

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/746

Estudo da Estabilidade de um Talude Rodoviário à Luz dos Parâmetros Não Saturados do Solo

Whilison Marques Mendonça

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, whilison@ufop.edu.br

Leandro Neves Duarte

Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco, Brasil, leandro.duarte@ufsj.edu.br

Hemilly Cristine Lobo Fernandes

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, hemilly.fernandes@aluno.ufop.edu.br

RESUMO: Em regiões tropicais, onde predomina o clima quente com distribuição não uniforme de chuva, é comum a presença de zonas não saturadas no maciço do talude, que proporciona uma poropressão negativa no solo, chamada de sucção. A avaliação da influência da sucção na estabilidade dos taludes é essencial no estudo dos gatilhos de ruptura do solo. Nesse contexto, esse estudo tem como objetivo a análise da estabilidade de um talude em solo não saturado, considerando a variação da sucção, bem como determinar a curva característica do solo pelo método do papel filtro e comparar com o método do tensiômetro. Para tanto, foram realizados ensaios para caracterizar fisicamente o solo, classificá-lo e definir as suas propriedades de permeabilidade e de resistência. Os resultados obtidos serviram de parâmetro para realização da análise de estabilidade por meio do software Slide2. As análises demonstraram uma tendência de proporcionalidade entre a sucção e o fator de segurança do talude. O fator de segurança mostrou que o talude estudado se encontra estável, mesmo para a condição saturada. Por fim, a curva característica obtida pelo método do papel filtro por processo de secagem da amostra demonstrou histerese em relação à curva obtida pelo método do tensiômetro.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Não Saturado, Sucção Mátrica, Curva Característica do Solo, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT: In tropical areas, where a warm climate with non uniform rainfall distribution predominates, it is typical to have unsaturated zones in the slope mass of residual soils, which provides a negative pore-water pressure in the soil, that is called suction. The assessment of the influence of soil suction on slope stability becomes imperative in the study of the trigger mechanism for slope stability failures. In this context, this study focuses on slope stability analysis for unsaturated soil, considering changes on matric suction, as well as ascertain the soil-water characteristic curve using filter paper and compare it with the in situ tensiometer method. Therefore, tests were carried out to physically characterize the soil, classify it and define its permeability and shear strength properties. The results of these tests were inputted in the software Slide2 to analyze the slope stability in different scenarios. The analyses showed a trend of proportionality between suction and the slope safety factor. The studied slope is stable and has a high factor of safety, even for the saturated condition. Finally, the soil-water characteristic curve obtained by the filter paper method using the sample drying process has hysteresis in relation to the curve obtained by tensiometer method.

KEYWORDS: Unsaturated Soil, Matric Suction, Soil-water Characteristic Curve, Finite Elements Methods.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019), os movimentos de massa, genericamente chamados de deslizamentos no Brasil, são os eventos que mais causam danos aos humanos no país. As regiões sudeste e sul apresentam suscetibilidade a deslizamentos considerada alta a muito alta em 47,8% e 40,1% do território, respectivamente. Esse cenário é ilustrado pelos desastres ocorridos na última

década que deixaram milhares de mortos em Blumenau-SC (2008), Angra dos Reis-RJ (2009), Niterói-RJ (2010), região Serrana do Rio de Janeiro (2011) e Região Metropolitana de Belo Horizonte - MG (2020).

A análise da estabilidade de um talude é uma tarefa da engenharia geotécnica e visa estabelecer um fator de segurança (FS), dado pela razão entre a soma das forças resistentes e a soma das forças atuantes no meio, a fim de expor e minimizar os riscos gerados pela movimentação de massa de um maciço de solo ou rocha. Diversos autores propuseram métodos para a realização da análise de estabilidade baseados na teoria do equilíbrio limite. Os métodos tradicionais utilizam os parâmetros efetivos do solo saturado para cálculo da força cisalhante mobilizada (Fellenius, 2024).

Entretanto, os fatores climatológicos em regiões tropicais favorecem a formação de uma zona não saturada dinâmica nos taludes. Dessa forma, a mecânica dos solos não saturados e a consideração da atuação das poropressões negativas (sucção) nos parâmetros de resistência do solo é apropriada para o estudo dos solos em regiões tropicais (Rahardjo et al., 2012). A sucção do solo depende do seu nível de saturação e da interação da sua estrutura composta por solo, água e ar.

A realização de análises de estabilidade tem se tornado mais frequente devido à disponibilidade de ferramentas computacionais que permitem modelar os parâmetros não saturados do solo e efetuar análises numéricas com maior precisão, e ainda obter melhor entendimento do comportamento do fluxo em solos não saturados. Calle (2000), utilizando técnicas de laboratório e de campo para obtenção dos valores de sucção e modelagem da curva característica do solo, realizou retroanálises da ruptura de um talude em solo não saturado.

Kristo et al. (2017), considerando as propriedades do solo não saturado, estudaram os efeitos das variações de intensidade de chuva, devido às mudanças climáticas, no comportamento dos solos e estimaram uma diminuição significativa no fator de segurança que pode ser prejudicial para a estabilidade de taludes em Singapura. Fernandes (2021) avaliou a estabilidade de um talude em solo não saturado, a partir de dados experimentais e análises numéricas, determinando a variação do fator de segurança do talude sob a influência de precipitações e alterações nos valores de sucção obtidos pela modelação da curva característica do solo.

O presente estudo tem por objetivo analisar a estabilidade de um talude rodoviário para diferentes cenários de precipitações, sob a influência dos parâmetros do solo não saturado e comparar as curvas características obtidas por métodos distintos. Para tal, determinou-se a curva característica do solo não saturado utilizando o método do papel filtro. Os valores de sucção obtidos em laboratório com o uso do método do papel filtro são comparados com aqueles obtidos por Fernandes (2021) utilizando o método de campo com o uso do tensiômetro.

2 SOLOS NÃO SATURADOS

Os solos não saturados apresentam uma quarta fase física na interface ar-água e podem ser caracterizados pelo potencial total da água no solo. Essa interface atua como uma membrana nos vazios que influencia o seu teor de umidade, volume e resistência ao cisalhamento. O entendimento do comportamento geotécnico desses solos se dá pelo estudo dos fenômenos de fluxo, tensão e deformações por eles apresentados (Fredlund *et al.*, 2012).

A sucção mátrica é uma combinação dos efeitos de capilaridade e adsorção de água, estando relacionada à interação ocorrida entre os poros e a estrutura dos sólidos. A curva característica do solo (*soil-water characteristic curve* – SWCC) descreve a relação entre os valores de sucção do solo e a quantidade de água presente nos seus poros, sendo uma informação de entrada para estimar a força cisalhante em solos não saturados (Lu e Likos, 2004). Essa curva apresenta uma histerese entre os processos de adsorção e secagem, ou seja, o solo pode apresentar diferentes valores de sucção para um mesmo teor de umidade quando está secando ou umedecendo (Fredlund e Xing, 1994).

Há diferentes métodos de ensaio para medição da sucção no solo, dentre eles o método do papel filtro e o método do tensiômetro. O tensiômetro consiste em um método de campo que mede diretamente os valores de sucção do solo, limitado a medição um intervalo de 0 a 1500 kPa. Já o método do papel filtro consiste na avaliação em laboratório da sucção do solo por meio de um papel filtro quantitativo em contato direto com o solo, possuindo a vantagem de conseguir mensurar a sucção em qualquer valor de umidade (Pan *et al.*, 2010).

Diversos autores propuseram equações para parametrizar a curva característica do solo. A equação de van Genuchten (1980) foi a primeira a considerar a curva com comportamento sigmoideal e é uma das mais utilizadas (Equação 1). Os parâmetros θ_r e θ_s são, respectivamente, o teor de umidade residual e o teor de

umidade de saturação; a está relacionado ao valor de entrada de ar; n corresponde à taxa de retirada de água do solo após excedido o valor de entrada de ar; e ; m relaciona-se às condições de teor de umidade residual.

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[(1 + (a\psi)^n)^m]^{-1} \quad (1)$$

A habilidade do solo em permitir o fluxo de água, ou seja, a condutividade hidráulica, varia nos solos não saturados com os níveis de sucção. À medida que a sucção aumenta, a condutividade hidráulica diminui, pois o caminho disponível para o fluxo de água é mais restrito (Lu e Likos, 2004). A determinação experimental da condutividade hidráulica é complexa para solos não saturados. Van Genuchten (1980) combinou sua equação da curva característica com a integral da função desenvolvida por Mualem para descrever a condutividade. Essa combinação resultou na hoje conhecida como equação de Van Genuchten – Mualem (Equação 2), largamente utilizada para descrever a condutividade hidráulica em solos.

$$k(\Theta) = k_{sat}\Theta^{0.5}[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

A resistência ao cisalhamento de solos não saturados sofre contribuição da sucção mátrica, sendo necessário uma modificação no critério de resistência Mohr-Coulomb. Uma dessas adaptações é a proposta por Fredlund *et al* (2012), na qual os autores adicionaram uma parcela de resistência ao cisalhamento devido à sucção mátrica (Equação 3).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot \tan\phi^b \quad (3)$$

Na Equação 3, c' , ϕ' , e $(\sigma - u_a)$ são os parâmetros efetivos de resistência do solo saturado e a tensão normal líquida na ruptura. A parcela $(u_a - u_w)$ corresponde à sucção mátrica do solo na ruptura e ϕ^b quantifica a taxa de aumento da resistência ao cisalhamento com a variação da sucção.

3 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho é dividida em três etapas principais, sendo elas a escolha do local do estudo e levantamento dos dados topográficos e pluviométricos, execução de ensaios de campo e de laboratório e, por fim, a utilização de *softwares* para obtenção dos parâmetros não saturados e análise da estabilidade do talude.

3.1 Local de Estudo e Dados Pluviométricos

O talude estudado está localizado na rodovia MG 443, próximo à entrada do campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João del Rei, em Ouro Branco – MG, na área geológica do quadrilátero ferrífero. A superfície do talude possui 11 metros de comprimento, fazendo um ângulo de 37° com o horizonte. Há processos erosivos aparentes em áreas do topo e vegetação de capim em toda sua extensão (Figura 1).



Figura 1. Talude em estudo (16/10/2020).

Os dados pluviométricos da região foram extraídos do sistema de informações da Agência Nacional das Águas (ANA) e a estação pluviométrica cujo dados foram obtidos localiza-se a 6,3 km do talude. O tempo de

retorno considerado foi de 100 anos, equivalente àqueles considerados para obras de arte, e a intensidade máxima de precipitação com 24 h de duração igual a 10,9 mm/h. A probabilidade de ocorrência da chuva de intensidade máxima adotada é de 63,40% para uma vida útil de 100 anos no tempo de retorno adotado.

3.2 Conhecendo o Solo: Ensaios de campo e de Laboratório

As amostras de solo, deformadas e indeformadas, foram coletadas próximo ao pé do talude. No mesmo local foi realizado o ensaio de frasco de areia a fim de ser obtido o valor da massa específica aparente *in situ* do solo. A umidade natural foi determinada pelo método da estufa em laboratório. A amostra deformada foi seca ao ar até a umidade higroscópica, destorroada e quarteada. Com a porção representativa do solo foram realizados os ensaios de massa específica dos grãos, análise granulométrica e limites de consistência, seguindo as normatizações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para tais ensaios. Os ensaios mini-MCV e perda de massa por imersão foram realizados a fim de classificar o solo segundo a metodologia MCT (miniatura, compactado, tropical).

O ensaio de permeabilidade à carga variável foi realizado com um cilindro de amostra indeformada. As leituras de permeabilidade foram realizadas para dois valores diferentes de gradiente hidráulico inicial, sendo esses 2,97 e 6,79. Com os valores registrados obteve-se o coeficiente de permeabilidade (k) do solo saturado.

Os parâmetros de resistência do solo foram obtidos por meio de três ensaios de cisalhamento direto realizados em um equipamento automatizado, com tensões normais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Os corpos de prova com dimensões 100 mm de aresta e 20 mm de altura foram talhados da amostra indeformada e o ensaio realizado inundado. A velocidade de ruptura foi fixada em 0,01 mm/min, conforme recomendado por Knappett e Craig (2012) para siltes, de forma a permitir a dissipação da poropressão. O tempo de adensamento foi fixado em 10 h para cada amostra, pois após esse tempo não houve variação significativa da altura do CP.

Para determinação da sucção foi utilizado o método do papel filtro, seguindo a norma americana D5298: *Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper* da ASTM International (2016). Ao todo, 22 corpos de prova cilíndricos foram talhados da amostra indeformada, utilizando anéis de PVC com 50 mm de diâmetro interno. Para cada um dos 11 pontos de umidade da Tabela 1 foram utilizados dois corpos de prova separados por três papéis filtros quantitativos Whatman™ N° 42 circulares, sendo dois com 52 mm de diâmetro e um interno com 47 mm de diâmetro. O processo de obtenção da umidade de ensaio para todos os corpos de prova foi por secagem.

Tabela 1. Pontos de umidade do ensaio de sucção.

Ponto	Grau de Saturação (%)	Umidade Volumétrica (%)
1	100	53,39
2	100	53,39
3	93	49,83
4	87	46,27
5	80	42,71
6	67	35,59
7	53	28,48
8	40	21,36
9	29	15,50
10	18	9,65
11	7	3,79

O conjunto composto por dois corpos de prova e três papéis filtro foi isolado hermeticamente e armazenado por 14 dias, a fim de equilibrar a umidade da amostra de solo e dos papéis filtro. Após esse período, o conjunto foi aberto e medido a massa do papel filtro central em balança de precisão 0,0001g. Depois de seco em estufa a massa do papel filtro foi novamente determinada. Obteve-se os valores de sucção do solo para cada umidade do solo ensaiada aplicando os resultados na Equação 4, proposta por Chrystello (2017).

$$\log \psi = 4,9271 * e^{-0,018wf} \quad (4)$$

Os pares ordenados de sucção e umidade do solo foram lançados no programa SWRC Fit (Seki, 2007) para serem obtidos os parâmetros θ_r , θ_s , a e n da Equação 1 e construída a curva característica do solo em estudo. De posse da curva característica e o coeficiente de permeabilidade saturado determinou-se a curva de permeabilidade do solo não saturado, conforme a Equação 2.

3.3 Análises Numéricas da Estabilidade do Talude

As análises numéricas foram realizadas pelo método dos elementos finitos no *software* Slide2 da Rocscience Inc. O programa foi alimentado com a geometria do talude, considerando um maciço homogêneo, e os demais dados obtidos pelos ensaios laboratoriais. A Equação 3 foi utilizada pelo programa para avaliar a resistência ao cisalhamento do solo não saturado. A malha de elementos finitos foi pré-definida com 1500 elementos triangulares de 3 nós, sendo refinada durante o processamento da análise.

O fator de segurança foi calculado utilizando sete métodos diferentes, sendo eles: Bishop Simplificado, GLE/Morgenstern-Price, Janbu Simplificado, Janbu Corrigido, Ordinário/Fellenius, Spencer e Sarma. Foram realizadas análises de estabilidade para quatro cenários diferentes, a fim de avaliar a influência da variação da sucção no fator de segurança global do talude.

No cenário 1 foi realizada uma análise estática utilizando os parâmetros efetivos de resistência. No cenário 2 analisou a estabilidade para um regime de fluxo permanente considerando a influência da sucção correspondente ao teor de umidade natural do solo encontrado em campo no dia da coleta de amostras.

Nos cenários 3 e 4 foram realizadas análises em regime de fluxo transitório devido a simulação de chuva e sua influência na sucção mátrica e, conseqüentemente, na estabilidade global do talude. A chuva simulada possui 10,9 mm/h de intensidade. Tanto o cenário 3 quanto o 4 foram simulados em sete estágios, sendo compostos de um inicial e outros seis equivalentes a um dia cada. No cenário 3 foi simulado a ocorrência de chuva apenas no 2º dia, já no cenário 4 foi simulado ocorrência de chuva no 2º e 5º dias.

4 RESULTADOS

A umidade natural do solo medida em campo foi de 26,4%, sendo esse valor utilizado como condição de contorno inicial nas análises de estabilidade nos cenários 2, 3 e 4. A análise granulométrica com uso de defloculante químico revelou que o solo possui 43,7% de silte, 35,2% de argila, 20,6% de areia e 0,5% de pedregulho. Não foi possível obter o limite de plasticidade pelo método da placa de vidro, pois o cilindro de solo fragmenta-se antes de alcançar 3 mm de diâmetro seja qual for o seu teor de umidade. Os demais resultados dos ensaios de caracterização, permeabilidade e resistência ao cisalhamento estão na Tabela 2.

O solo, de acordo com a classificação unificada, é um silte de alta compressibilidade com areia. Nos ensaios realizados da sistemática MCT, os corpos-de-prova compactados apresentaram elevada desagregação do material ao ser imerso em água e o solo foi classificado como siltoso não laterítico (NS').

Tabela 2. Dados do solo em estudo obtidos em laboratório.

Parâmetro	Valor
ρ_{nat} (g/cm ³)	1,596
$\rho_{\text{sólidos}}$ (g/cm ³)	2,710
LL (%)	62
K (m/s)	8,61x10 ⁻⁶
Coesão efetiva - c' (kPa)	24,6
Ângulo de atrito efetivo - ϕ' (°)	31,5

A curva característica do solo foi modelada de acordo com a Equação 1 pelo programa SWRC Fit, utilizando os valores de sucção obtidos pelo método de ensaio do papel filtro e calibrados pela Equação 4. O coeficiente de determinação da curva R^2 foi de 0,96. A Figura 2 apresenta a curva obtida por esse trabalho utilizando o método do papel filtro e a curva obtida por Fernandes (2021), para o mesmo solo, utilizando o método do tensiômetro.

Apesar de ser o mesmo solo e ambos os autores terem utilizado o modelo de van Genuchten, as curvas características apresentam algumas diferenças. A curva obtida por Fernandes (2021) utilizando o método de

campo do tensiômetro possui um trecho retilíneo após a saturação residual e maiores valores de saturação máxima e entrada de ar. As curvas apresentam histerese, fenômeno típico das curvas características de solos não saturados quando obtidas por secagem e umedecimento, processos que foram utilizados respectivamente pelo método do papel filtro nesse trabalho e pelo método do tensiômetro por Fernandes (2021).

De acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009) o fator de segurança mínimo para o talude em estudo é 1,43. Apesar de terem sido analisados 7 métodos de análise de estabilidade, o método Janbu Simplificado apresentou o menor fator de segurança em todos os cenários e será utilizado na discussão dos resultados, como referência para as comparações.

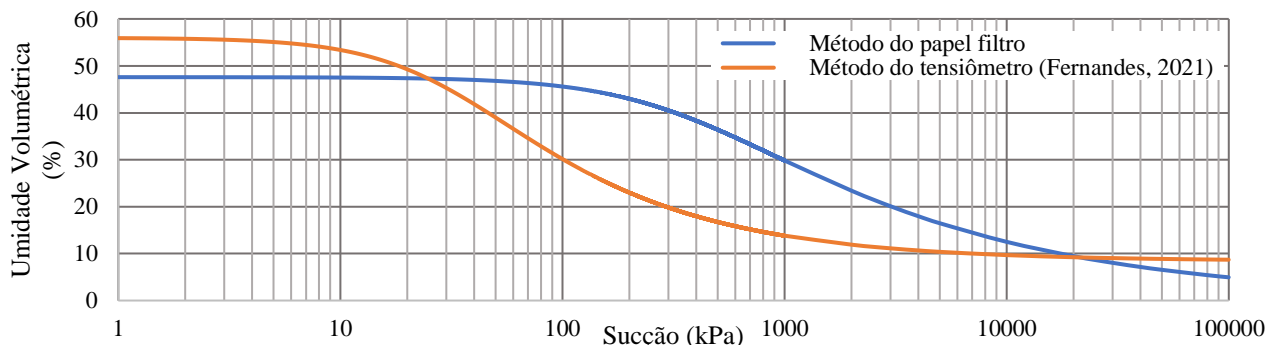


Figura 2. Curva característica do solo para dois métodos diferentes.

No cenário 1, sem influência da sucção, o talude apresentou FS de 2,613. Tal fator de segurança é 83% maior que o FS mínimo para o talude, estando o talude estável para esse cenário. Já no cenário 2, considerando a atuação de 68,27 kPa de sucção (correspondente a umidade natural do solo), o FS do talude aumentou para 4,430, ou seja, 70% maior daquele determinado no cenário 1. A maior segurança na estabilidade do talude se deu pelo aumento da resistência do solo devido a contribuição da sucção.

A Figura 3 apresenta as superfícies críticas de ruptura para os cenários 1 e 2. Ambas as superfícies são circulares e côncavas, com tendência ao movimento rotacional de ruptura. No entanto, no cenário 1, cujo FS é menor, a área transversal da seção de ruptura é inferior à do cenário 2, e o ângulo da tangente na parte final da superfície de ruptura também é menor, indicando um talude de ruptura mais íngreme. Embora o momento instabilizante no cenário 2 seja maior devido ao peso da massa de solo e à distância horizontal até o centro do raio ($W \cdot x$), a tensão cisalhante mobilizada será superior, tanto pelos maiores comprimentos de arco e raio da seção de ruptura quanto pela contribuição da poropressão negativa, conforme demonstrado na Equação 3.

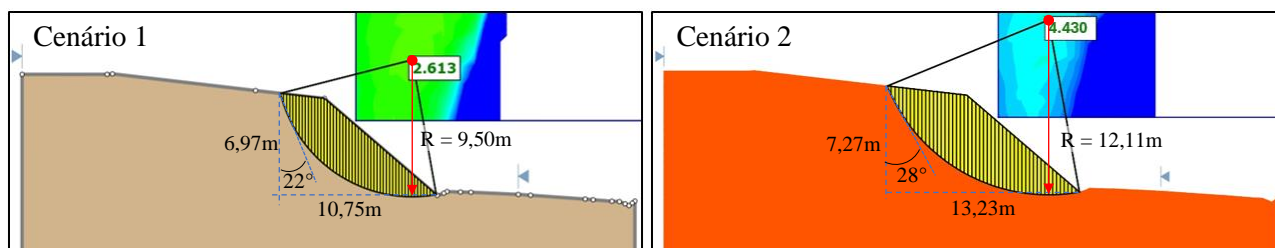


Figura 3. Superfícies críticas de ruptura geradas pelo software Slide 2 (imagem adaptada).

No cenário 3 foi realizada uma análise considerando o regimento transitório com simulação de chuva no segundo dia. O FS diminuiu 13% no final do dia de chuva, enquanto a sucção variou em 25%. Nos dias seguintes, o talude recupera lentamente o seu fator de segurança, sendo que ao final do quarto dia após a chuva o FS do talude recuperou apenas 23% da perda de segurança ocorrida durante o dia de chuva (Figura 4).

Por fim, no cenário 4, os resultados obtidos até o final do quarto dia foram os mesmos do cenário 3. Ao final do quinto dia, no qual foi simulado uma nova chuva, o talude apresentou um novo decréscimo de segurança, enquanto a sucção também teve seu valor diminuído. No dia seguinte, mesmo cessada a chuva, o fator de segurança continuar a cair, alcançando o valor de 2,837, valor esse 34% menor que o inicial. A sucção também diminuiu, chegando a 9,29 kPa, ou seja, valor próximo da poropressão nula (Figura 4).

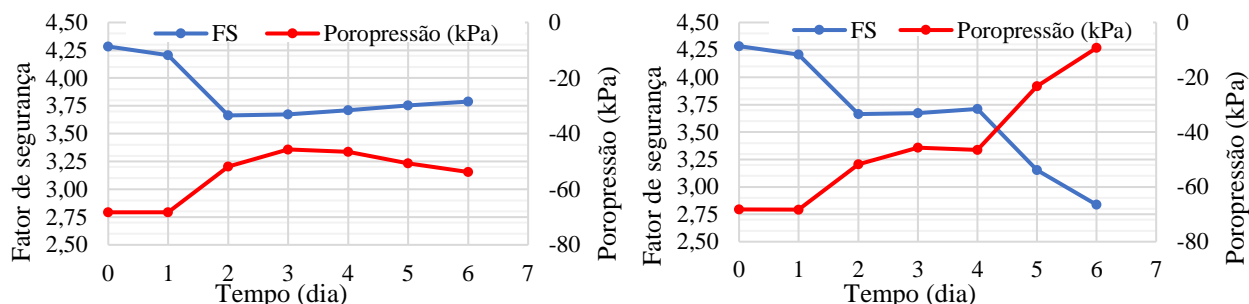


Figura 4. Resultado da análise de estabilidade no cenário 3, à esquerda, e no cenário 4, à direita.

A Figura 5 ilustra a variação do fator de segurança (FS) e da superfície de ruptura ao final de cada dia simulado. As imagens permitem observar o avanço da água pelos poros do maciço e a consequente diminuição da poropressão, resultando em um menor FS. Nos dias de chuva (2 e 5), há uma diminuição mais acentuada do FS devido à redução rápida da poropressão negativa. É importante destacar a diminuição do FS no dia 6, mesmo sem a simulação de chuva, atribuída ao avanço da franja de saturação.

Pode-se supor que o deslizamento do Morro do Bumba, em Niterói (RJ), ocorreu em situação semelhante. O evento aconteceu por volta das 21h do dia 07/04/2010, e durante todo esse dia choveu apenas 7,6 mm. No entanto, de acordo com a estação pluviométrica localizada no Forte de Copacabana (a 14,9 km do Morro do Bumba), choveu 179,4 mm no dia anterior ao desastre (INMET, 2020). A franja de saturação pode ter continuado seu movimento descendente até alcançar a superfície crítica, desmobilizando a tensão cisalhante resistente e acionando o mecanismo de ruptura. Tal hipótese pode ser verificada por meio de retroanálise.

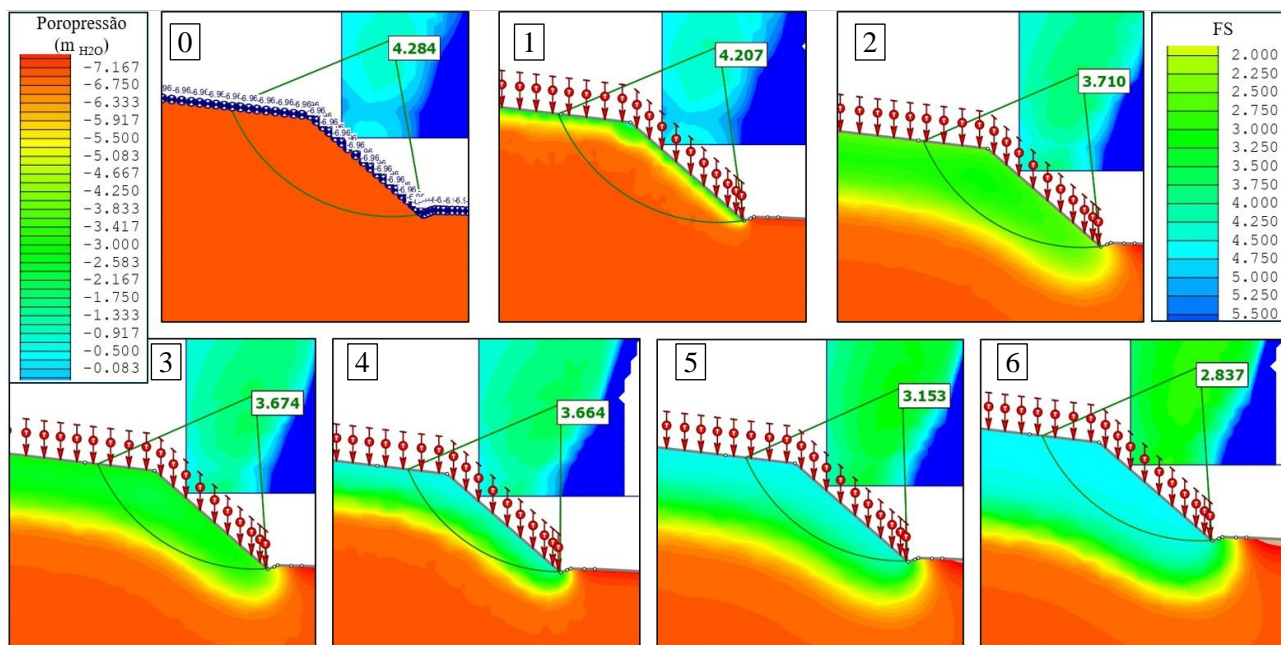


Figura 5. Evolução do FS e poropressão ao longo de 6 dias (Cenário 4)

5 CONCLUSÕES

O talude estudado apresentou estabilidade satisfatória em todos os cenários realizados, nas condições saturado e não saturado, sendo que na presença de sucção o talude apresentou maior fator de segurança. Os resultados demonstraram uma proporcionalidade entre a sucção do solo e o fator de segurança do talude. Na umidade natural do talude, a sucção do solo contribuiu para um aumento de 70% do fator de segurança. A simulação de chuva nas análises de estabilidade indicou que o talude recupera lentamente o seu valor de sucção inicial após um período de chuva intensa, ficando vulnerável em períodos chuvosos.

A curva característica do solo, traçada a partir dos parâmetros hidráulicos do solo não saturado, utilizando o método do papel filtro, exibiu comportamento padrão para solo com granulometria predominante

de silte. As curvas obtidas pelos métodos do papel filtro e do tensiômetro exibem diferentes valores de entrada de ar, cerca de dez vezes maior para o primeiro método. Tal diferença está relacionado com a histerese típica entre as curvas características de adsorção e dessorção, pois enquanto o método do tensiômetro varia a umidade do solo pela adição de água, o ensaio realizado pelo método do papel filtro variou a umidade pela secagem ao ar do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2016). D5298. *Standart Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*. West Conshohocken, PA, USA. 6p.
- Calle, J. A. C (2000) *Análise de ruptura de talude em solo não saturado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos.
- Chrystello, A. C. (2017) *Avaliação de curvas de calibração do método do papel filtro tipo Whatman nº 42 utilizadas para estimar a sucção matricial em solos não saturados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 135p.
- Fellenius, B. H. (2024) *Basics of Foundation Design*. Eletronic Edition. Disponível em: <https://www.fellenius.net>. Acesso em 05 de março de 2024.
- Fernandes, H. C. L. (2021) *Estudo experimental e numérico para avaliação da estabilidade de talude em solos não saturados*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H.; Fredlund, M. D. (2012) *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, Nova Jersey, USA, 926 p.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v.32, p. 440-448.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Banco de Dados Meteorológicos. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/#>>. Acesso em: 25 de novembro de 2020.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019). *Suscetibilidade a Deslizamentos no Brasil: Primeira aproximação*. Rio de Janeiro: IBGE. 60p.
- Knappett, J. A.; Craig, R. F. (2012) *Craig's Soil Mechanics*, 8nd ed, Spon Press, New York, NY, USA. 552 p.
- Kristo, C.; Rahardjo, H.; Satyanaga, A. (2017) Effect of variations in rainfall intensity on slope stability in Singapore. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 5, n. 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.07.001>.
- Lu, N.; Likos, W. J. (2004) *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, Nova Jersey, USA, 566 p.
- Pan, H.; Qing, Y.; Pei-Young, L. (2010) Direct and Indirect Measurement of Soil Suction in the Laboratory. *The Eletronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 15, bund. A. 14p.
- Rahardjo, H.; Satyanaga, A.; Leong, E. C. (2012) Unsaturated Soil Mechanics for Slope Stabilization. *Geotechnical Engeneering Journal*, SEAGS & AGSSEA, Bangjok, v. 43, n. 1, p. 48-58.
- Rocscience Inc. (2020) Slide 2 Versão 9.010. *2D Limit Equilibrium Slope Stability analysis*. Disponível em: <https://www.roscience.com>.
- Seki, K. (2007) SWRC-Fit – a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 4, p. 407-437.
- van Genuchten, M. T. A. (1980) A closed-form equation for predicting the hidraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sciense Society of America Journal*, v. 44 (5), p. 892-898.