

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DO SOLO EM ENCOSTA SOB INFLUÊNCIA DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL RASO – NOVA FRIBURGO, RJ

DETERMINATION OF PHYSICAL PARAMETERS OF SOIL IN SLOPE UNDER INFLUENCE OF TRANSLATIONAL SLIDE – NOVA FRIBURGO, RJ

ROBERTA PEREIRA DA SILVA

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: pereira.roberta00@gmail.com

KARINA MENEZES MACHADO

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: karina.menezes@gmail.com

GERSON CARDOSO DA SILVA JÚNIOR

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: gerson@acd.ufrj.br

ANA LUIZA COELHO NETTO

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: ananetto@acd.ufrj.br

LEONARDO DE BONA BECKER

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: leonardobecker@poli.ufrj.br

ANDERSON MULULO SATO

Universidade Federal Fluminense, Angra dos Reis, RJ, Brasil
E-mail: andersonsato@id.uff.br

RESUMO ABSTRACT

No presente trabalho buscou-se determinar a influência de parâmetros físicos do solo e dos fluxos sub-superficiais de água na deflagração de escorregamentos translacionais rasos em encosta sobre substrato granítico. Foram aplicadas metodologias de investigação hidrologico-geotécnica como o método geofísico Ground Penetration Radar (GPR); sondagens a trado; análises qualitativa (caracterização tátil-visual) e quantitativa (análise granulométrica e comportamento *in situ* dos solos envolvidos na ruptura do ponto de vista de estrutura) e ensaios de campo para obtenção da condutividade hidráulica. Duas hipóteses sugerem que os fluxos de água subterrânea são de fundamental importância para o entendimento da deflagração dos movimentos

The objective of this work is to determine the influence of soil physical properties and groundwater flows on triggering mechanisms of shallow translational landslides on slopes with granite bedrock. Different hydrologic-geotechnical investigation methods were applied. Such methods included Ground Penetration Radar (GPR); auger boring; qualitative analysis (tactile and visual observations) and quantitative analysis (grain size analysis and *in situ* behavior of soil structure during the rupture process) and also hydraulic conductivity field tests. Two hypotheses suggest that groundwater flows are of utmost importance in landslides triggering mechanisms during extreme rain events, such an event occurred at Rio de Janeiro's state mountainous

gravitacionais de massa em eventos extremos de chuva, como o ocorrido na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, em janeiro de 2011. A primeira hipótese considera, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica, a formação de um lençol suspenso devido à existência de uma camada mais permeável sobreposta a uma camada menos permeável. A outra hipótese adiciona a influência dos blocos rochosos *in situ*, evidenciados no radargrama e observados em campo, que associada à diferença de condutividade hidráulica entre as camadas, poderia ocasionar fluxo horizontal e ascendente, desencadeando os movimentos de massa.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, fluxos sub-superficiais, movimentos de massa.

1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de condutividade hidráulica (K) é um parâmetro físico-hidrológico do solo, que caracteriza a capacidade do solo em transmitir água através de seu perfil. Ela está diretamente relacionada às propriedades físicas do solo, como: tamanho das frações granulométricas, arranjo dos grãos e volume das partículas (Hillel 1980). Além disso, os valores de condutividade hidráulica podem ser atribuídos à estruturação (formação de agregados) dos solos *in situ*, especialmente quando se trata de frações granulométricas mais finas, demonstrando que, embora os valores de K sejam comumente classificados conforme as frações granulométricas, a textura por si só não representa na íntegra o comportamento da condutividade hidráulica (Lambe & Whitman 1969, Mesquita & Moraes 2004).

Em eventos extremos de chuva, como o ocorrido em janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, a condutividade hidráulica, aliada às características intrínsecas do perfil de solo, pode proporcionar condições hidrológicas adversas e induzir a rupturas, devido às descontinuidades entre camadas do terreno, que podem causar a formação de zonas saturadas suspensas que geram fluxos paralelos em diferentes posições da encosta (Selby 1993, Brugger et al. 1997, Lacerda et al. 1997, Van Asch et al. 1999). Isso ressalta a importância do estudo da condutividade hidráulica dos solos, haja vista a função que esta

região on January 2011. The first hypothesis consider, according to hydraulic conductivity tests results, the formation of a suspended water table due to a permeable layer above an intermediate less permeable layer. The other hypothesis adds the influence of *in situ* rock blocks, shown in GPR radargram and observed in field inspection. The association between those blocks and the higher hydraulic conductivity of the top layers, could result in horizontal and ascending flows triggering mass movements.

Keywords: hydraulic conductivity, groundwater flows, mass movements.

propriedade exerce nos modelos de rupturas de-flagradas durante eventos extremos de chuva.

A ocorrência de eventos de magnitude catastrófica ao longo da Serra do Mar é atestada pelos espessos depósitos coluvionares, muitos deles evidenciando o retrabalhamento de depósitos de escorregamentos pretéritos (Fernandes et al. 2001). Porém, a ocorrência desses eventos pode ser potencializada por uma série de fatores, como: o crescimento demográfico acelerado; a falta de planejamento territorial; e o uso ineficiente das bacias hidrográficas (Kobiyama et al. 2006). Estes fatores criam novas relações entre os agentes controladores de ordem natural, alterando as propriedades físicas do solo por mudanças de uso e cobertura, as quais influenciam na resposta hidrológica do terreno (Sidle et al. 1985, Fernandes & Amaral, 1996 Augusto Filho & Virgili 1998).

As características hidrológicas dos solos são resultantes da complexa interação entre os fatores geomorfológicos, geológicos, geotécnicos, climáticos e da ação antrópica, e podem determinar a frequência, o tipo e o tamanho dos escorregamentos (Van Asch et al. 1999). Na Serra do Mar, compartimento geológico-geomorfológico que se estende do Sudeste ao Sul do Brasil, há um predomínio de escorregamentos do tipo translacional raso (Lacerda 1997), os quais, frequentemente, caracterizam-se por superfícies de ruptura marcadas pelo contato entre solo e rocha ou entre dois tipos de solos, associadas às heterogeneidades dos materiais, que representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas (Guidicini & Nieble 1984).

Levando em conta o papel da água como principal agente deflagrador dos escorregamentos, este estudo busca o entendimento das relações existentes entre a dinâmica hidrológica da encosta-alvo da pesquisa, o substrato e as estruturas geológicas nos processos de infiltração e percolação da água. O intuito foi avaliar o comportamento dos fluxos subsuperficiais de água como subsídio ao entendimento das condições de deflagração dos escorregamentos. A hipótese inicial foi a de que a formação de um lençol suspenso, durante o evento extremo de chuva de janeiro de 2011 (levando ao aumento da poro-pressão e redução da tensão efetiva, e conseqüentemente, da resistência ao cisalhamento), teriam propiciado condições para deflagração de muitos dos 3.622 escorregamentos mapeados numa área de aproximadamente 421 km², como registrado por Coelho Netto et al. (2013).

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Nova Friburgo (a cerca de 140 km da capital Rio de Janeiro), no distrito de Campo do Coelho, na coordenada 22°16'18" S / 42°35'56" O (SIRGAS 2000), a aproximadamente 1110 m de altitude, em uma área predominantemente rural na bacia do córrego do Roncador, afluente do rio Grande.

A escolha do município está relacionada ao fato de ter sido o mais afetado no evento extremo de chuva ocorrido em janeiro de 2011 na Região Serrana. Este evento é considerado o maior desastre socioambiental registrado no país, segundo o Banco Mundial (2012), devido as onerosas perdas humanas e materiais. Nova Friburgo concentrou 60% da população atingida, 180 mil pessoas afetadas.

Nova Friburgo está situada na Serra do Mar, formada por um grande batólito granítico de rochas magmáticas intrusivas, associadas a migmatitos heterogêneos, biotita gnaisses graníticos, leucogranitos gnáissicos e granitos pós-colisionais (Hartwig & Riccomini 2009). De acordo com Dantas et al. (2001), a característica marcante das escarpas serranas é a presença de solos pouco espessos e bastante lixiviados, devido ao clima úmido, proporcionado pela barreira física imposta ao avanço dos sistemas frontais de precipitação. O município é apontado como o mais chuvoso do Estado,

com precipitação média anual (1977 – 2000) em torno de 2500 mm nas áreas mais altas, decrescendo progressivamente para norte até 1300 mm (Coelho Netto et al. 2013). Estes autores indicam ainda que o clima predominante na Região Serrana é o Tropical de Altitude, e a temperatura média anual é de 16° C, podendo variar entre extremos de 37° C e - 2° C. O bioma característico da Região Serrana é o da Mata Atlântica.

A encosta alvo desta pesquisa foi escolhida devido sua representatividade na paisagem local frente ao evento extremo de chuva de janeiro de 2011 (Avelar et al. 2011), a partir do inventário de cicatrizes, desenvolvido por Coelho Netto et al. (2013). A área-alvo apresenta uma topografia concava resultante de várias gerações de escorregamentos, iniciados a, pelo menos, 10.000 anos atrás, e reativados novamente em janeiro de 2011 (Coelho Netto et al., 2016). Esta reativação da feição erosiva resultou de um escorregamento do tipo translacional raso, com uma espessura de ruptura média de 1,5 m próximo as bordas da cicatriz (Machado 2013). A declividade média do talude é de 32° e suas dimensões projetadas são de 170 m de largura e 300 m de comprimento, com uma área de aproximadamente 4 ha. O substrato rochoso é dominado por rochas do tipo ortognaisses graníticos (Vinagre et al. em preparação), as quais favorecem a produção de blocos *in situ*. Além disso, as coberturas de colúvios acumulados a partir do sua porção média-inferior apresentam-se ricas em blocos transportados em eventos passados e atuais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de atingir os objetivos propostos pela pesquisa, optou-se por uma caracterização física dos materiais do solo, incluindo a execução de sondagens, a coleta de amostras para análises qualitativa (análise tátil-visual) e quantitativa (análise granulométrica), e a realização de ensaios de condutividade hidráulica *in situ*. Para um melhor conhecimento da área em subsuperfície e subsidiar a alocação das sondagens e instalação dos piezômetros, optou-se por utilizar o método geofísico Ground Penetrating Radar (GPR). As técnicas e ensaios realizados são descritos abaixo.

3.1 Ground penetrating radar (GPR)

Foi realizado um perfil longitudinal de, aproximadamente, 110 m de extensão para a obtenção de dados referentes à espessura e profundidade das camadas de solo, características do embasamento rochoso e diferenças entre horizontes (Figura 1). Informações sobre a profundidade do topo rochoso e a localização do nível freático não puderam ser obtidos devido as limitações do terreno, que não permitiram a utilização de uma antena de maior alcance em profundidade. Para a aquisição dos dados empregou-se uma antena de alta frequência de 200 MHz, a qual possibilita, segundo Porsani (1999), um alcance ótimo até 5 metros de profundidade, ou seja, maior que a profundidade do escorregamento observado.

Os dados foram coletados utilizando um aparelho de GPR, modelo TerraSIRch SIR (Sub-surface Interface Radar) System-3000 fabricado pela Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI), monoestática com sistema de antena blindada, que tem a vantagem de sofrer menos interferências por ruídos eletromagnéticos externos (torres de alta tensão, celulares, rádio, etc.). O modo de

operação utilizado foi o perfil de reflexão com afastamento constante, mais conhecido como “common offset”.

O tratamento dos dados GPR se deu basicamente nas seguintes etapas: edição dos dados, processamento do sinal e apresentação da imagem processada. Cada um desses passos foi monitorado individualmente no “software”, com o objetivo de proporcionar o melhor ajuste da seção radargrama a ser produzida. Os arquivos de dados receberam processamentos dentro do software REFLEXW, versão 4.2.

3.2 Sondagens a trado (ST)

Foram realizados 9 furos de sondagem distribuídos em quatro posições da encosta. Na primeira posição (ST 01) foram executados três furos em diferentes profundidades e nas demais posições (ST 02, ST 03, ST 04) foram realizados apenas dois furos em profundidades de interesse, visando a coleta de amostras de solo e instalação de permeâmetros para a realização de ensaios de condutividade hidráulica *in situ* (Figura 1).

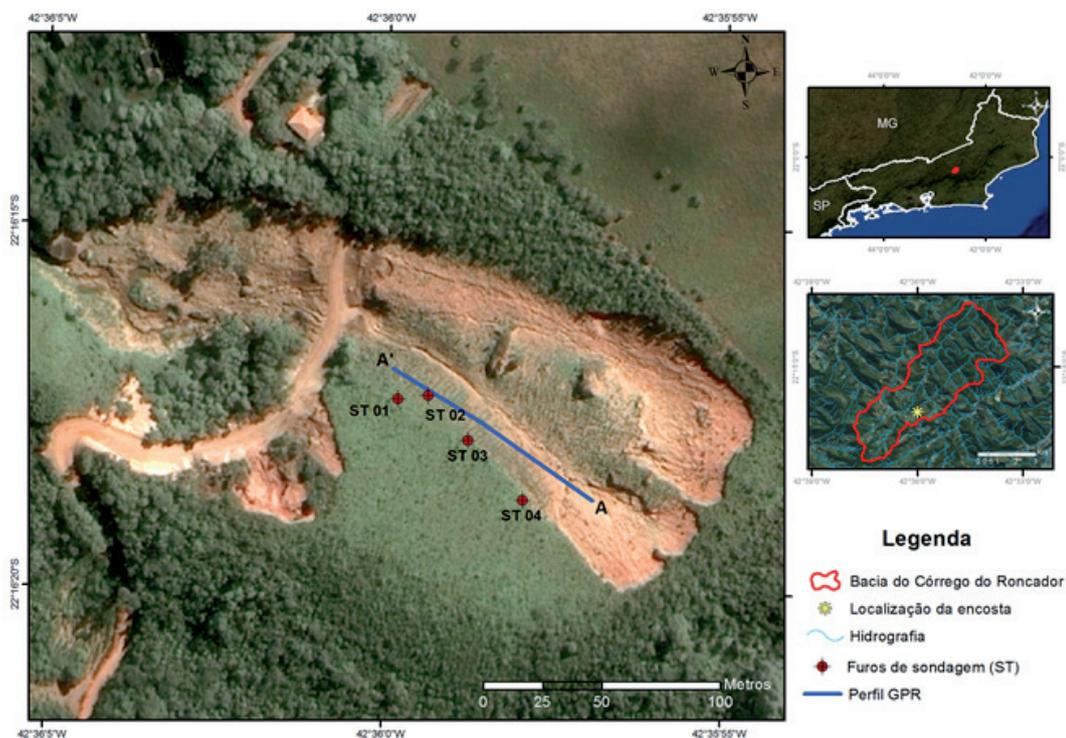


Figura 1 - Cicatriz do deslizamento de Janeiro de 2011, com as localizações do perfil de GPR e dos pontos de sondagens a trado (ST) na encosta experimental situada na vertente direita do médio vale do Córrego do Roncador, no município de Nova Friburgo - RJ.

3.3 Caracterização tátil-visual e análise granulométrica

A caracterização física do solo foi realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ, a partir de amostras coletadas nos diferentes níveis dos perfis das sondagens. O primeiro procedimento executado foi a análise tátil-visual do solo, onde buscou-se observar o tipo dos grãos; a cor, de acordo com a tabela Munsell (1994); os minerais predominantes; a matriz do solo; a coesão; friabilidade; presença de raízes; dentre outras características. Após sua ordenação pela profundidade para um melhor entendimento da estratigrafia do perfil, as amostras foram examinadas individualmente, e as que apresentavam características semelhantes foram agrupadas, e daí foram escolhidas as amostras para a realização das análises granulométricas. As análises foram feitas baseadas no Manual de Métodos de Análise do Solo da EMBRAPA (1997).

Nas amostras selecionadas foram realizadas análises granulométricas dos materiais através de ensaios de granulometria dispersa (peneiramento e sedimentação), segundo os procedimentos da norma técnica da ABNT (1984), e, densidade real dos grãos, segundo método de ensaio do DNER (1994). Os ensaios de sedimentação, além de serem executados com defloculante hexametáfosfato de sódio, com pH igual a 9, também foram realizados sem o uso de defloculante e aparelho dispersor, utilizando uma metodologia modificada, como em Cruz (1996), Rodriguez (2005), Fonseca (2006), Leal (2009), Silva (2014), dentre outros. Na metodologia modificada, as partículas do solo não são dispersas, e, por isso, os resultados refletem as reais condições que os agregados do solo apresentam em campo. Com o intuito de indicar um possível comportamento agregado (ou estruturado) do solo, cada vez mais se tem utilizado a comparação entre as análises granulométricas ABNT (1984) e a metodologia modificada.

3.4 Ensaios de condutividade hidráulica in situ na zona não saturada

Para a determinação da condutividade hidráulica na zona não saturada, utilizaram-se 15 furos de sondagem a trado executados na média/

alta encosta (Figura 1). Tais furos permitiram a estimativa da condutividade hidráulica dos solos. Utilizou-se um tubo de PVC de 32 mm de diâmetro no qual foram feitas ranhuras nos 30 cm inferiores do tubo para permitir a passagem de água. Em torno das ranhuras, posicionaram-se telas de nylon, para evitar a passagem de partículas de solo. Esses dispositivos foram denominados “permeômetros” (Pm) no contexto do trabalho diferenciando-se dos piezômetros, que atingem a zona saturada do subsolo (Figura 2).

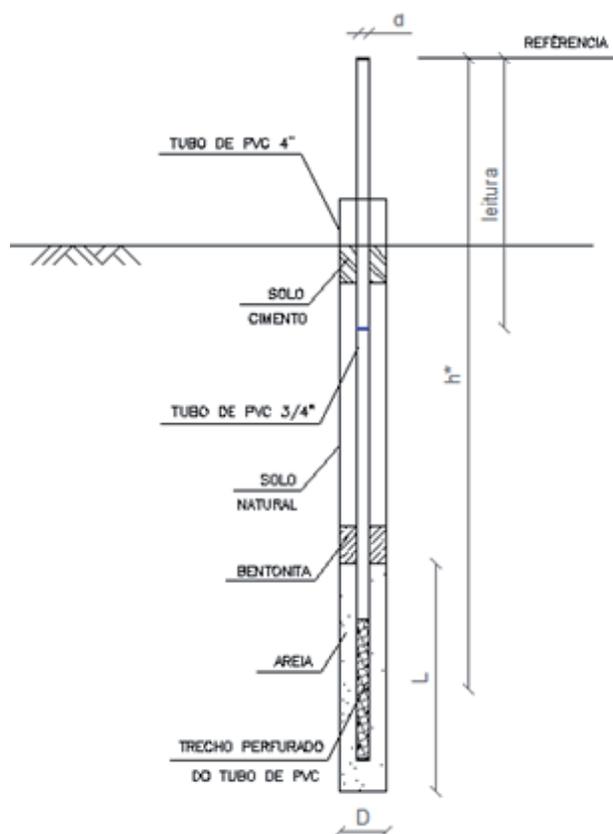


Figura 2 - Representação esquemática do permeômetro *in situ* idealizado para o estudo.

Na Tabela 1 encontram-se a distribuição dos locais de realização de ensaios de permeabilidade *in situ* na encosta e a profundidade de instalação dos permeômetros. Optou-se pela obtenção desse parâmetro por métodos de campo, porque, apesar de laboriosos, são mais representativos, tendo em vista o maior volume de solo ensaiado; a não alteração da estrutura natural do solo, devido aos processos de amostragem; e a determinação da condutividade hidráulica segundo a direção predominante do escoamento (Cedergren 1989). O método de execução dos ensaios foi o de carga

variável, no qual a variação do nível d'água em um intervalo de tempo foi registrada até que o intervalo de descida da coluna d'água se tornasse

constante e se atingisse o estado de equilíbrio a partir do qual se obteve a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}).

Tabela 1 - Profundidade de instalação dos permeômetros (Pm), separadas por furos de sondagem.*

Pm	Prof. (m)						
1.1	0,64	2.1	3,26	3.1	2,10	4.1	2,96
1.2	1,10	2.2	6,34	3.2	4,33	4.2	5,36
1.3	2,59			3.3	6,65	4.3	6,38
1.4	5,00			3.4	7,39		
1.5	6,45			3.5	14,35		

* O primeiro algarismo da nomenclatura dos permeômetros corresponde à localização do equipamento na encosta (ST 01 - 1; ST 02 - 2; ST 03 - 3; ST 04 - 4) e o segundo algarismo é referente à profundidade (crescente) de instalação do Pm.

Quantidades significativas de água foram adicionadas aos permeômetros visando à formação de um bulbo de saturação, para que assim o ensaio pudesse ser executado. Após a adição suficiente de água, o que foi estimado com a relativa estabilização do rebaixamento no furo, o cronômetro foi disparado e leituras de 15 em 15 segundos foram feitas com auxílio de um medidor elétrico de nível hidrostático, como observado na Figura 3. Os ensaios foram repetidos no mínimo 2 vezes,

para dar maior confiabilidade aos dados coletados em campo. Apesar de mais representativos, os ensaios de campo podem apresentar problemas relacionados ao não controle das condições de contorno. Por isso, embora se tenha tentado, com o bombeamento contínuo, obter o estado estacionário em termos de saturação do aquífero para estimativa de K_{sat} , essa condição não pôde ser assegurada nos ensaios.

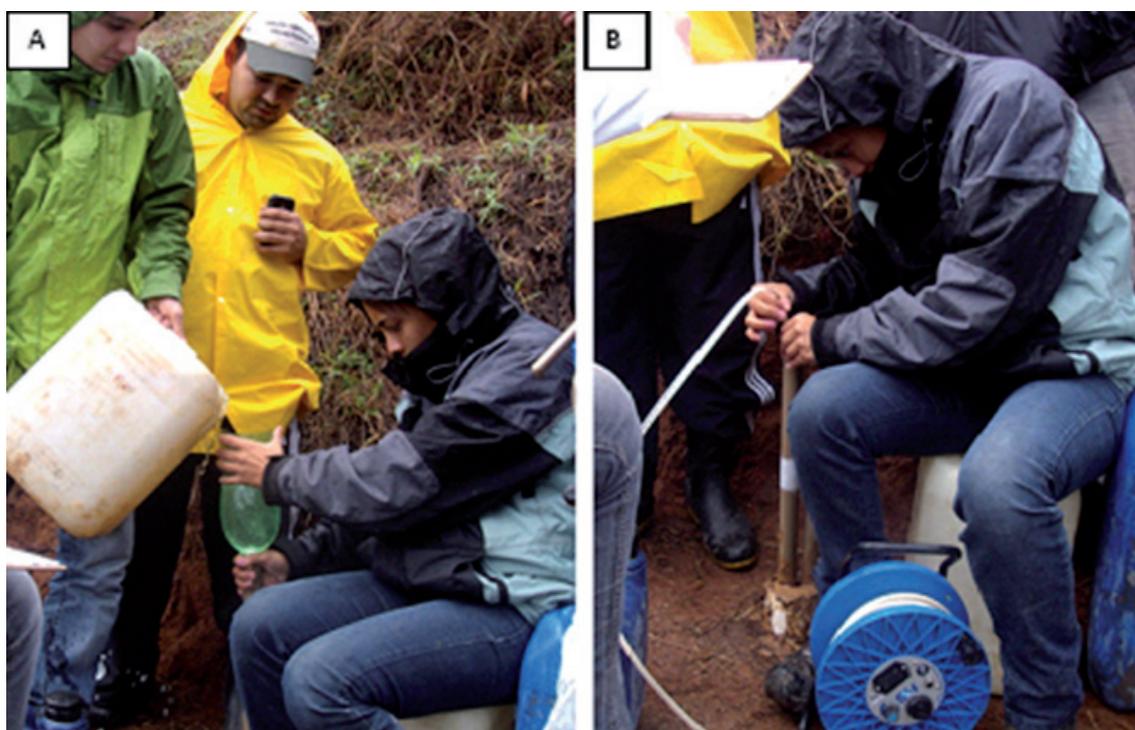


Figura 3 - Etapas de realização dos ensaios de condutividade hidráulica *in situ*. Na Figura A tem-se a adição de água no permeômetro, visando à formação de um bulbo de saturação. Na figura B é mostrado a execução das leituras em campo, com auxílio de um medidor de nível hidrostático elétrico.

Após a realização dos ensaios os dados foram processados de acordo com método Hvorslev (1951), como observado nas equações (1) e (2). Apesar de a solução matemática proposta por Hvorslev (1951) ser comumente utilizada para análises em zona saturada, assumiu-se que

na área perfurada a pressão é próxima à pressão atmosférica e a carga piezométrica é nula, o que permite adotar a carga piezométrica instantânea igual à altura de coluna d'água medida no tubo, em um estado de saturação no bulbo formado ao redor do furo.

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left(\frac{2mL}{D}\right)}{8 \cdot L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{se} \quad \frac{mL}{D} > 4, \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (1)$$

ou

$$K_h = \frac{d^2 \cdot \ln\left[\frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{mL}{D}\right)^2}\right]}{8 \cdot L(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad \text{sendo } m = \sqrt{\frac{K_h}{K_v}} \quad (2)$$

onde,

D - diâmetro do furo (cm)

L - altura do filtro de areia (cm)

h_2 - carga piezométrica para $t = t_2$ (cm)

t - tempo (s)

K_h - permeabilidade horizontal (cm/s)

d - diâmetro do tubo (cm)

h_1 - carga piezométrica para $t = t_1$ (cm)

K_v - permeabilidade vertical (cm/s)

m - razão de transformação

4 RESULTADOS

4.1 Ground penetrating radar (GPR)

Diferentes respostas espectrais foram observadas entre 2,0 e 2,5 m de profundidade ao longo do perfil (Figura 4). Isso demonstra uma espessura relativamente constante das camadas do solo ao longo da encosta. Foram interpretadas, na seção radargrama, três feições bem definidas, que se apresentam como refletores. Também foram destacadas duas feições geológicas muito bem marcadas.

As feições hiperbólicas identificadas ao longo do perfil foram interpretadas como sendo blocos rochosos em subsuperfície, e as feições geológicas bem marcadas foram interpretadas como sendo estruturas rochosas bem consolidadas. Estas feições se concentraram nos primeiros 5 m do perfil e, a partir daí, percebe-se uma grande influência de ruídos, que podem ser provenientes do alcance limitado da antena ou da influência de outras fontes de campos eletromagnéticos (Figura 4).

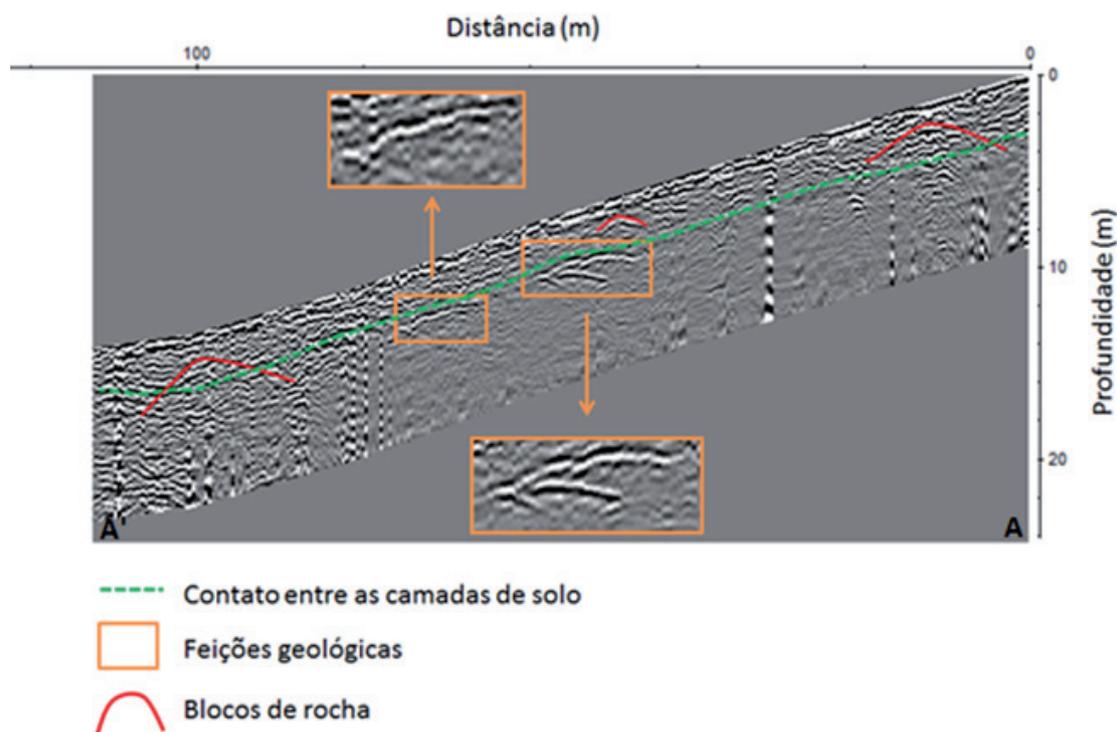


Figura 4 - Seção radargrama referente ao perfil longitudinal realizado na encosta.

4.2 Análises granulométricas

Os resultados das análises granulométricas também apontaram a existência de duas camadas de solo com características distintas, assim como observado no radargrama, que foram classificadas como: laterítica, mais superficial (cuja base localiza-se entre 1,5m e 4,0m); e saprolítica, mais profunda. A Tabela 2 lista a espessura de cada camada ao longo das sondagens realizadas. É importante ressaltar que para este trabalho não foi considerada a gênese do solo. Isto significa dizer que um solo classificado como laterítico pode ser um colúvio em processo de laterização ou um solo residual maduro.

Tabela 2 - Espessura das camadas laterítica e saprolítica, de acordo com os boletins de sondagem.

Sondagens	Laterítico (prof. m)	Saprolítico (prof. m)
ST 01	0,00 - 1,65	1,65 - 6,45
ST 02	0,00 - 2,45	2,45 - 6,50
ST 03	0,00 - 4,00	4,00 - 14,45
ST 04	0,00 - 2,50	2,50 - 6,50

Na Figura 5 tem-se a classificação das amostras, segundo triângulo textural proposto por Lemos & Santos (1996). Os solos ensaiados com uso de aparelho dispersor e defloculante (CD) foram classificados de uma maneira geral como franco arenosos. Já os solos ensaiados sem o uso de aparelho dispersor e defloculante (SD) foram classificados, em sua maioria, como areia franca, evidenciado o comportamento agregado dos solos em condições de campo (Figura 6).

Os percentuais de argila e silte são os que sofrem maior alteração, quando comparados o método proposto pela ABNT (CD) e a metodologia modificada (SD). Nos solos classificados como lateríticos são encontrados, nos ensaios CD, altos percentuais de argila (20 - 30%), devido ao avançado grau de intemperismo, que lhe confere a cor avermelhada, tendo a caulinita como argilo-mineral mais comum. Porém, nos ensaios SD os percentuais de argila para estes mesmos solos são nulos. Os solos classificados como saprolíticos, estão diretamente relacionados à rocha matriz, logo apresentaram menores percentuais de argila (cerca de 10%) e maiores percentuais de areia (40 - 60%), devido a menor ação intempérica e tipo de rocha matriz.

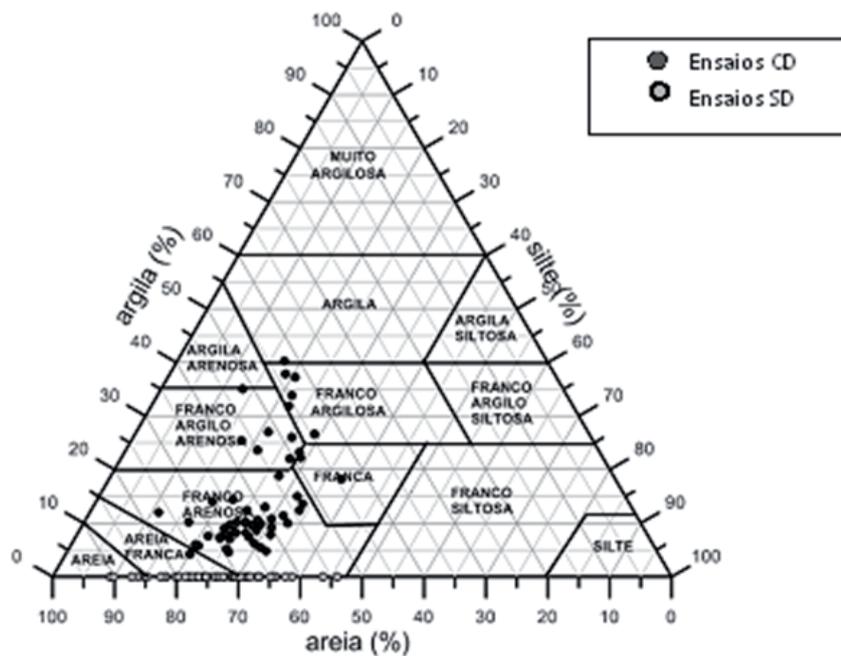


Figura 5 - Triângulo de classificação textural. Modificado de Lemos & Santos (1996).

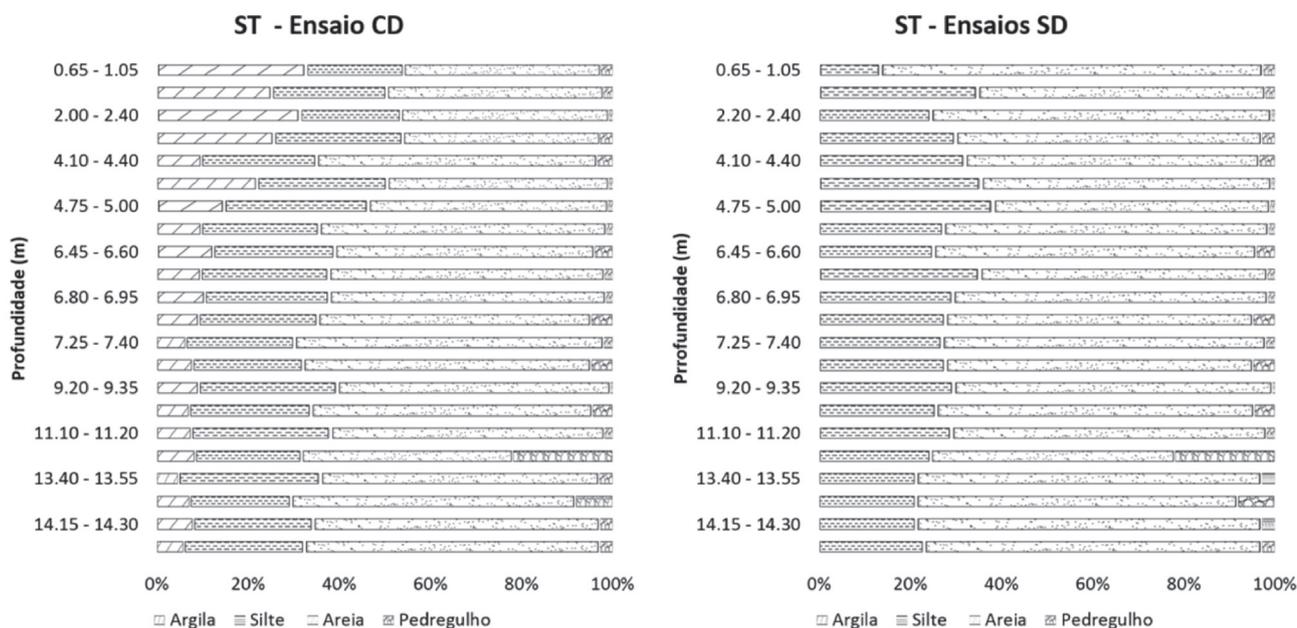


Figura 6 - Comparação entre os ensaios granulométricos com uso de aparelho dispersor e defloculante (CD) e sem uso de dispersor e defloculante (SD) de um perfil de solo representativo.

4.3 Condutividade hidráulica

Nos ensaios de condutividade hidráulica realizados na zona não saturada, os permeâmetros instalados em profundidades rasas (< 3m) indicaram um valor médio de K_{sat} mais elevado do que os permeâmetros instalados em maiores

profundidades (> 3m), ($2,7 \times 10^{-4}$ cm/s e $2,8 \times 10^{-5}$ cm/s, respectivamente). Essa diferença de condutividades hidráulicas na zona não saturada coincidiu com a mudança de camadas entre os solos saprolíticos e lateríticos, evidenciada no radargrama e nas sondagens a trado.

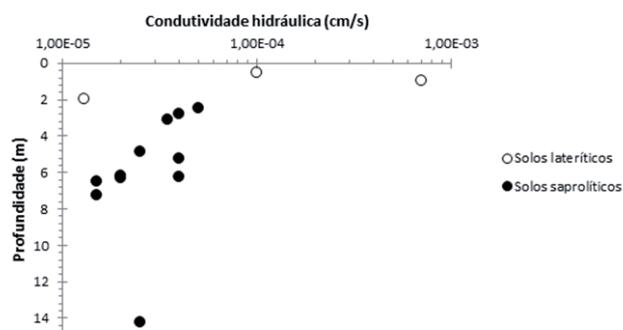


Figura 7 - Valores de condutividade hidráulica dos solos lateríticos e saprolíticos, de acordo com o método proposto por Hvorslev (1951).

5 DISCUSSÃO

A constatação da existência de duas camadas de solo, com composição mineralógica e comportamento hidrológico distintos, foi observada tanto no radargrama quanto nas análises tátil-visuais e granulométricas, e também nos ensaios de condutividade hidráulica executados em campo. No radargrama (Figura 4), a diferença entre as camadas é atestada pela resposta espectral de cada material. Percebe-se que os primeiros metros do solo apresentam uma resposta mais rugosa, enquanto abaixo dessa profundidade o solo mostrou uma aparência mais suave. Este fato pode estar diretamente relacionado a diferenças na composição mineralógica, ao percentual de umidade, ao nível de porosidade e ao grau de intemperismo do solo.

A partir das análises granulométricas, as camadas de solo foram classificadas como laterítica (camada superior) e saprolítica (camada inferior). A formação do solo laterítico, se dá pela atuação dos processos pedológicos envolvendo o intemperismo físico e principalmente químico (diminuição do tamanho das partículas, mudança na mineralogia e redução da resistência das cimentações entre as partículas), através da intensa migração de partículas, dando origem a um solo com estrutura estável e porosidade elevada com formação de grumos (Nogami & Villibor 1995, Fookes 1997). A argila em grumos assume o comportamento hidrológico de partículas de silte, podendo chegar até mesmo ao comportamento de uma areia fina (Rodriguez 2005, Fonseca 2006, Leal 2009, Silva 2014), como pode ser observado na comparação dos percentuais de argila, silte e

areia, obtidos em cada uma das metodologias (Figura 6). Já os solos saprolíticos, como evidenciado pelas estruturas reliquias coletadas em campo, apresentam manchas, xistosidades, vazios e outras características inerentes à rocha matriz. Sua composição mineralógica é dependente do tipo de rocha que é derivado, que confere uma coloração acinzentada ao saprolito, e do grau de intemperismo sofrido por esta (Futai 1999).

De uma maneira geral, observa-se que, com o aumento da profundidade, os percentuais de argila diminuem e os de areia e pedregulho aumentam, mostrando um clássico perfil de solos tropicais nos ensaios CD. A composição dos solos nos ensaios SD resume-se basicamente a silte e areia, evidenciando o comportamento agregado das argilas *in situ*. A utilização desses dois métodos para as análises granulométricas possibilitou observar como o comportamento do solo *in situ* não está diretamente relacionado à sua composição granulométrica, ou seja, depende, dentre outros fatores, das condições climáticas, das taxas de intemperismo, da mineralogia da rocha matriz e do processo de formação do solo.

A diferença de condutividade hidráulica encontrada entre as duas camadas de solo estudadas em eventos extremos de chuva pode levar a formação de um lençol suspenso com fluxo paralelo à superfície do terreno. Para estes mesmos solos, Pita (2014) encontraram, através dos métodos empíricos propostos por Hazen, Kozeny-Carman e Breyer, diferenças de até uma ordem de grandeza entre os solos lateríticos e saprolíticos, corroborando assim a ideia de que uma camada mais permeável sobreposta a uma menos permeável.

Essas características de condutividade hidráulica do solo aliadas a presença de blocos, (como evidenciado pelo radargrama e também por observações em campo), podem favorecer o processo de exfiltração, que tende a contribuir para a instabilidade da encosta. Lacerda (1999) demonstrou a influência de diques de diabásio na instabilidade de uma encosta localizada no município de Teresópolis-RJ. Segundo este autor, os diques agem como um obstáculo ao fluxo subsuperficial. A interpretação das anomalias nas linhas de fluxo geradas pela presença dos diques, e o conseqüente fluxo ascendente, conferem a este

fenômeno a geração de uma superfície potencial de ruptura.

Assume-se, nesta hipótese, que blocos agiram como obstáculo ao fluxo gerando uma pressão de fluxo ascendente e condições hidrogeológicas adversas à estabilidade, à semelhança do modelo dos diques proposto por Lacerda (1999). Wilson (1988) propôs um modelo em que a condutividade hidráulica diminui com o aumento da profundidade, assim como observado na área em questão. A maior condutividade hidráulica nos pontos menos profundos é evidenciada pelos ensaios *in situ*, que sugerem a existência de um fluxo planar entre camadas, que pode vir a exfiltrar quando atinge um obstáculo impenetrável, como os blocos rochosos.

Ao se avaliar a ação dos blocos na instabilização da encosta é importante ter em mente que, nos solos residuais tropicais com substrato granítico, o intemperismo se dá na forma da esfoliação esferoidal, que resulta em formas arredondadas e esferoidais. O grau de alteração tende a diminuir com o aumento da profundidade, porém é possível encontrar blocos de relevância hidrológica em pequenas profundidades.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com a metodologia empregada sugerem que os fluxos de água subterrânea são de fundamental importância para o entendimento dos escorregamentos durante eventos extremos de chuva, como ocorrido em janeiro de 2011. Os altos índices pluviométricos aliados às diferenças geohidromecânicas entre as camadas, permitem concluir que, localmente, a camada laterítica apresenta condutividade hidráulica maior do que a camada subjacente (saprólítica), o que pode justificar a formação de um lençol suspenso durante eventos extremos de chuva. Apesar dos maiores percentuais de frações finas observados nos solos lateríticos, estas partículas apresentam um comportamento agregado, devido à estruturação do solo. Isso demonstra que considerar apenas a composição granulométrica do solo para análises de permeabilidade dos materiais constituintes da encosta pode conduzir a resultados não condizentes com o comportamento do solo *in situ*. A relação entre composição granulométrica

e valores de condutividade hidráulica não deve ser descartada, pois auxilia na elucidação da dinâmica dos fluxos, visto que a condutividade hidráulica é uma propriedade muito complexa, que resulta em grande variabilidade espacial e temporal (Lambe & Whitman 1969, Schoeneberger et al. 1995, Vieira & Fernandes 2004).

A morfometria da encosta e as características intrínsecas ao perfil de solo são outros elementos que contribuem para a explicação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica. A concavidade suave, observada na encosta, caracteriza a convergência e o direcionamento dos fluxos d'água em caminhos preferenciais, ditando a concentração dos fluxos (Anderson & Burt 1978). Essa convergência de fluxos aumenta o intemperismo nos solos, principalmente nos solos mais superficiais (lateríticos), que se traduz em maiores índices de vazios no solo, e consequentemente maiores valores de K. Outra influência da morfometria relaciona-se a efeito da declividade no condicionamento dos movimentos de massa. A encosta possui declividade média de 32°, o que, segundo estudos conduzidos por Palma (2013), representa uma declividade crítica para a ocorrência de deslizamentos para a mesma região de Nova Friburgo - RJ.

Todos os condicionantes supracitados, aliados à presença de blocos rochosos graníticos em subsuperfície, conforme evidenciado pelo levantamento geofísico, criam condições para que supor que possa haver exfiltração do fluxo subsuperficial na encosta, visto que os blocos agem como superfícies impermeáveis que interferem na percolação do fluxo d'água, formando assim um cenário propício a instabilização da encosta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos Laboratórios GEOHECO-UFRJ (IGEO - UFRJ), HIDROGEO-UFRJ (IGEO - UFRJ), Mecânica dos Solos Prof. Fernando Emmanuel Barata (Escola Politécnica - UFRJ) e Laboratório de Geotecnia (COPPE - UFRJ), que através da pesquisa científica, buscam aprofundar o conhecimento sobre os diferentes mecanismos que regulam a dinâmica das encostas. E as agências de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPERJ que viabilizaram financeiramente a execução desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Anderson M. G. & Burt T. P. 1978. Experimental investigations concerning the topographic control of soil water movement on hillslopes, *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 29: 52 – 63.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. 13 p.
- Augusto Filho O. & Virgili J. C. 1998. Estabilidade de Taludes. In: Oliveira A.M.S. & Brito S.N.A. (eds) *Geologia de Engenharia*, São Paulo, ABGE. p.: 243-269.
- Avelar A. S., Coelho Netto A. L., Lacerda W. A., Becker L. B., Mendonça M. B. 2011. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: C. Margottini, P. Canuti, K. Sassa. (Org.) *Landslide Science and Practice*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, p.:265-270.
- Banco Mundial. 2012. Pesquisas sobre desastres naturais. Disponível em: <http://www.worldbank.org/pt/country/brazil>. Acessado em 20 de maio de 2015.
- Brugger P. J., Ehrlich M., Lacerda W. A. 1997. Movements, piezometric level and rainfall at two natural slopes. In: ABMS, 2ª COBRAE, Conf. Bras. Estab. Enc., 1, Anais, p. 13-20.
- Cedergren H. R. 1989. Seepage, drainage and flow nets. John Wiley and Sons, New York, 496 pp.
- Coelho Netto A. L., Sato A. M., Avelar A. S., Viana L. G. G., Araújo I. S., Ferreira D. L. A., Lima P. H., Silva A. P. A., Silva R. P. 2013. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. In: Claudio Margottini & Paolo Canuti, Kyoji Sassa. (Org.) *Landslide Science and Practice*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, p.:377 -384.
- Cruz P. T. 1996. 100 barragens brasileiras: casos históricos, material de construção, projeto. Oficina de Textos, São Paulo, 2ª edição, 647 pp.
- Dantas M. E., Shinzato E., Medina A. I. M., Silva C. R., Pimentel J., Lumbreras J. F. Calderano. S. B. 2001. Diagnóstico geoambiental do estado do Rio de Janeiro, Brasília, CPRM. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/artigo_geoambientalRJ.pdf. Acessado em 10 de maio de 2015.
- DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens. 1994. ME 093/94: Solos – determinação da densidade real (método de ensaio). 4p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. 1997. Manual de métodos de análise de solo. Ministério da Agricultura e do Abastecimento, Rio de Janeiro. 212 pp.
- Fernandes N. F. & Amaral C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. 1996. In: Guerra A. J. T. & Cunha, S. B. (org) *Geomorfologia e Meio Ambiente*, Rio de Janeiro, Bertrand, p.:123-194.
- Fernandes N., Guimarães R. F., Gomes R. A. T., Vieira B. C., Montgomery D. R., Greenberg H. 2001. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Suscetíveis. *Rev. Bras. Geom.*, 2 : 51-71.
- Fonseca A. P. 2006. Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceiras de drenagem na bacia do rio Bananal (SP/RJ). Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 348 p.
- Fookes P. G. 1997. Geology for engineers: the geological model, prediction and performance. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30:293-424.
- Futai M. M. 1999. Propriedades geotécnicas de solos saprolíticos e rochas alteradas de filito. In: ABGE, IX Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, IX, Anais, p. 15-29.
- Guidicini G. & Nieble C. M. 1984. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blücher, Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 194 pp.

- Hartwig M. E. & Riccomini, C. 2009. Padrão de fraturas da região da Serra dos Órgãos (RJ) e sua relação com a tectônica mesozóico-cenozóica do sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Geoc.* São Paulo, 39: 452 – 464.
- Hillel D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, San Diego, 494 pp.
- Hvorslev M. J. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. *Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army*, 36: 1-50.
- Kobiyama M., Mendonça M., Moreno D. A., Marcelino I.P.V.O., Marcelino E.V., Gonçalves E. F., Brazetti L. L. P., Goerl R. F., Moller G., Rudorff F. 2006. *Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos*. Curitiba: Organic Trading, 109 pp.
- Lacerda W. A., Ehrlich M., Santos Jr. O.F. 1997. Efeito das variações de poro-pressão sobre a estabilidade de encostas em solos residuais. In: *ABMS, COBRAE, Conf. Bras. Estab. Enc., 2, Anais*, p. 381-388.
- Lacerda W. A. 1997. Stability of natural slopes along the tropical coast of Brazil. In: Almeida, M. (ed.) *Proceeding of the Internacional Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*. Balkema, Brookfield, p.: 17-39.
- Lacerda W. A. 1999. Local instability in saturated colluvial slopes in southern Brazil. In: Y. N. Yagi; T. Yamagami; J.C. Jiang (eds), *Slope Stability Engineering*. Balkema, International Symposium on Slope Stability Engineering, Japan. p. 199-204.
- Lambe T. W. & Whitman R. V. 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley, New York, 553 pp.
- Leal P. J. V. 2009. Crescimento de redes de canais e pirataria de água subterrânea em vales de cabeceira de drenagem. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 213 p.
- Lemos R. C. & Santos R. D. 1996. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3a Ed. São Paulo, 86 pp.
- Machado K. M. 2013. *Retroanálise de um deslizamento de encosta no Município de Nova Friburgo/RJ. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 63 p.
- Mesquita M. G. B. F. & Moraes S. O. 2004. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos do solo. *Ciência Rural*. 34: 963 - 969.
- Munsell R. 1994. *Soil Color Charts*. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, New Windsor, NY 12553.
- Nogami J.S. & Villibor D.F. 1995. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Editora Villibor, São Paulo, 213 pp.
- Palma L. H. 2013. *Inventário e classificação topográfica de cicatrizes de movimentos de massa na bacia do Córrego Dantas - Nova Friburgo/RJ*. In: UFRJ, JICTAC - *Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Tecnológica, Artística e Cultural, XXXV, Anais, CD-ROM*.
- Pita R. C. S. 2014. *Aplicação e avaliação de metodologias de campo e laboratoriais para a determinação da permeabilidade em encosta com deslizamento raso, em Nova Friburgo-RJ*. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 82 p.
- Porsani J.L. 1999. *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, 150 p.
- Rodriguez T. T. 2005. *Proposta de classificação geotécnica para colúvios brasileiros*. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 370 p.
- Schoeneberger P.J., Amoozegar A., Buol S.W. 1995. Physical property variation of a soil and saptrolite continuum at three geomorphic positions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1389 – 1397p.
- Selby M. J. 1993. *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, New York, 264 pp.

Sidle R. C., Pearce, A. J., O'Loughlin C. L. 1985. Hillslope stability and land use. Water Resource Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, 140 pp.

Silva R. P. 2014. Comportamento hidrológico de uma encosta de substrato rochoso de granito sob influência de deslizamento raso - Nova Friburgo, Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 151 p.

Van Asch T. W. J., Buma J., Van Beek L.P.H. 1999. A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, 30: 25-32.

Vieira B. C. & Fernandes N. F. 2004. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. *Hydrological Processes*. 18: 791- 805.

Vinagre R., Avelar A. S., Coelho Netto A. L., Burros L., Lacerda W. A. (em preparação). Influências geológicas nos movimentos de massa de Janeiro de 2011 em Nova Friburgo (RJ).

Wilson C. J. 1988. Runoff and pore pressure development in hollows. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, 284 p.