.

Com os valores de permeabilidade da Tabela 3.11 foram geradas as curvas de condutividade hidráulica para a camada de solo coluvionar e para a camada de solo residual, mostradas na Figura 3.29 e Figura 3.30.

Figura 3.29 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro

Figura 3.30 Funções de condutividade hidráulica estimadas para o solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro

Os parâmetros de resistência obtidos por Avelar et al. (2011a), Oliveira (2013) e Melo (2014), obtidos através de ensaios de cisalhamento direto sobre amostras indeformadas, estão apresentados nas tabelas Tabela 3.12 e Tabela 3.13.

Os parâmetros de resistência refletem maior resistência do solo residual quando comparado com os parâmetros de resistência do solo coluvionar.

Tabela 3.12 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro

	Avelar et al. (2011a)	Oliveira (2013)	Oliveira (2013)	Melo (2014)
$c' \text{ (kPa)}$	0,0	7,0	1,0	7,3
$\varphi' (^{\circ})$	38,3	21,0	30,0	34,6

Tabela 3.13 Parâmetros de resistência do solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro

	Avelar et al. (2011a)	Avelar et al. (2011a)	Oliveira (2013)	Melo (2014)
$c' \text{ (kPa)}$	24,9	14,2	0,0	2,8
$\varphi' (^{\circ})$	37,0	38,6	37,0	33,4

3.2.4 Tipos de movimento de massa

Os movimentos de massa segundo Nunes et al. (2013) são condicionados pela presença de fraturas e falhas que influem nas condições mecânicas e hidrológicas no talude, pela morfologia das encostas e pelos depósitos de tálus e colúvios que se encontram diretamente sobre a rocha, criando descontinuidade ao longo do contato solo-rocha.

Os tipos de movimentos registrados devido às chuvas extremas de janeiro de 2011 segundo a DRM –RJ (2011) foram:

- Corridas de massas de detritos: foram registrados em Vieira e Cuiabá com grande raio de alcance e volume movimentado;
- Deslizamentos: ocorreu na transição solo – rocha na parte superior das encostas, promovendo instabilidade na parte baixa da encosta devido à energia de choque das massas em movimento;

- Deslizamento tipo rasteira com velocidade alta e erosão fluvial intensa, mobilizou capas de solo alteradas, começa na base da encosta e prossegue até a parte superior da encosta;
- Deslizamentos tipo vale suspenso: são deslizamentos profundos circulares, movimentam grandes volumes de material.

Segundo Avelar et al. (2011a) os principais movimentos de massa observados na Região Serrana do Rio de Janeiro foram:

- Escorregamentos translacionais: ocorreram em solo saprolítico com profundidade de entre 1 a 3 m, em encostas com inclinação média de 20°;
- Fluxo de detritos iniciando-se em pequenas bacias com encostas muito íngremes, o maior fluxo de detritos observado foi o formado pela junção de vários escorregamentos translacionais rasos;
- Escorregamentos rotacionais: predominam em encostas com fraturas pouco espaçadas na rocha, propiciando o comportamento do saprólito como material granular;
- Queda de rochas.

O tipo de movimento de massa estudado no presente trabalho são os escorregamentos translacionais que ocorreram no solo saprolítico, porque este é o tipo de escorregamento que ocorreu com maior frequência nas encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro.

Segundo Nunes et al. (2013) o plano de ruptura dos escorregamentos encontram-se na camada de solo residual, no contato entre o solo residual e saprolítico ou em encostas com uma camada superficial pouco espessa de solo coluvionar.

3.2.5 Histórico de casos

São muitos os eventos de escorregamentos registrados ao longo do Estado do Rio de Janeiro.

Como indicado por Costa Nunes (1969), no dia 22 de janeiro de 1967 chuvas de 70 mm/h atingiram o Estado do Rio de Janeiro, nesse evento foram suficientes duas horas de chuva para desencadear escorregamentos que atingiram uma área de 7,5

km de largura e 24 km de comprimento, provocando ao redor de 1,000 mortos. A Figura 3.31 mostra o panorama do que aconteceu em dito evento.

Figura 3.31 Escorregamento de janeiro de 1967 na Serra das Araras (Jones, 1973)

Segundo Barata (1969) os escorregamentos ocorridos em janeiro de 1967 começaram na camada de solo residual jovem tornando-se fluxos e corridas, que devido às condições de permeabilidade do solo e à inclinação do talude se desenvolveram rapidamente.

Os escorregamentos de janeiro de 1967, embora não atingiram a Região Serrana do Rio de Janeiro, foram escorregamentos considerados históricos devido à magnitude do evento.

Em abril de 2010 chuvas 143 mm em 24 horas e chuvas acumuladas de 417 mm em três dias, provocaram ao redor de 70 escorregamentos no Município de Angra dos Reis, mas este evento não será aprofundado porque este não pertence à Região Serrana do Rio de Janeiro.

Os escorregamentos de janeiro de 2011 foram os que causaram maior impacto devido ao grau de destruição que geraram nos Municípios de Nova Friburgo, Teresópolis, Petrópolis, Sumidouro e Bom Jardim.

3.2.6 Escorregamentos em 2011

Em 11 e 12 de janeiro de 2011, a Região Serrana do Rio de Janeiro foi afetada por milhares de escorregamentos provocados por chuvas extremas, segundo Avelar et al. (2011a) foram registradas chuvas de 325 mm em 48 horas.

Na Figura 3.32 e Figura 3.33, estão mostradas a distribuição de cicatrizes mapeadas em campo, onde pode ser observada a grande quantidade de cicatrizes geradas pelos escorregamentos de 11 e 12 de janeiro de 2011, nos Municípios de Teresópolis e Nova Friburgo (DRM-RJ, 2011).

Figura 3.32 Distribuição das cicatrizes de escorregamentos em Teresópolis (DRM-RJ, 2011)

Figura 3.33 Distribuição das cicatrizes de escorregamentos em Nova Friburgo (DRM-RJ, 2011)

Segundo dados horários de chuvas, apresentados pela DRM-RJ, da estação entre Cachoeiras de Macacú e Nova Friburgo (Figura 3.34), foram registradas fortes precipitações em intervalos de uma hora, principalmente no dia 12 de janeiro (0h a 5h).

Figura 3.34 Chuvas horária das estações Cachoeiras de Macacú e Nova Friburgo em 11 e 12 de janeiro de 2011

Avelar et al. (2011a) mediante a interpretação de imagens de satélites observaram a ocorrência de 3,562 escorregamentos em uma área de 421 km², nos municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Sumidouro. Coelho et al. (2011) observaram 3,622 escorregamentos nos Municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo.

Segundo Coelho et al. (2011) o 77,8% das cicatrizes de escorregamentos foram menores a 5,000 m² e ocorreram nas áreas com maior quantidade de chuva registrada (160 a 220 mm/dia) (Figura 3.22).

O fato analisado por Coelho et al. (2011) referido ao tamanho das cicatrizes e a inclinação dos taludes explica a ocorrência da maior quantidade de escorregamentos em taludes menos íngremes, entretanto os escorregamentos de maior porte foram observados em encostas mais íngremes.

Os escorregamentos de maior porte foram muitas vezes produto de diversos escorregamentos translacionais que começaram no topo do talude se somando aos novos escorregamentos em porções mais baixas do talude, os mesmos que dependendo da quantidade de água no processo se tornaram em fluxo de detritos.

Os materiais envolvidos nos escorregamentos se juntaram aos fluxos de detritos gerando grandes avalanches, os quais foram transportados vários quilômetros ao longo do fundo do vale chegando a transbordar os canais (Coelho et al., 2011).

Como relatado por Nunes et al. (2013) o primeiro evento de chuva aconteceu às 23h15 do dia 11 de janeiro com 22,2 mm de precipitação em 30 minutos, o segundo evento iniciou às 2h00 do dia 12 com 30,0 mm de precipitação em 2 horas, o último evento começou às 5h00 com 16,4 mm de chuva em 30 minutos.

No município de Nova Friburgo, localizado na porção central da Serra do Mar conhecida como Serra dos Órgãos, dois dos locais bastante afetados pelas chuvas extremas de janeiro de 2011 foram Condomínio do Lago e comunidade da Prainha (Figura 3.35).

Figura 3.35 Escorregamentos no Município de Nova Friburgo a) Condomínio do Lago; b) Prainha (Oliveira, 2013)

4 CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA INFILTRAÇÃO

Para a análise do processo de infiltração foi feita a modelagem de fluxo em solos não saturados e com umidade variável ao longo do tempo, para alcançar este objetivo foi escolhido o programa computacional de elementos finitos SEEP/W, que realiza simulações matemáticas de processos físicos de fluxo de água através do solo. No SEEP/W a encosta é analisada por discretização em uma série de células de diversas formas e tamanhos conhecida como malha, assim a geometria de cada componente da encosta pode ser representada.

As equações de fluxo são aplicadas e resolvidas para transferência de fluxo entre os nós que definem os elementos da malha, o programa finalmente fornece soluções ponderadas segundo a influência de cada elemento.

O principal recurso a ser aproveitado do programa SEEP/W é a capacidade de executar modelos de fluxo para solos não saturados sob condições de fluxo em regime transiente, porém pode ser considerado o tempo que o solo leva para responder às condições de contorno impostas, segundo as condições hidráulicas do solo que são manifestas mediante o emprego das propriedades hidráulicas do solo (curva de retenção do solo e curva de condutividade hidráulica).

A geometria e as condições de contorno elaboradas nas análises reproduzem a geometria real das encostas que apresentaram os escorregamentos, os tipos de solo considerados assim como os parâmetros dos mesmos, estão baseados na revisão feita nos itens 3.1.3 e 3.2.3 para os dois casos estudados. As variáveis do estudo foram a precipitação antecedente, a distribuição da precipitação, o coeficiente de permeabilidade saturada e a geometria do talude.

Os modelos foram feitos para não gerar pressão neutra positiva na superfície e quando o fluxo for maior que a permeabilidade do solo, o modelo de infiltração não permitirá pressões da água maiores que 0 kPa na superfície. Isso reproduz o estágio de escoamento superficial.

4.1 Serra de Cubatão

Com base nas informações obtidas da literatura apresentadas no item 3.1 foi realizada a análise numérica da infiltração gerando assim perfis da variação da sucção ao longo do ano, a sucção precedente e a sucção durante os escorregamentos em 22 e 23 de janeiro de 1985.

4.1.1 Geometria dos taludes modelados

Foram modelados três taludes com inclinações de 30°, 40° e 50°, a altura dos taludes é de 75 m, a mesma que foi mantida constante para as diferentes inclinações, o comprimento foi de 150, 115 e 110 m para a inclinação de 30°, 40° e 50° respectivamente. A geometria foi estabelecida em concordância com o indicado pelos diversos autores (Wolle, 1988; Ignatius et al., 1991; Lopes et al., 2007; Nery e Vieira, 2009) que estudaram a região como indicado no item 3.1.2 e 3.1.4.

A geometria dos taludes modelados, foram estabelecidas com o objetivo de abranger a maioria das inclinações presentes no local; taludes menos íngremes que apresentam 30°, taludes com inclinações entre 40° e 50°, onde geralmente acontecem os escorregamentos, além de ser 50° a inclinação mais íngreme dos taludes.

As camadas de solo estão representadas pelas regiões consideradas segundo a descrição do item 3.1.3, assim o perfil de solo é dividido em uma camada de solo superficial coluvionar com uma espessura de 1m.; uma camada de solo saprolítico com espessura de quatro metros dividido em quatro camadas de 1m de espessura nomeadas de saprolítico 1, saprolítico 2, saprolítico 3 e saprolítico 4; e uma camada que representa a camada de rocha fraturada

A peculiaridade das encostas da região da Serra de Cubatão no que refere à condutividade hidráulica crescente com a profundidade, como indicado por Wolle (1988), Abramento (1988) e Carvalho (1989); foi aplicado nos modelos mediante o acréscimo da permeabilidade saturada nas camadas de solo subjacentes à camada de solo coluvionar.

A malha de elementos finitos foi criada com elementos quadrados e triangulares de 0,5 m de lado, sendo gerados 11.569 nós e 14.444 elementos, o espaçamento de 0,5

m é apropriado para superar os problemas de convergência gerados pela não linearidade da curva de retenção e da curva de condutividade hidráulica, como indicado por Tsaparas et al. (2002).

As camadas de solo coluvionar e saprolítico estão divididas em elementos triangulares criando uma malha mais refinada, e a camada rochosa está dividida em elementos quadrados, portanto uma malha menos refinada (Figura 4.1).

Figura 4.1 Malha de elementos finitos empregada nas análises de fluxo

Ao longo do perfil dos taludes foram situados pontos de referência para apresentar os resultados das análises como mostrado na Tabela 4.1. Os pontos representativos foram localizados na porção alta da encosta e na vizinhança do pé da encosta.

Tabela 4.1 Localização dos pontos de referência nos taludes da Serra de Cubatão

		Inclinação do talude						Tipo de solo
		30°		40°		50°		
Ponto	Profundidade (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
A	0,5	38,0	80,8	38,0	76,5	38,0	70,4	
B	1,5	38,0	79,8	38,0	75,5	38,0	69,4	Saprolítico
C	2,5	38,0	78,8	38,0	74,5	38,0	68,4	Saprolítico
D	3,5	38,0	77,8	38,0	73,5	38,0	67,4	Saprolítico
E	0,5	110,0	39,2	85,0	37,2	69,0	33,4	Coluvionar
F	1,5	110,0	38,2	85,0	36,2	69,0	32,4	Saprolítico
G	2,5	110,0	37,2	85,0	35,2	69,0	31,4	Saprolítico
H	3,5	110,0	36,2	85,0	34,2	69,0	30,4	Saprolítico

Os pontos foram situados na profundidade de 0,5 m até os 3,5 m., profundidade considerada já que o interesse é analisar o comportamento do fluxo da água nas camadas superficiais, especialmente na cama de solo coluvionar de espessura de 1m que é a mais afetada pela infiltração da água da chuva.

4.1.2 Condições de contorno

A base do perfil do talude foi considerada permeável permitindo o fluxo da água, esta condição obedece à característica de rocha fraturada sob as camadas de solo, como descrito no item 3.1.3; nessas condições o fluxo de água é governado pelo coeficiente de permeabilidade, no programa SEEP/W esta condição é definida pela opção chamada de gradiente unitário “unit gradient” aplicada ao longo da superfície da base do perfil do talude.

O fluxo na borda esquerda na crista do talude é permitido mediante a opção de drenagem livre, na borda do pé do talude é considerada a condição de talude infinito com a finalidade de reduzir os efeitos da borda direita nas análises; entendido que o foco das análises é o comportamento do talude principalmente na alta e média encosta que exibem maior ocorrência de escorregamentos.

Na superfície do talude é aplicada a função de contorno de fluxo unitário “unit flux”, que representa o fluxo transitório que experimenta o solo, composto por as precipitações que produzem entrada de água e a evapotranspiração que gera perda de água.

Como o nível d'água não foi encontrado nas investigações feitas no local (item 3.1.3), o lençol freático supõe-se a uma profundidade considerável maior aos 10 metros, transmitindo essa condição no modelo do SEEP/W, não foi considerado o nível do lençol freático inicial.

As condições de contorno adotadas descritas acima estão mostradas na Figura 4.2.

Figura 4.2 Condições de contorno impostas para os taludes da Serra de Cubatão

4.1.3 Pluviometria

Fazendo uma análise das chuvas ao longo dos anos 1975 a 1985, foi observado na Figura 3.5 que as chuvas correspondentes ao ano 1982 da estação Curva da Onça são as chuvas que melhor representam a série histórica das chuvas dos anos 1975 a 1985, como pode ser observado na Figura 4.3, estas chuvas serão empregadas para a obtenção do perfil de sucção inicial, como será mostrado posteriormente.

Figura 4.3 Distribuição das chuvas empregadas nas análises de fluxo (Estação Curva da Onça)

Os valores de evapotranspiração empregados são os mostrados anteriormente na Figura 3.7, assim a Figura 4.4 apresenta a distribuição da precipitação do ano 1982 a ser aplicada nas análises, e da evapotranspiração do mesmo período.

Figura 4.4 Pluviograma da estação Curva da Onça (Serra de Cubatão)

Sendo o foco do estudo os escorregamentos devido à influência das chuvas de janeiro de 1985, é importante analisar também a influência das chuvas antecedentes, portanto será feita a análise de infiltração, aplicando na superfície do talude a intensidade da chuva ao longo do ano 1984. Na Figura 4.5 a intensidade representa a quantidade de chuva menos a quantidade de evapotranspiração diária, sendo que nos dias em que a intensidade é negativa não houve chuva ou a intensidade da chuva foi menor do que a evapotranspiração. Nos modelos a serem analisados no programa SEEP/W, a intensidade será aplicada como função de contorno na superfície do talude.

Figura 4.5 Pluviograma do ano 1984 da estação Curva da Onça - Serra de Cubatão

Na Figura 4.6 mostra-se o acumulado das chuvas desde o mês de dezembro de 1984 até janeiro de 1985, observa-se claramente que entre os dias 23 e 24 de janeiro de 1985 houve um incremento abrupto na quantidade de precipitação; segundo registros da estação Curva da Onça choveu 277 mm em 48 horas (23 e 24 de janeiro), quantidade que representa um 44% dos 631,6 mm de precipitação registrada no mês de janeiro de 1985.

Figura 4.6 Chuva diária e acumulada do período novembro 1984 a janeiro 1985 (Estação Curva da Onça)

Cabe lembrar que as chuvas dos dias 23 e 24 de janeiro de 1985, pertence a um dos três eventos de chuva extrema, registrados no período 1975 a 1985, como analisado no item 3.1.1 na Figura 3.6.

Nos modelos a serem analisados no SEEP/W durante o mês de janeiro de 1985, foi subtraída evapotranspiração da quantidade de chuva e se obteve o fluxo unitário (Figura 4.7), que será aplicado ao longo da superfície do talude como função de contorno “unit flux function”.

Figura 4.7 Pluviograma do mês de janeiro de 1985 da estação Curva da Onça (Cubatão)

4.1.4 Parâmetros hidráulicos do solo

A curva de retenção a ser empregada nas análises foi ajustada a partir dos dados de Abramento (1988), como mostrado na Figura 3.11 (item 3.1.3), por refletir melhor o caráter arenoso do solo. Os valores ingressados no programa SEEP/W correspondem aos valores ajustados pelo método de Van Genuchten como mostrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 Curva de retenção empregada nas análises de infiltração da Serra de Cubatão

Devido à ausência de resultados de ensaios de permeabilidade para as camadas com profundidades maiores aos 1,5 m, os valores de permeabilidade saturada para as camadas embaixo da camada do solo saprolítico de espessura de 1m, denominado aqui como saprolítico 1, foram estimadas acrescentando a ordem de grandeza, baseado no exposto por Wolle (1988) como estudado no item 3.1.3. A Figura 4.9 mostra a variação na ordem de grandeza para cada camada de solo.

Figura 4.9 Idealização da variação da permeabilidade saturada média com a profundidade (Wolle, 1988)

A função condutividade hidráulica para as camadas de solo consideradas nas análises de infiltração estão mostradas na Figura 4.10. Estas foram geradas a partir da curva de retenção do solo mediante a equação de Van Genuchten usando os valores de permeabilidade saturada média apresentadas na Tabela 3.5 para o solo coluvionar e saprolítico 1 e a permeabilidade idealizada para as camadas denominadas de saprolítico 2, 3, 4 e da rocha fraturada (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 Valores de permeabilidade saturada empregadas para as análises da Serra de Cubatão

Camada de solo	Ksat (cm/s)
Coluvionar	5×10^{-4}
Saprolítico 1	5×10^{-4}
Saprolítico 2	$2,8 \times 10^{-3}$
Saprolítico 3	5×10^{-3}
Saprolítico 4	1×10^{-2}
Rocha fraturada	$1,2 \times 10^{-2}$

Figura 4.10 Estimativa das funções condutividade hidráulica para os solos da Serra de Cubatão

4.2 Região Serrana do Rio de Janeiro

A partir do apresentado no item 3.2 foi realizada a análise numérica da infiltração para obter os perfis da variação da sucção ao longo do ano 2010 (antecedente aos escorregamentos estudados) e durante o mês de janeiro de 2011 em que aconteceram os escorregamentos catastróficos.

4.2.1 Geometria dos taludes modelados

Foram modelados três taludes com inclinações de 20°, 30° e 40°, a altura dos taludes é de 20, 30 e 50 m respectivamente, e o comprimento foi de 60 m para os três casos. As inclinações dos taludes modelados representam um talude menos íngreme, um talude de inclinação média e um talude mais íngreme.

O perfil de solo foi subdividido em uma camada superficial de solo coluvionar de 2 m de espessura, sobrejacente ao solo residual com 3 m de espessura.

A malha de elementos finitos foi criada com elementos quadrados de 0,25 m, e quadrados de 0,50 m só na base do talude, o número de nós é de 5.954 e 5.756 elementos no caso do talude com 20° de inclinação, 5.918 e 5.704 elementos no caso do talude com 30° e 5.917 nós e 5.696 elementos no talude com inclinação de 40°.

Na Figura 4.11 mostra-se a malha empregada nas análises numéricas.

Figura 4.11 Malha de elementos finitos empregada nas análises de fluxo

Os pontos A, B, C, D, E, F, G e H colocados ao longo do perfil dos taludes, na porção alta da encosta e na vizinhança do pé da encosta, são pontos de referência para apresentar os resultados das análises, na Tabela 4.3 mostram-se as coordenadas dos pontos considerados.

Tabela 4.3 Localização dos pontos de referência nos taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro

		Inclinação do talude						Tipo de solo
		20°		30°		40°		
Ponto	Profundidade (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
A	0,5	36,0	22,7	36,0	33,9	36,0	45,0	Coluvionar
B	1,5	36,0	21,7	36,0	32,9	36,0	44,0	Coluvionar
C	2,5	36,0	20,7	36,0	31,9	36,0	43,0	Residual
D	3,5	36,0	19,7	36,0	30,9	36,0	42,0	Residual
E	0,5	64,0	13,3	64,0	17,5	64,0	21,6	Coluvionar
F	1,5	64,0	12,3	64,0	16,5	64,0	20,6	Coluvionar
G	2,5	64,0	11,3	64,0	15,5	64,0	19,6	Residual
H	3,5	64,0	10,3	64,0	14,5	64,0	18,6	Residual

Como observado na Figura 4.11 e na Tabela 4.3 os pontos foram situados na profundidade de 0,5 m até 3,5 m, isto devido ao interesse de analisar o comportamento do fluxo da água nas camadas superficiais, especialmente na camada de solo coluvionar de espessura de 2 m que sofre maior influência da infiltração da água da chuva.

4.2.2 Condições de contorno

A base do perfil do talude foi considerada impermeável, não sendo permitido o fluxo da água, sendo adotada a condição de fluxo zero, esta condição é devido à presença da rocha impermeável, sob as camadas de solo, como descrito no item 3.2.3.

Cabe destacar, que o mecanismo de escorregamento, mais representativo dos escorregamentos de janeiro de 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro, ocorreram sob a presença de solo menos impermeável com a profundidade, e com a existência do nível freático, no pé da encosta (Figura 3.24), como reportado por Avelar, et al. (2011).

O fluxo na borda esquerda na crista do talude é permitido com o emprego da opção de drenagem livre, na borda direita no pé do talude devido às características morfológicas descritas no item 3.2.2 é considerada uma carga constante.

Na superfície do talude será aplicado o fluxo transiente que experimenta o solo devido às precipitações que geram entrada de água e à evapotranspiração que gera perda de água, este fluxo é representado pela aplicação da função de contorno de fluxo unitário “unit flux”.

O nível da água foi considerado como mostrado na Figura 4.12, o mesmo que como indicado no item 3.2.3 varia segundo a quantidade de chuva.

Figura 4.12 Condições de contorno para os taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro

4.2.3 Pluviometria

Fazendo a análise das chuvas ao longo dos anos 2002 a 2011, foi observado na Figura 3.19 que as chuvas correspondentes ao ano 2005 da estação Teresópolis operada pelo INMET são as chuvas que melhor se ajustam à precipitação média dos anos 2002 a 2011 e à normal climatológica 1961-1990, portanto estas chuvas serão empregadas para a obtenção do perfil de sucção inicial, como será mostrado na frente (Figura 4.13).

Figura 4.13 Distribuição da chuva empregada nas análises de fluxo (Estação Teresópolis)

Os valores de evapotranspiração empregados foram mostrados anteriormente na Figura 3.23, assim a Figura 4.14 apresenta a distribuição da precipitação do ano 2005 a ser empregada nas análises, e da evapotranspiração real do mesmo período. Um detalhe observado no pluviograma durante os meses de poucas chuvas é a maior quantidade de evapotranspiração quando comparado com a quantidade de chuva.

Figura 4.14 Pluviograma da Estação Teresópolis (Região Serrana do Rio de Janeiro)

Ao estudar os escorregamentos devido à influência das chuvas extremas de janeiro de 2011, é importante analisar a influência das chuvas antecedentes, perante isso será feita a análise de infiltração, aplicando ao longo da superfície do talude, a intensidade do ano 2010 (Figura 4.15). A intensidade é a diferença entre a quantidade da chuva menos a evapotranspiração, resultando negativa nos casos em que ocorreu pouca ou nenhuma chuva, portanto a evapotranspiração é maior do que a precipitação.

Figura 4.15 Pluviograma do ano 2010 da estação Teresópolis - Região Serrana do Rio de Janeiro

No acumulado de chuvas desde o mês de dezembro de 2010 até janeiro de 2011, mostrado na Figura 4.16, observa-se claramente que entre os dias 11 e 12 de janeiro, houve um incremento abrupto na quantidade de chuva acumulada; segundo registros da estação empregada a precipitação no dia 12 de janeiro foi de 124,6 mm e o acumulado com a chuva do dia anterior foi de 168 mm, quantidade que representa o 48% dos 348,3 mm de precipitação registrada no mês de janeiro de 2011.

Figura 4.16 Chuva diária e acumulada do período dezembro 2010 a janeiro 2011 (Estação Teresópolis)

A chuva acumulada no mês de dezembro de 2010 foi de 447 mm, valor que excede em 35% ao valor da precipitação média do período 2002-2011, já a chuva acumulada de janeiro de 2011 excede em 13% ao valor da precipitação média, mas o incremento brusco registrado entre os dias 11 e 12 de janeiro é o que torna esta chuva como extrema.

Nas análises numéricas a serem feitas no programa SEEP/W diminuámos a evapotranspiração da quantidade de chuva e obtemos o fluxo unitário (Figura 4.17), o fluxo unitário será aplicado como condição de contorno “unit flux function”.

Figura 4.17 Pluviograma do mês de janeiro de 2011 da estação Teresópolis

4.2.4 Parâmetros hidráulicos do solo

A curva de retenção do solo coluvionar e do solo residual empregadas nas análises serão as obtidas por Oliveira (2013), os valores ingressados no programa SEEP/W correspondem aos valores ajustados pelo método de Van Genuchten como mostrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 Curvas de retenção empregada nas análises de infiltração da Região Serrana do Rio de Janeiro

Os valores de permeabilidade saturada empregadas nas análises de infiltração estão mostrados na Tabela 4.4. As funções condutividade hidráulica para as camadas de solo coluvionar e residual consideradas nas análises de infiltração estão mostradas na Figura 4.19, estas foram geradas a partir da curva de retenção de cada solo e da permeabilidade saturada da Tabela 4.4 mediante a equação de Van Genuchten.

Tabela 4.4 Valores de permeabilidade saturada empregadas nas análises para a Região Serrana do Rio de Janeiro

Camada de solo	Ksat (cm/s)
Coluvionar	$2,6 \times 10^{-3}$
Residual	$4,3 \times 10^{-4}$

Figura 4.19 Funções condutividade hidráulica para os solos da Região Serrana do Rio de Janeiro

A continuação é apresentado um resumo da precipitação, geometria das encostas, propriedades dos solos e parâmetros hidráulicos, das encostas da Serra de Cubatão e da Região Serrana do Rio de Janeiro. Observa-se uma notável diferença nos níveis de precipitação acumulada, na declividade das encostas e nos valores de permeabilidade do solo.

SUMÁRIO DO CAPÍTULO

5 CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE DA ESTABILIDADE

5.1 Serra de Cubatão

Para as análises de estabilidade, foi obtida a variação do φ^b com a sucção a partir da equação de resistência obtida por Abramento (1988) para o local estudado, visto que os valores de pressão neutra obtidos nas análises de fluxo encontram-se dentro da faixa de 0 a 60 kPa, é possível fazer uso de dita equação.

A Figura 5.1 mostra a variação da sucção com a coesão, onde pode ser observado o ganho de coesão na medida em que a sucção cresce.

Figura 5.1 Variação da sucção com a coesão (Abramento, 1988)

Em relação à variação do ângulo φ^b pode se observar, na Figura 5.2, que o mesmo diminui de valor com o incremento da sucção, salienta-se também o fato da não variação do ângulo φ^b até o valor de entrada de ar (0,40 kPa).

Figura 5.2 Variação do ângulo ϕ^b com a sucção (Abramento, 1988)

Os taludes na Serra de Cubatão apresentam-se inicialmente não saturados com a formação e avanço de uma frente de infiltração devido à infiltração da água proveniente das chuvas; no processo de infiltração as sucções são reduzidas com a conseguinte redução da coesão aparente por tanto a redução da resistência do solo.

No caso das encostas da Serra de Cubatão, o método de talude infinito é o que melhor insere as características dos escorregamentos, porque os taludes possuem grande extensão e uma camada superficial de pouca espessura de solo coluvionar, e como observado por diversos pesquisadores os escorregamentos desenvolvem-se nessa camada.

Devido às características dos taludes é importante incluir na análise de estabilidade a parcela de sucção, esse objetivo é alcançado mediante a aplicação da equação mostrada por Futai et al. (2012) para o cálculo do fator de segurança, sendo a seguinte:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \alpha) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} \quad (5.1)$$

Como visto no item 3.1.3 a variação do intercepto de coesão total com a sucção apresenta forma não linear ajustando-se a uma função exponencial, por tanto a parcela $c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$, pode ser substituída pela equação exponencial do

Abramento (1988) quedando a equação para o cálculo do talude infinito da seguinte forma:

$$FS = \frac{2,5(u_a - u_w)^{0,5} + (\gamma H \cos^2 \alpha) \tan \phi'}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} \quad (5.2)$$

A equação é válida para um intercepto de coesão efetivo nulo e um ângulo de atrito de 38°.

Outro resultado que faz parte dos ensaios geotécnicos em solos não saturados nas encostas da Serra de Cubatão, foi apresentado por Abramento e Carvalho (1989), para um intercepto de coesão de 1 kPa e um ângulo de atrito efetivo de 36°, obtendo o fator de segurança através da seguinte equação:

$$FS = \frac{1,0 + 3,1(u_a - u_w)^{0,5} + (\gamma H \cos^2 \alpha) \tan \phi'}{\gamma H \sin \alpha \cos \alpha} \quad (5.3)$$

Os parâmetros de resistência apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4 estão baseados nos dados da literatura mostrados no item 3.1.3.

Figura 5.3 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Serra de Cubatão

Figura 5.4 Parâmetros de resistência do solo saprolítico da Serra de Cubatão

Os parâmetros de resistência apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4, pertencem a ensaios feitos com amostras com umidade natural e ensaios com amostras inundadas, como mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Parâmetros de resistência dos solos da Serra de Cubatão

Solo	Com umidade natural			Estado inundado		
	c (kPa)	ϕ (°)	S (%)	c (kPa)	ϕ (°)	S (%)
Coluvionar	9,5	40	65 - 69	1	36	80 - 92
Saprolítico	11	45	40 - 77	3,5	39	87 - 100

5.2 Região Serrana do Rio de Janeiro

Para as análises de estabilidade será calculado o fator de segurança pelo método de talude infinito, os parâmetros de resistência utilizados são os apresentados no item 3.2.3 e estão resumidos na Figura 5.5 e Figura 5.6.

Figura 5.5 Parâmetros de resistência do solo coluvionar da Região Serrana do Rio de Janeiro

Figura 5.6 Parâmetros de resistência do solo residual da Região Serrana do Rio de Janeiro

Os parâmetros de resistência apresentados na Figura 5.5 e Figura 5.6 pertencem a ensaios feitos com amostras com diferentes graus de saturação, como mostrado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Parâmetros de resistência dos solos da Região Serrana do Rio de Janeiro

Solo	c (kPa)	ϕ (°)	S (%)
Coluvionar	7	35	65 - 71
	1	30	34 - 49
Residual	3	33	29 - 34
	0	37	42 - 72

6 RESULTADOS

Os resultados das análises numéricas serão usados para descrever o mecanismo dos escorregamentos translacionais rasos nos locais estudados, principalmente a influência da chuva antecedente no processo de infiltração, portanto na variação da pressão neutra, assim como a chuva extrema deflagradora dos eventos generalizados de escorregamentos.

6.1 Serra de Cubatão

Os resultados estão apresentados em dois itens, um item referido aos resultados das análises de infiltração e um segundo item referido à análise de estabilidade baseado no cálculo do fator de segurança.

6.1.1 Perfis de sucção

O desempenho do programa SEEP/W foi avaliado comparando os resultados obtidos nas análises numéricas, com os dados de sucção apresentados por Carvalho (1989), obtidos mediante monitoração com tensiômetros nas encostas da Serra de Cubatão, durante o período março 1987 até outubro de 1988 (período após os escorregamentos generalizados de 1985).

O perfil de sucção mostrado na Figura 6.1 corresponde à variação da sucção gerada pela chuva de abril de 1987 até março de 1988 (período de um ano), para a profundidade de 0,50m, obtidas mediante análise numérica com o programa SEEP/W, comparados com as sucções de campo apresentadas por Carvalho (1989) medidas na profundidade de 0,53m.

A chuva da Figura 6.1 pertence à estação Barragem das Pedras e corresponde à chuva registrada durante o monitoramento da sucção apresentada por Carvalho (1989); esta chuva foi também empregada nesta análise, para gerar os perfis de sucção no programa SEEP/W e poder compará-los entre si.

Figura 6.1 Perfil de pressão neutra obtida por análise numérica versus perfil de pressão neutra obtida in situ por Carvalho (1989)

Na Figura 6.1 pode-se observar que para uma profundidade de 0,50m os valores de sucção obtidos no programa SEEP/W se assemelham aos valores apresentados por Carvalho (1989), não superando em ambos os casos os 10 kPa.

Como pode ser observado na Figura 6.1, para a profundidade de 0,50m os valores de pressão neutra negativa (sucção) quando obtidos em campo, são levemente maiores do que os valores obtidos no programa SEEP/W, isto devido principalmente à descontinuidade e ao intenso fraturamento da camada rochosa existente em campo que não pode ser exatamente refletida nas análises, portanto as camadas inferiores são mais drenantes, porém não necessariamente possuem maior valor de permeabilidade na matriz do solo.

A heterogeneidade do solo é também um elemento influente na variação dos valores obtidos em campo e os obtidos mediante análises numéricas, devido a que o programa SEEP/W considera o solo homogêneo, mas em campo existe heterogeneidade visível como indicado no item 3.1.3; além disso, existe variação na quantidade de água de chuva que atinge a superfície do terreno, fato que não pode ser reproduzido nas análises numéricas.

Contudo podemos dizer que as análises realizadas com o programa SEEP/W mostram-se satisfatórias no tocante aos resultados apresentados quando comparados com valores de sucção medidos em campo, assim os resultados obtidos com o emprego do programa SEEP/W são considerados confiáveis para as análises de infiltração.

Cardoso e Futai (2009), com o intuito de obter um regime médio anual, representativo dos valores de pressão neutra, criaram um procedimento numérico, baseado em ciclos de análise numérica, sob a aplicação da chuva representativa da média histórica de um período analisado. Assim a distribuição da sucção ou pressão neutra inicial no talude, é considerada representativa, uma vez alcançada a convergência dos valores de pressão neutra, durante dois ou mais ciclos consecutivos.

Adotando o procedimento numérico apresentado por Cardoso e Futai (2009), o primeiro objetivo deste trabalho, é obter as características iniciais de pressão neutra no talude, antes do início da infiltração da água da chuva de janeiro de 1985, mais próximos da realidade, porque, como concluído por Cardoso e Futai (2005), as condições iniciais de sucção do solo, tem influência na variação da sucção durante os eventos de chuva.

Para alcançar o primeiro objetivo, será obtida a distribuição da pressão neutra inicial, sob aplicação da chuva diária ao longo de um ano (ciclo), considerado representativo da média histórica do período 1975-1985, que como indicado no item 4.1.3, corresponde à chuva do ano 1982. Uma vez obtida a distribuição da sucção inicial, será aplicada a chuva do ano 1984, e finalmente, será analisada a variação da sucção ou pressão neutra, sob a chuva do mês de janeiro de 1985, em que ocorreram o grande número de escorregamentos translacionais rasos na Serra de Cubatão.

No primeiro ciclo de análise numérica feito com o programa SEEP/W, o talude foi considerado na condição de equilíbrio sem a existência do nível da água, em concordância com as características da região, como estudado no item 3.1.3, nos seguintes ciclos, as condições iniciais foram as fornecidas pelos resultados da análise antecedente, até alcançar a convergência dos valores de sucção.

O número de ciclos varia para cada uma das três inclinações dos taludes considerados, a convergência nos valores de sucção foi alcançada após um número de 11 ciclos para os taludes com inclinações de 30° e 40°, e 12 ciclos para o talude com inclinação de 50°; as inclinações adotadas obedecem às inclinações comumente encontradas na região, como indicado no item 3.1.2.

Na Figura 6.2 é mostrado um exemplo para o talude com inclinação de 40°, de como foram realizadas as análises dos ciclos para a obtenção da condição inicial de cada

caso de inclinação do talude, nos pontos A, B, C, D pertencentes à porção alta da encosta, detalhados na Tabela 4.1.

Como observado na Figura 6.2, a partir do ciclo 10 os valores de pressão neutra começam a alcançar a convergência, não sendo observadas variações bruscas das pressões neutras nos ciclos seguintes. Assim neste caso foram escolhidos os resultados do ciclo número 11 como a distribuição da pressão neutra inicial.

Figura 6.2 Exemplo do procedimento numérico baseado em ciclos, para a obtenção da distribuição da sucção inicial, para o talude com inclinação de 40° da Serra de Cubatão

Na Figura 6.2, observa-se que, embora tenha-se alcançado a convergência dos valores de sucção, há diferença numérica entre dois ciclos consecutivos, mesmo sob as mesmas condições de análise, portanto pode existir a variação numérica nos valores de sucção.

Na Figura 6.3 é apresentada a variação da pressão neutra ao longo do ano, considerada como inicial, para o exemplo analisado, observa-se sucções maiores para os pontos localizados a maiores profundidades. São observadas sucções menores aos 3 kPa no ponto A (0,5 m), mais próximo da superfície do talude, e sucções de até 8 kPa no ponto D, localizado na maior profundidade analisada (3,5 m).

Figura 6.3 Variação da pressão neutra obtida no ciclo número 11 para o talude com inclinação de 40° da Serra de Cubatão.

Em concordância com o indicado no item 3.1.3, os resultados das análises numéricas ao longo dos ciclos não geraram nível da água em nenhuma das inclinações de talude estudadas.

6.1.1.1 Encosta com inclinação de 30°

A Figura 6.4 e Figura 6.5 mostram a variação da sucção na encosta com inclinação de 30° da Serra de Cubatão ao longo do ano, para os pontos A, B, C, D, E, F, G e H selecionados segundo o indicado na Tabela 4.1, sob o efeito da chuva do ano 1984.

Figura 6.4 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C, D de um talude com 30° de inclinação

Figura 6.5 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 30° de inclinação.

Como observado na Figura 6.4 e Figura 6.5 correspondentes aos resultados das análises numéricas de fluxo ao longo do ano 1984, os valores de sucção variaram entre 10 kPa nos períodos com poucas chuvas até valores próximos a 0 kPa em períodos chuvosos. Analisando os perfis de sucção percebe-se claramente que as maiores mudanças de sucção (perdas e ganhos) concentraram-se nos primeiros 0,50m de profundidade, na camada de solo coluvionar, diminuindo o efeito da chuva e da evapotranspiração na medida em que a profundidade cresce.

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.4)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.5)
JANEIRO	<p>No ponto A, após 20 dias sem chuvas, a sucção cresceu até os 14 kPa, no dia 22, com a chuva de 76 mm precedida por uma de 30 mm gerou uma perda de sucção de 10 kPa. Posteriormente, uma nova chuva de 100 mm gerou perda de apenas 2 kPa de sucção. Nos pontos B, C e D não ocorreu o notável ganho de sucção observado no ponto A. A queda de sucção ocorreu progressivamente: primeiro no ponto A, após quatro dias no ponto B, após cinco dias no ponto C e após seis dias no ponto D.</p> <p>A perda de sucção no ponto B foi de 2,0 kPa, no ponto C foi de 4,5 kPa e no ponto D de 5 kPa. Observou-se que com a ocorrência de chuvas menores aos 10 mm fez a sucção aumentar 4 kPa no ponto B e 6 kPa nos pontos C e D.</p>	<p>O ponto E, após 20 dias sem chuvas, apresentou uma sucção de 12,5 kPa. A chuva de 30 mm gerou perda de 10 kPa de sucção. As chuvas de 76 mm e 100 mm apenas mantiveram o nível de sucção neste ponto. No ponto F a perda de sucção ocorreu após sete dias de chuvas entre 10 mm e 100 mm. O ponto G apresentou um ganho de sucção de 4 kPa no começo do mês e a perda de sucção ocorreu lentamente ao longo do mês. O ponto H manteve em média uma sucção de 6,5 kPa.</p>

FEVEREIRO	<p>Após dez dias praticamente sem chuvas (ocorrências menores aos 10 mm), uma chuva de 32 mm, no dia 38 (07 de fevereiro), gerou a perda de sucção de 1 kPa no ponto A. Os pontos B, C e D mantiveram as sucções de 3 kPa, 7 kPa e 7,5 kPa.</p>	<p>A chuva de 32 mm (dia 38) gerou perda de sucção de 0,5 kPa nos pontos E e F, enquanto o ponto G atingiu a mínima sucção de 2,5 kPa. O ponto H, após 04 dias da ocorrência da chuva, atingiu a sucção de 4 kPa. O ponto E perdeu 9 kPa de sucção em 14 dias sem chuvas.</p>
MARÇO	<p>No ponto A podem ser observadas duas mudanças de sucção: a primeira corresponde a um ganho de sucção de 8 kPa (de 1 kPa a 9 kPa) no dia 62 (03 março), após 22 dias sem chuvas; a segunda corresponde a uma perda de sucção de 7 kPa (de 9,5 kPa a 2,5 kPa) devido à chuva de 71 mm no dia 81 (22 de março), precedidas por chuvas isoladas entre 10 mm e 20 mm.</p> <p>Nos pontos B e C houve perda progressiva de sucção, após da chuva de 71 mm: após cinco dias o ponto B perdeu 1,5 kPa de sucção e após seis dias o ponto C perdeu 4 kPa de sucção.</p> <p>Posteriormente às perdas de sucção dos pontos B e C, houve ganho de sucção de 4 kPa no ponto B e 2,5 kPa no ponto C. No ponto D a perda de sucção de 4,5 kPa (de 6,5 kPa a 2 kPa) foi observada apenas no dia 92 (02 de abril).</p>	<p>O ponto E apresentou uma queda de sucção anômala no começo do mês, provavelmente devido a um erro numérico isolado.</p> <p>A perda de sucção de 10 kPa no ponto E deu-se em função das chuvas de 71 mm e 19 mm dos dias 81 e 82 (22 e 23 de março). No ponto F a perda de sucção de 2 kPa ocorreu no dia 83 (24 de março).</p> <p>Os pontos G e H não apresentaram alterações nos níveis de sucção, se mantendo sucções médias de 4,5 kPa ao longo do mês.</p>

ABRIL	<p>A chuva de 125 mm do dia 90 (31 de março), gerou sucções perto de zero no ponto A (após dois dias da ocorrência da chuva) e 1 kPa no ponto B (após quatro dias da ocorrência da chuva). Chuvas de 54 mm no dia 94 (04 de abril) e 20 mm no dia 95 (05 de abril), geraram perdas de sucção de 3 kPa no ponto C (no dia 97) e 0,5 kPa no ponto D (no dia 99). Após as perdas de sucção nos pontos A, B, C e D manteve-se as sucções médias de 2 kPa, 4 kPa, 3 kPa e 6,5 kPa, respectivamente.</p> <p>Notou-se que a chuva de 69 mm no dia 115 (25 de abril) não gerou perda de sucção, pois, foi uma chuva isolada após 16 dias praticamente sem chuvas (ocorrências menores a 10 mm)</p>	<p>O ponto E não foi influenciado pela chuva do dia 90 (31 de março). As chuvas de 54 mm do dia 94 (04 de abril) e de 20 mm do dia 95 (05 de abril), geraram perda de sucção de 1,5 kPa, mantendo a sucção de 1 kPa ao longo do mês. Os pontos F, G e H, após o ganho de sucção de 2 kPa, tiveram perda contínua de sucção no decorrer no mês, pois, o ponto F variou de 4,5 kPa a 3,5 kPa; o ponto G variou de 6 kPa a 5 kPa no final do mês e o ponto H variou de 6,2 kPa a 6 kPa.</p> <p>Da mesma forma que aconteceu nos pontos A, B, C e D, a chuva de 69 mm, do dia 115 (25 de abril), não gerou variações nos níveis de sucção.</p>
MAIO - JUNHO	<p>Não ocorreram chuvas maiores que 10 mm, portanto, os valores de sucção mantiveram a média de 2 kPa no ponto A, 1,5 kPa no ponto B, 2 kPa no ponto C e 5 kPa no ponto D.</p>	<p>Os pontos E, G e H não apresentaram mudança de sucção. Já no ponto F houve ganho de sucção, principalmente no mês de maio, podendo ser atribuído à redistribuição da água dentro da camada de solo.</p>
JULHO	<p>Observou-se o ganho de 7 kPa de sucção no ponto A, em 15 dias sem chuvas maiores a 10 mm, portanto, a sucção manteve-se na média de 10 kPa pelo fato da ocorrência de duas chuvas de 18 mm/ dia. A sucção</p>	<p>No período sem chuvas, o ganho de sucção no ponto E foi de 1,5 kPa. A ocorrência de dois eventos de chuva de 18 mm/dia, nos dias 195 e 196 (14 e 15 de julho), geraram a perda de sucção de 3,5 kPa no ponto E; 0,5</p>

	<p>começou a diminuir de 10 kPa para 6 kPa, devido à maior frequência de chuvas com intensidades maiores que 10 mm.</p> <p>Os pontos B, C e D perderam 0,5 kPa de sucção após três, quatro e cinco dias, respectivamente, da ocorrência de dois eventos de chuva com intensidade de 18 mm/dia.</p>	<p>kPa no ponto F; 1 kPa no ponto G e 0,5 kPa no ponto H. Observou-se o ganho de sucção, atingindo em média de 0,5 kPa no ponto E; 4 kPa no ponto F; 5 kPa no ponto G e 5,5 kPa no ponto H.</p>
AGOSTO	<p>O ponto A não apresentou mudança de sucção. No ponto B, as chuvas de 51 mm e 17 mm dos dias 230 e 231 (18 e 19 de agosto) mantiveram a sucção de 1,5 kPa; no ponto C, houve perda de sucção de 2 kPa após quatro dias de acontecidas as chuvas dos dias 18 e 19 e, finalmente, no ponto D houve perda de sucção de 3 kPa após sete dias de ocorridas as chuvas dos dias 18 e 19.</p> <p>O fato de ter acontecido mudanças de sucção notáveis nas camadas mais profundas deu-se devido à redistribuição da água. No ponto A, mais próximo da superfície, os níveis de sucção se mantiveram devido ao balanço hídrico. Após a chuva ter cessado, a água infiltrou progressivamente na direção das camadas mais profundas, gerando sucção crescente no ponto B enquanto nos pontos C e D a sucção diminuiu.</p>	<p>No começo do mês a chuva de 36 mm do dia 215 (03 de agosto) manteve a sucção de 1 kPa no ponto E. Nos pontos F, G e H a perda de sucção de 1,5 kPa, 4,5 kPa e 3,5 kPa, respectivamente, ocorreu após dois, seis e oito dias de ocorrida a chuva.</p> <p>Outra perda de sucção de 1 kPa observou-se no ponto E devido à chuva de 51 mm do dia 230 (18 de agosto), no ponto F, no dia 234 (22 de agosto) houve perda de sucção de 2 kPa, no ponto G, a perda de sucção de 3 kPa aconteceu no dia 236 (24 de agosto) e, no ponto H, a perda de sucção foi de 2 kPa no dia 238 (26 de agosto).</p>

SETEMBRO	Entre os dias 250 e 260 (07 e 17 de setembro) observou-se comportamento atípico nos pontos A, C e D. Estes apresentaram perdas de sucção de entre 1 kPa e 1,5 kPa, sob chuvas de apenas 3,5 mm, sendo que esta intensidade não deveria provocar mudanças por ser menor que a quantidade de evapotranspiração do mês.	O mesmo comportamento atípico, observado nos pontos A, C e D, entre os dias 250 e 260 (07 e 17 de setembro) foi observado nos pontos E, F, G e H. No dia 263 (20 de setembro), com a chuva de 49 mm a sucção no ponto E perdeu 1 kPa, a mesma perda de sucção aconteceu no dia 270 (27 de setembro) com a chuva de 33 mm.
OUTUBRO	A chuva de 74 mm (dia 292 ou 19 de outubro), após nove dias sem chuvas, gerou apenas uma perda de sucção de 0,5 kPa no ponto A. Já no ponto B a diminuição da sucção foi de 1 kPa, enquanto que nos pontos C e D, após três e cinco dias da chuva, houve uma perda de sucção de 4 kPa e 2 kPa, respectivamente.	A chuva de 37 mm do dia 281 (08 de outubro) gerou perda de sucção de 1 kPa no ponto E, 3 kPa no ponto F, após 02 dias da chuva do dia 08, 2,5 kPa no ponto G, após 05 dias da chuva e 3 kPa no ponto H, após 07 dias da chuva. A chuva de 74 mm do dia 292 (19 de outubro) gerou diminuição de sucção de 1,5 kPa apenas no ponto E.
NOVEMBRO	Com o aumento de frequência e intensidade das chuvas houve maior variação dos níveis de sucção. No ponto A, perdas de sucção de 1 kPa foram geradas por chuvas de 25 mm; a perda de sucção de 2 kPa ocorreu sob 30 mm de chuva (após quatro dias de uma chuva de 49 mm). Os pontos B, C e D apresentaram perdas de sucção de 2 kPa, 5 kPa e 3,5 kPa, respectivamente, após dois, quatro e	No ponto E perdas de sucção de 1 kPa aconteceram após chuvas maiores aos 30 mm. A menor sucção foi de 0,5 kPa após a chuva de 40 mm do dia 310 (06 de novembro). Os pontos F, G e H apresentaram perdas de sucção após quatro, seis e sete dias de observada a menor sucção no ponto E, no entanto a diminuição da sucção nos pontos F, G e H teve também influência das chuvas de 24 mm e 49 mm ocorridas

	<p>cinco dias de observada a diminuição da sucção no ponto A.</p> <p>No dia 322 (18 de novembro) devido a duas chuvas de 30 mm/dia, o ponto A perdeu 2 kPa de sucção; três dias após a chuva, o ponto B perdeu 1,5 kPa. O ponto C perdeu progressivamente 6 kPa de sucção, desde o dia 18 até o final do mês. O ponto D perdeu 1,5 kPa de sucção desde o dia 23 até o final do mês.</p>	<p>após três e cinco dias de acontecida a menor sucção no ponto E.</p> <p>No dia 322 (18 de novembro), com o começo das chuvas maiores aos 30 mm, a sucção no ponto E diminuiu 1 kPa atingindo 1,5 kPa de sucção; no ponto F, entre os dias 322 e 324 (18 e 20 de novembro), a sucção diminuiu 1,5 kPa; no ponto G, entre os dias 326 e 327 (22 e 23 de novembro), a sucção diminuiu 5 kPa; e no ponto H, entre os dias 328 e 329 (24 e 25 de novembro), a sucção diminuiu 3,5 kPa.</p>
DEZEMBRO	<p>No ponto A sucções próximas de zero ocorreram no dia 341 (07 de dezembro), após dois dias de ocorrências de três chuvas consecutivas com intensidades de 17 mm, 19 mm e 46 mm. O efeito dessas chuvas foram observados dois, quatro e seis dias depois, nos pontos B, C e D respectivamente.</p> <p>Observou-se valores altos de sucção entre os dias 347 e 360 (13 e 26 de dezembro), devido principalmente, à ausência de chuvas maiores aos 10 mm e à maior quantidade de evapotranspiração durante o mês (5,6 mm).</p>	<p>No ponto E, sucções de 1 kPa foram atingidas no dia 339 (05 de dezembro), após chuvas de 17 mm, 19 mm e 46 mm (02, 03 e 04 de dezembro). A menor sucção foi de 0,5 kPa, no dia 344 (10 de dezembro), após dois dias da chuva de 50 mm, no dia 342 (08 de dezembro). O ponto F diminuiu a sucção até 2,5 kPa, após a chuva de 40 mm, do dia 349 (15 de dezembro). Os pontos G e H apresentaram sucções mínimas de 2,5 kPa nos dias 352 e 354 (18 e 20 de dezembro).</p>

		No final do mês, as sucções nos pontos E e F foram de 2 kPa e nos pontos G e H foram de 6 kPa.
--	--	--

6.1.1.2 Encosta com inclinação de 40°

A Figura 6.6 e Figura 6.7 mostram a variação da sucção na encosta com inclinação de 40° da Serra de Cubatão ao longo do ano, para os pontos A, B, C, D, E, F, G e H seleccionados segundo o indicado na Tabela 4.1, sob o efeito da chuva do ano 1984.

Figura 6.6 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C, D de um talude com 40° de inclinação.

Figura 6.7 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 40° de inclinação

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.6)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.7)
JANEIRO	<p>No ponto A, após 20 dias sem chuvas, a sucção cresceu até os 19 kPa. No dia 21, a chuva de 30 mm, gerou diminuição de sucção de 4 kPa. A chuva de 76 mm, no dia 22, gerou 10 kPa de perda de sucção, enquanto que a chuva de 100 mm, no dia 23, gerou a perda de somente 2 kPa de sucção. Nos pontos B, C e D não ocorreram o crescimento da sucção observada no ponto A. A perda de sucção devido às chuvas consecutivas, com intensidades maiores de 10 mm, no período de 21 a 27 de janeiro, geraram sucções de 1,5 kPa no ponto B, referente ao dia 27; 2,5 kPa no ponto C, referente ao dia 28; e 4 kPa no ponto D, referente ao dia 29.</p> <p>Após o dia 27, chuvas com intensidades menores de 10 mm geraram ganhos de sucção de 1,5 kPa no ponto A, 2,5 kPa no ponto B, 1 kPa no ponto C e não houve ganho de sucção no ponto D.</p>	<p>No ponto E, após 20 dias sem chuvas, a sucção cresceu até os 10 kPa. No dia 22, a chuva de 76 mm, gerou diminuição de sucção de 5 kPa. A chuva de 100 mm, do dia 23, gerou perda de sucção de 4 kPa, após o dia 23, a sucção se manteve em 1 kPa. Nos pontos F, G e H ocorreram perdas de sucção, devido às chuvas consecutivas, com intensidades maiores de 10 mm, no período de 21 a 27 de janeiro, geraram diminuição da sucção: no ponto F, de 4 kPa no dia 24 a 1 kPa no dia 28; no ponto G, de 6,5 kPa no dia 23 a 2 kPa no dia 27; e no ponto H, de 7 kPa no dia 25 a 2,5 kPa no dia 27.</p> <p>No ponto G, após o dia 27, houve ganho de sucção de 4,5 kPa, e no ponto H, após o dia 28, houve ganho de sucção de 2 kPa.</p>
FEVEREIRO	Após dez dias com chuvas de intensidades menores de 10 mm, a sucção nos pontos A, B, C e D manteve-se. Após as chuvas de 32	Após dez dias com chuvas de intensidades menores de 10 mm, a sucção nos pontos E, G e H manteve-se em 1,5 kPa, 6 kPa e

	<p>mm do dia 38 (07 de fevereiro), e de 52 mm do dia 39 (08 de fevereiro), constatou-se perda de sucção de 1 kPa nos pontos A, B e C. No ponto D a perda de 1 kPa de sucção foi contínua ao longo de 16 dias.</p> <p>O ponto A, após 11 dias sem chuvas, recuperou 9 kPa de sucção. Os pontos B, C e D não apresentaram ganho significativo de sucção.</p>	<p>4,5 kPa, respectivamente. No ponto F, ocorreu diminuição de 0,5 kPa de sucção no dia 36 (05 de fevereiro), sem a ocorrência de chuvas, atribuindo-se a diminuição à redistribuição da água dentro do solo.</p> <p>A chuva de 32 mm do dia 38 (07 de fevereiro), e de 52 mm do dia 39 (08 de fevereiro) geraram perda de sucção, de 0,5 kPa no ponto E, 3 kPa no ponto G, e 2 kPa no ponto H.</p> <p>O ponto E, ganhou 8 kPa de sucção (de 2 kPa a 10 kPa), após 13 dias sem chuvas. Nos pontos F, G e H, mantiveram-se sucções de 3 kPa, 4 kPa e 6 kPa, respectivamente.</p>
MARÇO	<p>No ponto A, houve somente uma queda de sucção de 10,5 kPa a 8,5 kPa devido às chuvas de 17 mm, 71 mm e 19 mm dos dias 80, 81 e 82, respectivamente, referente aos dias 21, 22 e 23 de março.</p> <p>Devido à elevada sucção na profundidade do ponto A de 0,5 m, as chuvas não atingiram os pontos B, C e D, mesmo com intensidades maiores a 20 mm.</p>	<p>No ponto E, houve duas perdas de sucção, uma de 8 kPa a 6 kPa, no dia 73 (14 de março), devido à chuva de 22 mm, e outra de 6,5 kPa a 5 kPa, devido à chuva de 125 mm do dia 90 (31 de março). O ponto F, manteve-se com sucções de 2,5 kPa em m, ao longo do mês. O ponto G, teve perdas de sucção de 0,5 kPa, devido a chuvas com intensidades de 10 mm a 20 mm, e de 1 kPa, devido à chuva de 71 mm; houve também ganho de 4 kPa de sucção, após seis dias sem</p>

		chuvas. O ponto H, apresentou perda de sucção, de 6 kPa para 2 kPa, após quatro dias de ocorridas as chuvas de 71 mm e 19 mm, dos dias 81 e 82 (22 e 23 de março).
ABRIL	<p>Ao longo do mês, as sucções no ponto A manteve-se na média de 2 kPa. No começo do mês de abril, houve ganho de sucção de 1 kPa no ponto B, e 2 kPa nos pontos C e D.</p> <p>Os pontos B e C apresentaram perda contínua de sucção até o final do mês: no ponto B a sucção diminuiu de 5 kPa a 3 kPa, enquanto que no ponto C a sucção diminuiu de 7,5 kPa a 6,5 kPa. Provavelmente, esta diminuição foi devida à redistribuição da umidade.</p> <p>O ponto D manteve a sucção de 6 kPa ao longo do mês.</p>	<p>Os pontos E, F e G apresentaram perda de sucção de 1 kPa, no começo do mês, devido à chuva de 125 mm do dia 90 (31 de março). O ponto H, apresentou perda de sucção de 4 kPa. Após as perdas de sucção, o ponto E manteve-se na sucção média de 3 kPa ao longo do mês; o ponto F, apresentou perda contínua de sucção, de 2,5 kPa a 1 kPa. Provavelmente, a diminuição da sucção no ponto F, foi devida à redistribuição da umidade, porque a diminuição não foi observada no ponto E, localizado a um metro acima do ponto F.</p> <p>O ponto G, apresentou ganho de sucção de 3,5 kPa a 5 kPa; o ponto H, apresentou ganho de sucção de 5 kPa a 6 kPa.</p>
MAIO - JUNHO	<p>Durante o mês de maio, sem a presença de chuvas de intensidades maiores que 10 mm, observou-se que enquanto a sucção no ponto A cresceu, nos pontos B, C e D a sucção diminuiu. Este</p>	<p>O ponto E, manteve a sucção média de 3 kPa no mês de maio, no mês de junho houve ganho significativo de sucção (de 3,5 kPa</p>

	<p>comportamento de ganho de sucção no ponto A deu-se ao fato de estar localizado mais próximo à superfície, onde o efeito de retirada de água, produto da evapotranspiração, é maior, enquanto que nos pontos mais profundos ocorre perda de sucção, devido à redistribuição da umidade.</p> <p>No mês de junho, houve ganho de sucção de 1 kPa no ponto A e 2 kPa no ponto B. Já nos pontos C e D houve diminuição de sucção de 2 kPa e 1 kPa.</p>	<p>a 7 kPa em 13 dias), a sucção de 7 kPa manteve-se até o final do mês.</p> <p>O ponto F, manteve a sucção média de 1 kPa no mês de maio, e durante o mês de junho houve ganho de sucção de 0,5 kPa. O ponto G, ganhou 1 kPa de sucção ao longo do mês de maio e perdeu 0,5 kPa de sucção ao longo do mês de junho. O ponto H, ganhou 1 kPa de sucção desde o mês de maio até junho.</p>
JULHO	<p>Os pontos A, B, C e D tiveram sucções que oscilaram no intervalo de 5,5 kPa a 2 kPa. As perdas de sucção de 1 kPa foram ocasionadas pelas chuvas de 10 mm e ganhos de sucção entre 1 kPa a 1,5 kPa, foram identificadas após quatro dias sem chuvas. No ponto C, houve ganho atípico de 3 kPa de sucção no dia 207 (26 de julho).</p>	<p>A chuva de 12 mm do dia 185 (04 de julho), gerou ganhos de sucção de 1,5 kPa, 2,5 kPa e 1 kPa nos pontos F, G e H, respectivamente, enquanto, o ponto E, perdeu 2 kPa de sucção. As chuvas de 18 mm nos dias 195 e 196 (14 e 15 de julho), geraram perda de sucção de 3 kPa (entre os dias 197 a 201) no ponto E, 1 kPa (dia 199) no ponto F, e 6 kPa (dia 203) no ponto G. O ponto H, perdeu 4,5 kPa de sucção no dia 206 (25), atribuindo a perda não só ao avanço progressivo da sucção, mas também à chuva de 16 mm do dia 205 (24).</p> <p>As chuvas de 10 mm a 30 mm de intensidade do final do mês,</p>

		<p>mantiveram a sucção de 1 kPa no ponto E, diminuíram 1,5 kPa de sucção nos pontos F e G, enquanto o ponto H não foi atingido pelo efeito dessas chuvas.</p>
AGOSTO	<p>A chuva de 36 mm do dia 215 (03 de agosto), gerou diminuição de 1 kPa de sucção no ponto A. Nos pontos B, C e D houve diminuição da sucção devido às chuvas contínuas com intensidades maiores a 10 mm, começando no dia 226 (14 de agosto), onde o ponto B perdeu 1,5 kPa de sucção. O ponto C, entre os dias 226 a 229 (14 a 17 de agosto), perdeu 6 kPa de sucção e o ponto D perdeu 1,5 kPa de sucção no dia 231 (19 de agosto).</p> <p>Após o dia 231 (19 de agosto), constatada a última chuva de 17 mm, o ponto A começou ganhar sucção, enquanto que o ponto B começou perder sucção, em virtude da redistribuição da umidade.</p> <p>Os pontos C e D tiveram sucções de 6 kPa e 5,5 kPa.</p>	<p>A chuva de 36 mm, manteve a sucção de 1 kPa nos pontos E e F, gerou diminuição de sucção de 1,5 kPa no ponto G e de 5 kPa no ponto H.</p> <p>As chuvas contínuas com intensidades maiores a 10 mm que começaram no dia 226 (14 de agosto), geraram perda de sucção de 2 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 4 kPa no ponto G, e 5 kPa no ponto H.</p> <p>No dia 233 (21 de agosto), após o cese das chuvas, as sucções foram de 1 kPa no ponto E, 2 kPa no ponto F, 6,5 kPa no ponto G e 7,5 kPa no ponto H.</p>
SETEMBRO	<p>Entre os dias 250 a 260 (07 a 17 de setembro), foi observado comportamento atípico nos pontos A, B, C e D, pois, tiveram perdas de sucção de 1 kPa a 1,5 kPa, após</p>	<p>Os pontos E e F, apresentaram comportamentos similares. Na ausência de chuvas, aumentou a sucção, de 1 kPa para 4 kPa no ponto E e de 1,5 kPa para 5 kPa no</p>

	<p>chuvas de 3,5 mm. Devido às chuvas apresentar intensidades menores que a evapotranspiração, não deveriam ocasionar a diminuição da sucção.</p> <p>Chuvas de 49 mm e 37 mm nos dias 232 e 233 (20 e 21 de setembro), geraram perda de sucção de 1 kPa nos pontos A e B e de 1,5 kPa nos pontos C e D. No final do mês os pontos A e B tiveram sucções de 4 kPa e os pontos C e D tiveram sucções de 8 kPa e 7,5 kPa.</p>	<p>ponto F; com as chuvas de 49 mm e 37 mm dos dias 232 e 233 (20 e 21 de setembro), houve diminuição da sucção, no ponto E de 4 kPa a 2 kPa e no ponto F de 5 para 4 kPa.</p> <p>Os pontos G e H, apresentaram comportamento atípico, entre os dias 252 a 258 (09 a 15 de setembro), observou-se perda de sucção, sob chuvas de baixa intensidade. Já as chuvas dos dias 232 e 233, geraram diminuição da sucção, de 7 kPa a 5,5 kPa no ponto G e de 7,5 kPa a 5 kPa no ponto H.</p>
OUTUBRO	<p>As chuvas de 13 mm, 37 mm e 40 mm nos dias 280, 281 e 282 (07, 08 e 09 de outubro), geraram perdas de sucção de 1 kPa nos pontos A e B. No ponto C a sucção diminuiu 4,5 kPa no dia 286 (13 de outubro), e no ponto D a sucção diminuiu 4 kPa no dia 288 (15 de outubro).</p> <p>As chuvas de 74 mm e 11 mm dos dias 292 e 293 (19 e 20 de outubro), geraram diminuição de sucção, de 1 kPa nos pontos A e B, e de 3,5 kPa nos pontos C e D.</p>	<p>As chuvas dos dias 07 a 09 de outubro, geraram perdas de sucção: 1,5 kPa nos pontos E e F, nos dias 281 e 283, respectivamente, e 3 kPa no ponto G no dia 284. O ponto H, teve perda de sucção de 3 kPa, nos dias 275 a 278 (02 a 05 de outubro), no entanto, a perda foi gerada pela chuva de 33 mm do dia 270 (27 de setembro).</p> <p>As chuvas dos dias 292 e 293, geraram diminuição de sucção, de 1 kPa nos pontos E e F, e de 2 kPa nos pontos G e H.</p>

<p style="text-align: center;">NOVEMBRO</p>	<p>Com o aumento da intensidade e frequência das chuvas houve maior variação dos níveis de sucção.</p> <p>Os pontos A e B ganharam 3 kPa de sucção após três dias sem chuvas e perderam 3 kPa de sucção após chuvas de 26 mm e 39 mm, nos dias 309 e 310 (05 e 06 de novembro).</p> <p>Os pontos C e D ganharam 3,5 kPa de sucção após três dias sem chuvas.</p> <p>Chuvas de intensidades variáveis de 10 mm a 49 mm dos dias 316 a 318 (12 a 14 de novembro), geraram perda de sucção de 0,5 kPa no ponto A; 2,5 kPa no ponto B; 0,5 kPa no ponto C; e 1 kPa no ponto D. As sucções nos pontos A, B, C e D no final do mês foram de 1,5 kPa, 3,5 kPa e 6 kPa.</p>	<p>As chuvas dos dias 309 e 310, geraram perdas de sucção, de 3 kPa no ponto E e 1 kPa no ponto F; chuvas de intensidade de 10 mm a 45 mm, geraram perdas de sucção de 1 kPa nos pontos E e F.</p> <p>Os pontos G e H, perderam sucção contínua, do dia 310 (06 de novembro) até o dia 323 (19 de novembro), alcançando 2 kPa de sucção.</p> <p>Após o dia 323 houve ganho de sucção 5,5 kPa no pontos G e 6 kPa no ponto H, atingindo sucções de 8,5 kPa e 8 kPa, respectivamente.</p>
<p style="text-align: center;">DEZEMBRO</p>	<p>No dia 346 (12 de dezembro), após chuvas de 50 mm e 16 mm nos dias 342 e 343 (08 e 09 de dezembro), o ponto A perdeu 0,5 kPa de sucção. Após a chuva de 40 mm no dia 349 (15 de dezembro), os pontos B, C e D perderam 1,5 kPa de sucção nos dias 349, 351 e 354 (15, 17 e 20 de dezembro).</p> <p>No final do mês após duas chuvas de 37 mm dos dias 362 e 363 (28 e 29</p>	<p>As chuvas com intensidades de 15 mm a 45 mm, dos dias 336 a 338 (02 a 04 de dezembro), geraram perdas de sucção, de 0,5 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 3 kPa no ponto G e 5 kPa no ponto H. Após a chuva de 45 mm, os pontos E, F e G se mantiveram com sucções de 1,5 kPa, 3 kPa e 2,5 kPa, no entanto o ponto H ganhou 3,5 kPa de sucção.</p>

	de dezembro) a sucção no ponto A foi de 0,5 kPa, no ponto B e C as sucções foram de 3,5 kPa e no ponto D a sucção foi de 5,5 kPa.	A chuva de 40 mm, do dia 349 (15 de dezembro), gerou perda de sucção, de 2 kPa no ponto e 4 kPa no ponto H. Após a chuva de 40 mm, chuvas de intensidades maiores a 10 mm, geraram perdas de sucção, entre 4 kPa a 5 kPa, nos pontos G e H, no entanto, os pontos E e F não apresentaram perdas de sucção maiores a 2 kPa.
--	---	--

6.1.1.3 Encosta com inclinação de 50°

A Figura 6.8 e Figura 6.9 mostram a variação da sucção na encosta com inclinação de 50° da Serra de Cubatão ao longo do ano, para os pontos A, B, C, D, E, F, G e H seleccionados segundo o indicado na Tabela 4.1, sob o efeito da chuva do ano 1984.

Figura 6.8 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos A, B, C e D de um talude com 50° de inclinação

Figura 6.9 Variação da sucção ao longo do ano 1984 nos pontos E, F, G, H de um talude com 50° de inclinação.

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.8)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.9)
JANEIRO	<p>Nos pontos A, B, C e D, durante 20 dias sem chuvas, mantiveram-se as sucções de 4,5 kPa, 3,5 kPa, 5,5 kPa e 7,5 kPa, respectivamente.</p> <p>No ponto A, no dia 21, a chuva de 30 mm, gerou diminuição de sucção de 3 kPa. As chuvas de 76 mm no dia 22 e 100 mm no dia 23, não geraram perda de sucção, enquanto que a chuva de 50 mm, no dia 25, gerou a perda de 2 kPa de sucção.</p> <p>A perda de sucção devido às chuvas consecutivas, com intensidades maiores de 10 mm, no período de 21 a 27 de janeiro, geraram sucções de 2,5 kPa no ponto B, referente ao dia 24; 3 kPa no ponto C, referente ao dia 24; e 3 kPa no ponto D, referente ao dia 26.</p> <p>Após o dia 27, chuvas com intensidades menores de 10 mm geraram ganhos de sucção de 1 kPa nos pontos C e D.</p>	<p>Durante 20 dias sem chuvas, houve ganho de sucção, no ponto E, desde o dia 16 até o dia 20; no ponto F manteve-se a sucção de 2 kPa, e nos pontos G e H, mantiveram-se sucções de 4,5 kPa.</p> <p>As chuvas com intensidades maiores que 10 mm, no período de 21 a 27 de janeiro, geraram perda de sucção de 3 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 2 kPa no ponto G e 1 kPa no ponto H.</p> <p>Após o dia 27, chuvas com intensidades menores de 10 mm, geraram ganhos de sucção de 0,5 kPa no ponto F, 3 kPa no ponto G e 1 kPa no ponto H.</p>
FEVEREIRO	<p>Após dez dias com chuvas de intensidades menores de 10 mm, a sucção nos pontos A, B e C, manteve-se, e no ponto D, houve ganho de sucção de 2 kPa.</p>	<p>Após dez dias com chuvas de intensidades menores de 10 mm, a sucção nos pontos E, F, G e H manteve-se em 2 kPa, 2,5 kPa, 6,5 kPa e 5 kPa, respectivamente.</p>

	<p>Após as chuvas de 32 mm do dia 38 (07 de fevereiro), e de 52 mm do dia 39 (08 de fevereiro), constatou-se perda de sucção, de 3,5 kPa no ponto A e 1 kPa no ponto B. No ponto C, a perda de 2 kPa de sucção foi contínua, ao longo dos dias 38 a 59 (07 a 28 de fevereiro). No ponto D, a perda de 1 kPa de sucção foi contínua, no período dos dias 39 a 59 (08 a 28 de fevereiro)</p> <p>O ponto A, sem chuvas após o dia 42 (11 de fevereiro), ganhou 2 kPa de sucção até o dia 59 (28 de fevereiro). O ponto B, manteve a sucção de 1,5 kPa, no período dos dias 41 a 59 (10 a 28 de fevereiro).</p>	<p>A chuva de 32 mm do dia 38 (07 de fevereiro), e de 52 mm do dia 39 (08 de fevereiro) geraram perda de sucção, de 1 kPa nos pontos E e F. Nos pontos G e H, observou-se perda de sucção de 2 kPa e 0,5 kPa, nos dias 42 e 44 (11 e 13 de fevereiro), respectivamente.</p> <p>Após as perdas de sucção, nos pontos E e F, mantiveram-se sucções de 2,5 kPa. No ponto G, houve ganho contínuo de 0,5 kPa de sucção até o final do mês. O ponto H, devido provavelmente a uma redistribuição da umidade, apresentou perda contínua de 1 kPa de sucção.</p>
MARÇO	<p>No ponto A, houve ganho de sucção de 4 kPa a 12 kPa, devido à ausência de chuvas nos primeiros sete dias do mês. As chuvas maiores de 10 mm, geraram perda de 7,5 kPa, ao longo do mês.</p> <p>As chuvas isoladas maiores a 10 mm, não atingiram os pontos B, C e D, que apresentaram sucções de 2 kPa, 2,5 kPa e 4 kPa. Apenas no dia 82 (23 de março), com a chuva de 71 mm, houve perda de sucção de 0,5 kPa nos pontos B, C e D.</p>	<p>No ponto E, houve duas perdas de sucção, uma de 10 kPa a 4,5 kPa, no dia 67 (08 de março), devido à chuva de 17 mm; e outra perda de sucção de 4,5 kPa a 1,5, após as chuvas de 11 mm e 22 mm, dos dias 72 e 73 (13 e 14 de março)</p> <p>O ponto F, manteve-se com sucções na média de 3 kPa até o dia 79 (20 de março), no dia 80 (21 de março), a chuva de 17 mm, gerou perda de sucção de 0,5 kPa; após cinco dias, começou novamente o ganho de sucção.</p>

		<p>No ponto G, houve perda de 1 kPa de sucção, geradas por chuvas maiores a 10 mm.</p> <p>O ponto H, sem a ocorrência de chuvas em sete, teve ganho de sucção de 1,5 kPa, após apresentou perda contínua de sucção de 3 kPa.</p>
ABRIL	<p>Os pontos A, C e D, apresentaram perda de sucção, devido a chuvas com intensidades maiores a 10 mm, entre os dias 94 a 100 (04 a 10 de abril). O ponto A, perdeu 4 kPa de sucção, entre os dias 94 a 96 (04 a 06 de abril). O ponto C, perdeu 4 kPa de sucção, nos dias 98 e 99 (08 e 09 de abril). O ponto D, perdeu 4 kPa de sucção, entre os dias 100 e 101 (10 e 11 de abril).</p> <p>A chuva de 69 mm, do dia 115 (25 de abril), gerou a perda de sucção, de 2 kPa no ponto A, no dia 25 de abril; o ponto C, perdeu 2,5 kPa de sucção, no dia 117 (27 de abril); o ponto D, perdeu 2 kPa de sucção, entre os dias 118 a 120 (28 a 30 de abril).</p> <p>O ponto B, no começo do mês, já apresentava sucção de 1,5 kPa, portanto, as chuvas do começo do mês, não geraram perda de sucção. A chuva de 69 mm, do dia 115 (25 de abril), gerou perda de 1 kPa de sucção.</p>	<p>No começo do mês, devido à chuva de 125 mm do dia 90 (31 de março), os pontos E e F, apresentaram perda de sucção, de 1 kPa e 3 kPa, respectivamente.</p> <p>As chuvas de 54 mm e 20 mm, dos dias 94 e 95 (04 e 05 de abril), geraram perdas de sucção de 1 kPa, nos pontos E e F, nos dias 96 e 97 (06 e 08 de abril), respectivamente.</p> <p>Os pontos G e H, apresentaram perda de sucção de 3,5 kPa, nos dias 100 e 101 (10 e 11 de abril).</p> <p>Após as perdas de sucção, os pontos E, F, G e H, apresentaram ganho de sucção de 3 kPa em média.</p> <p>A chuva de 69 mm, do dia 115 (25 de abril), gerou perda de sucção, de 3 kPa em média, nos pontos E e</p>

		G; e de 2 kPa em média, nos pontos F e H.
MAIO – JUNHO- JULHO	<p>O ponto A, sem a ocorrência de chuvas de intensidades maiores a 10 mm, manteve a sucção de 3,5 kPa no mês de maio; no mês de junho, houve ganho de sucção, de 3,5 kPa para 4 kPa; no mês de julho, manteve-se a sucção de 4 kPa.</p> <p>O ponto B, nos meses de maio e junho, perdeu sucção, de 4 kPa para 3 kPa, devido provavelmente à redistribuição da umidade. No mês de julho, manteve-se a sucção de 3 kPa.</p> <p>O ponto C, no mês de maio, perdeu sucção, de 5 kPa para 4,5 kPa, devido provavelmente à redistribuição da umidade; nos meses de junho e julho, manteve-se a sucção de 4,5 kPa.</p> <p>O ponto D, nos meses de maio e junho, apresentou ganho de sucção, de 4,5 kPa para 6 kPa; no mês de julho, manteve-se a sucção de 6 kPa.</p>	<p>O ponto E, nos meses de maio e junho, manteve a sucção de 4 kPa. No dia 03 de julho, houve ganho de 1,5 kPa de sucção, após este ganho, a sucção manteve-se em média de 5,5 kPa.</p> <p>Nos meses de maio junho e julho, as sucções nos pontos F e G, mantiveram-se na média de 3,5 kPa no ponto F, e 5,5 kPa no ponto G.</p> <p>No mês de maio, o ponto H, apresentou perda de sucção, de 9 kPa a 6 kPa, ocasionada provavelmente, pela infiltração da água para maiores profundidades. Nos meses de junho e julho, manteve-se a sucção em média de 6 kPa.</p> <p>As chuvas maiores a 10 mm, dos dias 28 a 30 de julho, geraram perda de sucção, de 3 kPa no ponto E, e 2 kPa no ponto F.</p>
	As sucções de 4 kPa no ponto A, 3 kPa no ponto B, 4,5 kPa no ponto C, e 6 kPa no ponto D, se mantiveram até o dia 230 (18 de agosto).	A chuva de 36 mm, do dia 215 (03 de agosto), gerou perdas de sucção, de 1 kPa nos pontos E e G,

A G O S T O	<p>A chuva de 51 mm do dia 230 (18 de agosto), gerou perdas de sucção, de 3 kPa no ponto A; 1,5 kPa no ponto B, entre os dias 230 a 232 (18 a 20 de agosto); 3 kPa no ponto C, entre os dias 20 a 23 de agosto; e 2 kPa no ponto D, entre os dias 235 a 242 (23 a 30 de agosto). Nos pontos A, B e C, foram observados ganhos de sucção de 3,5 kPa, 2,5 kPa e 3 kPa, após as chuvas ter cessado.</p>	<p>de 1,5 kPa no ponto F, e de 2 kPa no ponto H.</p> <p>As chuvas contínuas com intensidades maiores a 10 mm que começaram no dia 226 (14 de agosto), geraram perdas de sucção de 2 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 1 kPa no ponto G e 2,5 kPa no ponto H.</p> <p>No dia 233 (21 de agosto), após o cese das chuvas, as sucções foram de 2,5 kPa no ponto E, 3,5 kPa no ponto F, 5 kPa no ponto G e 5 kPa no ponto H.</p> <p>A chuva de 37 mm, do dia 235 (23 de agosto), gerou perdas de sucção, de 1 kPa nos pontos E, F e G, e de 2 kPa no ponto H. Note-se que nos pontos E, G e H, a perda de sucção ocorreu em um ou dois dias, enquanto, no ponto F a perda de sucção, ocorreu de forma contínua</p>
S E T E M B R O	<p>Entre os dias 250 a 260 (07 a 17 de setembro), foi observado comportamento atípico nos pontos A, B, C e D, pois, tiveram perdas de sucção de 1 kPa a 1,5 kPa, após chuvas de 3,5 mm. Devido às chuvas apresentar intensidades menores que a</p>	<p>Os pontos E, F, G e H, apresentaram comportamento atípico, ao longo do mês, porque houve perdas e ganhos de sucção, entre os dias 243 até a 261 (01 a 18 de setembro), sem ocorrência de chuvas. Além disso, as chuvas de 49 mm e 37 mm dos dias 232 e 233</p>

	<p>evapotranspiração, não deveriam ocasionar a diminuição da sucção.</p> <p>Chuvas de 49 mm e 37 mm nos dias 232 e 233 (20 e 21 de setembro), não geraram perda de sucção nos pontos A, B e C, no entanto, o ponto H apresentou perda de sucção contínua de 1 kPa.</p>	<p>(20 e 21 de setembro), não geraram diminuição da sucção.</p>
OUTUBRO	<p>As chuvas de 13 mm, 37 mm e 40 mm nos dias 280, 281 e 282 (07, 08 e 09 de outubro), geraram perdas de sucção, de 2 kPa no ponto A e 1,5 kPa no ponto B. No ponto C, a sucção diminuiu 2 kPa, entre os dias 284 a 292 (11 a 19 de outubro). No ponto D, a sucção diminuiu somente no dia 292 (19 de outubro), devido muito provavelmente, não somente à chuva de 74 mm do dia 19 de outubro, se não também, às chuvas dos dias 280 a 282 (07 a 09 de outubro).</p>	<p>As chuvas dos dias 280 a 282 (07 a 09 de outubro), geraram perda de sucção de 1,5 kPa no ponto E, no dia 289 (16 de outubro). Após a chuva de 74 mm, do dia 292 (19 de outubro), houve perdas de sucção: 1 kPa nos pontos E e F, 3 kPa no ponto G, entre os dias 293 a 297 (20 a 24 de outubro), e 2,5 kPa no ponto H, entre os dias 296 a 298 (23 a 25 de outubro).</p>
NOVEMBRO	<p>Com o aumento da intensidade e frequência das chuvas houve maior variação dos níveis de sucção.</p> <p>Os pontos A e B, perderam 2,5 kPa e 1 kPa de sucção, após chuvas de 26 mm e 39 mm, nos dias 309 e 310 (05 e 06 de novembro).</p> <p>Chuvas de intensidades variáveis de 10 mm a 49 mm dos dias 316 a 318 (12 a 14 de novembro), geraram perda de</p>	<p>O ponto E, apresentou incremento de sucção, de 2 kPa para 8 kPa. As chuvas dos dias 309 e 310 (05 e 06 de novembro), geraram perdas de sucção, de 6 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 2,5 kPa no ponto G, e 2 kPa no ponto H. Chuvas de intensidades de 10 mm a 45 mm, intercaladas ao longo do mês, geraram perdas de sucção de 1</p>

	sucção de 2 kPa nos pontos A e B; 1,5 kPa no ponto C; e 2 kPa no ponto D.	kPa a 3 kPa, nos pontos E, F, G e H.
DEZEMBRO	<p>As chuvas com intensidades maiores a 10 mm, espalhadas ao longo do mês, geraram perdas de sucção, de 1,5 kPa nos pontos A e B, e de 3 kPa nos pontos C e D.</p> <p>No dia 346 (12 de dezembro), após chuvas de 50 mm e 16 mm nos dias 342 e 343 (08 e 09 de dezembro), o ponto A perdeu 1,5 kPa de sucção. Após a chuva de 40 mm no dia 349 (15 de dezembro), o ponto B, perdeu 2 kPa de sucção.</p> <p>No final do mês após duas chuvas de 37 mm dos dias 362 e 363 (28 e 29 de dezembro) as sucções nos pontos A, B e C, foram de 1 kPa. O ponto D apresentou, perda continua de sucção, do dia 349 a 365 (15 ao dia 31 de dezembro).</p>	<p>As chuvas com intensidades de 15 mm a 45 mm, dos dias 336 a 338 (02 a 04 de dezembro), geraram perdas de sucção, de 2,5 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto F, 1 kPa no ponto G e 3,5 kPa no ponto H. Após a chuva de 50 mm, do dia 342 (08 de dezembro), os pontos F e G, perderam 1 kPa de sucção, do dia 344 a 361 (10 a 27 de dezembro).</p> <p>O ponto H, manteve a sucção de 6 kPa. As chuvas dos dias 362 e 363 (28 e 29 de dezembro), de 37 mm de intensidade, geraram perdas de sucção, de 1,5 kPa no ponto E, 1 kPa no ponto G, e 0,5 kPa no ponto H.</p>

Com base na Figura 6.4 a Figura 6.9 observa-se que a camada mais próxima da superfície (0,5 a 1,5 m de profundidade), apresenta as maiores mudanças de sucção, já a camada localizada entre 1,5 e 2,5 m de profundidade, apresenta variações de sucção geradas pelo avanço progressivo da umidade, portanto, a queda ou o ganho da sucção acontece dias após de ocorridas as chuvas.

Nota-se também, diferença na variação da sucção, entre os pontos localizados na parte alta e baixa do talude, embora estejam localizados a uma mesma profundidade,

estes apresentam diferente comportamento, este fato foi observado principalmente, nos taludes com inclinações de 30° e 50° durante o mês de agosto, porém, este item será analisado mais adiante.

Pode também ser observado, na Figura 6.4 a Figura 6.9, que as maiores mudanças de sucção aconteceram nos meses de janeiro, fevereiro e março; ganhos de sucção de 12 kPa e 17 kPa, após 20 dias sem chuvas, foram observados nos pontos localizados na parte alta dos taludes com inclinações de 30° e 40°. As elevadas sucções caíram, depois de chuvas sucessivas, de 20 mm a 100 mm, no mês de janeiro de 1984.

Outro ganho claro de sucção, observou-se no mês de fevereiro, após 20 dias sem chuvas, com apenas duas chuvas menores que 50 mm. No mês de março, a chuva de 70 mm de intensidade, precedida por chuvas isoladas de 20 mm, geraram perda de 10 kPa de sucção. No talude com inclinação de 50°, não foram observadas ditas variações bruscas da sucção.

No que diz respeito às chuvas, intensidades maiores a 40 mm, após períodos prolongados sem chuvas (20 dias em média), geraram variações bruscas de sucção, na profundidade de 0,50 m. As mesmas chuvas, quando acontecidas depois de períodos curtos sem a ocorrência de chuvas, atingiram maiores profundidades, gerando variação da sucção, nas camadas localizadas a maior profundidade.

Ao longo do mês de setembro, foi observado um comportamento atípico em quase todos os taludes, este fato pode ser atribuído à redistribuição de umidade, que acontece após o período de chuvas, ou devido à variação numérica.

6.1.1.4 Chuva acumulada

Na Figura 6.10 e Figura 6.11, são apresentadas as variações das pressões neutras ao longo do ano 1984, para a encosta com inclinação de 40°, com os acumulados das chuvas de dois, três e quatro dias, com o objetivo de avaliar a influência das chuvas antecedentes. Cabe destacar que o comportamento sob chuvas acumuladas, é similar nas encostas com inclinações de 30° e 50°.

Na Figura 6.10 a queda da sucção de 15 kPa para 2 kPa, no ponto A, em janeiro de 1984, pode ser melhor avaliada sob a influência da chuva de 265 mm, acumulada em

quatro dias; outra queda de sucção, devido à chuva acumulada de 165 mm em 4 dias, foi observada em abril de 1984, mudando a sucção de 8 kPa para 2 kPa. As chuvas acumuladas, iguais ou menores a 100 mm/4dias, não geram maior variação da sucção, em pontos localizados a 0,50 m de profundidade; já nos pontos a 1,5, a 3,5 de profundidade, são necessárias chuvas acumuladas com maior intensidade, para gerar valores mínimos de sucção.

Figura 6.10 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias, na variação da pressão neutra do ponto A, do talude com inclinação de 40°, no ano 1984

Figura 6.11 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto B do talude com inclinação de 40°

Fazendo uma avaliação mais detalhada do papel das chuvas acumuladas, durante o mês de janeiro de 1984, nos pontos A, B, C e D, da encosta com inclinação de 30° (Figura 6.12), observa-se que a chuva acumulada de 106 mm em 48 horas, do dia 22, gerou diminuição da sucção até valores próximos de 3,8 kPa, mas o menor valor de sucção é observado após a chuva acumulada de 237,1 mm em 4 dias (24 de janeiro).

Na Figura 6.12, observa-se também o avanço progressivo da umidade ao longo da profundidade, assim no dia 21 de janeiro, com a chuva de 30 mm, a queda de sucção acontece logo em seguida no ponto A (0,50 m). No ponto B (1,5m), a queda da sucção acontece no dia 25, com a chuva acumulada de 265 mm em 4 dias. No ponto C (2,5m), a queda da sucção acontece no dia 26, com a chuva acumulada de 205 mm em 4 dias. No ponto D (3,5m), a queda de sucção acontece no dia 27, com 118 mm de chuva acumulada em 4 dias. O mesmo comportamento apresentaram os pontos A, B, C e D do talude com inclinação de 40° .

Figura 6.12 Influência da chuva acumulada em quatro dias durante o mês de janeiro de 1984, no talude com inclinação de 30°

Nos dias 21 a 29 de janeiro (Figura 6.12), observa-se a influência do nível de sucção do solo antes de acontecer a chuva, assim quando o solo se encontra com umidade

maior, um novo evento de chuva infiltrará com maior facilidade no solo, atingindo camadas de solo mais profundas; no entanto, quando a sucção é maior, o avanço da frente de umedecimento irá evoluir mais lentamente, devido ao processo de distribuição da umidade ao longo da superfície, que ocorre logo após da chuva atingir a superfície do solo.

6.1.1.5 Localização dos pontos

Na Figura 6.13 a Figura 6.15, apresentam-se comparações, entre os pontos localizados em duas posições diferentes no talude (porção alta e baixa do talude), em diferentes profundidades (0,5; 1,5; 2,5 e 3,5 m), dos taludes com 30°, 40° e 50° de inclinação. Isto foi feito para avaliar a influência da chuva no processo de infiltração, ao longo da profundidade, segundo a localização na encosta.

Observa-se que o comportamento ao longo do tempo, para os pontos localizados na alta ou na baixa encosta são muito variáveis, mas podem ser observados trechos, onde dito comportamento é claramente visível. Por exemplo, um talude com inclinação de 30° (Figura 6.13), o ponto A, localizado na porção alta do talude, na estação chuvosa, perde mais sucção do que o ponto E, mas nos meses de julho e agosto, pertencentes à estação seca, o ganho de sucção é maior do que o ponto E, sendo que ambos pontos estão localizados a 0,50 m de profundidade.

Observando os valores de sucção, dos pontos B e F (Figura 6.13), localizados a 1,5 m de profundidade, nota-se que as sucções do ponto B, da parte alta da encosta, apresentaram sucções menores que o ponto F, da parte baixa da encosta, porém os valores de sucção, ficaram muito próximos ao longo do ano. Em pontos localizados a maiores profundidades, como os pontos C, D, G e H, as sucções foram menores, nos pontos localizados na porção baixa do talude (G e H), durante os meses de fevereiro e março, após as chuvas de janeiro de 1984; nos meses de abril a junho, as sucções foram maiores no ponto G, do que as sucções no ponto C.

No talude com inclinação de 40° (Figura 6.14), a diferença da sucção entre os pontos da porção alta e baixa do talude, é mais notável no período com poucas chuvas, por exemplo, no mês de março, o ponto A localizado na alta encosta, apresenta maior valor de sucção do que o ponto E, localizado na porção baixa, estes valores são invertidos ao longo da profundidade, portanto os pontos localizados na porção baixa

(F, G e H), apresentam maiores valores de sucção, porém, a diferença entre os pontos da alta e baixa encosta não ultrapassam os 4 kPa.

No talude com inclinação de 50° (Figura 6.15) os valores de sucção dos pontos localizados na alta e na baixa encosta apresentam valores muito próximos durante o período seco e a diferença entre os pontos mesmo no período chuvoso não ultrapassa os 2 kPa ao igual que no caso do talude com 30° de inclinação.

Observando a variação da posição dos pontos, e lembrando que existem variações que decorrem da aproximação numérica ou da escolha dos pontos avaliados; pode-se concluir, que não há grandes diferenças, entre a distribuição da sucção ao longo da encosta.

Figura 6.13 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 30°

Figura 6.14 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°

Figura 6.15 Influência da posição dos pontos localizados, na porção alta e baixa do talude com inclinação de 50°

Na Figura 6.16 e Figura 6.17, foi avaliada a influência da inclinação da encosta, para isso, foram plotadas as sucções nos pontos localizados na mesma profundidade, das encostas com inclinação de 30° , 40° e 50° .

Observa-se que as sucções nos pontos A, B, C e D, apresentaram valores muito próximos, mesmo pertencendo a encostas com diferente inclinação. A variação da sucção, em encostas com diferente inclinação, encontra-se na faixa de 2 kPa a 4 kPa.

Visto que, não há uma relação clara, da sucção com inclinação da encosta, não foi possível definir a influência da inclinação da encosta, na variação da sucção.

Figura 6.16 Influência do ângulo de inclinação do talude nos pontos A e B

Figura 6.17 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos C e D.

Na Figura 6.18 a Figura 6.20, apresentam-se, valores médios da variação da sucção com a profundidade, ao longo do ano 1984. Observa-se que a sucção cresce ao longo da profundidade, comportamento que reflete a característica da camada rochosa fraturada, que permite maior drenagem da água, tal como medido experimentalmente por Wolle (1988).

Figura 6.18 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 30°

Figura 6.19 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 40°

Figura 6.20 Variação da sucção ao longo da profundidade para o talude com inclinação de 50°

O comportamento de acréscimo da sucção com a profundidade é observado nas diferentes inclinações dos talude analisados. As menores sucções acontecem nos meses de novembro, dezembro, janeiro e março onde ocorreram chuvas de 450 mm, 355, 356 e 327 mm, respectivamente. Foi observado que, por exemplo, as chuvas de novembro geraram a queda da sucção, primeiro no talude com inclinação de 30° (menos íngreme), a queda da sucção prolonga-se, devido às chuvas de maior frequência e intensidade, do mês de dezembro.

No talude com inclinação de 30°, percebeu-se que as chuvas geraram a diminuição da sucção, até a profundidade de 1,5 m, enquanto nos talude com inclinações de 40° e 50°, a chuva gerou a queda de sucção, somente até a profundidade de 1,0 m. Fica evidente que o regime de precipitações da Serra de Cubatão, manteve o solo com sucções baixas, ao longo do ano.

6.1.1.6 Variação da sucção em janeiro de 1985 e no mês antecedente.

Na Figura 6.21 a Figura 6.26, estão apresentadas, as variações da sucção, ao longo do mês de dezembro de 1984 (mês antecedente aos escorregamentos generalizados), e no mês de janeiro de 1985. Chuvas com intensidade abaixo dos 50 mm/dia ocorreram isoladamente, embora provocassem mudanças nos valores de sucção, na camada de solo coluvionar, não a levaram à saturação. No mês de janeiro

de 1985, as chuvas com intensidade na média de 40 mm/dia, geraram mudanças significativas de sucção, apenas na camada de solo coluvionar, porém, a infiltração gerou redução progressiva da sucção, na camada de solo saprolítico.

Chuvas de intensidades menores a 10 mm/dia, no período 16 a 27 de dezembro de 1984, geraram sucções entre 3 e 4 kPa, no entanto, as chuvas dos dias 28 e 29 de dezembro, de aproximadamente 40 mm/dia, precedidas por 11 dias secos geram queda da sucção até o valor de 2 kPa, isso devido a que a influência da evapotranspiração é maior do que a infiltração; assim as chuvas dos dias 2 e 3 de janeiro de 1985 produziram maior efeito na perda de sucção, devido à influência da chuva precedente, dos dias 28 e 29 de dezembro.

As chuvas em torno de 60 mm/dia dos dias 9 e 21 de janeiro de 1985, geraram maior influência no comportamento da sucção no entanto mesmo sendo precedidas por chuvas de entre 20 e 30 mm/dia ainda não geraram a saturação da superfície do talude.

No talude com inclinação de 30°, os valores de sucção na porção alta do talude, foram anulados com a chuva de 60 mm do dia 21 de janeiro, esta sucção baixa, se manteve devido à chuva extrema do dia 23 de janeiro, enquanto, na porção baixa do talude, a sucção foi anulada após a chuva de 159,5 mm do dia 23 de janeiro (Figura 6.21 e Figura 6.22).

Figura 6.21 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.

Figura 6.22 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985

Analisando a Figura 6.23, percebe-se que no talude com inclinação de 40° , a chuva de 159,5 mm, do dia 23 de janeiro de 1985, gerou perda de sucção a 0,5 m de profundidade, logo após de ocorrida a chuva; a baixa sucção, se manteve durante o dia 24, devido à chuva de 117,6 mm. A infiltração da água proveniente da chuva, atingiu a profundidade de 1,5m, no segundo dia após a chuva extrema de 159,5 mm. Foram esses eventos de chuva, os que levaram à anulação da sucção no solo, e muito provavelmente, foram os eventos deflagradores, dos escorregamentos nos taludes da região, mas a avaliação da influência desses eventos de chuva, na estabilidade do talude será feita no próximo item.

Os valores de sucção na porção baixa, do talude com inclinação de 40° foram anulados, logo após de acontecida a chuva extrema de 159,5 mm tanto na camada de solo coluvionar como na camada de solo saprolítico (Figura 6.24).

Figura 6.23 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 40° , no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.

Figura 6.24 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.

Na porção alta do talude, com inclinação de 50° (Figura 6.25), a sucção durante o mês de dezembro de 1984, manteve sucções de 1 kPa a 3,5 kPa, em janeiro de 1985, a chuva de 60 mm, gerou a anulação da sucção, na camada de solo coluvionar, nos primeiros 0,50 m de profundidade; a perda de sucção, na camada de solo saprolítico, na profundidade de 1,50 m, gerou-se pelo efeito da chuva extrema, do dia 23 de janeiro.

Na porção baixa do talude (Figura 6.26), a anulação da sucção, dos primeiros 0,50 m de profundidade, ocorreu devido à chuva de 159,5 mm, porém, não ocorreu a anulação da sucção, na profundidade de 1,5 m; a eliminação da sucção, na camada de solo saprolítico, ocorreu após as chuvas de 159,5 mm e 118 mm, dos dias 23 e 24 de janeiro.

Figura 6.25 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 50°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.

Figura 6.26 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 50°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 1985.

Como foi observado na Figura 6.21, quando a quantidade de chuva, é menor que 20 mm/dia, as condições de evapotranspiração, exercem maior influência sobre a superfície do talude.

O fato da perda da sucção ocorrer primeiro nos pontos localizados na porção alta do talude, e depois nos pontos localizados na parte baixa do talude, é um fator que poderia sugerir que os escorregamentos superficiais, poderiam ter ocorrido primeiro na porção alta do talude, porém, este fato será confrontado nas análises de estabilidade de talude do próximo item.

As análises feitas no programa SEEP/W mostram que embora o fluxo não seja uniforme pode ser observado o fluxo predominantemente vertical, promovendo uma zona de saturação próxima à superfície do talude, avançando à medida que a profundidade aumenta, como mostra a Figura 6.27.

Figura 6.27 Sentido do fluxo no talude da Serra de Cubatão

6.1.2 Fator de segurança ao longo do tempo

O cálculo do fator de segurança, foi feito admitindo que o talude é infinito e empregando a equação 5.3, para levar em consideração a variação da sucção. Na

Figura 6.28, Figura 6.29 e Figura 6.30 estão apresentados, os resultados do cálculo do fator de segurança, para os taludes com inclinação de 30°, 40° e 50°.

Como era de esperar, no talude com inclinação de 30°, o fator de segurança se mantém acima da unidade, ao longo do mês de janeiro de 1985 (Figura 6.28), no dia em que acontecem as chuvas extremas (23 e 24 de janeiro), o fator de segurança sofreu uma brusca queda, porém, o talude não escorregou.

Figura 6.28 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 30°

No caso do talude com inclinação de 40°, o talude se mantém estável até o dia 22 de janeiro de 1985, já no dia 23 de janeiro, em que aconteceu o evento de chuva extrema (159,5 mm), o fator de segurança atingiu a unidade, portanto o talude escorregou (Figura 6.29). Cabe destacar, que os escorregamentos generalizados, na Serra de Cubatão, aconteceram exatamente no dia 23 de janeiro.

Figura 6.29 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 40°

Segundo os resultados obtidos, para o talude com 50° de inclinação (Figura 6.30), no dia 23 de janeiro, exatamente no dia em que acontecem as chuvas extremas, o fator de segurança é menor que a unidade, portanto, aconteceu a instabilidade, porém, nos taludes mais íngremes, os parâmetros de resistência costumam ser maiores, neste caso o fator de segurança, atingiria a unidade, se o ângulo de atrito fosse de 45°, ou se tivesse coesão efetiva, maior que 1 kPa.

Figura 6.30 Variação do fator de segurança ao longo do mês de janeiro de 1985, para um talude com inclinação de 50°

Com os resultados do fator de segurança pode ser dito que os taludes mais íngremes são mais vulneráveis de sofrer escorregamentos, resultados concordantes, com os apresentados por Lopes et al. (2007), que mostraram, maior numero de cicatrizes de escorregamentos, em encostas com declividade de 35° a 40°.

Outra análise a ser considerada, é se os escorregamentos, aconteceram primeiro na porção alta ou na porção baixa do talude. Para isso foram elaboradas a Figura 6.31 e Figura 6.32, onde se observa que o fator de segurança tanto na porção alta do talude, como na porção baixa, não garantem mais a estabilidade do talude, no dia 23 de janeiro, ocorrendo o escorregamento ao longo de toda a superfície do talude. No caso do talude com inclinação de 50°, o escorregamento poderia ter acontecido, primeiro na porção baixa do talude, indicando que o escorregamento, aconteceu na condição não saturada, inclusive dois dias antes da chuva extrema do dia 23, após a chuva de 60 mm do dia 21 de janeiro.

Figura 6.31 Variação do fator de segurança em janeiro de 1985 na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°

Figura 6.32 Variação do fator de segurança em janeiro de 1985 na porção alta e baixa do talude com inclinação de 50°

6.2 Região Serrana do Rio de Janeiro

Os resultados das análises de infiltração e estabilidade para a Região Serrana do Rio de Janeiro, estão apresentados nos seguintes dois itens.

6.2.1 Perfis de sucção

Para alcançar o primeiro objetivo, de obter a distribuição da pressão neutra inicial ao longo da encosta, foi seguido o procedimento numérico, apresentado por Cardoso e Futai (2009), baseado em ciclos de análise numérica, sob a aplicação da chuva representativa, da média histórica do período 2002 a 2011.

A distribuição da pressão neutra inicial no talude, é considerada representativa, uma vez alcançada a convergência dos valores de pressão neutra, durante dois ou mais ciclos consecutivos.

Segundo o estudo das chuvas, no período 2002 a 2011, a chuva representativa da média histórica, corresponde à chuva do ano 2005, como indicado no 4.2.3. Um vez obtida a distribuição da sucção inicial, será aplicada a chuva do ano 2010 e finalmente será analisada a variação da sucção ou pressão neutra, sob a chuva do mês de janeiro

de 2011, em que ocorreram os escorregamentos translacionais rasos, considerados catastróficos, na Região Serrana do Rio de Janeiro.

No primeiro ciclo de análise numérica, feito com o programa SEEP/W, o talude foi considerado na condição de equilíbrio, com o nível da água como indicado na figura do item 4.2.2, nos seguintes ciclos, as condições iniciais, foram as fornecidas pelos resultados da análise antecedente, até alcançar a convergência dos valores de sucção.

O número de ciclos varia para cada inclinação dos taludes; as inclinações analisadas são a de 20°, que como indicado por Avelar et al. (2011), ocorre com maior frequência na região; 30° de inclinação média e, 40° de inclinação maior. O número de ciclo foi alcançado após 10 repetições, no caso do talude com inclinação de 20°; 9 ciclos, no talude com inclinação de 30°; e 10 ciclos, no talude com inclinação de 40°.

Na Figura 6.33 é mostrado um exemplo para o talude com inclinação de 30°, de como foram realizadas as análises dos ciclos, para a obtenção da condição inicial, de cada caso de inclinação do talude, nos pontos A, B, C e D, pertencentes à porção alta da encostas, detalhados na Tabela 4.3.

Como observado na Figura 6.33, a partir do ciclo número 9, os valores de pressão neutra atingiram a convergência, não sendo observadas variações bruscas das pressões neutras, nos ciclos seguintes. Assim no caso do talude com inclinação de 30°, foram escolhidos os resultados do ciclo 9, como a distribuição da pressão neutra inicial.

Figura 6.33 Exemplo do procedimento numérico baseado em ciclos, para a obtenção da distribuição da sucção inicial, para o talude com inclinação de 30° da Região Serrana do Rio de Janeiro

Na Figura 6.34, está apresentado o resultado da variação da pressão neutra ao longo do ano, para o caso do talude com inclinação de 30° , observa-se que a média dos valores de sucção variam desde 60 kPa até valores próximos a 0 kPa em períodos chuvosos (novembro a outubro), e entre 60 kPa e 160 kPa em períodos com poucas chuvas (abril a setembro). Observa-se também que as maiores variações da pressão neutra ocorreram nos pontos A e B, que estão mais próximos da superfície, localizados a 0,50 e 1,5 m de profundidade.

Figura 6.34 Variação da pressão neutra obtida na iteração número 9 do exemplo analisado.

Em concordância com o indicado no item 3.2.3 e Figura 4.12, durante o processo de iteração o nível da água varia segundo o regime das precipitações, ficando localizado no pé da encosta. Os resultados indicam uma possível infiltração de água advinda do topo da encosta, que infiltra através da parte média e baixa da encosta e que estabelece o nível da água.

6.2.1.1 Encosta com inclinação de 20°

A Figura 6.35 e Figura 6.36, mostram a variação da sucção ao longo do ano 2010, para os pontos A, B, C, D, E, F, G e H, detalhados na Tabela 4.3. Para a realização das análises, foram empregados dados de chuvas do ano 2010.

Figura 6.35 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 20° de inclinação

Figura 6.36 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 20° de inclinação.

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.35)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.36)
JANEIRO	<p>Com a chuva de 31 mm do dia 06, a sucção caiu de 39 kPa para 29 kPa, no ponto A, e de 30 kPa para 22 kPa, no ponto B. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 53 kPa para 29 kPa, no ponto A, e de 43 kPa para 15 kPa no ponto B. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou diminuição da sucção, de 42 kPa para 17 kPa no ponto A, e de 33 kPa para 11 kPa, no ponto B.</p> <p>Nos pontos A e B, após ter cessado as chuvas, houve tendência de ganho de sucção.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram as sucções de 24 kPa e 22 kPa, respectivamente.</p>	<p>A chuva de 31 mm do dia 06, gerou a queda da sucção, de 25 kPa para 18 kPa, no ponto E, e de 15 kPa para 10 kPa no ponto F. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 33 kPa para 17 kPa, no ponto E, e de 23 kPa para 9 kPa, no ponto F. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou queda da sucção, de 26 kPa para 11 kPa no ponto E, e de 17 kPa para 4 kPa no ponto F.</p> <p>A sucção nos pontos E e F, cresceu após ter cessado as chuvas.</p> <p>O ponto G, manteve sucção de 10 kPa, com as chuvas de 56 mm do dia 15 e de 72 mm do dia 26, houve perda de 2,5 kPa de sucção.</p> <p>O ponto H, manteve a sucção de 10 kPa, ao longo do mês.</p>

FEVEREIRO	<p>A ausência de chuvas maiores aos 10 mm, gerou o ganho de sucção, de 32 kPa para 73 kPa no ponto A, e de 32 kPa para 63 kPa no ponto B. Após a chuva de 105 mm, a sucção diminui para 30 kPa no ponto A e para 20 kPa no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, apresentaram sucção de 22 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>O ponto E, após 18 dias sem chuvas, teve crescimento da sucção, de 23 kPa para 43 kPa. A chuva de 27 mm, gerou perda de 44 kPa para 30 kPa, a chuva de 105 mm, gerou perda de 30 kPa para 15 kPa.</p> <p>No ponto F, a sucção cresceu de 14 kPa para 35 kPa, após 18 dias sem chuva. A chuva de 27 mm gerou perda de sucção de 35 kPa para 15 kPa.</p> <p>O ponto G, manteve sucção de 5 kPa e o ponto H, manteve sucção de 10 kPa.</p>
MARÇO	<p>A ocorrência de chuvas com intensidade de entre 10 mm a 40 mm, gerou perdas de sucção de entre 10 kPa a 20 kPa, nos pontos A e B.</p> <p>O ponto C, teve sucção de 17 kPa em média, o ponto D, teve sucção de 22 kPa ao longo do mês.</p>	<p>Nos pontos E e F, as chuvas de entre 10 mm a 40 mm, geraram maiores oscilações da sucção, porém, numa menor amplitude de valores.</p> <p>No ponto E, a sucção variou no intervalo de 15 kPa a 20 kPa, no ponto F, a sucção variou no intervalo de 5 kPa a 10 kPa.</p> <p>Os pontos G e H, mantiveram sucções, na média de 2,5 kPa.</p>

ABRIL	<p>A pouca frequência e intensidade das chuvas, provocou que a sucção nos pontos A e B, continuaram crescendo, de 25 kPa para 71 kPa, no ponto A, e de 15 kPa para 61 kPa, no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram sucções de 15 kPa e 22 kPa, respectivamente.</p>	<p>A sucção nos pontos E e F, cresceram, de 14 kPa para 42 kPa, no ponto E, e de 6 kPa para 32 kPa no ponto F.</p> <p>Nos pontos G e H, a sucção diminuiu, de 1 kPa, no começo do mês, para 5 kPa, no final do mês.</p>
MAIO	<p>As chuvas de entre 10 mm a 20 mm, geraram nos ponto A e B, perdas de sucção menores a 5 kPa. A sucção no ponto A, foi de 73 kPa, no começo do mês, a 99 kPa, no final no mês. No ponto B, a sucção no começo do mês, foi de 63 kPa para 89 kPa, no final do mês.</p> <p>Os ponto C e D, mantiveram sucções de 15 kPa e 22 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>Nos pontos E e F, as sucções tendem a crescer, quando não ocorrem chuvas. Com chuvas maiores a 10 mm, ocorreram perdas de 10 kPa de sucção.</p> <p>O ponto G, manteve a sucção de 7,5 kPa. O ponto H, manteve a sucção de 4 kPa.</p>
JUNHO - SETEMBRO	<p>A baixa intensidade e frequência de chuvas, gerou crescimento da sucção. No ponto A, de 100 kPa para 236 kPa. No ponto B, de 89 kPa para 225 kPa.</p> <p>O ponto C, ganhou sucção, de 14 kPa para 22 kPa. O ponto D, manteve a sucção de 20 kPa, ao longo destes meses.</p>	<p>Observou-se acréscimo da sucção, de 48 kPa para 70 kPa, no ponto E, e de 38 kPa para 51 kPa, no ponto F.</p> <p>A sucção no ponto G, aumentou apenas 4 kPa, e 2 kPa no ponto H.</p>

OUTUBRO	A ocorrência de chuvas maiores a 10 mm, geraram diminuição da sucção; no ponto A, diminuiu de 250 kPa para 200 kPa, no ponto B, diminuiu de 225 kPa para 170 kPa. Os pontos C e D, mantiveram a sucção de 22 kPa, ao longo do mês.	No ponto E, a sucção mudou de 65 kPa para 45 kPa. No ponto F, a sucção diminuiu, de 50 kPa para 45 kPa. Ao longo do mês, o ponto G, manteve a sucção de 15 kPa, e no ponto H, manteve-se a sucção de 8 kPa.
NOVEMBRO	Com o aumento da intensidade e frequência das chuvas, as sucções começaram diminuir. No ponto A, de 140 kPa para 38 kPa, no ponto B, de 152 kPa para 26 kPa. O ponto C, manteve a sucção de 25 kPa, e o ponto H, manteve a sucção de 22 kPa.	Nos pontos E e F, houve maior oscilação da sucção, chuvas de 30 mm, geraram perdas de 10 kPa, chuvas menores de 20 mm, geraram perda de 5 kPa de sucção. O ponto G, manteve a sucção de 15 kPa, o ponto H, manteve sucção de 8,5 kPa.
DEZEMBRO	Os ponto A e B, quando aconteceram chuvas com intensidades maiores a 10 mm, apresentaram perdas de sucção de 10 kPa. No começo do mês, a sucção no ponto A foi de 38 kPa, e 10 kPa no final do mês. No ponto B, a sucção no começo do mês foi de 31 kPa e de 5 kPa no final do mês. O ponto C, diminuiu de sucção, de 26 kPa para 12 kPa. O ponto D, manteve a sucção de 22 kPa, ao longo do mês.	Os pontos E e F, apresentaram perdas de sucção menores a 5 kPa, com chuvas de entre 10 mm a 40 mm, e de 10 kPa, com chuvas maiores a 40 mm. A sucção diminuiu, no ponto E, de 22 kPa para 7 kPa; no ponto F, de 18 kPa para 5 kPa. A sucção no ponto G, diminuiu de 14 kPa para 2 kPa. No ponto H, a sucção diminuiu, de 9 kPa para 1,5 kPa.

6.2.1.2 Encosta com inclinação de 30°

Figura 6.37 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 30° de inclinação

Figura 6.38 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 30° de inclinação

Analisando o talude com 30° de inclinação observa-se comportamento similar ao observado no talude com inclinação de 20°, a diminuição da sucção é notável nos meses com chuvas maiores que 50 mm, especificamente de dezembro a março.

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.37)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.38)
JANEIRO	<p>Com a chuva de 31 mm do dia 06, a sucção caiu de 33 kPa para 22 kPa, no ponto A, e de 25 kPa para 15 kPa, no ponto B. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 49 kPa para 16 kPa, no ponto A, e de 40 kPa para 16 kPa no ponto B. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou diminuição da sucção, de 39 kPa para 16 kPa no ponto A, e de 31 kPa para 5 kPa, no ponto B.</p> <p>Nos pontos A e B, após ter cessado as chuvas, houve tendência de ganho de sucção.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram em média, sucções de 8,5 kPa e 10 kPa, respectivamente.</p>	<p>A chuva de 31 mm do dia 06, gerou a queda da sucção, de 19 kPa para 12 kPa, no ponto E, e de 11 kPa para 6 kPa no ponto F. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 31 kPa para 6 kPa, no ponto E, e de 23 kPa para 6 kPa, no ponto F. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou queda da sucção, de 24 kPa para 7 kPa no ponto E, e de 16 kPa para 5 kPa no ponto F.</p> <p>A sucção nos ponto E e F, cresceu após ter cessado as chuvas.</p> <p>O ponto G, manteve sucção média de 3,5 kPa. O ponto H, manteve sucção média de 2,5 kPa, ao longo do mês.</p>

FEVEREIRO	<p>A ausência de chuvas maiores aos 10 mm, gerou ganho de sucção, de 29 kPa para 90 kPa no ponto A, e de 22 kPa para 85 kPa no ponto B. Após a chuva de 105 mm, a sucção diminui para 30 kPa no ponto A e para 23 kPa no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, apresentaram sucção de 10 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>O ponto E, após 18 dias sem chuvas, teve crescimento da sucção, de 17 kPa para 44 kPa. A chuva de 27 mm, gerou perda de 44 kPa para 34 kPa, a chuva de 105 mm, gerou perda de 34 kPa para 18 kPa.</p> <p>No ponto F, a sucção cresceu de 10 kPa para 36 kPa, após 18 dias sem chuva. A chuva de 27 mm gerou perda de sucção de 34 kPa para 14 kPa.</p> <p>O ponto G, manteve sucção média de 5 kPa e o ponto H, manteve sucção média de 3 kPa.</p>
MARÇO	<p>A ocorrência de chuvas com intensidade de entre 10 mm a 40 mm, gerou perdas de sucção de entre 10 kPa a 20 kPa, nos pontos A e B.</p> <p>O ponto C, teve sucção de 5 kPa em média, o ponto D, teve sucção de 7,5 kPa em média.</p>	<p>Nos pontos E e F, as chuvas de entre 10 mm a 40 mm, geraram oscilações da sucção, com perdas e ganhos de 5 kPa a 10 kPa.</p> <p>No ponto E, a sucção variou no intervalo de 10 kPa a 20 kPa, no ponto F, a sucção variou no intervalo de 5 kPa a 15 kPa.</p> <p>Os pontos G e H, mantiveram sucções, na média de 2,5 kPa.</p>

ABRIL	<p>A pouca frequência e intensidade das chuvas, provocou que a sucção nos pontos A e B, continuaram crescendo, de 21 kPa para 79 kPa, no ponto A, e de 15 kPa para 70 kPa, no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram sucções de 7,5 kPa e 4,5 kPa, respectivamente.</p>	<p>A sucção nos pontos E e F, cresceram, de 11 kPa para 51 kPa, no ponto E, e de 4 kPa para 45 kPa no ponto F.</p> <p>No ponto G, a sucção cresceu, de 1 kPa para 6 kPa, e no ponto H, a sucção manteve-se, na média de 2,5 kPa.</p>
MAIO	<p>As chuvas de entre 10 mm a 20 mm, geraram nos ponto A e B, perdas de sucção menores a 5 kPa. A sucção no ponto A, foi de 80 kPa, no começo do mês, a 90 kPa, no final no mês. No ponto B, a sucção no começo do mês, foi de 69 kPa para 82 kPa, no final do mês.</p> <p>Os ponto C e D, mantiveram sucções médias, de 9,5 kPa e 5,5 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>Nos pontos E e F, as sucções tenderam a crescer, quando não ocorreram chuvas. Com chuvas maiores a 10 mm, ocorreram perdas de 10 kPa de sucção.</p> <p>O ponto G, manteve a sucção média de 7,5 kPa. O ponto H, manteve a sucção média de 4 kPa.</p>
JUNHO - SETEMBRO	<p>A baixa intensidade e frequência de chuvas, gerou crescimento da sucção. No ponto A, de 93 kPa para 247 kPa. No ponto B, de 84 kPa para 237 kPa.</p> <p>O ponto C, ganhou sucção, de 11 kPa para 16 kPa. O ponto D, teve um pequeno crescimento da sucção, de 6 kPa para 8 kPa.</p>	<p>Observou-se acréscimo da sucção, de 60 kPa para 114 kPa, no ponto E, e de 51 kPa para 109 kPa, no ponto F.</p> <p>A sucção no ponto G, aumentou de 10 kPa para 14 kPa, e 5 kPa para 8 kPa no ponto H.</p>

OUTUBRO	A ocorrência de chuvas maiores a 10 mm, geraram diminuição da sucção; no ponto A, diminuiu de 246 kPa para 196 kPa, no ponto B, diminuiu de 234 kPa para 192 kPa. Os pontos C e D, mantiveram sucções, de 16 kPa e 9 kPa, respectivamente.	No ponto E, a sucção mudou de 113 kPa para 73 kPa. No ponto F, a sucção diminuiu, de 109 kPa para 64 kPa. Ao longo do mês, o ponto G, manteve a sucção de 15 kPa, e no ponto H, manteve-se a sucção de 8 kPa.
NOVEMBRO	Com o aumento da intensidade e frequência das chuvas, as sucções começaram diminuir. No ponto A, de 160 kPa para 36 kPa, no ponto B, de 144 kPa para 29 kPa. O ponto C, manteve a sucção de 17 kPa, e o ponto H, manteve a sucção de 9 kPa.	Nos pontos E e F, houve maior oscilação da sucção, chuvas de 30 mm, geraram perdas de 10 kPa, chuvas menores de 20 mm, geraram perda de em média 5 kPa de sucção. A sucção ao longo do mês, mudou de 71 kPa para 26 kPa, no ponto E, e de 51 kPa para 16 kPa, no ponto F. O ponto G, manteve a sucção de 16 kPa, o ponto H, manteve sucção de 9 kPa.
DEZEMBRO	Os ponto A e B, quando aconteceram chuvas com intensidades maiores a 10 mm, apresentaram perdas de sucção de 10 kPa. No começo do mês, a sucção no ponto A foi de 34 kPa, e 10 kPa no final do mês. No ponto B, a sucção no começo do mês, foi de 30 kPa e de 9 kPa no final do mês. O ponto C, diminuiu de sucção, de 18 kPa para 6 kPa. O ponto D, manteve a sucção de 10 kPa, ao longo do mês.	Os pontos E e F, apresentaram perdas de sucção menores a 5 kPa, com chuvas de entre 10 mm a 40 mm, e de 5 kPa, em média, com chuvas maiores a 40 mm. A sucção diminuiu, no ponto E, de 24 kPa para 9 kPa; no ponto F, de 17 kPa para 3,5 kPa. A sucção no ponto G, diminuiu de 16 kPa para 2 kPa. No ponto H, a sucção diminuiu, de 9 kPa para 2 kPa.

6.2.1.3 Encosta com inclinação de 40°

Figura 6.39 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos A, B, C, D de um talude com 40° de inclinação

Figura 6.40 Variação da sucção ao longo do ano 2010 nos pontos E, F, G, H de um talude com 40° de inclinação

Fica evidente que as maiores mudanças de pressão neutra concentraram-se nos pontos A, B, E e F mais próximos da superfície do talude, diminuindo a variação nos pontos C, D, G e H localizados nas profundidades maiores, assim também os pontos mais profundos tiveram sucções menores devido ao fato de ficarem próximos do nível freático.

	PONTOS A, B, C, D (Figura 6.39)	PONTOS E, F, G, H (Figura 6.40)
JANEIRO	<p>Com a chuva de 31 mm do dia 06, a sucção caiu de 34 kPa para 22 kPa, no ponto A, e de 28 kPa para 16 kPa, no ponto B. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 51 kPa para 20 kPa, no ponto A, e de 44 kPa para 16 kPa no ponto B. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou diminuição da sucção, de 39 kPa para 7 kPa no ponto A, e de 33 kPa para 3 kPa, no ponto B.</p> <p>Nos pontos A e B, após ter cessado as chuvas, houve tendência de ganho de sucção.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram em média, sucções de 8 kPa e 10 kPa, respectivamente.</p>	<p>A chuva de 31 mm do dia 06, gerou a queda da sucção, de 18 kPa para 11 kPa, no ponto E, e de 12 kPa para 5 kPa no ponto F. A chuva de 56 mm do dia 15, gerou a queda de sucção, de 31 kPa para 11 kPa, no ponto E, e de 25 kPa para 6 kPa, no ponto F. A chuva de 72 mm do dia 26, gerou queda da sucção, de 23 kPa para 6 kPa no ponto E, e de 17 kPa para 1 kPa no ponto F.</p> <p>A sucção nos ponto E e F, cresceu após ter cessado as chuvas.</p> <p>O ponto G, manteve sucção média de 3,5 kPa. O ponto H, manteve sucção média de 2,5 kPa, ao longo do mês.</p>

FEVEREIRO	<p>A ausência de chuvas maiores aos 10 mm, gerou ganho de sucção, de 28 kPa para 70 kPa no ponto A, e de 22 kPa para 63 kPa no ponto B. Após a chuva de 105 mm, a sucção diminuiu para 37 kPa no ponto A e para 31 kPa no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, apresentaram sucção de 10 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>O ponto E, após 18 dias sem chuvas, teve crescimento da sucção, de 15 kPa para 47 kPa. A chuva de 27 mm, gerou perda de 47 kPa para 41 kPa, a chuva de 105 mm, gerou perda de 46 kPa para 13 kPa.</p> <p>No ponto F, a sucção cresceu de 10 kPa para 40 kPa, após 18 dias sem chuva. A chuva de 27 mm manteve a sucção de 39 kPa, em média. A chuva de 105 mm, diminuiu a sucção, de 39 kPa para 9 kPa.</p> <p>O ponto G, manteve sucção média de 5 kPa e o ponto H, manteve sucção média de 3 kPa.</p>
MARÇO	<p>A ocorrência de chuvas com intensidade de entre 10 mm a 40 mm, gerou perdas de sucção de entre 10 kPa a 20 kPa, nos pontos A e B.</p> <p>O ponto C, teve sucção de 5 kPa em média, o ponto D, teve sucção de 7,5 kPa em média.</p>	<p>Nos pontos E e F, as chuvas de entre 10 mm a 40 mm, geraram oscilações da sucção, com perdas e ganhos de 5 kPa a 10 kPa.</p> <p>No ponto E, a sucção variou no intervalo de 10 kPa a 20 kPa, no ponto F, a sucção variou no intervalo de 5 kPa a 15 kPa.</p> <p>Os pontos G e H, mantiveram sucções, na média de 3 kPa.</p>

ABRIL	<p>A pouca frequência e intensidade das chuvas, provocou que a sucção nos pontos A e B, continuaram crescendo, de 12 kPa para 82 kPa, no ponto A, e de 6 kPa para 77 kPa, no ponto B.</p> <p>Os pontos C e D, mantiveram sucções de 7,5 kPa e 7 kPa, respectivamente.</p>	<p>A sucção nos pontos E e F, cresceram, de 8 kPa para 53 kPa, no ponto E, e de 4 kPa para 48 kPa no ponto F.</p> <p>No ponto G, a sucção cresceu, de 1 kPa para 5 kPa, e no ponto H, a sucção manteve-se, na média de 3 kPa.</p>
MAIO	<p>As chuvas de entre 10 mm a 20 mm, geraram nos ponto A e B, perdas de sucção menores a 5 kPa. A sucção no ponto A, foi de 82 kPa, no começo do mês, para 96 kPa, no final do mês. No ponto B, a sucção no começo do mês, foi de 78 kPa para 88 kPa, no final do mês.</p> <p>Os ponto C e D, mantiveram sucções médias, de 9 kPa e 6,5 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>Nos pontos E e F, as sucções tenderam a crescer, quando não ocorreram chuvas. Com chuvas maiores a 10 mm, ocorreram perdas de 10 kPa de sucção.</p> <p>O ponto G, manteve a sucção média de 5,5 kPa. O ponto H, manteve a sucção média de 4 kPa.</p>
JUNHO - SETEMBRO	<p>A baixa intensidade e frequência de chuvas, gerou crescimento da sucção. No ponto A, de 98 kPa para 286 kPa. No ponto B, de 91 kPa para 271 kPa.</p> <p>O ponto C, ganhou sucção, de 11 kPa para 15 kPa. O ponto D, teve um pequeno crescimento da sucção, de 7 kPa para 9 kPa.</p>	<p>Observou-se acréscimo da sucção, de 66 kPa para 160 kPa, no ponto E, e de 60 kPa para 148 kPa, no ponto F.</p> <p>A sucção no ponto G, aumentou de 7,5 kPa para 12 kPa, e 4,5 kPa para 7 kPa no ponto H.</p>

OUTUBRO	<p>A ocorrência de chuvas maiores a 10 mm, geraram diminuição da sucção; no ponto A, houve diminuição de 285 kPa para 197 kPa; no ponto B, houve diminuição de 273 kPa para 161 kPa. Os pontos C e D, mantiveram sucções, de 15 kPa e 10 kPa, respectivamente.</p>	<p>No ponto E, a sucção mudou de 149 kPa para 95 kPa. No ponto F, a sucção diminuiu, de 140 kPa para 94 kPa.</p> <p>Ao longo do mês, o ponto G, manteve a sucção de 13 kPa, e no ponto H, manteve-se a sucção de 7 kPa.</p>
NOVEMBRO	<p>Com o aumento da intensidade e frequência das chuvas, as sucções começaram diminuir.</p> <p>No ponto A, de 160 kPa para 43 kPa, no ponto B, de 138 kPa para 33 kPa.</p> <p>O ponto C, manteve a sucção de 16 kPa, e o ponto H, manteve a sucção de 10 kPa.</p>	<p>Nos pontos E e F, houve maior oscilação da sucção, chuvas de 30 mm, geraram perdas de 10 kPa, chuvas menores de 20 mm, geraram perda de em média 5 kPa de sucção.</p> <p>A sucção ao longo do mês, mudou de 67 kPa para 26 kPa, no ponto E; e de 62 kPa para 22 kPa, no ponto F. O ponto G, manteve a sucção de 13 kPa, o ponto H, manteve sucção de 7 kPa.</p>
DEZEMBRO	<p>Os ponto A e B, quando aconteceram chuvas com intensidades maiores a 10 mm, apresentaram perdas de sucção de 10 kPa. No começo do mês, a sucção no ponto A foi de 37 kPa, e 14 kPa no final do mês. No ponto B, a sucção no começo do mês, foi de 31 kPa e de 10 kPa no final do mês.</p> <p>O ponto C, diminuiu de sucção, de 16 kPa para 8 kPa. O ponto D, manteve a sucção de 10 kPa, ao longo do mês.</p>	<p>Os pontos E e F, apresentaram perdas de sucção menores a 5 kPa, com chuvas de entre 10 mm a 40 mm, e de 5 kPa, em média, com chuvas maiores a 40 mm.</p> <p>A sucção diminuiu, no ponto E, de 20 kPa para 8 kPa; no ponto F, de 18 kPa para 4 kPa.</p> <p>A sucção no ponto G, diminuiu de 14 kPa para 3 kPa. No ponto H, a sucção diminuiu, de 7,5 kPa para 3 kPa.</p>

6.2.1.4 Chuva acumulada

A variação da sucção pode acontecer no mesmo dia ou dias após de acontecida uma chuva, isto depende principalmente da intensidade da chuva e da ocorrência ou não de chuvas antecedentes, para analisar este fato foram elaboradas a Figura 6.41 à Figura 6.44.

Ao fazer a análise das chuvas acumuladas se pode dizer que estas influenciam nos níveis de sucção quando ocorrem chuvas consecutivas de intensidade entre 10 mm e 20 mm. Estas chuvas, que por si só não são suficientes para provocar quedas no valor da sucção no mesmo dia da chuva, geram o efeito de queda da sucção dias após a ocorrência de chuvas de baixa intensidade.

Figura 6.41 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto A do talude com inclinação de 30°

Figura 6.42 Influência das chuvas acumuladas em 2, 3 e 4 dias na variação da pressão neutra do ponto B do talude com inclinação de 30°

Na Figura 6.43 e Figura 6.44, está mostrado o comportamento, sob chuva acumulada de quatro dias, de alguns pontos, que mostraram melhor a variação da sucção, sob chuva acumulada. Cabe destacar, que os pontos localizados na profundidade de 2,5 m e 3,5 m, não foram influenciados, pelas chuvas acumuladas.

Na Figura 6.43, é mostrada a variação da sucção, sob efeito da chuva diária e da chuva acumulada em quatro dias, no mês de outubro de 2010. A chuva de 42 mm, do dia 02 de outubro, não gerou variação da sucção, mas no dia 05, com a chuva acumulada de 50 mm, houve queda de sucção, de 255 kPa para 212 kPa, no ponto A do talude com inclinação de 20°, de 244 kPa para 234 kPa, no ponto A do talude com inclinação de 30°, de 234 kPa para 221 kPa, no ponto B do talude com inclinação de 20° e de 147 kPa para 137 kPa, no ponto E do talude com inclinação de 40°.

Nos pontos A e B, do talude com inclinação de 20°. No dia 20 de outubro, a perda de sucção foi de 20 kPa no ponto A, e de 10 kPa no ponto B, sob a chuva de 24 mm acumulada em quatro dias. No ponto A do talude com inclinação de 30°, houve perda de sucção de 20 kPa.

No ponto B do talude com inclinação de 20°, observou-se comportamento atípico, porque, a chuva acumulada de 24 mm, gerou perda de 30 kPa de sucção, no dia 22 de outubro.

Figura 6.43 Influência das chuvas acumuladas em 4 dias no mês de outubro de 2010

A Figura 6.44, mostra os dados correspondentes à chuva acumulada de quatro dias do mês de dezembro de 2010. A influência da chuva acumulada na variação da sucção, manifesta na diminuição da sucção, dias após de ocorrida uma chuva; pode ser observada com clareza.

No talude com inclinação de 20° , no dia 18, com a chuva acumulada de 76 mm em quatro dias, as sucções, nos pontos A e B começaram diminuir, ainda que no dia 18, não ocorreu nenhum evento de chuva.

No ponto A, do talude com inclinação de 30° , no dia 12, ocorre a menor sucção, com 75 mm de chuva acumulada em quatro dias. No ponto A, do talude com inclinação de 40° , a sucção começou diminuir no dia 17 com a chuva acumulada de 84 mm, sendo que, não ocorreu nenhuma chuva no mesmo dia.

O ponto B, do talude com inclinação de 40° , sofreu diminuição da sucção, no dia 25 de dezembro, com a chuva acumulada de 77 mm em quatro dias, sem a ocorrência de chuva no dia.

Figura 6.44 Influência das chuvas acumuladas em 4 dias no mês de dezembro de 2010

Na Figura 6.45, Figura 6.46 e Figura 6.47, foram feitas as comparações entre os pontos localizados na porção alta e baixa do talude, porém na mesma profundidade desde a superfície.

Em todas as inclinações, o ponto A, localizado na porção alta do talude, apresenta maiores valores de sucção, quando comparado com o ponto E, localizado na porção baixa do talude. O notável afastamento das curvas, ocorre no começo do período seco (abril) e é maior na medida em que os meses do período seco avançam. No mês de novembro, que corresponde ao período em que começam as chuvas, o afastamento das curvas se reduz. O mesmo comportamento, é observado nos pontos B e F do talude com inclinação de 20°. Os pontos localizados em maiores profundidades (C, D, G e H), mantém uma diferença quase constante ao longo do ano.

Figura 6.45 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 20°

Figura 6.46 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 30°

Figura 6.47 Influência da posição dos pontos, localizados na porção alta e baixa do talude com inclinação de 40°

Da Figura 6.45 a Figura 6.47 pode se concluir que os pontos localizados na porção baixa do talude tem maior influência das chuvas portanto menores valores de sucção que os pontos localizados na porção alta do talude.

Na Figura 6.48 e Figura 6.49, pode se observar que a inclinação do talude, não tem influência na variação da sucção nos pontos A e B, localizados mais próximos da superfície do talude, já nos pontos C e D localizados a maiores profundidades a inclinação do talude tem influência nos valores da sucção.

Uma possível explicação para o fato de a inclinação ter influência na sucção, em pontos a maior profundidade e não nos pontos mais próximos da superfície, é que na crista do talude, quando o solo permanece não saturado, o fluxo poderia ser mais vertical, sobretudo, quando mais perto da superfície; em profundidade, poderia começar a ter fluxo lateral, devido à camada impermeável subjacente.

Figura 6.48 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos A e B

Figura 6.49 Influência do ângulo de inclinação do talude para os pontos C e D

Na Figura 6.50, Figura 6.51 e Figura 6.52 estão apresentados os valores médios mensais, da variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010. Os resultados mostram que a sucção diminui ao longo da profundidade.

Figura 6.50 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 20°

Figura 6.51 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 30°

Figura 6.52 Variação da sucção ao longo do ano 2010 com a profundidade para o talude com inclinação de 40°

Na Figura 6.50, Figura 6.51 e Figura 6.52, observa-se a clara influência da diferença nas características dos solos, a sucção se mantém mais baixa no solo residual do que no coluvionar.

Segundo os resultados das análises no programa SEEP/W, e em concordância com a observação de Avelar et al. (2011), o lençol freático encontra-se localizado no pé do talude. Essas informações, podem ser vistas na Figura 6.53, Figura 6.54 e Figura 6.55, onde se mostram a variação da sucção com a profundidade, em pontos localizados na vizinhança do pé dos taludes de 20°, 30° e 40° de inclinação.

Na Figura 6.53, se observa que no caso do talude com inclinação de 20°, durante o período chuvoso de dezembro e janeiro, o lençol freático sobe, até a profundidade de 3,5 m. O lençol freático se mantém elevado durante o mês de março logo após do período chuvoso, este nível diminui no mês de abril devido à ausência de chuvas afastando-se mais da saturação ao longo dos meses de maio a novembro. Observa-se também que as sucções próximas à superfície do talude são maiores no mês de setembro (63 kPa) e menores no mês de dezembro (17 kPa).

Figura 6.53 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 20°

Na Figura 6.54, se observa que no talude, com inclinação de 30°, o lençol freático não atinge os pontos localizados na vizinhança do pé do talude, encontrando-se em estado não saturado. O lençol freático, não se foi observado ao longo do ano, só no mês de março, observou-se que o lençol freático, cresceu até a profundidade de 4,5 m, após do período chuvoso. As sucções a 0,5 m de profundidade, são maiores no mês de setembro (110 kPa) e menores no mês de março (15 kPa).

Figura 6.54 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 30°

Na Figura 6.55 observa-se que no talude com inclinação de 40° o lençol freático não atinge os pontos localizados na vizinhança do pé do talude, o lençol freático não atinge a profundidade de 5 m ao longo do ano, as sucções a 0,5 m de profundidade são maiores no mês de setembro (150 kPa), e menores no mês de março (13 kPa).

Figura 6.55 Variação da sucção com a profundidade ao longo do ano 2010 na vizinhança do pé do talude com inclinação de 40°

6.2.1.5 Variação da sucção em janeiro de 2011 e no mês antecedente

A Figura 6.56 à Figura 6.61, foram elaboradas para avaliar detalhadamente, a variação da sucção ao longo do mês de dezembro de 2010 e durante o mês de janeiro de 2011, em que aconteceram os escorregamentos catastróficos na Região Serrana do Rio de Janeiro.

Note-se que no dia 28 de dezembro de 2010, aconteceu uma chuva de 87 mm, que gerou perda de sucção imediata, no talude com inclinação de 20° (Figura 6.56 e Figura 6.57). O efeito dessa mesma chuva, foi observado nos dias seguintes, nas encostas com inclinações de 30° (Figura 6.58 e Figura 6.59) e 40° (Figura 6.60 e Figura 6.61).

Observa-se também na Figura 6.57, Figura 6.59 e Figura 6.61, que a chuva do dia 12 de janeiro de 2011, gerou elevação do nível freático, coincidindo com o nível do terreno. Nos pontos localizados na porção alta da encosta, a diminuição da sucção, foi devido ao avanço da frente de umedecimento e não pela elevação do lençol freático.

Figura 6.56 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 20°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

Figura 6.57 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 20°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

Figura 6.58 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

Figura 6.59 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 30°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

Figura 6.60 Variação da sucção na porção alta do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

Figura 6.61 Variação da sucção na porção baixa do talude com inclinação de 40°, no mês antecedente e durante o mês de janeiro de 2011

As análises de fluxo feitas no programa SEEP/W, apresentadas na Figura 6.62, Figura 6.63 e Figura 6.64, mostram a variação do lençol freático, para as diferentes inclinações de encosta analisadas, desde o dia 01 de janeiro, até o dia 12 de janeiro, dia em que aconteceram os escorregamentos translacionais rasos. Observa-se com clareza, o súbito incremento do lençol freático (linha azul no desenho), devido à chuva extrema de 124,6 mm do dia 12 de janeiro.

Na Figura 6.62 e Figura 6.63, observa-se que o contato entre o solo coluvionar e o solo residual gera as condições para o avanço do nível da água. Em ambos casos a infiltração na parte alta do talude e o crescimento do nível da água se encontram. Porém, no talude com inclinação de 40° (Figura 6.64), não acontece o encontro do nível da água com a com a frente de umedecimento.

Figura 6.62 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 20°

Figura 6.63 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 30°

Figura 6.64 Variação do nível da água no mês de janeiro de 2011 do talude com inclinação de 40°

Em relação ao sentido do fluxo, pode se observar na Figura 6.65, que o fluxo é paralelo à superfície do talude, e se dá principalmente na camada de solo coluvionar, nota-se também que os vetores de velocidade de fluxo, são maiores no contato da camada de solo coluvionar com a camada de solo residual.

Figura 6.65 Sentido de fluxo no talude da Região Serrana do Rio de Janeiro

6.2.2 Fator de segurança ao longo do tempo

Para o cálculo do fator de segurança foi empregada a equação 5.1, que leva em consideração a variação da sucção, o valor do ângulo ϕ^b foi de 15° , considerado constante para todos os níveis de sucção.

Os resultado do cálculo do fator de segurança estão mostrados na Figura 6.66, Figura 6.67 e Figura 6.68, nos quais se observa com clareza, a queda do fator de segurança no dia em que ocorreu a chuva de 124,6 mm no dia 12 de janeiro. A queda do fator de segurança ocorre tanto nos taludes menos íngremes como o de 20° , como no caso do talude mais íngreme como o de 40° .

Figura 6.66 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 20°

Figura 6.67 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 30°

Figura 6.68 Variação do fator de segurança ao longo do mês de dezembro de 2010 e janeiro de 2011, para o talude com inclinação de 40°

SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Serra de Cubatão

Ponto I: As sucções máximas, de 14 kPa e 19 kPa, observaram-se nas encostas com inclinações de 30° e 40°, em pontos localizados a 0,50 m de profundidade, após 20 dias sem chuvas, no mês de janeiro de 1984.

Com a ocorrência de chuvas com intensidades maiores a 10 mm/dia ao longo de sete dias, o nível de sucção caiu, no entanto, a 0,5 m de profundidade, a sucção mínima de 1,5 kPa, ocorreu com a chuva acumulada máxima de 265 mm em quatro dias. Os valores mínimos de sucção, em pontos localizados a 1,5 m, 2,5 m e 3,5 m de profundidade, foram observados dois, três e quatro dias, após de ocorrida a chuva acumulada máxima.

Ponto II: Após o intervalo de 20 dias, com a ocorrência de apenas uma chuva de 19 mm, em março de 1984, observaram-se sucções de 10 kPa em média, em todas as encostas analisadas, a sucção de 10 kPa, manteve-se ou diminui muito pouco, enquanto as chuvas foram de intensidade menor a 10 mm.

A chuva acumulada de 110 mm em quatro dias, gerou sucções mínimas de 2 kPa em média, primeiro nos pontos localizados a 0,5 m de profundidade, e dias depois em pontos localizados a maiores profundidades.

Ponto III: Os meses de abril a julho de 1984, a frequência e intensidade das chuvas diminuiu. Foram registradas, em sua maioria, chuvas isoladas com intensidades menores a 20 mm, que não geraram perdas de sucção; chuvas maiores a 20 mm, no mês de abril, geraram diminuição de sucção apenas no talude com inclinação de 50°.

No período de abril a junho de 1984, observou-se perda de sucção nos pontos localizados a 1,5, 2,5 e 3,5 m de profundidade, enquanto, o ponto localizado a 0,5 m de profundidade mantinha ou ganhava sucção; este comportamento pode ser atribuído à redistribuição da umidade dentro do solo.

Cabe destacar, que durante o período seco, a evapotranspiração diminui, portanto, não são gerados ganhos significativos de sucção, principalmente, na profundidade de 0,5 m.

Ponto IV: O ganho notável de sucção, observado no ponto A, da encosta com inclinação de 30°, não havendo características específicas para este comportamento, pode ser atribuído à variação numérica, já evidenciada na figura 6.2, porque, apesar de observado o ganho de sucção, nas encostas com inclinações de 40° e 50°, estes não tiveram o nível de sucção alcançado pelo ponto A da encosta com inclinação de 30°.

Ponto V: Neste ponto, observou-se que o ponto A manteve a sucção, enquanto o ponto B ganhou sucção e os pontos C e D apresentaram perda de sucção.

A explicação para este comportamento, no ponto A, é que a sucção se manteve, devido ao balanço hídrico. Visto que, ocorreram chuvas isoladas maiores a 10, portanto, houve baixa frequência e intensidade das chuvas; e o efeito da evapotranspiração, é mais acentuada nas proximidades da superfície da encosta.

O ponto B, ganhou sucção, devido à infiltração da água para camadas mais profundas. Os pontos C e D, perderam sucção, porque a água infiltrada atingiu essas profundidades, dias após de ocorridas as chuvas.

Ponto VI: Nos meses de outubro e novembro, com o aumento na frequência de chuvas com intensidade maior a 20 mm, as sucções apresentaram maiores oscilações.

Ponto VII: A elevada sucção, observada nos pontos a 2,5 e 3,5 m de profundidade, mesmo com a presença de chuvas, é devido à permeabilidade crescente com a profundidade; propriedade do solo que gera infiltração da água para maiores profundidades.

Como indicado na tabela 4.2, a permeabilidade saturada a 2,5 m de profundidade é de $2,8 \times 10^{-3}$ cm/s, enquanto a 3,5 m de profundidade é de 5×10^{-3} cm/s; o dobro da permeabilidade a um metro menos de profundidade. A permeabilidade saturada de um ponto localizado a 4 m de profundidade, é de 1×10^{-2} cm/s. Portanto, havendo maior permeabilidade com a profundidade, existe a tendência de a água infiltrar rapidamente.

No que diz respeito às chuvas, pode-se dizer que chuvas de maior intensidade, geram diminuição da sucção a maiores profundidades, enquanto, chuvas com maior frequência geram menores sucções nos pontos mais superficiais. Chuvas com intensidade e frequência elevadas, geram picos de sucção mínima, que ocorrem nos pontos mais próximos da superfície, quando a máxima chuva acumulada em quatro dias é alcançada; e nos pontos mais profundos, nos dias posteriores à máxima chuva acumulada de quatro dias.

As figuras 6.4 a 6.9, de variação da sucção, mostraram claramente, que os pontos localizados a 0,5 m de profundidade, foram os que apresentaram maiores mudanças de sucção, seja devido à ocorrência de chuvas, que geraram perda de sucção, seja devido à evapotranspiração, que gerou ganho de sucção. Há que se destacar também que os pontos localizados a 0.5 m de profundidade, apresentam primeiro os menores valores de sucção, seja no dia em que acontece uma chuva, seja dias depois da chuva.

A diminuição progressiva da sucção, reflete o avanço progressivo da água ao longo da profundidade, comportamento que foi observado, por exemplo: nos pontos A, B, C e D, nos dias 24 a 28 de janeiro de 1984, nos taludes com inclinações de 30° e 40°;

nos pontos E, F, G e H, nos dias 07 a 12 de fevereiro de 1984, no talude com inclinação de 30°.

A queda da sucção, não ocorre de forma generalizada, demora mais, quanto maior for a profundidade, e está relacionada com chuvas acumuladas diferentes. Assim, a relação com a chuva acumulada anterior ao evento, depende também da profundidade do escorregamento. Se a causa é a redução de sucção, a chuva acumulada, é menor se os escorregamentos são mais rasos, isso explica por que os escorregamentos são rasos. Claro que não deve-se deixar de considerar, a diferença de resistência saturada e não saturada.

Nas figuras 6.4 a 6.9, observou-se que, os menores valores de sucção, em pontos localizados a 0,5, acontece geralmente no mesmo dia do evento de chuva, já nos pontos localizados a 1,5 m de profundidade, são necessários quatro dias para atingir valores mínimos de sucção. No pontos localizados a 2,5 m e 3,5 m de profundidade, são necessário entre quatro a sete dias, para que ocorra a diminuição da sucção.

Fazendo a relação, entre os níveis de sucção e os escorregamentos, o fato de que os valores mínimos de sucção, na profundidade de 1,5 m, ocorram em até quatro dias de chuva acumulada, coincide com a correlação feita por Tatizana et al. (1987), em que os escorregamentos na Serra de Cubatão, ocorreram em sua maioria, na profundidade de 1 m a 2 m, sob a influência de chuvas acumuladas em quatro dias.

Avaliando a variação da sucção ao longo da profundidade, destaca-se que, o tipo de solo, tem influência marcante nas encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro, enquanto nas encostas da Serra de Cubatão, apresenta pouca influência. A faixa de variação da sucção, ao longo da profundidade, nas encostas da Serra de Cubatão, não apresenta a redução brusca, observada nas encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro.

Região Serrana do Rio de Janeiro

A chuva acumulada em quatro dias, teve influência nos pontos localizados até a profundidade de 1,5 m, enquanto os pontos a maior profundidade, não foram influenciados pelas chuvas acumuladas.

Ponto I: as chuvas de 36 mm, 51 mm e 72 mm, geraram perdas de sucção notáveis. Após cessada a chuva, houve clara tendência de acréscimo da sucção. Sem a ocorrência de chuvas, as sucções tenderam a crescer.

Ponto II: houve maior oscilação das sucções, devido à ocorrência de chuvas maiores que 10 mm e menores que 60 mm, espalhadas, em vários dias do mês.

Ponto III: houve diminuição na frequência e intensidade das chuvas. Na encosta com inclinação de 20° , houve acréscimo das sucções nos pontos A e B, enquanto, o ponto C, manteve o nível de sucções; Os pontos E, F e G, apresentaram crescimento da sucção, enquanto, o ponto H, manteve os níveis de sucção.

Ponto IV: as sucções no ponto C, do talude com inclinação de 20° , começaram crescer, aproximadamente, um mês após do crescimento das sucções, nos pontos A e B. Nos taludes com inclinações de 30° e 40° , não foi observada a diferença no tempo de crescimento da sucção, entre os pontos A e B do ponto C.

Ponto V: na encosta com inclinação de 20° , as sucções, não foram influenciadas pela ocorrência ou não de chuvas. No talude com inclinação de 30° e 40° , houve perdas de sucção de 4 kPa em média.

A oscilação das sucções, vale dizer, diferença na ocorrência de ganhos ou perdas de sucção, num determinado dia, em taludes com geometrias diferentes, não necessariamente pode ser atribuída à geometria da encosta, e sim à variação numérica das análises; esta variação numérica já tinha sido observada, no procedimento baseado em ciclos para a obtenção da distribuição da sucção inicial. Na ocasião, os valores de sucção, resultados das análises numéricas, mostraram-se diferentes, mesmo sob as mesmas condições de análise.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Nesta pesquisa, o objetivo foi analisar a influência das chuvas extremas, na estabilidade de taludes, na Serra de Cubatão e na Região Serrana do Rio de Janeiro. Para lograr este objetivo, foi empregado o programa computacional SEEP/W, que permite analisar a variação da sucção, sob regime transiente, ao longo do tempo. Assim, foi analisada a variação da sucção, no ano antecedente e durante o mês, em que aconteceram os eventos de escorregamentos.

Após a análise da variação da sucção, foi feita a análise de estabilidade de taludes, pelo método do talude infinito, este método foi empregado, porque, os escorregamentos na Serra de Cubatão e na Região Serrana do Rio de Janeiro, foram do tipo translacional raso.

Na média e alta encosta de trechos importantes, relativamente típicos da Serra de Cubatão, apresentam-se valores de sucção abaixo dos 10 kPa ao longo do ano, isto devido à intensidade das chuvas e ao clima tropical (quente e úmido), em que se encontram as camadas de solo. Já alguns trechos específicos de encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro, apresentam sucções elevadas, que atingem os 250 kPa em meses como agosto e setembro, pertencentes ao período seco.

Nos dois locais estudados os resultados das análises de infiltração mostram o aumento da umidade do solo, portanto a diminuição dos valores de sucção até a eliminação da mesma durante os eventos de chuva extrema.

A diferença dos valores de sucção, obtidos com o programa SEEP/W e os obtidos em campo por Carvalho (1989), mostraram que as sucções medidas em campo foram maiores que as obtidas com o uso do programa SEEP/W; esta diferença reflete o intenso fraturamento da camada rochosa em campo. Sendo que os valores de sucção, obtidos com o programa SEEP/W e os obtidos em campo, ficaram muito próximos, verificou-se a eficiência do programa SEEP/W para análises de camadas superficiais, sendo o quesito de análise, a camada de solo coluvionar, pode-se dizer que a efetividade do programa reflete o comportamento do solo do talude.

Os resultados de infiltração analisados com o programa SEEP/W apresentaram em alguns casos comportamentos atípicos, como diminuição da sucção sem a ocorrência de eventos de chuva, este fato é atribuído à redistribuição da umidade ao longo do perfil feito pelo programa para manter o equilíbrio ao longo da camada de solo.

Nas encostas da Serra de Cubatão, a chuva extrema, do dia 23 de janeiro de 1985, gerou a eliminação da sucção, ao mesmo tempo em que ocorreram os escorregamentos translacionais rasos, nas encostas com inclinação de 40° e 50°. O fato de a encosta com inclinação de 30°, mantivera-se em pé, está associado aos parâmetros de resistência, das camadas do solo do talude, porque, os valores adotados para as análises, foram resultados de ensaios de laboratório, feitos com solos de encostas com inclinação de 40° a 43°.

No caso da Região Serrana do Rio de Janeiro, os resultados mostram um acúmulo de água na interface entre o solo coluvionar e o solo residual, no decorrer da chuva, isto devido à diferença entre os valores de permeabilidade saturada, do solo coluvionar e do solo residual, componentes do talude, fato que influi na instabilidade, criando uma superfície instável, no contato entre os dois tipos de solo.

As análises numéricas feitas para os dois locais, mostrou que no caso dos taludes da Serra de Cubatão, a inclinação do talude poderia ter pouca influência nos níveis de sucção, enquanto, no caso dos taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro, a inclinação pode ter maior influência nos níveis de sucção.

Um fato influente é o nível de fraturamento da rocha sob as camadas de solo, no caso dos taludes da Serra de Cubatão, o intenso fraturamento da rocha, permite a infiltração da água, não sendo gerado o nível da água, no entanto, no caso da Região Serrana do Rio de Janeiro, a rocha se apresenta pouco fraturada, permitindo a formação do nível da água. Este comportamento, é válido para o caso mais geral, onde não existem barreiras intermediárias, geradas pela mudança das propriedades dos solos, lentes de areia, ou outras condições, que interfiram na formação do nível da água.

As chuvas extremas no caso dos taludes da Serra de Cubatão promovem o avanço da frente de umedecimento causando escorregamentos superficiais já no caso da Região Serrana do Rio de Janeiro as chuvas extremas causam o rápido aumento do nível da água gerando escorregamentos mais profundos.

A chuva média anual na Serra de Cubatão é de 3040 mm (Estação Curva da Onça) e na Região Serrana do Rio de Janeiro é de 1750 mm (Estação Teresópolis). O regime de precipitação é claramente maior na Serra de Cubatão que na Região Serrana do Rio de Janeiro

Segundo as análises numéricas, os escorregamentos que atingiram a camada de solo residual, das encostas da Região Serrana do Rio de Janeiro, ocorreram devido à ação conjunta de: chuvas antecedentes (dezembro de 2010), que geraram aumento gradual do nível da água e diminuição da sucção; e das chuvas extremas de 11 e 12 de janeiro de 2011, que provocaram a súbita elevação do nível freático, portanto, o aumento da pressão neutra.

Em alguns trechos da Região Serrana do Rio de Janeiro, a ocorrência de escorregamentos translacionais rasos, na porção alta da encosta que não foi atingida pela elevação do nível freático, sob as condições específicas estudadas, poderia ter ocorrido diminuição da sucção, devido às chuvas extremas de 11 e 12 de janeiro, capaz de desencadear escorregamentos translacionais rasos.

No caso dos taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro, a infiltração é fortemente influenciada pela condição de sucção inicial do solo, assim após o período chuvoso de dezembro de 2010, o solo encontrava-se com sucções baixas, criando um cenário favorável para a ocorrência de escorregamentos, os mesmos que devido às chuvas extremas de 11 e 12 de janeiro de 2011, tornaram-se catastróficos.

No caso dos taludes da Serra de Cubatão, pôde ser comprovado que chuvas isoladas maiores que 40 mm, em períodos secos, não geraram diminuição da sucção no mesmo dia em que aconteceu a chuva, porém, a diminuição da sucção foi observada após três dias de chuvas acumuladas.

A variação da sucção nos taludes da Serra de Cubatão, quando não aconteceram escorregamentos, oscilou entre valores próximos de zero no período chuvoso, e 10 kPa no período seco, portanto, no geral as sucções são baixas, e mesmo com chuvas intensas (acima de 60 mm), não são geradas pressões neutras positivas. Os escorregamentos ocorreram, quando a sucção foi zero.

A amplitude da variação da sucção dos taludes da Região Serrana do Rio de Janeiro é maior que no caso dos taludes da Serra de Cubatão, as sucções oscilam entre 5

kPa nos períodos chuvosos e 250 kPa nos períodos secos, enquanto na Serra de Cubatão, as sucções oscilam entre 10 kPa e 1 kPa.

Nos talude da Serra de Cubatão, observou-se com clareza, o processo de infiltração da água para camadas mais profundas. Porque, após dois a mais dias de ter cessado a chuva, observou-se diminuição da sucção, nos pontos localizados a maior profundidade.

A pluviosidade na Serra de Cubatão, faz com que não se apresente um amplo intervalo de variação da sucção, ocorrendo predominantemente, perdas e ganhos de sucção de entre 1 kPa a 3 kPa, com chuvas de entre 20 mm a 60 mm. Na Região Serrana do Rio de Janeiro, chuvas menores a 60 mm, geram variações da pressão neutra no intervalo de 10 kPa a 15 kPa, chuvas maiores a 60 mm, geram variações de pressão neutra, maiores a 20 kPa.

Portanto, com a análise numérica, foi possível chegar no dia exato, em que aconteceram os escorregamentos translacionais rasos, tanto na Serra de Cubatão, como na Região Serrana do Rio de Janeiro.

7.1 Recomendações para futuras pesquisas

Para obter o valor de permeabilidade saturada, que represente a permeabilidade saturada existente em campo, calibrar o modelo no programa SEEP/W, mediante a variação da permeabilidade saturada, utilizada nas análises numéricas, até que os resultados de sucção obtidos com o programa SEEP/W, sejam os mais próximos possíveis com as sucções obtidas em campo por Carvalho (1989).

Estudar outros mecanismos de escorregamentos sob diversas condições geológico – geotécnicas presentes nos locais estudados.

Realizar ensaios de laboratório, com amostras de camadas de solo mais profundas, para observar o comportamento da sucção a maior profundidade, com maior certeza.

Realizar ensaios de resistência com sucção controlada, para otimizar as análises de estabilidade.

Fazer instrumentação em campo, para obter dados de variação da sucção e comparar com os resultados das análises numéricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMENTO, M. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: considerações teóricas e estudo experimental sobre solo coluvionar das encostas da Serra do Mar**. 1988. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

ABRAMENTO, M.; CARVALHO, C. S. **Geotechnical parameters for the study of natural slopes instabilization at Serra do Mar, Brazil**. In: Proceedings of the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 1989, vol. 3, pp. 1599-1602

ALEVA, G. J. **Facts of debate – Classification and Nomenclature of Laterities**. I.G.C.P. – 129, Newsletter V, India, 1982.

ALI, F. H.; RAHARDJO, H. Unsaturated soil. In: HUAT, B. B. K. et al. **Tropical Residual Soils Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2004. p. 57-71.

ALONSO, E.; GENS, A.; LLORET, A. **Effect of Rain Infiltration on the Stability of Slopes**. In: Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soils. Paris, 1995. p. 241-249

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. 1ro COBRAE, Rio de Janeiro, 1992. p. 721-733

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: BRITO, S. N. A.; OLIVEIRA, A. M. S. **Geologia de Engenharia**. 1 ed. São Paulo. ABGE, 1998. p. 243-269.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; D'ORSI, R. N. Monitoramento dos problemas de encosta na Cidade do Rio de Janeiro frente às mudanças climáticas em curso e futuras. In **Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças Climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2011, p. 311-328.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W.A.; BECKER, L.B.; MENDOÇA, M.B. **Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the**

mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum, Rome, 2011 (a).

BAGGIO, H.; HORN, H. A. **Geological risks in Brazil: The mountainous region of Rio de Janeiro.** Geo-risk management – a German Latin American approach. Heidelberg, p. 55-63, 2-7 April 2011.

BARATA, F. E. **Landslides in the Tropical Region of Rio de Janeiro.** In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 2, p. 507-516, México, 1969.

BARATA, F. E. **Elucubrações sobre aspectos geotécnicos interessantes, específicos e Diferenciáveis dos Solos Tropicais, em geral, Particularmente os do Brasil.** Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. COPPE/URFJ. Rio de Janeiro, 1981.

BISHOP, A. W. **The use of the slip circle in the stability of slopes.** Geotechnique, London. U. K. v.5, 1955. p.7-17

BISHOP, A. W.; ALPAN, I.; BLIGHT, G. E.; DONALD, I. B. Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. **ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils**, University of Colorado, Boulder, CO, p. 500-532, 1960

BODMAN, G. B.; COLMAN, E. A. **Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils.** Soil Science Society América Proceedings, v.8, p. 116-122, 1944.

BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; MENEZES, S. J. M. C. **Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, p.13-21, 2006.

CAI, F.; UGAI, **Numerical analysis of Rainfall Effects on Slope Stability.** International Journal of Geomechanics, v.4, n.2, p. 69-78, 2004.

CARDOSO, C. R. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes.** 2006.

172f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CARDOSO, C. R.; FUTAI, M. M. **Simulação do efeito de um fluxo transiente na estabilidade dos taludes**. IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – IV COBRAE. v.1, pp.453-463, Salvador – BA, 2005

CARDOSO, C. R.; FUTAI, M. M. **Estudo da variação da sucção ao longo do ano de um talude de solo residual**. V Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – V COBRAE. v.1, pp.123-131, São Paulo– SP, 2009

CARVALHO, C. S. **Estudo da Infiltração em Encostas de Solos Insaturados na Serra do Mar**. 1989. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. **Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone**. American Meteorological Society. v.15 p. 2377-2394, Setembro 2002.

CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. **Eventos extremos de precipitação sobre o Sul do Nordeste**. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2000.

COELHO, NETO, A. L. **A interface florestal – urbana e os desastres naturais relacionados à água no maciço da Tijuca: desafios ao planejamento urbano numa perspectiva sócio ambiental**. Revista do Departamento de Geografia, 16, pp. 46-60, 2005

COELHO NETO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. **January 2011; the extreme landslide disaster in Brazil**. In: Proceedings of the Second World Landslide Forum, Rome, 2011.

COSTA NUNES, A. J. **Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms**. Proceedings 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, v.2, pp. 554-574, 1969.

COSTA NUNES, A. J.; BRANDÃO, C. A.; DIAS, P. H. V.; FERNANDES, C. E. D. M. **Landslides due to intense tropical rainfall in Brazil**. VII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vancouver, 1983, v.1, p. 291-304.

DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. **Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM. 1 CD-ROM. 2000.

DE CAMPOS, T. M. P. **Resistência ao cisalhamento de Solos Não Saturados**. Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, v.2, p. 399-417. Rio de Janeiro. 1997

DE CAMPOS, T. M. P.; ANDRADE, M. H. N.; VARGAS JR., E. A. **Unsaturated colluvium over rock slide in a forested site in Rio de Janeiro, Brazil**. 6th Int. Symp. On Landslides. Christchurch New Zealand, Balkema, p. 1357-1364, 1991.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. **Slope stability in residual soils**. In: Proceedings of the IV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. v. 1, p. 87-170, Puerto Rico, 1971.

DIAS, M. A. F. S. **Eventos extremos: Fenômenos naturais ou consequências das ações humanas?** In: Mesa redonda eventos extremos: fenômenos naturais ou consequências das ações humanas?, 2011, São Paulo

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D.; MECHOSO, C. R. **Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans**. In Journal of Climate, v. 11, p. 251-271, 1998.

DRM – RJ. **Megadesastre da Serra Jan 2011**. Departamento de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro, 2011.

EGLER, C. A. G.; GUSMÃO, P. P. Tendências de uso e ocupação do território e gestão metropolitana face às mudanças climáticas. In **Megacidades, Vulnerabilidades e Mudanças Climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2011, p. 16-40.

ESCÁRIO, V.; SÁEZ, J. **The shear strength of partly saturated soils**. Geotechnique, v. 36, p.453-456, 1986.

ESCOBAR, F.; CAMPOS, T. M. P.; PORTOCARRERO, H. **Estudos geotécnicos para caracterização de solos nas cicatrizes de um escorregamento no distrito de Conquista: Nova Friburgo/RJ**. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro. Bertrand, 1996. p. 123-194.

FORMIGA, K. T. M.; SEIBT, A. C.; CASTRO, T. Q.; BERNARDES, R. S. A infiltração e o escoamento superficial. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JR. G. F.; CARVALHO, E. T. L. **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. Brasília, 2012.p. 101-116.

FREDLUND, D.G.; MORGENSTERN, N.R. **Stress State Variables for Unsaturated Soils**. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering, Division GT5, v. 103, p. 447-466, 1977.

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

FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York: John Wiley & Sons, 517 p.1993.

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

FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. **Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, p. 533-546, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. **The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve**. Canadian Geotechnical Journal. v. 33, p. 440-448, 1995

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A.M.G.; PETERSON, T. **Observed coherent changes in climatic**

extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research. v. 19. p 193-212. 2002

FUTAI, M. M. **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento.** 2002. 559f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FUTAI, M. M.; ALMEIDA, M. S. S.; LACERDA, W. A. **Resistência ao Cisalhamento de Solos Tropicais Não-Saturados.** Simpósio Brasileiro sobre solos não saturados, São Carlos, 2004.

FUTAI, M. M.; MELO, D. F. M.; CARDOSO, C. R.; DUEÑAS, V. Z. **Estabilidade de encostas em condições não saturadas.** VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Pirenópolis, 2011

FUTAI, M. M.; MELO, D. F. M.; CARDOSO, C. R.; DUEÑAS, V. Z. Infiltração e estabilidade de encostas em condições não saturadas. In: CARVALHO, J. C.; GITIRANA JR. G. F.; CARVALHO, E. T. L. **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais.** Brasília, 2012.p. 457-480.

GARDNER, W.R. **Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table.** Soil Science, v.85, n.4, p. 533-546, 1958.

GASMO, J. M.; RAHARDJO, H.; LEONG, E. C. **Infiltration effects on stability of a residual soil slope.** Computers and Geotechnics, v.26, p. 145-165, 2000.

GEO-RIO, **Manual Técnico de Encostas – Análise e Investigação.** Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, v. 1, Rio de Janeiro, 2000. 2º Edição. 253p.

GODT, J. W.; BAUM, R. L.; MCKENNA, J. P. **Vadose-zone response to rainfall leading to shallow landslide initiation on the Puget Sound bluffs, Washington,** Geological Society of America Abstract with Programs, v.36, n.6, p.362, 2007.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; CORREA, G.P.; ROCHA, H.L.; GIGLIO, J.N. **Desastre hidrológico resultante das chuvas intensas em Rio dos Cedros –SC.** In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – MS, 2009.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/S, Publicação Nº 1080, 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976, 2ª ed. p. 194.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VICENT, L. A. **Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature**. In: Journal of Climate, v. 19, p. 1490 - 1512, 2006.

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

IGNATIUS, S. G.; TOGNON, A. A.; SAAD, A. M.; CARVALHO, C. S. **Ensaio geotécnicos em solos não saturados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, SP**. Seminário sobre Solos Não Saturados, Universidade de Brasília, Brasília, 1991, pp. 50-70

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil / 1961-1990. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/webcdp/climatologia/normais/imagens/normais/textos/apresentacao.pdf>. Acesso em 04/07/2012.

IPCC, Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas. **Mudança do Clima 2007: Relatório de Síntese**, 2007.

ISSMFE, COMMITTEE ON TROPICAL SOILS. **Peculiarities of Geotechnical Behaviour of Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. Progress Report**, 1982-1985, ABMS. São Paulo, 1985.

JOHNSON, K. A.; SITAR, N. **Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation**. Canadian Geotechnical Journal, 27 (6): p. 789-801, 1990

JONES, F. O. **Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras Escarpment, Brazil**. Geological survey professional paper, 697, Washington, 1973

JONES, P. **Global Temperature Record**. Disponível em <<http://www.cru.uea.ac.uk/information-sheets>>, acesso em 14 de agosto de 2013.

KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. *Landslides* (2008) 5:71-82.

KOUSKY, V. E. **Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American Sector**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.3, p. 217-231, 1988.

LACERDA, W. A. **Stability of Natural Slopes along the Tropical Coast of Brazil**. In: *Proc. of the Int. Symp. On Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, ed. Almeida, p.17-40, Balkema, Rotterdam, 1997.

_____. **Efeitos das Variações de Poro-Pressão sobre a Estabilidade de Encostas em Solos Residuais**. 2º Simpósio Pan-Americano de Escorregamentos de Terra. pp.381-388. Rio de Janeiro, 1997a

_____. **The behavior of colluvial slopes in a tropical environment**. IX International Symposium on Landslides. Rio de Janeiro, p. 1315-1343, 2004.

_____; SANDRONI, S. S. **Movimentos de massas coluviais**. In: *Mesa Redonda sobre os Aspectos Geotécnicos de Encostas*, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: Clube de Engenharia, 1985. p. III-1-19.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil mechanics, SI version**. John Wiley & Sons, 553 p. 1979.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. **Review of Soil-Water Characteristics Curve Equations**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v. 123, n. 12, p. 1106-1117, 1997.

LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. **Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil**. *Journal of Climate*, AMS. v. 14, 2001.

LIM, T. T.; RAHARDJO, H.; CHANG, M.F.; FREDLUND, D. G. **Effect of Rainfall on**

Matric Suctions in a Residual Soil Slope. Canadian Geotechnical Journal, v.33, pp. 618-628, 1996.

LOPES, E. S. S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar Paulista, na escala de 1:10.000.** 2006. 276f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro (SP), 2006.

LU, N.; GODT, J. **Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions.** Water Resource Research, v.44, W11404, 2008.

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

MAAIL, S.; HUAT, B. B. K.; JAMALUDIN, S. Index, engineering properties and classification of tropical residual soils. In: HUAT, B. B. K. et al. **Tropical Residual Soils Engineering.** London: Taylor & Francis Group, 2004. p. 37-55.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI.** Brasília: MMA, 2007. 212 p.

MARUYAMA, S. **Aquecimento Global?.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 125p.

MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T. L. **Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de Janeiro de 2011.** In: Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió, AL, 2011.

MEDEIROS, V. S. **Análise estatística de eventos críticos de precipitação relacionados a desastres naturais em diferentes regiões do Brasil.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MEDINA, J. I **Identificação e Classificação de Solos Tropicais Distribuição e Gênese dos solos Tropicais.** In: Encontro Técnico sobre Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos. São Paulo, 1983

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. **Modeling infiltration during a steady rain**. Water Resource Research, v.9, n.2, pp. 384-394, 1973

MELO, D. F. M. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MELLO, V. F. B. **Thoughts on Soil Mechanics Applicable to Residual Soils**. Southern Asian Conference on Soil Engineering, Hong Kong, p. 5-34, 1972

MENDONÇA, M. B.; COELHO, G. V. S.; CERUTTI, R. M. B. **Análise Estatística da Dependência entre Deslizamentos e Pluviometria no Bairro do Quitandinha, Petrópolis, RJ**. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas, 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Brasília, 2008. 242p.

MORGENSTERN, N. R.; MATTOS, M. M. **Stability of Slopes in Residual Soils**. Proceedings 5º Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones. Buenos Aires, 1975.

NERY, T.D.; VIEIRA, B.C. **O papel dos condicionantes geomorfológicos na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP)**. In 5º Conferencia Brasileira de Estabilidade de Encostas. vol.2, São Paulo, 2009. P 29-35

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

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo, 1995. 240 p.

NUNES, A. L. L. S.; SAYÃO, A. S. F. J.; RIOS FILHO, M. G. R.; DIAS, P. H. V. **Desastres e ações nas encostas do Rio de Janeiro**. In VI Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. vol.1, Angra dos Reis, 2013. P 74-96

OBREGÓN, G.; MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no Século XX no Brasil: Tendências de chuvas e temperaturas médias e extremas**. São Paulo, 2007. 87 p.

OLIVEIRA, C. M. M. **Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova Friburgo, Rio de Janeiro**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PINTO, J. L. T. M. G. **Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PRANDINI, F. L. **Cobertura Vegetal nos Processos e Evolução do Relevo: O Papel da Floresta**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1984. 10p.

PRESA, E. P. **Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succion controlada**. 1982. Tese (Doutorado) – Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1982.

RAHARJO, H.; LEE, T.; LEONG, E. C.; REZAUR, R. B. **Response of a residual soil slope to rainfall**. Canadian Geotechnical Journal, v. 42, pp. 340-351, 2005

RAHARDJO, H.; SATYANAGA, A; LEONG, E. C. Unsaturated soil mechanics for slope stabilization. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA. v. 43, n.1, p. 48-58, Março 2012.

SALLES, R. O.; AMARAL, C. **Estudo da Correlação entre Chuvas e Escorregamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro**. VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – VI COBRAE. v.2, p.526-530, Angra dos Reis – RJ, 2013.

SANTOS, L. V. **Estudo da influência de uma bentonita em um solo residual para uso como camada selante**. 2008. 157f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SINGH, V. P. **Hydrologic Systems: watershed modeling**. Englewood Clifs (NJ): Prentice Hall. 420 p. 1989.

SINGH, H.; HUAT, B. B. K. Origin, formation and occurrence of tropical residual soils. In: HUAT, B. B. K. et al. **Tropical Residual Soils Engineering**. London: Taylor & Francis Group, 2004. p.1-19.

SOARES, A. B. **Fluxo de água em talude arenoso: modelagem física e numérica**. 2006. 233p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOBIRNO, G.; NICOTERA, M. V. **Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides**. Engineering Geology Journal, Out. 2012

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. **Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão**. 5º CBGE, São Paulo, 1987. p. 225-236.

TEIXEIRA, M. S. **Atividade de ondas sinópticas relacionada a episódios de chuvas intensas na região do Sul do Brasil**. 2004. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

TERZAGHI, K. **Mechanisms of Landslides**. 1950. Tradução - "Mecanismos de Escorregamentos de Terra", de E. Pichler. Departamento de Livros e Publicações do Grêmio Politécnico, São Paulo, 1967.

TOWNSEND, F. C. Geotechnical Characteristics of Residual Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 111, n. 1, pp. 77-94, 1985.

TSAPARAS, I.; RAHARDJO, H.; TOLL, D. G.; LEONG, E. C. **Controlling parameters for rainfall-induced landslides**. Computers and Geotechnics, v. 29, p. 1-27, 2002.

VAN GENUCHTEN, M.T. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Science Society of America Journal.1980, v.44, pp. 892-898.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E.; CLIFTON, A. G. **Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction**. Canadian Geotechnical Journal, v. 33, p. 379-392, 1996.

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, 1986, p.491-500

VARGAS JR., E. A.; VELLOSO, R.C.; DE CAMPOS, T.M.P.; COSTA FILHO, L.M. **Saturated-Unsaturated analysis of water flow in slopes of Rio de Janeiro, Brazil.** Computers and Geotechnics, 1990, v. 10. p. 247-261.

VARGAS, M. **Some engineering properties of residual clays soils occurring in Southern Brazil.** ICSMFE, 3, v. 1, Zurich, 1953

VARGAS, M. **Estabilização de Taludes em Encostas de Gneisses Decompostos.** Anais do III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. v.1, Belo Horizonte, 1966

VARGAS, M. **Geotécnica dos Solos Residuais.** Revista Latinoamericana de Geotecnia, v. 1, n. 1, pp. 20-41, 1971

VARGAS, M. **Structurally Unstable Soils in Sothern Brazil.** VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscou, 1973

VARGAS, M. **Progresso dos Estudos Geotécnicos dos Solos Tropicais em São Paulo.** Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. COPPE/URFJ. Rio de Janeiro, 1981.

VARGAS, M. **Revisão histórico-conceitual dos escorregamentos da Serra do Mar.** Revista Solos e Rochas. v.22, São Paulo, 1989. p. 53-83

VARGAS, M. História dos conhecimentos geotécnicos: Serra do Mar. In: FALCONI, F. F.; NEGRO, A. **Solos do litoral de São Paulo**, São Paulo: ABMS, 1994.p. 1-16.

VARGAS, M.; PICHLER, E. **Residual Soil and Rock Slides in Santos Brazil.** Proceedings of the IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Londres, v.1, p. 43-46, 1957

VARNES, D.J. **Slope movement types and process.** Special Report 176: Landslides: Analysis and control, pp.11-33, 1978.

VAUGHAN, P. R. **Pore pressures due to infiltration into partly saturated slopes.** First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasília, Proceedings, v.2, p. 61-71, 1985

VAZ, L.F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais**. In: Revista Solos e Rochas, v.19, n.2, pp. 117-136, ABMS/ABGE, São Paulo, 1996.

VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WESLEY, L. D. **Influence of Structure and Composition on Residual Soils**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.116, n. 4, p. 589-602, 1990.

WOLLE, C. M. **Taludes naturais – Mecanismos de instabilização e critérios de segurança**. 1980. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

WOLLE, C. M. **Microescorregamentos na Serra do Mar**. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. Anais, v.1, p. 773-785. Rio de Janeiro, 1981.

WOLLE, C. M. **Peculiaridades de Comportamento de Taludes em Solos Tropicais**. In: Encontro Técnico sobre Solos Tropicais Lateríticos e Saprolíticos. São Paulo, 1983

WOLLE, C. M. **Poluição e escorregamentos – causa e efeito na Serra do Mar em Cubatão – SP**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Porto Alegre, Outubro 1986.

WOLLE, C. M. **Análise dos Escorregamentos Translacionais numa Região da Serra do Mar no contexto de uma Classificação de Mecanismos de Instabilização de Encostas**. 1988. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. **Deslizamentos em Encostas na Serra do Mar-Brasil**. Solos e Rochas, v. 12, n. único, p. 27-36, 1989.

WOLLE, C.M.; CARVALHO, C.S. **Taludes Naturais**. In: FALCONI, F. F.; NEGRO, A. **Solos do litoral de São Paulo**, São Paulo: ABMS, 1994.p. 179-203.

WOLLE, C. M.; GUIDICINI, G.; ARAUJO, J. S.; PEDROSA, A. **A slide mechanism in the slopes of the Serra do Mar Southern Brazil**. III International Congress of Engineering Geology, Madrid, 1978.

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. **Rain-induced Landslides in Southeastern Brazil.** Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, p. 1639-1642, 1989

ZHANG, L. L.; FREDLUND, D. G.; ZHANG, L. M.; TANG, W. H.; **Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained.** Canadian Geotechnical Journal, v.41, p. 569-582, 2004.

ZHU, Y.; TOTH, Z. **Extreme weather events and their probabilistic prediction by NCEP ensemble forecast system.** 81st American Meteorological Society Annual Meeting. P1.38. 15 January 2001.