

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Camyla Margarete Magalhães de Oliveira

**Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos
escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova
Friburgo, Rio de Janeiro**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



Camyla Margarete Magalhães de Oliveira

**Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos
escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova
Friburgo, Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Cláudio Palmeiro do Amaral

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Marcelo Motta de Freitas

Departamento de Geografia - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Camyla Margarete Magalhães de Oliveira

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2010. Participou de pesquisas em Geotecnia em 2010. Estagiou na área de projetos em ferrovias no período de 2009-2011. Ingressou no mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia no início de 2011. Principais áreas de interesse e linhas de pesquisa: Geotecnia Ambiental, Geotecnia Experimental e Mecânica dos Solos.

Ficha Catalográfica

Magalhães de Oliveira, Camyla Margarete

Avaliação de mecanismos de ruptura em escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova Friburgo, Rio de Janeiro / Camyla Margarete Magalhães de Oliveira; orientador: Tácio Mauro Pereira de Campos. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

105 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de Taludes. 3. Solos Residuais. 4. Solos Não Saturados. 5. Ensaios de Laboratório. 6. Modelagem Numérica I. de Campos, Tácio Mauro Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Aos meus pais e irmãos.

Agradecimentos

Ao meu orientador que procurou me passar seus conhecimentos e experiências profissionais, no sentido de contribuir no enriquecimento deste trabalho.

A Raquel Velloso pelos ensinamentos e por estar sempre disposta a ajudar e tirar dúvidas. Sua contribuição foi fundamental para a finalização deste trabalho.

Ao professor e amigo Franklin Antunes pelos pelas tardes, almoços e cafés de aulas de geologia e conversas gerais. Obrigada pela paciência, apoio e por estar sempre disposto a ajudar.

Ao CNPq, CAPES e PRONEX pelo auxílio financeiro indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico de campo André Barros pelo apoio técnico durante esses meses e pela amizade.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, Amaury e Josué pelo auxílio, a ajuda de vocês foi fundamental. A Mônica pelos ensinamentos, auxílio e atenção.

Ao professor Cláudio Amaral pelos ensinamentos e por estar sempre disponível para qualquer dúvida. Também às geólogas da sua equipe Larissa e Sofia por disponibilizarem tão prontamente materiais solicitados.

Ao professor Vargas pelos ensinamento, pela atenção e por estar sempre disponível para retirar dúvidas.

Ao professor Marcelo Motta, a ECOBRAND e a equipe da MorfoTEKTOS, em especial ao Rodrigo Paixão pela elaboração e disponibilização dos mapas.

Ao Ronaldo Silva do Laboratório e-Diffraction Lab/NanoBusiness pela disponibilidade e rapidez na realização das minhas difratometrias.

A Jacqueline Giori do INEA por disponibilizar os dados de precipitação tão prontamente.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação e mestrado.

Aos funcionários do DEC: Rita, Fátima, Lenilson, Marcel e Rafael por sempre ajudarem no que foi preciso.

Aos alunos de iniciação científica Fernando e Francisco e ao Hugo pelo auxílio no início deste trabalho.

A ALTA Geotecnia, principalmente ao Alexandre e Guilherme pelo auxílio com alguns programas utilizados nesta dissertação.

Aos amigos do mestrado, especialmente ao Ricardo, Júlio e João pela ajuda e disponibilidade.

Aos amigos da 607-C, em especial para o Alexandre, Ricardo, Renzo, Elliot, Lorena, Alexander e Martin pela amizade, apoio e incentivo.

As geo-amigas Bê e Desirée pelo carinho, amizade e por estarem sempre dispostas a ajudar e ensinar o que fosse necessário.

Aos amigos inseparáveis Alena e Daniel, por estarem sempre presentes e pela valiosa amizade. Nossos cafés, saídas e estudos na favelinha foram essenciais nesta etapa.

As tias Jô e Clarice pelos pensamentos positivos e por estarem sempre na primeira fileira da torcida.

Aos meus pais e irmãos por estarem sempre presentes, pelo incentivo e amor. O apoio de vocês foi imprescindível nesta etapa. Amo todos vocês.

Resumo

de Oliveira, Camyla Margarete Magalhães; de Campos, Tácio Mauro Pereira. **Avaliação de mecanismos de ruptura associados aos escorregamentos da Prainha e Condomínio em Nova Friburgo, Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2013. 105 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta dissertação foi avaliar os mecanismos de ruptura em solo residual não saturado, nos locais da Comunidade da Prainha e Condomínio do Lago, em Nova Friburgo, após os deslizamentos ocorridos do dia 11 para 12 de janeiro de 2011, evento conhecido como Megadesastre'11 da Serra Fluminense. Para isso foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica, ensaios de permeabilidade *in situ* e no laboratório, ensaios para a determinação da curva característica e porosimetria de mercúrio. Para a determinação dos parâmetros de resistência foram realizado ensaios de cisalhamento convencional em amostras indeformadas submersas. A partir destes resultados foram realizadas análises numéricas de infiltração e estabilidade com a utilização dos programas *Vadose/W* e *Slope/W* ambos do pacote *GeoStudio 2007*. Os resultados das análises mostraram que as rupturas foram do tipo planar, ocorrendo na transição do solo maduro para o solo jovem para ambos locais. No caso do Condomínio do Lago verificou-se que a ruptura foi iniciada na base do talude, indicando um movimento de baixo para cima. Na Comunidade da Prainha a ruptura foi iniciada no topo da encosta. Em ambos os casos, ruptura ocorreu em decorrência da infiltração das águas de chuva.

Palavras-chave

Estabilidade de Taludes; Solos Residuais; Solos não Saturados; Ensaios de Laboratório; Modelagem Numérica.

Abstract

de Oliveira, Camyla Margarete Magalhães; de Campos, Tácio Mauro Pereira (Advisor). **Assessment of failure mechanisms of the Prainha and Condomínio landslides, in Nova Friburgo, Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2013. 105 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this dissertation was to assess the failure mechanisms in unsaturated residual soil, in places of Comunidade da Prainha Prainha (Community of Prainha) and Condomínio do Lago (Lago Condominium), in Nova Friburgo, after the landslides that occurred from the 11th to 12th of January of 2011. The event is known as Megadesastre'11 da Serra Fluminense. For this, tests of physical, chemical and mineralogical characterization, in situ permeability tests and the in laboratory, tests to determine the characteristic curve and mercury porosimetry were performed. To determine the strength parameters, were conducted conventional shear tests on submerged soil samples. From these results, numerical analyzes of infiltration and stability were performed with the use of Vadose/W and Slope/W, both programs of GeoStudio 2007. The analysis' results showed that the ruptures were planar, occurring in the transition from the mature soil to the young soil for both locations. In the case of Condomínio do Lago, the failure surface was located at the base of the slope, indicating a movement from bottom to top. In the Comunidade da Prainha the failure surface was located at the top of the slope. In both cases rupture occurred due to infiltration of the rainwater.

Keywords

Slope Stability; Residual Soils; Unsaturated Soils; Soil Laboratory Test; Numerical Modelling.

Lista de Símbolos

γ_n	Peso específico natural
w_n	Teor de umidade natural
γ_d	Peso específico seco
γ_s	Peso específico dos grãos
ω	Teor de umidade
ρ	Massa específica do solo
G_s	Peso específico
e	Índice de vazios
n	Porosidade
S	Grau de saturação
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
I_a	Índice de Atividade
α	Ângulo de inclinação constante da curva tensão deformação
δh	Deslocamento horizontal
τ	Tensão cisalhante
τ_r	Tensão cisalhante na ruptura
σ	Tensão normal
σ_r	Tensão normal na ruptura

Sumário

1	Introdução	18
2	Área de Estudo	23
2.1.	Meio Físico	23
2.1.1.	Localização e características gerais	23
2.1.2.	Geologia Regional e Local	24
2.1.3.	Geomorfologia Regional e Local	26
2.1.4.	Aspectos Climáticos	28
2.1.5.	Vegetação	29
2.2.	Amostragem	31
2.2.1.	Localização, coleta e denominação das amostras	31
2.2.2.	Características Tátil-Visuais das amostras	34
3	Equipamentos, Rotinas e Programa de Ensaios	38
3.1.	Caracterização Geotécnica	39
3.2.	Caracterização Mineralógica	40
3.3.	Caracterização Química	40
3.4.	Parâmetros Hidráulicos	41
3.4.1.	Permeâmetro de Guelph	41
3.4.2.	Permeâmetro de Carga Constante com Parede Flexível	42
3.4.3.	Ensaio para Obtenção da Curva de Retenção de Umidade	43
3.4.3.1.	Rotinas e Técnicas de Ensaio	43
3.4.3.2.	Programa de Ensaios	44
3.4.4.	Porosimetria por Injeção de Mercúrio	46
3.5.	Ensaios de Cisalhamento Direto Convencional	47
3.5.1.	Equipamento	47
3.5.2.	Rotinas e Técnicas de Ensaios	47
3.5.3.	Programa de Ensaios	48
4	Caracterização Física, Química, Mineralógica e Hidráulica	49
4.1.	Características Físicas	49
4.1.1.	Análise Granulométrica	49
4.1.2.	Limites de Atterberg	51

4.1.3. Classificação do solo – SUCS	52
4.2. Caracterização Química	52
4.2.1. Perda ao Fogo	52
4.3. Caracterização Mineralógica	53
4.3.1. Difração por Raios-X (DRX)	53
4.3.2. Lupa Binocular	54
4.4. Características Hidráulicas	56
4.4.1. Porosimetria de Mercúrio	56
4.4.2. Curva Característica de Sucção	59
4.4.3. Permeabilidade Saturada	63
4.5. Análise dos Resultados	63
5 Ensaio de Resistência	66
5.1. Ensaio de Cisalhamento Direto Convencional	66
5.2. Análise dos Resultados	71
6 Análise Numérica	77
6.1. Geometria do Problema	77
6.2. Análise de Infiltração	79
6.2.1. Malha de Elementos Finitos	80
6.2.2. Condições de Contorno	83
6.2.3. Propriedades dos Materiais	89
6.3. Análise de Estabilidade	90
6.4. Análise dos Resultados	91
7 Conclusões e Sugestões	100
7.1. Conclusões	100
7.1.1. Caracterização Física, Química e Mineralógica	100
7.1.2. Curva Característica	101
7.1.3. Permeabilidade Saturada	101
7.1.4. Resistência ao Cisalhamento	101
7.1.5. Análises Numéricas	101
7.2. Sugestões	102
Referências Bibliográficas	103

Lista de figuras

Figura 1.1 - Sobrevoos de helicóptero no Condomínio do Lago em 15/01/2011. Autor: Nelson Fernandes.	19
Figura 1.2 - Detalhes do deslizamento da Condomínio.	19
Figura 1.3 - Sobrevoos de helicóptero na Prainha, 28/01/2011, autor: Débora Toci.	20
Figura 1.4 – Detalhes do deslizamento da Prainha.	20
Figura 1.5 - Danos causados pelos deslizamentos. (a) Comunidade da Prainha e (b) Condomínio do Lago.	21
Figura 2.1 - Localização da área do estudo.	23
Figura 2.2 - Recorte da Folha Nova Friburgo (1:100.000) sobreposta a imagem do Google Earth de 20 de janeiro de 2011 com a área de estudo marcada com o retângulo branco (Correia, 2011 apud Tupinambá et al., 2011).	24
Figura 2.3 - Amostras dos litotipos: a) Ortognaisse, b) Biotita leucognaisse, c) Granito (Correia, 2011).	25
Figura 2.4 - Detalhes das encostas do Condomínio do Lago (a) e Comunidade da Prainha (b) em 25 de maio de 2010. Fonte: Google Earth.	27
Figura 2.5 - Mapa Geomorfológico da região de Conquista, Nova Friburgo (elaborado pela equipe Morfo TEKTOS, PUC-Rio).	27
Figura 2.6 - Temperatura médias em Nova Friburgo entre os anos de 1960 e 1990 (Fonte: Tempo Agora).	28
Figura 2.7 - Precipitação média em Nova Friburgo nos anos 1960 a 2002 (Fonte: INMET).	29
Figura 2.8 - Imagens do Condomínio do Lago retiradas do Google Earth dias após e meses após o desastre: (a) Imagem do dia 19/01/2011 e (b) Imagem do dia 06/05/2011.	30
Figura 2.9 - Imagens da Comunidade da Prainha retiradas do Google Earth dias após e meses após o desastre: (a) Imagem do dia 19/01/2011 e (b) Imagem do dia 06/05/2011.	31
Figura 2.10 - Localização dos pontos de amostragem (Google Earth).	32

Figura 2.11 - Talude antes da coleta das amostras F.01 e F.03. Observada a formação de muitas ravinas.	32
Figura 2.12 - Talude antes da coleta da amostra F.02.	33
Figura 2.13 - Talude antes da coleta da amostra F.04.	33
Figura 2.14 - Detalhes da amostra F.01.	35
Figura 2.15 - Detalhes da amostra indeformada F.02.	35
Figura 2.16 - Detalhes do solo in loco da amostra F.03 típico de alteração de rocha granítica.	36
Figura 2.17 - Detalhes da amostra F.04.	37
Figura 3.1 - Permeâmetro de Guelph utilizado para a realização dos ensaios.	41
Figura 3.2 - Célula Triaxial do LGMA (PUC-Rio).	42
Figura 3.3 - Prensas utilizadas para a realização dos ensaios de cisalhamento direto.	47
Figura 4.1 - Distribuição Granulométrica para os solos da Prainha e do Condomínio.	50
Figura 4.2 - Difratoograma da amostra de solo F.01 (a) e F.02 (b).	53
Figura 4.3 - Difratoograma da amostra de solo F.03 (a) e F.04 (b).	54
Figura 4.4 - Amostra F.01 fração pedregulho.	55
Figura 4.5 - Amostra F.02 fração pedregulho.	55
Figura 4.6 - Amostra F.03 (a) e F.04 (b) fração pedregulho.	56
Figura 4.7 - Distribuição acumulativa dos diâmetros dos poros para os solos analisados.	57
Figura 4.8 - Resultados dos Ensaios de porosimetria de mercúrio para os solos F.01 e F.02.	58
Figura 4.9 - Resultados dos Ensaios de porosimetria de mercúrio para os solos F.03 e F.04.	58
Figura 4.10 - Curva de Retenção do solo F.01.	61
Figura 4.11 - Curva de Retenção do solo F.02.	61
Figura 4.12 - Curva de Retenção do solo F.03.	61
Figura 4.13 - Curva de Retenção do solo F.04.	62
Figura 5.1 - Curvas tensão - deslocamento para a amostra de solo F.01.	68
Figura 5.2 - Curvas tensão - deslocamento para a amostra de solo F.02.	69
Figura 5.3 - Curvas tensão - deslocamento para a amostra de solo F.03.	70

Figura 5.4 - Curvas tensão - deslocamento para a amostra de solo F.04.	71
Figura 5.5 - Critério utilizado para a definição dos pontos de ruptura (de Campos e Delgado, 1995).	72
Figura 5.6 - Envoltórias de resistência para amostras submersas.	74
Figura 5.7 - Envoltórias obtidas a partir da junção dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto.	75
Figura 6.1 - Localização das sondagens realizadas na Prainha e no Condomínio e seções utilizadas para as análises.	78
Figura 6.2 - Modelo de elevação da área de estudo.	79
Figura 6.3 - Definição dos materiais.	80
Figura 6.4 - Perfil da Prainha com malha 0,4 metros.	81
Figura 6.5 - Perfil do Condomínio com malha 0,4 metros.	82
Figura 6.6 - Localização das estações pluviométricas e da área de estudo. Fonte: Google Earth.	84
Figura 6.7 - Gráficos de precipitação acumulada por hora, dia e mês respectivamente.	85
Figura 6.8 - Dados de precipitação diários de janeiro de 2011.	86
Figura 6.9 - Dados de temperatura máxima e mínima diárias utilizadas nas análises.	87
Figura 6.10 - Dados de umidade relativa do ar máxima e mínima diárias.	87
Figura 6.11 - Dados de velocidade do vento.	87
Figura 6.12 - Condições de contorno da simulação numérica da Prainha.	88
Figura 6.13 - Condições de contorno da simulação numérica do Condomínio.	88
Figura 6.14 - Curvas de função de permeabilidade dos materiais utilizados nas análises.	89
Figura 6.15 - Balanço Hídrico do sistema: (a) Prainha e (b) Condomínio.	92
Figura 6.16 - Perfil de poropressão: (a) Prainha e (b) Condomínio.	93
Figura 6.17 - Perfil de Saturação da Prainha: (a) antes do evento e (b) no dia do evento.	95
Figura 6.18 - Perfil de Saturação do Condomínio: (a) antes do evento e (b) no dia do evento.	96
Figura 6.19 - Análise de Estabilidade para o talude da Prainha, sendo (a) para antes do evento e (b) para o dia do evento.	98

Figura 6.20 - Análise de Estabilidade para o talude do Condomínio, sendo (a) para antes do evento e (b) para o dia do evento.

99

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Profundidades das amostras coletadas.	34
Tabela 3.1 - Resumo do programa experimental de Caracterização Física.	38
Tabela 3.2 - Resumo do programa experimental de Caracterização Química, Mineralógica.	39
Tabela 3.3 - Resumo do programa de ensaios hidráulicos, de retenção de água e porosimetria de mercúrio realizados.	39
Tabela 3.4 - Resumo do programa de ensaios de resistência.	39
Tabela 3.5 - Pontos para a curva característica do solo F.01.	44
Tabela 3.6 - Pontos para a curva característica do solo F.02.	45
Tabela 3.7 - Pontos para a curva característica do solo F.03.	45
Tabela 3.8 - Pontos para a curva característica do solo F.04.	46
Tabela 3.9 - Nomenclatura e a tensão normal aplicada em cada ensaio.	48
Tabela 4.1 - Índices físicos médio para o solo no seu estado natural.	49
Tabela 4.2 - Resumo da Granulometria para os solos analisados da Prainha e do Condomínio (%).	50
Tabela 4.3 - Limites de consistência ou de Atterberg para os solos analisados.	51
Tabela 4.4 - Valores de índice de atividade.	51
Tabela 4.5 - Classificação dos solos estudados de acordo com o SUCS.	52
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios de perda ao fogo.	52
Tabela 4.7 – Resultados obtidos.	54
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de porosimetria de mercúrio.	57
Tabela 4.9 - Dados experimentais de entrada no programa das amostras F.01 e F.03.	60
Tabela 4.10 - Dados experimentais de entrada no programa das amostras F.02 e F.04.	60
Tabela 4.11 - Valores de entrada do programada RETC.	62
Tabela 4.12 - Parâmetros obtidos com o ajuste.	62
Tabela 4.13 - Permeabilidades obtidas nos ensaios no campo e no laboratório.	63
Tabela 4.14 - Densidade relativa dos grãos de alguns minerais (Deer at al., 1981 apud Lopes, 2006).	64

Tabela 5.1 - Índices Físicos iniciais e final do solo F.01.	66
Tabela 5.2 - Índices Físicos iniciais e final do solo F.02.	66
Tabela 5.3 - Índices Físicos iniciais e final do solo F.03.	67
Tabela 5.4 - Índices Físicos iniciais e final do solo F.04.	67
Tabela 5.5 - Pares tensão normal e cisalhante na ruptura para o solo F.01.	72
Tabela 5.6 - Pares tensão normal e cisalhante na ruptura para o solo F.02.	72
Tabela 5.7 - Pares tensão normal e cisalhante na ruptura para o solo F.03.	73
Tabela 5.8 - Pares tensão normal e cisalhante na ruptura para o solo F.04.	73
Tabela 5.9 - Parâmetros de resistência obtidos.	75
Tabela 5.10 - Parâmetros de resistência obtidos a partir das envoltórias F.01 e F.02; F.03 e F.04.	76
Tabela 6.1 - Estações Pluviométricas em Nova Friburgo e suas distâncias para a área de estudo.	83
Tabela 6.2 - Permeabilidades utilizadas nas análises.	90
Tabela 6.3 - Parâmetros de resistência utilizados para a análise de estabilidade.	91