Universidade Federal do Rio de Janeiro

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA REDE DE FLUXO NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE EM NOVA FRIBURGO - RJ

Raphael Barbosa dos Santos



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA REDE DE FLUXO NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE EM NOVA FRIBURGO - RJ

Raphael Barbosa dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça Leonardo De Bona Becker

Rio de Janeiro Março de 2014

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA REDE DE FLUXO NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE NO MUNICÍPIO DE NOVA FRIBURGO – RJ

Raphael Barbosa dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinada por:

Prof. Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc.

Prof. Leonardo De Bona Becker, D.Sc.

Prof. André de Souza Avelar, D.Sc.

Prof. Maurício Ehrlich, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2014

Santos, Raphael Barbosa dos

Estudo da influência da rede de fluxo na análise de estabilidade de talude em Nova Friburgo - RJ / Raphael Barbosa dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

x, 45 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e Leonardo De Bona Becker

Projeto de Graduação - UFRJ/ Escola Politécnica/

Curso de Engenharia Civil, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 45-46.

1. Estabilidade de Taludes. 2. Rede de Fluxo. 3. Encostas.

I. Mendonça, Marcos Barreto de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela sabedoria e por todas as graças e bênçãos que sempre me concedeu em minha vida.

Agradeço à minha mãe, Lucia, e ao meu pai, João, por todo o apoio e carinho na nossa família, e especialmente pelo incentivo na busca por uma educação de qualidade, sem a qual este diploma não seria possível. Eu amo vocês!

À toda a minha grande família, da qual tenho orgulho de fazer parte.

Aos meus orientadores, Marcos Barreto e Leonardo Becker, pela dedicação nas disciplinas e principalmente no desenvolvimento deste trabalho.

À minha madrinha Carmen Lucia Nascimento e ao meu padrinho Rodrigo Cepeda pela ajuda na minha formação pessoal e profissional. Devo muito a vocês.

Aos meus amigos de longa data, especialmente Allan Naue, Bianca de Souza, Clara de Queiroz, Fabiane e Tatiane Paiva, Felipe Pierantoni, Guilherme Jacobs, Julio Trindade e Marcos Puoci, por todos esses anos de companheirismo e por tantos momentos de descontração.

Aos meus colegas e amigos de faculdade, principalmente André Santini, Cássio Pacheco, Diego Rezende, Diego "Farofa" Melo, Isaac Balster, Luis Felipe Figueiredo, Luiz Augusto Berger e Tiago Eller, pelas horas de estudo e de diversão.

À toda equipe do Laboratório de Hidráulica Computacional com a qual convivi por muito tempo, e ao professor Marcelo Miguez por acreditar e ajudar na formação de seus alunos.

Aos professores, alunos e funcionários do GEOHECO, que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, especialmente no campo.

À todos os professores, alunos e funcionários da Escola Politécnica da UFRJ que contribuíram para a minha formação como engenheiro.

À todos, muito obrigado,

Raphael Barbosa dos Santos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA REDE DE FLUXO NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDE EM NOVA FRIBURGO – RJ

Raphael Barbosa dos Santos

Março/2014

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça e Leonardo De Bona Becker

Curso: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta um estudo de como a maneira de tratar e interpretar as informações relativas às águas subterrâneas influencia nas análises de estabilidade de taludes. São apresentados também os resultados de uma campanha de ensaios de campo, compreendendo sondagens à percussão e instalação de piezômetros.

Foi escolhido o caso de um talude em Nova Friburgo, RJ. Utilizou-se um programa de computador para realizar análises de estabilidade pelo método das fatias. A poropressão foi determinada de modos distintos: no primeiro, utiliza-se o método usual e simplificado de considerar a linha freática, determinada através de sondagens, como linha piezométrica; no segundo, através do traçado da rede de fluxo.

Concluiu-se que, para este caso específico, a aproximação de considerar a linha freática como se fosse uma linha piezométrica foi a favor da segurança. Entretanto, ressalta-se que em outras situações, especialmente em casos que haja fluxos ascendentes, esta aproximação pode ser contrária a segurança.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes, Rede de Fluxo, Encostas

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

STUDY OF THE INFLUENCE OF FLOW NETS ON THE SLOPE STABILITY ANALYSIS IN NOVA FRIBURGO – RJ.

Raphael Barbosa dos Santos

March/2014

Advisors: Marcos Barreto de Mendonça and Leonardo De Bona Becker

Course: Civil Engineering

This work presents a study on the influence of groundwater data interpretation in slope stability analysis. The results of penetration tests and data from piezometers are also shown.

A slope in Nova Friburgo, RJ, Brasil was chosen for a case study. A computer program has been used for stability analysis by the method of slices. The pore-pressure has been determined in two different ways: by assuming the phreatic line is a piezometric line and by drawing a flow net.

It has been concluded that, in this specific case, the assumption that the phreatic line is a piezometric line was conservative. However, in other situations, such as slip surfaces that extend through areas of upward flow, this assumption could be unconservative.

Keywords: Slope Stability, Flow Nets, Slopes

ÍNDICE

1. Introdução1
2. Revisão bibliográfica
2.1. Movimentos de massa
2.2. Análise de estabilidade de taludes7
2.2.1. Análise de Tensões7
2.2.2. Equilíbrio Limite
2.3. Fluxo de água em taludes14
2.3.1. Rede de fluxo
2.3.2. Piezômetros
2.3.3. Rede de fluxo em taludes
3. Caso estudado
3.1. Descrição do local
3.2. Topografia
3.3. Investigações realizadas
3.3.1. Sondagens
3.3.2. Piezometria
3.4. Perfil do subsolo
3.5. Rede de fluxo
4. Análises de estabilidade
4.1. Resultados
4.2. Análise de resultados
5. Conclusões
6. Referências bibliográficas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Escorregamento planar no Morro da Carioca, Angra dos Reis, 2010 4
Figura 2 - Escorregamento rotacional (foto: Willy Lacerda) 4
Figura 3 - Rodovia desalinhada devido ao rastejo da encosta (foto: Willy
Lacerda)
Figura 4 - Corrida de detritos em Santa Catarina6
Figura 5 - Exemplo de divisão em fatias de uma superfície circular
(GERSCOVICH, 2012)
Figura 6 - Equações de equilíbrio: (a) Equilíbrio de forças da fatia; (b) Equilíbrio
de momentos (GERSCOVICH, 2012)
Figura 7 - Método de Spencer (GERSCOVICH, 2012) 11
Figura 8 – Exemplo de convergência do Método de Spencer (GERSCOVICH,
2012)
Figura 9 - Cargas em um permeâmetro (PINTO, 2006)15
Figura 10 – Exemplo de rede de fluxo sob pranchada (TAYLOR, 1948) 16
Figura 11 - Modelo reduzido de fluxo sob pranchada, construído no Laboratório
de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica - UFRJ 16
Figura 12 - Piezômetro de Casagrande (modificado de LAMBE & WHITMAN,
1979)
Figura 13 - Rede de fluxo subterrâneo (HUBBERT, 1940 apud PATTON &
HEDRON JR, 1974 apud SUZUKI, 2004)
Figura 14 - Comparação de rede de fluxo na encosta (adaptado de PATTON &
HEDRON, 1974 apud SUZUKI, 2004)
Figura 15 - Imagem de satélite com a localização da área de estudo 21
Figura 16 - Imagem de satélite da encosta antes e depois do escorregamento com
a indicação do talude estudado
Figura 17 - Levantamento topográfico da área do talude de estudo
Figura 18 - Localização das sondagens 24
Figura 19 - Execução da sondagem SP1, já na fase de avanço por trépano de
lavagem
Figura 20 - Execução da sondagem SP226
Figura 21 - Execução da sondagem SP327
Figura 22 - Detalhe do trecho perfurado do piezômetro

Figura 23 - Esquema da instalação dos piezômetros 30
Figura 24 - Dimensões das camadas de instalação dos piezômetros
Figura 25 - Vista em planta do eixo da seção analisada
Figura 26 - Perfil do terreno com base nas sondagens
Figura 27 - Influência de diques de diabásio no artesianismo (LACERDA &
AVELAR, 2003)
Figura 28 - Rede de fluxo subterrânea
Figura 29 - Linhas equipotenciais (a cada 0.5m) traçadas a partir da linha
piezométrica (Hipótese 1). Nas regiões acima da linha piezométrica as poropressões são
nulas
Figura 30 - Linhas equipotenciais (a cada 0.5m) inseridas a partir da rede de
fluxo (Hipótese 2)
Figura 31 - Poropressões determinadas pela linha piezométrica (Hipótese 1) 39
Figura 32 – Poropressões determinadas pela rede de fluxo (Hipótese 2) 39
Figura 33 - Superfície crítica determinada pela análise através da linha
piezométrica (Hipótese 1) 40
Figura 34 - Superfície crítica determinada pela análise através da rede de fluxo
(Hipótese 2)
Figura 35 - Cálculo da poropressão em taludes42

1. INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes é um dos mais recorrentes problemas da Engenharia Geotécnica. Garantir a segurança de encostas naturais ou de cortes de estrada contra escorregamentos a fim de preservar o ambiente urbanizado é uma necessidade cada vez maior com a expansão do espaço urbano.

Também com grande frequência aparece o papel da água na estabilidade do talude, sendo ela o principal agente instabilizante em regiões tropicais (SUZUKI, 2004). Diversos eventos de deslizamentos ocorrem no período de intensas chuvas na região metropolitana do Rio de Janeiro, quando o volume de precipitação aumenta o grau de saturação das massas de solo, reduzindo seus parâmetros de resistência e causando um movimento de massa.

Sendo assim, evidencia-se a importância do conhecimento do regime de fluxo da água no interior dos taludes, que está diretamente relacionado com o surgimento de forças de percolação, elevação de poropressões, erosão interna e aumento do grau de saturação com diminuição da coesão aparente. Através da determinação da rede de fluxo, pode-se compreender a maneira com que se dá a percolação subterrânea, permitindo calcular as poropressões e, consequentemente, avaliar a segurança do talude de forma mais confiável.

O presente trabalho tem por finalidade comparar a análise de estabilidade de um talude com poropressões definidas por uma rede de fluxo com outra análise na qual as poropressões são definidas pelo método simplificado de considerar a linha freática, baseada em informações de sondagens, como a linha piezométrica. Para isto, foi escolhido como estudo de caso um talude no bairro Campo do Coelho, Município de

1

Nova Friburgo, RJ, local bastante afetado por escorregamentos em janeiro de 2011. Para a realização do presente trabalho foi realizada uma campanha de investigação geotécnica que compreendeu sondagens e piezometria.

O trabalho é apresentado nos capítulos a seguir, organizado da seguinte maneira:

- Capítulo 2 Revisão bibliográfica, onde se descrevem os conceitos básicos para o desenvolvimento do trabalho, abordando movimentos de massa, análise de estabilidade de taludes e fluxo de água em taludes;
- Capítulo 3 Caso estudado, no qual o talude estudado é apresentado, bem como sua topografia, os ensaios de campo realizados para investigação do terreno, o perfil geológico-geotécnico e a rede de fluxo estimados a partir destes;
- Capítulo 4 Análises de estabilidade, onde os cálculos de estabilidade são realizados com as poropressões calculadas a partir da rede de fluxo, ou a partir da consideração da linha freática (obtida das sondagens) como linha piezométrica;
- Capítulo 5 Conclusões, no qual são consolidados os resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Movimentos de massa

Em áreas cuja topografia não é plana existem três forças que tendem a movimentar a massa de solo ou rocha dos pontos mais altos para os mais baixos: a componente do peso da massa que atua na direção provável do movimento, a força de percolação exercida pelo fluxo d'água através do terreno e eventuais esforços devidos aos sismos (TAYLOR, 1948). Quando a resistência do solo em qualquer superfície potencial de ruptura iguala-se a estas forças atuantes, dá-se origem a um movimento de massa, deslocando a massa instável até que a energia do movimento seja dissipada.

Este fenômeno pode ocorrer em regiões não ocupadas, sem maiores consequências para a sociedade, ou em áreas urbanizadas, com potencial de causar catástrofes de grande impacto social e econômico devido à energia destrutiva do movimento.

Os movimentos de massa podem assumir diversas configurações devido à superfície de ruptura e à velocidade do movimento. Em solos, seus tipos com ocorrência mais comuns são: escorregamentos planares; escorregamentos rotacionais; rastejo; e corrida de detritos, conforme descritos a seguir (BECKER, 2013):

 a) Escorregamentos planares (Figura 1): caracterizam-se por ocorrerem sobre um plano bem definido, em uma descontinuidade de resistência (contato solo-rocha, colúvio - solo residual ou plano de fraqueza). O movimento é rápido e geralmente envolve camadas de solo de pequena espessura.



Figura 1 - Escorregamento planar no Morro da Carioca, Angra dos Reis, 2010

 b) Escorregamentos rotacionais (Figura 2): movimento rápido em camadas espessas de solo residual, coluvionar ou laterítico, taludes cortados ou aterros sobre solos sedimentares, que se dá em superfície aproximadamente cilíndrica, da crista ao pé do talude.



Figura 2 - Escorregamento rotacional (foto: Willy Lacerda)

c) Rastejo (Figura 3): movimentos muito lentos, na ordem de mm ou cm/ano. Pode ser acelerado por uma obra que o perturbe ou pelo aumento da poropressão em épocas de chuva, caracterizando-se, nesse caso, como um movimento sazonal.



Figura 3 - Rodovia desalinhada devido ao rastejo da encosta (foto: Willy Lacerda)

 d) Corrida de detritos (Figura 4): caracterizada pela liquefação da massa de solo, com ocorrência mais comum em talvegues de solo residual argiloso. O movimento é rápido, podendo alcançar velocidade em torno de 100 km/h, e possui caráter destrutivo, carregando árvores e matacões.



Figura 4 - Corrida de detritos em Santa Catarina

A instabilidade de um talude ocorre porque a resistência ao cisalhamento do solo diminuiu até o valor da resistência necessária para o equilíbrio, o que pode ocorrer por dois motivos (DUNCAN & WRIGHT, 2005):

- Redução da resistência ao cisalhamento do solo, através de diminuição das tensões efetivas devido ao aumento da poropressão, redução da sucção devido ao aumento do grau de saturação, surgimento de trincas, ação do intemperismo, orientação de partículas de argila, carregamentos cíclicos, entre outros;
- Aumento das tensões cisalhantes atuantes, devido a sobrecargas na crista do talude, empuxo d'água em trincas de tração, aumento do peso do solo devido ao aumento de seu grau de saturação, corte no pé do talude, redução do nível d'água na base do talude, sismos, entre outros.

2.2. Análise de estabilidade de taludes

Para a determinação da estabilidade de um talude, o conceito de Fator de Segurança (FS) é frequentemente utilizado. No método das fatias, o fator de segurança é definido como a razão entre a resistência ao cisalhamento e a tensão cisalhante mobilizada (τ_{mob}) pelas forças atuantes no solo na superfície de ruptura:

$$FS = \frac{Resistência ao cisalhamento}{Tensão cisalhante mobilizada}$$
(1)

Este tipo de abordagem é denominado determinístico, pois estabelece um único valor para o FS para todo o talude. Quanto maior este valor, mais distante o talude estará de romper na superfície analisada. Quando é igual à unidade, o talude atinge a ruptura. O fator de segurança também pode ser determinado de maneira probabilística, obtendo como resultado um valor médio e um desvio-padrão associado, porém esta abordagem não está no escopo deste trabalho.

A obtenção do FS determinístico pode ser realizada através de dois métodos, conforme exposto nos itens seguintes (GERSCOVICH, 2012):

2.2.1. Análise de Tensões

Este método é baseado na análise de tensão-deformação com o auxílio de programas computacionais, que utilizam o Método dos Elementos Finitos ou o Método das Diferenças Finitas. O alto poder de processamento dos computadores permite com esse método a incorporação de características complexas do solo, como a não linearidade da curva tensão-deformação, anisotropia, heterogeneidade e influência do estado inicial de tensões. A situação de ruptura é caracterizada quando se atinge a plastificação do solo ao longo de uma superfície. Os parâmetros de entrada do modelo podem ser bastante complexos, exigindo uma campanha rigorosa de ensaios específicos,

o que pode inviabilizar ou tornar desnecessário o uso deste método, sendo mais vantajoso utilizar um método mais simples, como o Equilíbrio Limite.

2.2.2. Equilíbrio Limite

Consiste na aplicação do equilíbrio estático em uma massa potencialmente instável do solo, delimitada por uma superfície potencial de ruptura circular, poligonal ou de forma qualquer. O método assume as seguintes hipóteses:

- A superfície potencial de ruptura é pré-determinada;
- O mecanismo de ruptura é pré-determinado (circular, planar etc.);
- O comportamento do solo é rígido-plástico;
- Todos os pontos ao longo da superfície potencial de ruptura possuem o mesmo fator de segurança.

Exceto em retroanálises, o talude analisado ainda não sofreu ruptura, portanto possui infinitas superfícies potenciais de ruptura com diferentes geometrias, cada uma com um FS associado. Define-se como fator de segurança crítico (FS_{crit}) o FS de menor valor em um conjunto adequado de análises, sendo também comumente referido apenas como Fator de Segurança do talude. A superfície de ruptura associada ao Fator de Segurança Crítico é chamada superfície crítica.

Sua principal desvantagem em relação ao método da Análise de Tensões está na hipótese de comportamento rígido-plástico do solo, que não permite a determinação das deformações na massa de solo de acordo com os níveis de carga. Esta simplificação, no entanto, atende a boa parte dos problemas de engenharia, para os quais apenas é necessário garantir que o terreno não sofra ruptura, mesmo que venha a sofrer deslocamentos limitados, como em encostas naturais à beira de estradas. Na aplicação do método, o solo acima da superfície potencial de ruptura é considerado um corpo livre e é geralmente dividido em n fatias (Figura 5). O equilíbrio de forças é realizado para cada fatia (Figura 6a), enquanto o equilíbrio de momentos é feito comparando o somatório dos momentos estabilizantes e instabilizantes da massa potencialmente instável como um todo (Figura 6b).



Figura 5 - Exemplo de divisão em fatias de uma superfície circular (GERSCOVICH, 2012)



Figura 6 - Equações de equilíbrio: (a) Equilíbrio de forças da fatia; (b) Equilíbrio de momentos (GERSCOVICH, 2012)

Para a fatia n da Figura 6a tem-se:

- b: largura da fatia;
- l: largura da base da fatia;
- W: peso da fatia;
- N': resultante das tensões efetivas normais à base;
- U: poropressão na base;
- S: resultante das tensões cisalhantes mobilizadas na base;
- E_n, X_n: resultante das tensões normais e cisalhantes que atuam na face da esquerda;
- E_{n+1}, X_{n+1}: resultante das tensões normais e cisalhantes que atuam na face da esquerda;

A análise por equilíbrio limite, geralmente, gera sistemas com mais incógnitas do que equações. Para resolvê-los, foram desenvolvidos diferentes métodos baseados em diversas hipóteses simplificadoras adicionais, todos respeitando as hipóteses listadas anteriormente de forma a diminuir o número de incógnitas e possibilitar a resolução do sistema de equações. Podem-se destacar os métodos de Fellenius, Bishop, Janbu e Spencer, sendo este último o adotado neste trabalho.

2.2.2.1. Método de Spencer (1967)

O método de Spencer (Figura 7) é considerado um método rigoroso da análise por equilíbrio limite, pois considera o equilíbrio de forças em duas direções e o equilíbrio de momentos, além de não desprezar as forças interlamelares. Foi desenvolvido para uma superfície circular, porém pode ser aplicado em superfícies poligonais. Suas condições gerais são as seguintes:

- O método admite a existência de trinca de tração;
- As forças interlamelares (X e E, na Figura 6) podem ser representadas por suas resultantes (Z_n e Z_{n+1}), cuja resultante possui módulo Q_n e inclinação θ, sendo esta suposta constante para todas as fatias. Sendo assim:

$$tg \ \theta = \frac{X_1}{E_1} = \frac{X_2}{E_2} = \dots = \frac{X_n}{E_n}$$
(2)

- A resultante Q_n é definida em termos de tensões totais, isto é, incorpora a parcela efetiva e a poropressão atuante na face da fatia;
- N'n, Un e Wn atuam no ponto médio da base de cada fatia, o que implica, para o equilíbrio de momentos, que Q também passe por este ponto.



Figura 7 - Método de Spencer (GERSCOVICH, 2012)

Aplicando-se as equações de equilíbrio de forças nas direções paralelas e normais à base da fatia, chega-se a equação da resultante Q, cuja magnitude depende das características geométricas e parâmetros geotécnicos de cada fatia, bem como do valor adotado para a inclinação das forças interlamelares:

$$Q = \frac{\frac{c'b}{FS}\sec\alpha + \frac{tg\,\phi'}{FS}(W\cos\alpha - U\,b\,\sec\alpha) - W\,sen\,\alpha}{\cos(\alpha - \theta)\left[1 + \frac{tg\,\phi'}{FS}tg(\alpha - \theta)\right]} \tag{3}$$

Como a expressão da resultante Q incorpora o FS, é necessário utilizar um processo iterativo para o cálculo do FS final.

Considerando-se a massa de solo acima da superfície de ruptura adotada como um corpo rígido, as forças interlamelares são forças internas deste corpo, portanto, para atender ao equilíbrio de forças, a soma de suas componentes deve ser nula (desde que não haja forças externas, como tirantes):

$$\sum Q \cos \theta = \mathbf{0} \tag{4}$$

$$\sum Q \operatorname{sen} \theta = \mathbf{0} \tag{5}$$

Como o método admite a mesma inclinação θ para todas as fatias, tem-se:

$$\sum Q = \mathbf{0} \tag{6}$$

O equilíbrio de momentos é garantido em cada fatia por meio da equação:

$$\sum Q \cos(\alpha - \theta) = \mathbf{0} \tag{7}$$

O procedimento iterativo do Método de Spencer é o seguinte:

- 1. Arbitrar a Superfície Potencial de Ruptura;
- 2. Arbitrar θ_1 , inclinação da resultante das forças interlamelares;
- 3. Substituir o valor θ_1 na Equação 3 para calcular Q em função de FS;
- 4. Substituir a expressão de Q na Equação 6 para calcular $FS_{1,força}$;
- 5. Plotar o ponto (FS_{1,força}; θ_1) no gráfico FS x θ ;
- 6. Substituir a expressão de Q na Equação 7 para calcular FS_{1,momento};
- 7. Plotar o ponto (FS_{1,momento}; θ_1) no gráfico FS x θ (Figura 8);
- Repetir o procedimento (itens 2 à 7) para outras inclinações θ até definir a interseção entre as curvas obtidas pelos equilíbrios de forças e momentos. O valor do FS no ponto da interseção das curvas será o FS da Superfície Potencial de Ruptura arbitrada;
- Repetir todo o procedimento (itens 1 à 8) um número adequado de vezes para outras Superfícies Potenciais de Ruptura;
- 10. A Superfície Potencial de Ruptura de menor FS será a Superfície Crítica.



Figura 8 – Exemplo de convergência do Método de Spencer (GERSCOVICH, 2012)

2.3. Fluxo de água em taludes

Como visto nas seções anteriores, a água está presente em diversos processos de instabilização de taludes, sendo ela o principal agente condicionante de deslizamentos de encostas em climas tropicais, segundo SUZUKI (2004). Eventos trágicos de escorregamentos costumam ocorrer com certa frequência nos períodos de chuvas intensas, quando a água atua tanto na redução da resistência ao cisalhamento do solo, com a elevação da poropressão, quanto na intensificação das forças instabilizantes, aumentando o peso da massa potencialmente instável. Sendo assim, o conhecimento da distribuição de poropressões da massa potencialmente instável é indispensável na análise de estabilidade de taludes.

No estudo de fluxos de água, é conveniente expressar as componentes de energia pelas correspondentes cargas em termos de altura de coluna d'água (PINTO, 2006). Segundo Bernoulli, a carga hidráulica (ou carga total) ao longo de qualquer linha de fluxo de fluido incompressível mantém-se constante e é igual à soma de três parcelas:

Carga Hidráulica = Carga Altimétrica + Carga Piezométrica + Carga Cinética (8)

A carga altimétrica corresponde à diferença de cota entre o ponto considerado e um nível de referência global adotado arbitrariamente para o problema; a carga piezométrica é a poropressão no ponto expressa em termos de coluna d'água; e a componente cinética está relacionada à velocidade de escoamento do fluido.

Na percolação através do solo, a velocidade da água é bastante reduzida, podendo-se desprezar a componente cinética de energia frente às outras duas componentes. Portanto, a equação válida para a percolação nos solos é:

14

A Figura 9 mostra um permeâmetro com uma amostra de areia sob fluxo descendente e as respectivas cargas no topo e na base da amostra, sendo h_T a carga hidráulica, h_A a carga altimétrica e h_P a carga piezométrica. O nível de referência considerado é na base do permeâmetro.



Figura 9 - Cargas em um permeâmetro (PINTO, 2006)

Tratando-se de taludes, normalmente a água encontra-se em movimento escoando das regiões mais elevadas do relevo para as regiões mais baixas, devido à elevada diferença de carga altimétrica. O regime de fluxo, por sua vez, está relacionado com a diferença de cargas hidráulicas ao longo do espaço considerado e não das cargas altimétricas isoladamente. Para a definição das cargas hidráulicas e suas componentes deve-se conhecer a rede de fluxo.

2.3.1. Rede de fluxo

A rede de fluxo representa graficamente a trajetória subterrânea da água pelo terreno, por meio de linhas de fluxo, e a correspondente dissipação de energia, através de curvas equipotenciais (linhas de mesma carga hidráulica). Esta representação é de grande importância em problemas de engenharia civil, como a determinação da vazão sob uma barragem, o conhecimento da pressão exercida pela água na base de uma barragem de concreto e a verificação da possibilidade de liquefação do solo em regiões de fluxo ascendente (TAYLOR, 1948). A Figura 10 mostra um exemplo de rede de fluxo sob uma pranchada (parede impermeável).



Figura 10 – Exemplo de rede de fluxo sob pranchada (TAYLOR, 1948)

A trajetória percorrida por uma partícula de água através da massa de solo saturado é denominada *linha de fluxo* (TAYLOR, 1948). Estas linhas podem ser determinadas de diversas maneiras, como através da injeção de corante em modelos reduzidos em laboratório para observação do caminho percorrido (Figura 11).



Figura 11 - Modelo reduzido de fluxo sob pranchada, construído no Laboratório de Mecânica dos Solos da Escola Politécnica - UFRJ

Na Figura 10, cada linha de fluxo começa em algum ponto do segmento *AB*, onde a carga hidráulica é h_t (considerando o plano de referência o segmento BD), e termina no segmento *CD*, com carga hidráulica zero, após dissipar gradualmente sua carga hidráulica por fricção viscosa na massa de solo. Sendo assim, para cada linha de fluxo, existe um ponto no qual a água já dissipou uma mesma porção de sua carga hidráulica. Uma linha passando por esses pontos de mesma carga hidráulica é chamada *linha equipotencial*. A linha tracejada do ponto R à parede impermeável é a linha equipotencial de carga igual a $\frac{2}{3}$ h_t (TAYLOR, 1948).

O gradiente hidráulico é definido como a razão entre a perda de carga e o comprimento de percolação no trecho onde a carga foi dissipada. Na rede de fluxo, este parâmetro é facilmente obtido dividindo-se a diferença de carga hidráulica entre duas equipotenciais pela distância percorrida entre elas. Como o escoamento ocorre pelo caminho de maior gradiente hidráulico em um meio isotrópico, as linhas de fluxo interceptam duas linhas equipotenciais adjacentes percorrendo a menor trajetória entre elas. Consequentemente, as linhas de fluxo interceptam as linhas equipotenciais formando ângulos retos com estas (TAYLOR, 1948). Além disso, como as linhas de fluxo delimitam canais de fluxo de igual vazão e as equipotenciais determinam faixas de perda de carga de mesmo valor, as formas delimitadas pelos dois tipos de linhas devem ser aproximadamente quadradas.

Considerando que não existe variação das condições de contorno na direção longitudinal do talude, o fluxo pode ser adotado como bidimensional no plano transversal. Sendo assim, a rede de fluxo é a mesma para qualquer seção transversal considerada. A construção da rede de fluxo pode ser realizada de diversas maneiras. Além do modelo físico citado anteriormente (Figura 11), pode-se traçar a rede por analogia com a dissipação de potencial elétrico, programas de computador que utilizam métodos numéricos ou, mais usualmente, a construção gráfica (PINTO, 2006). Esta última foi o método utilizado para a construção da rede de fluxo neste trabalho.

2.3.2. Piezômetros

Em casos mais complexos, para a construção da rede de fluxo é importante a medição de cargas piezométricas em alguns pontos da massa de solo. Um dos instrumentos mais utilizados para a determinação de cargas piezométricas no campo é o Piezômetro de Casagrande, que consiste em um tubo fechado com ponteira permeável instalado no terreno. A ponteira é envolta em material permeável, geralmente areia, para permitir o fluxo da água para dentro do aparelho, permitindo a medida da coluna de água formada dentro do tubo, isto é, a carga piezométrica do ponto de instalação. A região preenchida pela ponteira deve estar isolada do restante do furo, através de selo de bentonita, de forma a indicar a piezometria média dessa região. A Figura 12 mostra um desenho esquemático do Piezômetro de Casagrande.



Figura 12 - Piezômetro de Casagrande (modificado de LAMBE & WHITMAN, 1979)

2.3.3. Rede de fluxo em taludes

Um modelo simplificado de rede de fluxo subterrâneo em encostas foi sugerido por HUBBERT (1940) apud PATTON & HEDRON (1974), onde o fluxo é, geralmente, descendente nas regiões mais elevadas do relevo (área de recarga) e ascendente nas regiões mais baixas (área de descarga). A Figura 13 apresenta o modelo mencionado, onde os piezômetros na área de descarga indicam níveis piezométricos acima do nível d'água na mesma vertical, caracterizando artesianismo.



Figura 13 - Rede de fluxo subterrâneo (HUBBERT, 1940 apud PATTON & HEDRON JR, 1974 apud SUZUKI, 2004)

A Figura 14b apresenta um modelo de rede de fluxo de PATTON & HEDRON JR. (1974) para aquíferos livres em encostas de permeabilidade homogênea e isotrópica, no qual as linhas de fluxo convergem para o nível d'água na base das encostas, diferentemente da usual hipótese de fluxo paralelo ao nível d'água (Figura 14a).



Figura 14 - Comparação de rede de fluxo na encosta (adaptado de PATTON & HEDRON, 1974 apud SUZUKI, 2004)

3. CASO ESTUDADO

3.1. Descrição do local

O talude escolhido para estudo de caso está localizado em Campo do Coelho, no município de Nova Friburgo, RJ, próximo ao km 57 da estrada RJ-130, que liga os municípios de Teresópolis e de Nova Friburgo. O local foi um dos diversos pontos afetados pelas intensas chuvas de janeiro de 2011, que levaram a inúmeros casos de deslizamentos de terra na região serrana do Rio de Janeiro.

A Figura 15 mostra em destaque a localização do talude estudado, enquanto a Figura 16 ilustra a comparação da encosta antes e depois da ocorrência do deslizamento.



Figura 15 - Imagem de satélite com a localização da área de estudo

Vale citar que a encosta a montante do talude de estudo é objeto de pesquisa de MACHADO (2013).



Figura 16 - Imagem de satélite da encosta antes e depois do escorregamento com a indicação do talude estudado

Este ponto foi escolhido para o presente estudo em função de ter sido observada uma forte surgência de água próximo ao pé do talude, o que poderia estar condicionando sua estabilidade.

3.2. Topografia

Um mapeamento aerofotogramétrico de escala 1:5.000 foi disponibilizado para o trabalho, com curvas de nível a cada 5m. Este nível de detalhamento não é ideal para o desenvolvimento tanto da rede de fluxo, na qual a elevação do terreno é essencial para a determinação das cargas altimétricas e, consequentemente, das cargas hidráulicas, quanto da análise de estabilidade, onde a inclinação da encosta afeta diretamente o fator de segurança. Entretanto, o prazo disponível para o desenvolvimento deste trabalho não permitiu que um levantamento topográfico mais detalhado fosse realizado.

A Figura 17 mostra o levantamento topográfico disponível para a região, juntamente com a localização das sondagens.



Figura 17 - Levantamento topográfico da área do talude de estudo

3.3. Investigações realizadas

3.3.1. Sondagens

Para a determinação do perfil geológico-geotécnico foram realizadas quatro sondagens à percussão com SPT na área de estudo. O serviço foi realizado pela empresa Soloteste, obedecendo à norma *ABNT NBR 6484/2001*, totalizando 35 metros perfurados. O ensaio de SPT foi executado com hastes de diâmetro de 2 ¹/₂" com amostrador padrão SPT de diâmetro interno e externo de 34,9mm e 50,8mm, respectivamente. Não foram realizados ensaios de granulometria, de forma que a classificação das camadas foi feita por análise tátil-visual pelos operadores. Esta prática é muito susceptível a erros e, sempre que possível, devem ser realizados ensaios granulométrico.

A distribuição dos furos no terreno objetivou a investigação das diferentes camadas de solo e foi definida através da observação da topografia e por meio de uma

visita de campo, realizada no dia 8 de novembro de 2013. A Figura 18 mostra uma imagem de satélite com a localização das sondagens.



Figura 18 - Localização das sondagens

Devido às restrições orçamentárias, o comprimento das sondagens foi previamente estabelecido de acordo com o perfil que se esperava para o terreno. Sendo assim, as sondagens SP1, SP2A, SP3 e SP4 tiveram extensões pré-determinadas de, respectivamente, 12m, 8m, 5m e 5m.

A execução das sondagens foi realizada nos dias 17 e 18 de novembro de 2013, e foi acompanhada pelo autor deste trabalho. Diferentemente da prática usual, na qual apenas a amostra da ponta do amostrador é coletada para análise, foi solicitado que toda a amostra fosse retida para que se pudesse fazer uma análise mais completa do material. Não foi permitida pela equipe do presente estudo a utilização de lama bentonítica para estabilização dos furos, pois esta poderia interferir nos resultados da piezometria a ser realizada. Os relatórios de sondagem se encontram no Anexo.

A sondagem SP1 (Figura 19) se encontra na beira da estrada de terra que dá acesso ao talude a partir da estrada RJ-130. Possui 12,45m de profundidade total, sendo

esta a sondagem mais extensa e que apresentou maior heterogeneidade de camadas. O perfil encontrado nesta sondagem é composto por camadas de silte arenoso de diferentes compacidades, com presença de lentes de argila siltosa e argila arenosa. A partir dos 5,45m o avanço foi dado com o trépano de lavagem, devido à elevada resistência do terreno ao avanço por trado. A profundidade registrada para o nível d'água foi de 6,70m.



Figura 19 - Execução da sondagem SP1, já na fase de avanço por trépano de lavagem

O furo SP2 (não indicado nas figuras), localizado ao final (de cima para baixo) da parte mais íngreme do talude, atingiu o impenetrável à percussão aos 3,70m. Devido à possibilidade de presença de matacões, foi feita uma nova tentativa de furo à percussão com um afastamento de 3m deste furo. Este novo furo foi então nomeado SP2A (Figura 20), atingindo a profundidade total de 8,21m, sendo composto por uma camada de colúvio, seguida de silte arenoso com compacidade crescente com a profundidade. O nível d'água foi encontrado a 3,85m de profundidade.



Figura 20 - Execução da sondagem SP2

A sondagem SP3 (Figura 21) já se encontra na parte inferior da encosta, região mais horizontalizada do terreno, onde puderam-se observar também blocos de rocha de grandes dimensões. A extensão total do furo é de 5,15m, sendo 1,00m de colúvio e o restante areia siltosa. O nível d'água neste ponto já possui profundidade bastante reduzida, sendo encontrado a 0,20m do nível do terreno.



Figura 21 - Execução da sondagem SP3

A sondagem SP4, a mais a jusante do talude, é composta de aproximadamente 1,50m de areia siltosa fofa e 3,80m de areia siltosa com compacidade elevada, possuindo extensão total de 5,30m. O nível d'água é coincidente com o nível do terreno.

3.3.2. Piezometria

Para o conhecimento da rede de fluxo subterrânea, foram instalados dois piezômetros em cada furo de sondagem – um no fundo do furo e outro num ponto intermediário dentro do aquífero – de forma a conhecer a carga piezométrica em diferentes pontos do terreno.

O elemento principal do piezômetro consiste em um tubo de PVC de água fria com diâmetro de 32mm, perfurado transversalmente em duas direções ortogonais em um trecho de 30cm na ponta para a entrada de água, com a proteção de uma tela de nylon fixada com abraçadeiras de modo a evitar a passagem de partículas de solo para dentro do tubo (Figura 22). Estes piezômetros foram construídos pelo autor do presente trabalho.



Figura 22 - Detalhe do trecho perfurado do piezômetro

Para a instalação dos piezômetros em cada furo de sondagem foram introduzidos nos furos os seguintes elementos citados abaixo (Figura 23), seguindo a ordem a partir do fundo:

- 20cm de selo de bentonita;
- 10cm de areia;
- primeiro piezômetro;
- 40cm de areia, preenchendo o espaço entre o tubo no trecho perfurado e a parede do furo;
- 20cm de selo de bentonita;
- solo (proveniente da sondagem), até atingir a profundidade desejada para a instalação do segundo piezômetro;
- 20cm de selo de bentonita;
- 10cm de areia;
- segundo piezômetro;
- 40cm de areia, preenchendo o espaço entre o tubo no trecho perfurado e a parede do furo;
- 20cm de selo de bentonita;
- solo (proveniente da sondagem), até a boca do furo.

Após o lançamento, as camadas foram compactadas no furo através de golpes com tubos de PVC com ponta fechada.

Os valores das espessuras das camadas indicadas acima são aproximados. As espessuras reais de cada camada foram registradas e estão apresentadas mais adiante na Figura 24.



Figura 23 - Esquema da instalação dos piezômetros

Na sondagem SP1 (extensão: 12,45m), após o assentamento do primeiro piezômetro e lançamento da camada de areia que reveste o trecho perfurado, verificouse uma profundidade de apenas 6m até o fundo, muito menor do que a esperada, evidenciando um provável fechamento de parte do furo. Como é inviável a retirada de material do furo após a instalação do primeiro piezômetro, procedeu-se à execução do selo de bentonita e instalação do segundo piezômetro no nível encontrado, ainda que este esteja acima da profundidade do lençol freático registrado pela sondagem neste ponto.

A sondagem SP2 também teve a instalação do piezômetro mais superficial prejudicada por um possível fechamento de parte do furo, com profundidade de assentamento menor do que o nível d'água encontrado. Estes problemas de fechamento

do furo são decorrentes da decisão de não se utilizar lama bentonítica para a estabilização do furo, que se mostram instáveis em níveis submersos.

As sondagens SP3 e SP4, de menor comprimento, não apresentaram este problema de fechamento das paredes do furo, pois a instalação dos piezômetros foi realizada com o auxílio do revestimento do trépano de lavagem.

A Figura 24 ilustra a distribuição e espessuras das camadas e profundidades de instalação de cada piezômetro. É importante ressaltar que a profundidade de instalação de cada piezômetro refere-se à profundidade do centro do trecho perfurado.



Figura 24 - Dimensões das camadas de instalação dos piezômetros

Para a determinação das cargas piezométricas foram realizadas as leituras dos níveis piezométricos nos piezômetros nos dias 14 e 15 de dezembro de 2013, com o auxílio de um sistema elétrico com cabo, aparelho que consiste em um torpedo na extremidade de uma trena, o qual emite um sinal sonoro quando em contato com a água, permitindo a medição de sua profundidade. As leituras estão apresentadas na Tabela 1, apresentadas em unidades de coluna d'água acima do bulbo de instalação:

PIEZÔMETRO		Profundidade de instalação	Leitura de carga piezométrica (m)	
			14/12/2013	15/12/2013
SP1 N.A.: 6.70m	Profundo	10.60	1.93	1.93
	Raso	4.97	0.00	0.00
SP2A N.A.: 3.85m	Profundo	7.40	3.48	3.46
	Raso	3.25	0.00	0.00
SP3 N.A.: 0.20m	Profundo	4.55	5.02	5.02
	Raso	2.25	2.41	2.41
SP4 N.A.: 0.00m	Profundo	4.12	5.01	5.01
	Raso	1.95	2.75	2.74

Tabela 1 - Leituras dos piezômetros

Obs.: leituras de nível d'água (N.A.) nos dias 17 e 18 de novembro de 2013.

Os piezômetros rasos das sondagens SP1 e SP2A não tiveram níveis registrados provavelmente devido ao problema do fechamento destes dois furos e a consequente instalação dos piezômetros em profundidade acima do nível d'água do dia registrado, conforme mencionado no item 3.3.2. As leituras mostraram-se estáveis nos dois dias.

3.4. Perfil do subsolo

A partir da análise do relatório de sondagem fornecido para cada furo, considerando a descrição das camadas e seus respectivos N resultantes dos ensaios SPT, foi possível determinar a estratigrafia do terreno e estimar seus parâmetros de resistência ao cisalhamento com base em experiências anteriores, devido à falta de prazo para a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento. Estes ensaios foram realizados para o talude a montante do talude estudado em AVELAR et al. (2011),

porém os resultados não foram utilizados pois o solo se apresentou diferente do encontrado nas sondagens realizadas no presente trabalho.

A Figura 25 mostra o eixo da seção escolhida para a análise de estabilidade, priorizando a proximidade com as sondagens realizadas, e a Figura 26 mostra o perfil desta seção inserido no programa SLOPE/W. A profundidade da camada abaixo da sondagem SP1 foi aumentada de forma a não criar uma condição de contorno que impedisse superfícies de ruptura mais profundas. Este recurso foi aplicado porque o impenetrável não foi atingido neste furo. Portanto supõe-se que a espessura da camada nesta área realmente seja maior.



Figura 25 - Vista em planta do eixo da seção analisada



Figura 26 - Perfil do terreno com base nas sondagens

3.5. Rede de fluxo

Através dos dados de leitura dos piezômetros, foi arbitrado um nível de referência no perfil para o traçado da rede de fluxo. Sendo assim, através do conhecimento das cargas altimétrica e piezométrica nos pontos de instalação dos piezômetros, foi possível realizar interpolações para determinar as linhas equipotenciais. A rede de fluxo traçada está mostrada na Figura 28.

No traçado da rede de fluxo, considerou-se que as linhas de fluxo na região superior mais inclinada são paralelas à declividade média do terreno. Na parte plana, a jusante, os levantamentos de campo indicaram diversos pontos de artesianismo. Além disto, as leituras dos piezômetros indicaram uma situação complexa, que somente poderia ser explicada por uma ou mais das hipóteses abaixo:

- injeção de água sob pressão através de possíveis fraturas na rocha;
- fluxo ascendente na "área de descarga" (HUBBERT, 1940);
- presença de diques de material impermeável (Figura 27)
- erros nas cotas das bocas dos furos, devidos à imprecisões da topografia.

Diante da conformação da encosta e da localização da seção, deve-se notar que o fluxo pode estar ocorrendo em direção esconsa ao eixo da seção, não estando de acordo com a hipótese de fluxo bidimensional.



Figura 27 - Influência de diques de diabásio no artesianismo (LACERDA & AVELAR, 2003)

A Figura 28 apresenta a rede esboçada em CAD para a hipótese de injeção através de fraturas, adotada neste trabalho. Esta rede de fluxo não é perfeita, apenas representando uma tentativa de interpretação do fluxo e interpolação das leituras dos dados da piezometria. As regiões marcadas com um ponto de interrogação são aquelas nas quais não há dados suficientes para interpretar o fluxo, sendo necessários mais piezômetros para a leitura destes pontos.



Figura 28 - Rede de fluxo subterrânea

4. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

4.1. Resultados

As análises de estabilidade tiveram por objetivos:

- estimar o fator de segurança da parte do talude a jusante da estrada;
- comparar os fatores de segurança obtidos com duas considerações diferentes de poropressão:
 - Hipótese 1: mais usual na prática, determina-se a linha freática do talude através dos níveis d'água medidos nas sondagens e inserese esta linha como uma linha piezométrica no programa SLOPE/W.
 - Hipótese 2: esboça-se ma rede de fluxo a partir das medições dos piezômetros e utiliza-se a rede de fluxo para determinar os valores de poropressão na superfície potencial de ruptura.

A rede de fluxo considerada na seção anterior foi inserida no programa SLOPE/W através da inserção de pontos com suas respectivas cargas piezométricas, e a análise nos dois casos foi realizada através do método de Spencer.

A Figura 29 apresenta o traçado das linhas equipotenciais, a cada 0.5m, a partir da linha piezométrica, que por sua vez foi determinada por simples interpolação dos níveis d'água encontrados nos furos de sondagem (Hipótese 1). As linhas equipotenciais resultantes são verticais abaixo da linha piezométrica, indicando que o fluxo d'água nesse caso é desprezado, ou seja, a poropressão cresce linearmente com a profundidade.



Figura 29 - Linhas equipotenciais (a cada 0.5m) traçadas a partir da linha piezométrica (Hipótese 1). Nas regiões acima da linha piezométrica as poropressões são nulas.

A Figura 30 mostra as linhas equipotenciais resultantes da interpolação das poropressões inferidas pela rede de fluxo (Hipótese 2). Essas cargas foram determinadas a partir de hipóteses e das leituras dos piezômetros, conforme item 3.5. Nota-se que estas são ortogonais à declividade média do talude em sua parte mais íngreme, conforme a hipótese de fluxo paralelo nesta área. Nas regiões em que a poropressão foi estabelecida como nula as equipotenciais são horiontais.



Figura 30 - Linhas equipotenciais (a cada 0.5m) inseridas a partir da rede de fluxo (Hipótese 2)

As Figuras Figura 31 e Figura 32 mostram a distribuições de poropressão na massa de solo obtidas através da linha piezométrica e da rede de fluxo, respectivamente. Percebe-se bastante semelhança entre as duas situações, com a primeira apresentando, em quase toda a massa de solo, valores maiores que a segunda para uma mesma profundidade.



Figura 31 - Poropressões determinadas pela linha piezométrica (Hipótese 1)



Figura 32 - Poropressões determinadas pela rede de fluxo (Hipótese 2)

A Figura 33 mostra o resultado da análise de estabilidade para o cálculo através da linha piezométrica (Hipótese 1), apresentando a superfície crítica com fator de segurança de 1,32. A superfície crítica é global, começando na crista do talude e saindo por seu pé.



A superfície crítica da análise considerando a rede de fluxo (Hipótese 2) está apresentada na Figura 34, com seu Fator de Segurança de 1,53, maior que o anterior. A superfície crítica pode ser considerada a mesma da análise anterior.



Figura 34 - Superfície crítica determinada pela análise através da rede de fluxo (Hipótese 2)

Nas duas análises foram realizadas buscas pela superfície crítica, testando-se 4000 superfícies circulares.

4.2. Análise de resultados

A análise de estabilidade do talude estudado apresentou resultados diferentes entre as duas considerações. Embora a mesma superfície crítica de ruptura tenha sido encontrada em ambas as análises, o fator de segurança com as poropressões obtidas através da linha piezométrica mostrou-se menor do que no cálculo com a rede de fluxo, ou seja, a favor da segurança.

A presença de fluxo ascendente no pé do talude estudado não condicionou a estabilidade pois a estratigrafia do terreno mostra que a região onde ocorre o fluxo ascendente está confinada por uma camada de material bastante resistente, fazendo com que as superfícies de menor Fator de Segurança estejam longe da região de artesianismo. De fato, observa-se pelas Figura 33 e Figura 34 que apenas uma pequena porção da massa instável está presente na região de fluxo ascendente, sendo muito maior a parcela presente na região mais íngreme.

Na região de maior declividade do terreno, onde está presente a maior parte da massa instável, a consideração da linha freática como linha piezométrica superestima os valores de poropressão, conforme mostrado no ponto A da Figura 35, levando a uma subestimação do fator de segurança. Em casos com outras condições de contorno, entretanto, a superfície crítica poderia estar predominantemente na região de artesianismo. Nestas condições, o uso de linha freática baseada em sondagens como se fosse linha piezométrica tenderia a subestimar as poropressões na superfície crítica, sendo contra a segurança.

De acordo a Hipótese 1, a poropressão é calculada tomando-se a distância vertical entre o ponto A e a linha definida pela água vezes o peso específico da água. Já na análise pela rede de fluxo (Hipótese 2), a poropressão corresponde à componente

vertical da distância entre o ponto e a linha freática, multiplicada pelo peso específico da água, um valor menor do que na consideração anterior. Portanto, nesta região, a análise considerando a linha freática como linha piezométrica é a favor da segurança.



Figura 35 - Cálculo da poropressão em taludes

Apesar deste resultado, deve-se estar atento para outros taludes com fluxo ascendente. Caso a camada de material mais resistente estivesse a uma profundidade maior, o efeito do fluxo ascendente poderia ser mais significativo, pois a superfície crítica poderia ter uma porção maior na região com artesianismo, onde a poropressão na base das fatias é maior. Portanto, nesta situação, a consideração da linha freática como linha piezométrica poderia estar contra a segurança.

Os valores dos fatores de segurança indicam que o talude possui certa segurança contra a ruptura, podendo continuar estável em uma condição mais crítica, como após uma forte precipitação. De fato, este talude não atingiu a ruptura após os elevados índices pluviométricos de janeiro de 2011, logo os valores de FS encontrados mostraram-se de acordo com a realidade.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas análises de estabilidade de um talude em Nova Friburgo/RJ.

Para se determinar o perfil geológico-geotécnico e as cargas hidráulicas na massa de solo foram realizados ensaios de campo, incluindo sondagens à percussão e piezometria.

As sondagens e piezômetros indicaram que na parte baixa da encosta o nível d'água era igual ao nível do terreno e havia fluxo ascendente.

A seguir, foram realizadas análises de estabilidade no programa SLOPE/W, pelo método das fatias. Nestas análises, a água subterrânea foi considerada de duas maneiras: na Hipótese 1, a linha freática, determinada a partir das sondagens, foi considerada como a linha piezométrica, prática usual neste tipo de análise; na Hipótese 2, as poropressões na massa de solo foram estimadas a partir da rede de fluxo construída com base nos dados de campo.

Para o caso estudado, a consideração da linha freática como linha piezométrica foi a favor da segurança devido ao fato de que a maior parte da superfície crítica encontrava-se na parte íngreme da encosta, onde assumiu-se, por hipótese, que o fluxo é aproximadamente paralelo ao nível do terreno. Isto ocorre pela existência de uma camada resistente à pequena profundidade na região do fluxo ascendente próxima ao pé da encosta. Nesta situação, esta simplificação resultou em um resultado anti-econômico, considerando-se a análise através da rede de fluxo mais de acordo com a realidade.

A rede de fluxo é uma importante ferramenta na análise de estabilidade de taludes, especialmente quando o fluxo existente não é simples (por exemplo, quando há

regiões com fluxo ascendente). A simplificação geralmente adotada na prática de considerar a linha freática como uma linha piezométrica não é capaz de reproduzir as elevadas poropressões nesta área, o que pode gerar erros contra a segurança.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVELAR, A.S.; NETTO, A.L.C.; 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: Second World Landslide Forum, 2011, Roma. Proceedings of the Second World Landslide Forum, 2011.

BECKER, L. De B., 2013, Notas de Aula da Disciplina de Estabilidade de Taludes e Estruturas de Contenção. UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

DUNCAN, J.M.; WRIGHT, S.G., 2005, *Soil Strength and Slope Stability*. 1 ed. New Jersey, John Wiley & Sons.

GERSCOVICH, D.M.S., 2012, *Estabilidade de Taludes*. 1 ed. São Paulo, Oficina de Textos.

LACERDA, W.A.; AVELAR, A.S., 2003, *Flume Tests on Sands Subjected to Seepage with the Influence of Hidden Barriers*. In: International Workshop on Occurrences and Mechanisms of Flows in Natural Sopes and Earthfill, 2003, Sorrento. Proceedings of the International Workshop on Occurrences and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfill, 2003. v. 1. p. 136-144.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V., 1979, *Soil Mechanics, SI Version*. 1 ed. New York, John Wiley & Sons.

MACHADO, K.M., 2013, Retroanálise de um deslizamento de encosta em solo residual no município de Nova Friburgo – RJ. Projeto de Graduação, UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PINTO, C.S., 2006, *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3 ed. São Paulo, Oficina de Textos.

SPENCER, E., 1967, A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. Géotechnique, 17: 11-26.

SUZUKI, S., 2004, Propriedades Geomecânicas de Alguns Solos Residuais e Coluviais ao Longo do Oleoduto Curitiba-Paranaguá. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TAYLOR, D.W., 1948, *Fundamentals of Soil Mechanics*. 1 ed. New York, John Wiley & Sons.

ANEXOS

ANEXO 1

Boletins de Sondagens

SP1, SP2, SP2A, SP3 e SP4









