



Efeito da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos: ênfase na análise de estabilidade de taludes

Breno Padovezi Rocha

Professor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, breno.rocha@unesp.br

Pedro Henrique Campos Amaral

Mestrando, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Brasil, phc.amaral@unesp.br

Luis Pedro Rojas Herrera

Mestre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, Brasil, luis.rojas@unesp.br

Jeferson Brito Fernandes

Doutor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, Brasil, jeferson.brito@unesp.br

Heraldo Luiz Giacheti

Professor, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, Brasil, h.giacheti@unesp.br

RESUMO: Escorregamentos de terra são uma das formas mais frequentes de movimentos de massa, podendo acarretar perdas econômicas e de vidas. Devido ao aumento do consumo de recursos naturais e efeitos das mudanças climáticas, a ocorrência de escorregamentos em taludes naturais ou antrópicos tem se tornado cada vez mais frequentes. Os taludes normalmente se encontram em condição não saturada, sendo a sucção um fator preponderante na definição da resistência ao cisalhamento do solo, bem como nas análises de estabilidade de taludes. O aumento da sucção pode aumentar a resistência ao cisalhamento do solo, melhorando assim a estabilidade do talude. Este artigo apresenta e discute o efeito da condição não saturada (sucção) no comportamento mecânico de uma areia fina pouco argilosa por meio de ensaios triaxiais saturados e não saturados. Amostras indeformadas foram coletadas a 1,5, 3,0, 5,0, e 9,0 m de profundidade. A técnica de translação de eixos foi empregada para a imposição/controle da sucção. Os valores de sucção impostos foram de 50, 200 e 400 kPa, enquanto as tensões confinantes foram de 50, 100 e 200 kPa. A partir desses resultados, uma análise de estabilidade foi feita, empregando um *software* comercial, para um talude de corte com 7,0 m de altura e inclinação de cerca de 55° a fim de ilustrar o efeito da condição não saturada no Fator de Segurança (FS). Observou-se um aumento da parcela coesiva com a sucção para as profundidades investigadas, e não foram verificadas alterações significativas no ângulo de atrito interno. Além disso, verificou-se o aumento da estabilidade do talude analisado em função da sucção matricial. Logo, é necessário o estudo da condição não saturada nas análises de estabilidade de taludes, uma vez que a sucção acarreta um acréscimo de resistência do solo, e assim na estabilidade dos taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade, Parâmetros de resistência, Coesão, Ângulo de atrito, Sucção.

ABSTRACT: Landslides are one of the most common forms of mass movement and can cause economic losses and loss of life. Because of the increasing consumption of natural resources and the effects of climate change, the occurrence of landslides on natural or man-made slopes has become more frequent. Slopes are usually unsaturated. Soil suction is a factor in defining soil shear strength and slope stability analysis. Increasing suction can increase the shear strength of the soil and thus improve slope stability. This paper presents and discusses the effect of the unsaturated state (soil suction) on the mechanical behavior of clayey fine sand using saturated and unsaturated triaxial tests. We took undisturbed samples at depths of 1.5, 3.0, 5.0, and 9.0 m. The axis translation technique was used to impose/control suction. The imposed suction values were 50, 200, and



400 kPa, while the confining stresses were 50, 100, and 200 kPa. Based on the laboratory test interpretation, we performed a stability analysis using commercial software on a 7.0 m high, 55° cut slope to illustrate how unsaturated conditions affect the factor of safety (FS). We observed an increase in cohesion, and the friction angle showed no significant changes at the investigated depths. In addition, there was an increase in the stability of the slope analyzed as a function of matrix suction. It is, therefore, necessary to study the unsaturated condition in slope stability analyses, since suction leads to an increase in soil resistance and slope stabilization.

KEYWORDS: Stability, Strength parameters, Cohesion, Friction angle, Suction.

1 INTRODUÇÃO

Os taludes podem ser subdivididos em dois grupos: naturais e artificiais. Os artificiais exibem maior homogeneidade do que os naturais, adequando-se melhor aos modelos empregados nas análises de estabilidade. A estabilidade de taludes é um tema importante, uma vez que apresenta riscos de perdas socioeconómicas causadas por eventuais rupturas. Tais rupturas podem causar danos em edificações, em infraestrutura rodoviária, bem como causar ferimentos ou morte da população (Rahardjo et al., 2019).

A necessidade de estabilização e de medidas preventivas adequadas para a proteção de taludes tem ganho grande relevância no contexto do desenvolvimento sustentável das áreas urbanas, especialmente devido às mudanças climáticas. Neste cenário, espera-se para o futuro períodos de seca mais longos e precipitações de maior intensidade e menor duração, sendo necessário prevenir futuras rupturas de taludes induzidas pela chuva como proteção contra a precipitação. As alterações nos padrões de precipitação, em particular, influenciarão a condição de fronteira do fluxo na superfície do solo. Alterações no comportamento das águas subterrâneas associadas a fenômenos extremos na interface solo-atmosfera demonstram a natureza complexa de problemas dependentes do tempo, como a estabilidade de taludes, que são melhor analisados no contexto da Mecânica dos Solos Não Saturados (Rocha et al. 2023).

O comportamento dos solos não saturados depende da sucção do solo (Alonso et al., 1990). As alterações no teor de água e na sucção dos solos não saturados ocorrem devido a variações climáticas (Blight, 2003). Os eventos climáticos (ou seja, precipitação extrema e secas) são dominados por interações solo-atmosféricas em que o teor de água e a sucção do solo podem variar sazonalmente (Rahardjo et al., 2019). As alterações na sucção do solo podem reduzir a resistência do solo, acarretando rupturas de taludes e consequentemente destruições e mortes (Cho & Lee, 2002). Logo, o comportamento dos solos não saturados deve ser considerado nas análises de estabilidade de taludes (Fredlund & Rahardjo, 1993; Ng et al., 2001).

É necessário determinar as propriedades do solo não saturado para uma análise adequada de estabilidade em solos não saturados, tais como a resistência ao cisalhamento não saturada, a condutividade hidráulica e a curva de retenção de água no solo (SWRC). Ensaios triaxiais convencionais e com controle de sucção, bem como ensaios para se determinar as curvas de retenção (placa de sucção, câmara de pressão e papel de filtro) em amostras indeformadas devem ser realizados para melhor entender o comportamento desses solos. Ressalta-se o progresso significativo que os ensaios com controle de sucção trouxeram para a compreensão dos solos não saturados, especialmente a técnica de translação de eixos de Hilt (1956). No entanto, técnicas de controle de sucção são complexas e dispendiosas, o que torna necessária a procura de alternativas mais econômicas.

Este artigo apresenta e discute o efeito da condição não saturada (sucção) no comportamento mecânico de uma areia fina pouco argilosa por meio da realização de ensaios triaxiais saturados e não saturados em amostras indeformadas coletadas a 1,5, 3,0, 5,0, e 9,0 m de profundidade. A partir dos parâmetros de resistência determinados, realizou-se uma análise de estabilidade empregando um *software* comercial em um talude de corte com 7,0 m de altura e inclinação de cerca de 55° a fim de ilustrar o efeito da condição não saturada no Fator de Segurança (FS). É necessário o estudo da condição não saturada nas análises de estabilidade de taludes, uma vez que a sucção acarreta um acréscimo de resistência do solo, e assim na estabilidade dos taludes.

2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SOLOS NÃO SATURADOS

Bishop (1959) cita que as tensões efetivas em solos não saturados podem ser determinadas utilizando-se o princípio das tensões efetivas, a partir da Equação 1:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi \cdot (u_a - u_w) \quad (1)$$



onde:

σ' e σ : tensão vertical efetiva e total atuante no solo;

u_a e u_w : pressão no ar e na água presentes nos poros do solo;

χ : parâmetro dependente do grau de saturação do solo.

A partir do conceito estabelecido por Bishop (1959), observou-se a possibilidade de se empregar o critério de resistência de Mohr-Coulomb, inicialmente desenvolvido para solos saturados, para os solos não saturados. Fredlund et al. (1978) propuseram que a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado é uma função das variáveis independentes do estado de tensão, e que pode ser representada pela Equação 2:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (2)$$

onde:

τ : tensão de cisalhamento;

c' : intercepto de coesão efetivo;

ϕ : ângulo de atrito interno relativo à tensão normal líquida ($\sigma - u_a$);

ϕ^b : ângulo de atrito interno relativo à sucção matricial ($u_a - u_w$).

A partir desta relação, muitos pesquisadores (Fredlund et al., 1978) têm assumido com base em ensaios laboratoriais que $\phi \cong \phi'$ (ou seja, a sucção pouco afeta o ângulo de atrito do solo). Estes autores verificaram que a relação entre τ e as variáveis de tensão pode ser aproximada para um plano, sendo que a inclinação desse plano é direcionada pelos ângulos de atrito do material (Figura 1). Deste modo, a expressão do intercepto de coesão em função da sucção pode ser representada pela Equação 3. Entretanto, devido à variação de ϕ e ϕ^b com o nível de sucção, se observa que uma envoltória geral de resistência de solos não saturados deve ser representada por uma superfície curva (Rohm & Vilar, 1995).

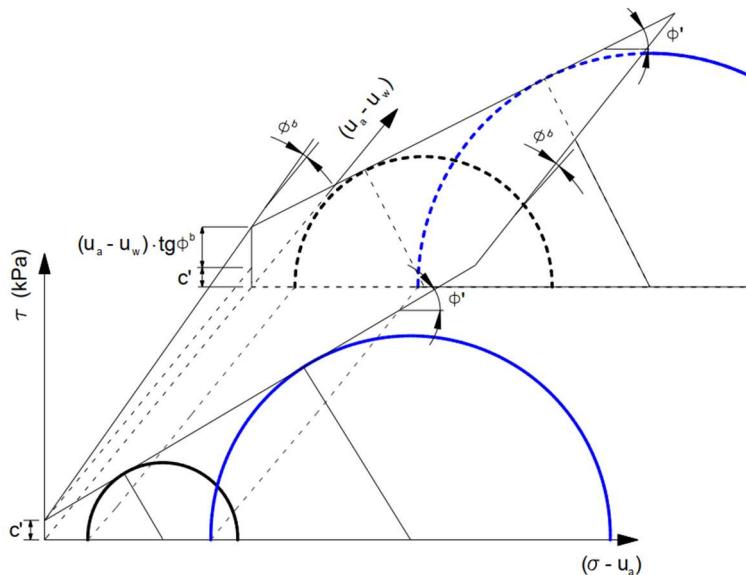


Figura 1. Envoltória de resistência para solos não saturados (adaptado de Fredlund et al. 1978).

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

onde:

c : intercepto de coesão em função da sucção.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solo estudado e ensaios realizados



Amostras indeformadas foram coletadas a 1,5, 3,0, 5,0, e 9,0 m de profundidade, por meio de um poço de amostragem, em um perfil de solo tropical típico do interior de São Paulo, caracterizado por uma areia fina a média, pouco argilosa, de origem coluvionar e comportamento laterírico até aproximadamente 13,0 m de profundidade (Giacheti et al., 2019). Ressalta-se que a camada superficial deste perfil, até aproximadamente 8,0 m de profundidade apresenta comportamento colapsável, quando inundado.

Ensaios triaxiais saturados e não saturados do tipo adensado drenado (CD) foram realizados em corpos de prova de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O programa experimental considerou a realização de ensaios sob sucções de 0 (condição saturada), 50, 200 e 400 kPa e tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa para as amostras coletadas a 1,5, 3,0, 5,0 e 9,0. A sucção nos corpos de prova foi imposta através da técnica de translação de eixos (Hilf, 1956). Os corpos de prova foram carregados com imposição de deformação axial constante e tensão normal líquida constante até a ruptura.

3.2 Características do talude analisado

A partir da interpretação dos ensaios de laboratório, uma análise de estabilidade de um talude de corte foi realizada, para avaliar o ganho de resistência ao cisalhamento, devido à sucção, no fator de segurança (FS) do talude.

O talude tem 7,0 m de altura e uma inclinação aproximada de cerca de 55°. A posição da água subterrânea foi assumida como sendo no pé do talude, sem fluxo de água subterrânea. A Figura 2 apresenta a geometria definida e a posição do nível d'água para a análise da estabilidade do talude.

O software *Slide (Rockscience)* foi utilizado para efetuar a análise de estabilidade de taludes utilizando o método de estabilidade de Bishop simplificado. O critério de resistência ao cisalhamento empregado é o proposto por Fredlund et al. (1978) para solos não saturados.

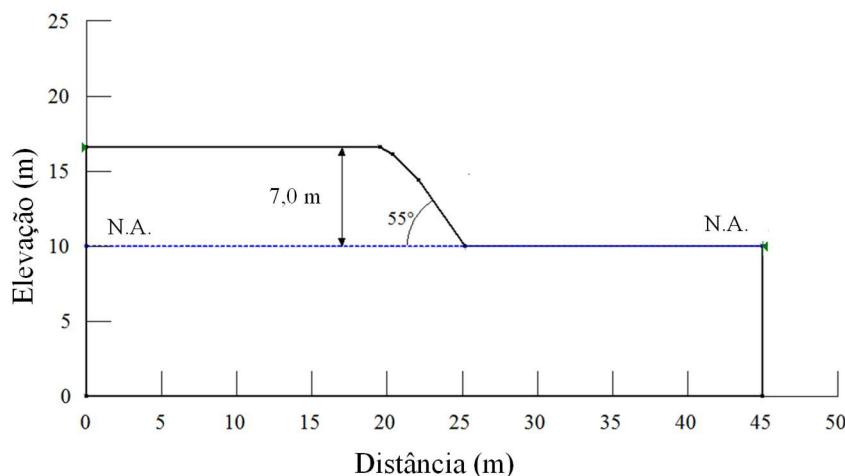


Figura 2. Geometria do talude a ser analisado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência ao cisalhamento do solo

Foram realizados ensaios com o objetivo de obter os parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito) dos solos em condição saturada e não saturada. A Figura 3 apresenta as curvas tensão-deformação das amostras coletadas a 1,5 m (Figura 3a) e a 5,0 m (Figura 3b) de profundidade, para as sucções de 0, 50, 200 e 400 kPa, e tensões confinantes de 50, 100 e 200 kPa. Já na Figura 4, apresenta-se as envoltórias de resistências para as amostras coletadas a 1,5 (Figura 4a) e 5,0 (Figura 4b) m de profundidade. A Tabela 1 apresenta os valores de intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) para as amostras ensaiadas para ambas as condições.

A partir da interpretação das curvas tensão-deformação de todas as amostras ensaiadas, observou-se que estas apresentaram ruptura do tipo plástico (por deformação excessiva), independentemente da profundidade de ensaio e da sucção do solo, como pode ser verificado pelas amostras coletadas a 1,5 e 5,0 m (Figura 3).

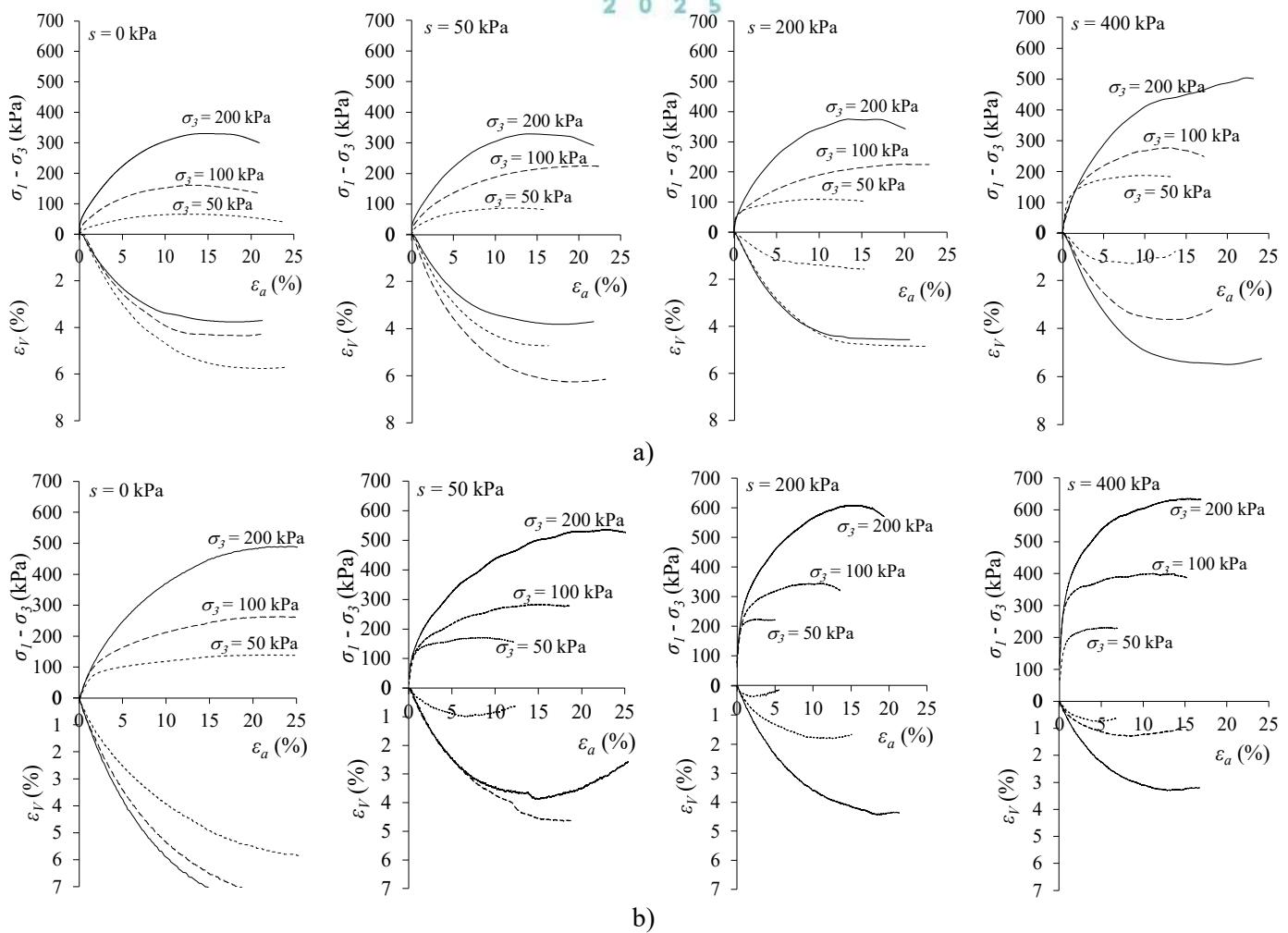
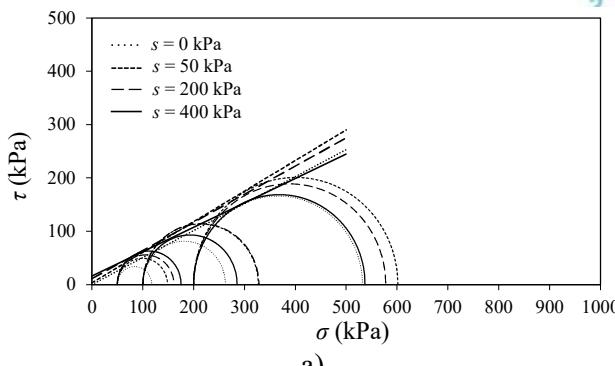


Figura 3. Curvas tensão-deformação para as amostras coletadas a 1,5 (a) e 5,0 (b) m de profundidade na condição saturada ($s = 0$ kPa) e não saturada ($s = 50, 200$ e 400 kPa) (adaptado de Fernandes et al., 2022).

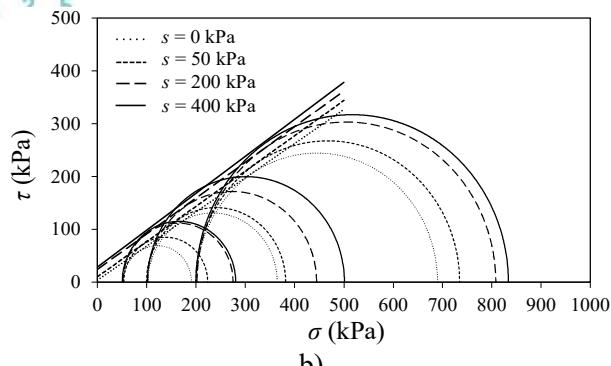
As envoltórias de resistência indicam que há diferenças entre o comportamento mecânico do solo em condição saturada e não saturado, principalmente em termos dos interceptos de coesão (Figura 4 e Tabela 1). O solo a 1,5 m de profundidade tem um intercepto de coesão que varia de 0 a 16 kPa, enquanto para o solo a 9 m de profundidade varia de 5,2 a 89,0 kPa. Também foi observado que as inclinações das envoltórias de resistência são aproximadamente iguais, independentemente dos valores de sucção (Figura 4). Deste modo, se considerou que o ângulo de atrito apresenta pouca influência da a sucção para as profundidades analisadas.

Tabela 1. Valores de coesão e ângulo de atrito para diferentes profundidades e para as condições saturadas e não saturada (adaptado de Fernandes et al. 2022).

| Prof. | $u_a - u_w$ (kPa) | c (kPa) | ϕ (°) | Prof. | $u_a - u_w$ (kPa) | c (kPa) | ϕ (°) |
|-------|----------------------|--------------|------------|-------|----------------------|-----------|------------|
| 1,5 | 0 | 0,0 | 26,8 | 5,0 | 0 | 5,3 | 32,4 |
| | 50 | 3,0 | 29,9 | | 50 | 10,3 | 33,7 |
| | 200 | 11,0 | 27,8 | | 200 | 24,2 | 34,0 |
| | 400 | 16,0 | 24,6 | | 400 | 28,7 | 34,9 |
| 3,0 | 0 | 1,2 | 32,6 | 9,0 | 0 | 5,2 | 31,6 |
| | 50 | 6,5 | 33,5 | | 50 | 15,0 | 35,3 |
| | 200 | 13,4 | 33,8 | | 200 | 36,0 | 34,6 |
| | 400 | 20,5 | 33,8 | | 400 | 89,0 | 29,5 |



a)



b)

Figura 4. Envoltórias de resistências para as amostras coletadas a 1,5 (a) e 5,0 (b) m de profundidade (adaptado de Fernandes et al. 2022).

4.2 Análise de estabilidade de talude

A fim de avaliar a importância da condição não saturada, especialmente da sucção, no comportamento mecânico de taludes, foi realizada uma análise de estabilidade de um talude de corte com declividade de aproximadamente 55° e 7,0 m de altura. Nas análises, o lençol freático foi considerado no pé do talude, nenhum fluxo de água subterrânea foi considerado, o método de estabilidade foi o de Bishop simplificado, e o critério de resistência ao cisalhamento foi o proposto por Fredlund et al. (1978) para o solo não saturado.

Para se demonstrar o efeito da condição não saturada nos valores de FS, foi estimado o valor do intercepto de coesão empregando o modelo de Fredlund et al. (1978) (Equação 3). Neste sentido, os valores de c versus sucção (Tabela 1), para cada profundidade, foi plotado no plano tensão cisalhante em termos de c versus sucção, para se definir o ângulo de atrito relativo à sucção (ϕ^b), o qual resultou em um valor médio de $12,8^\circ$ ($\operatorname{tg} \phi^b = 0,227$). O intercepto de coesão efetivo (c') igual a 2,9 kPa foi obtido através da média dos valores de c em condição saturada, para as quatro profundidades ensaiadas. E, os valores de sucção de 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 kPa, semelhantes aos observados em um talude de corte em solo residual por Vieira (1999), foram utilizados. A Tabela 2 apresenta os valores de coesão estimados pela Equação 3. Ressalta-se que nestas análises se considerou que a sucção não afeta o ângulo de atrito do solo.

Tabela 2. Valores de coesão versus sucção obtidos pela Equação 3.

| $u_a - u_w$ (kPa) | c (kPa) | $u_a - u_w$ (kPa) | c (kPa) | $u_a - u_w$ (kPa) | c (kPa) |
|-------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| 0 | 3,0 | 30 | 9,8 | 70 | 18,8 |
| 5 | 4,1 | 40 | 12,1 | 80 | 21,1 |
| 10 | 5,2 | 50 | 14,3 | 90 | 23,4 |
| 20 | 7,5 | 60 | 16,6 | 100 | 25,7 |

A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 2, e considerando um ângulo de atrito médio igual $31,8^\circ$, as análises de estabilidade foram realizadas. A Figura 5 apresenta a análise de estabilidade considerando o valor de sucção igual a 50 kPa. O Fator de segurança (FS) nesta condição de sucção foi igual a 1,539. A Figura 6 apresenta a variação de FS em função dos valores de sucção e de coesão a fim de demonstrar o efeito e a importância de se considerar a sucção nos valores de FS. Os resultados desse e de outros estudos semelhantes levaram ao consenso de que a condição não saturada, quantificada pela sucção, tende a aumentar a estabilidade do talude devido ao aumento da coesão aparente (Kang et al., 2020; Sivakumar Babu & Murthy, 2005).

Importante ressaltar que neste trabalho, considerou-se para as análises de estabilidade que o perfil típico do talude analisado é composto por uma areia fina pouco argilosa. Tal procedimento foi adotado, pois a partir da interpretação dos ensaios de caracterização física, bem como pelas curvas de retenção de água no solo (SWRC) obtidas por Fernandes (2018) e Fernandes et al. (2022), observou-se a homogeneidade do perfil, e assim, possíveis modificações no comportamento mecânico do solo seriam devidas às variações no teor de umidade, e consequentemente da sucção no solo.

Ressalta-se ainda que, como discutido por vários autores (por exemplo, Escario & Saez, 1986), a influencia da sucção na resistência (coesão) reflete-se por um aumento não linear, diferentemente da proposta apresentada por Fredlund et al. (1978). Entretanto, mesmo com as limitações, a proposta de Fredlund et al.



(1978) é interessante devido a sua simplicidade matemática podendo ser empregada considerando-se diferentes envoltórias retilíneas, função do nível de sucção presente na obra/projeto a ser analisado.

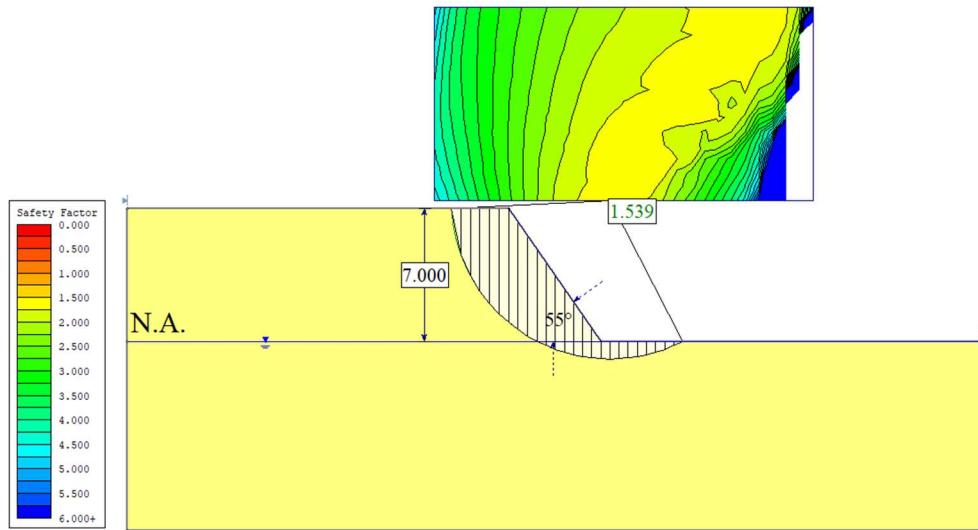


Figura 5. Fator de segurança determinado para o valor de sucção igual a 50 kPa.

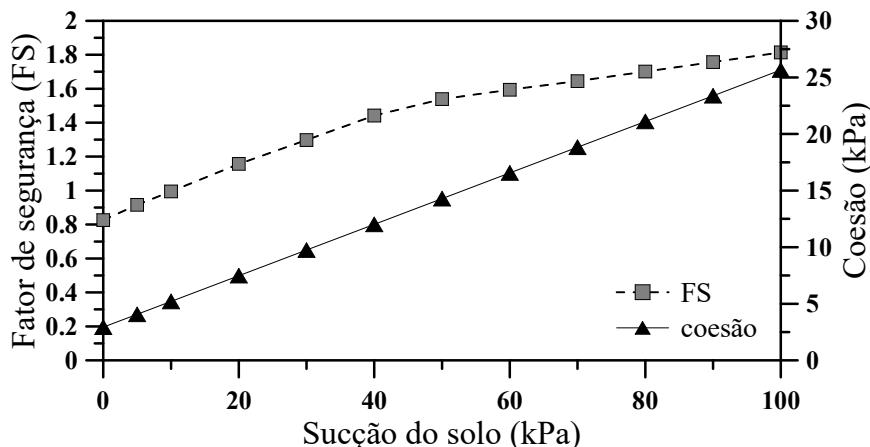


Figura 6. Efeito da sucção na coesão e no Fator de segurança para o talude analisado.

5 CONCLUSÕES

Os taludes normalmente encontram-se em condição não saturada, sendo a sucção um fator preponderante na definição da resistência ao cisalhamento do solo, bem como nas análises de estabilidade de taludes. Neste trabalho, o efeito da condição não saturada, representada pela sucção, foi avaliado por meio de resultados de ensaios triaxiais saturados e não saturados. Observou-se o aumento da coesão devido ao aumento da sucção. Entretanto, para o ângulo de atrito, houve pouca influência da sucção para as profundidades analisadas. Após essa etapa, realizou-se uma análise de estabilidade de um talude de corte empregando o critério de Fredlund et al. (1978). Verificou-se que o Fator de Segurança (FS) aumenta com o aumento da sucção. Logo, é necessário o estudo e consideração da condição não saturada nas análises de estabilidade de taludes, uma vez que a sucção acarreta um acréscimo de resistência do solo, e assim na estabilidade dos taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Processos nº 2015/17260-0 e 2017/23174-5), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo nº 436478/2018-8) pelo apoio ao desenvolvimento dessa pesquisa. Além disso, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, 40 (3), p.405-430. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405>.
- Bishop, A. W. (1959). The Principle of Effective Stress. *Tecnisk Ukeblad*, 106 (39), p.859-863.
- Blight, G. E. (2003) The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. *Geotechnique*, 53 (1), p.55-64. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.55>.
- Cho, S. E., Lee, S. R. (2002) Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (9), p.756-763. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:9\(756\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:9(756)).
- Escario, V., Sáez, J. (1986) The shear strength of partly saturated soils. *Géotechnique*, 36(3), 453-456. <https://doi.org/10.1680/geot.1986.36.3.453>.
- Fernandes, J.B. (2022). *Estudo da resistência e da deformabilidade de um perfil de solo tropical não saturado*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP/FEB. Bauru, 144f.
- Fernandes, J. B., Saab, A. L., Rocha, B. P., Rodrigues, R. A., Lodi, P. C., Giacheti, H. L. (2022) Geomechanical parameters in the active zone of an unsaturated tropical soil site via laboratory tests. *Soils and Rocks*, 45 (4), p.1-15. <http://dx.doi.org/10.28927/SR.2022.000422>.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1993) *Soil mechanics for unsaturated soils*, 1st ed., John Wiley & Sons, New York, USA, 513 p.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A. (1978) The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15 (3), p.313-321. <http://dx.doi.org/10.1139/t78-029>.
- Giacheti, H. L., Bezerra, R. C., Rocha, B. P., Rodrigues, R. A. (2019) Seasonal influence on cone penetration test: an unsaturated soil site example. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11 (2), p.361-368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.10.005>.
- Hilf, J.W. (1956). *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils* [Doctoral thesis, University of Colorado]. United State Department of the Interior Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, CO, USA.
- Kang, S., Lee, S.-R., Cho, S.-E. (2020) Slope stability analysis of unsaturated soil slopes based on the sitespecific characteristics: a case study of Hwangryeong Mountain, Busan, Korea. *Sustainability*, 12 (7), 2839. <http://dx.doi.org/10.3390/su12072839>.
- Ng, C. W., Shi, Q. (1998) A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. *Computers and Geotechnics*, 22 (1), p.1-28. [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X\(97\)00036-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-352X(97)00036-0).
- Rahardjo, H., Kim, Y., Satyanaga, A. (2019) Role of unsaturated soil mechanics in geotechnical engineering. *International Journal of Geo-Engineering*, 10 (8), p. 1-23. <http://dx.doi.org/10.1186/s40703-019-0104-8>.
- Rocha, B. P., Yacoub, J. D., Fernandes, J. B., Rodrigues, R. A., Giacheti, H. L. (2023) Geotechnical site characterization by DMT and laboratory tests on an unsaturated tropical soil site for slope stability analysis. *Soils & Rocks*, 46 (4), p. e2023005123. <https://doi.org/10.28927/SR.2023.005123>
- Rohm, S. A., Vilar, O. M. (1995). Shear strength of an unsaturated sandy soil. *Unsaturated Soils*, ed. Alonso and Delage., In: *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Paris, Balkema, Vol. 1, pp. 189-193.
- Sivakumar Babu, G.L., Murthy, D.S. (2005) Reliability analysis of unsaturated soil slopes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (11), p.1423-1428. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:11\(1423\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:11(1423))
- Vieira, A. M. (1999) *Variação sazonal da sucção em um talude de solo residual de gnaisse*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica / USP, 142 p