

Aplicação de Conceitos Probabilísticos na Análise da Estabilidade de Taludes em Solos Não Saturados

Mario Sergio de Souza Almeida

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, mario.almeida@ufbr.edu.br

Sandro Lemos Machado

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, smachado@ufba.br

Heloya Martins Carvalho Andrade

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, handrade@ufba.br

Rita de Cassia Viana Cerqueira

Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA, Brasil, cassiabass@hotmail.com

Tarcísio Machado Barreto do Prado

Universidade Católica do Salvador, Salvador/BA, Brasil, eng.tmachado@gmail.com

RESUMO: Este trabalho aplica conceitos probabilísticos em resultados de ensaios triaxiais do tipo consolidado e drenado, em amostras saturadas e não saturadas, com controle de sucção, para analisar a influência da variação na magnitude da sucção do solo nos fatores de segurança calculados para um talude de referência. O solo utilizado foi o residual do granulito-gnaiss, de predominância argilosa, de vasta ocorrência na cidade de Salvador, Bahia. Utilizando-se as técnicas do tensiômetro, da placa de pressão (câmara de Richards) e do papel filtro, foi possível determinar a curva de retenção de água no solo. A resistência ao cisalhamento do solo foi determinada para a condição saturada e não saturada, através de ensaios triaxiais em triplicata, do tipo consolidado-drenado, executados em corpos de prova compactados na umidade ótima para água, na energia do Proctor normal. Nos ensaios com sucção controlada foram aplicados valores de sucção de 100, 200, e 300 kPa. Os resultados dos ensaios triaxiais em triplicata foram utilizados para a definição de envoltórias de ruptura com níveis de confiança de 95%. Com essa metodologia foi possível observar a grande variação do fator de segurança (FS) do talude, em função da sucção existente, e associar o valor de FS e da sucção a uma probabilidade de ruptura do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude, fator de segurança, resistência ao cisalhamento, solos não saturados, métodos probabilísticos.

1 INTRODUÇÃO

A definição dos parâmetros de estabilidade de taludes em solos é uma das tarefas mais demandadas no campo da Engenharia Geotécnica.

Os estudos sobre esse tema consistem na determinação de fatores de segurança capazes de indicar a integridade estrutural do maciço

estudado. Os principais métodos de cálculo utilizados (Bishop, 1955; Janbu, 1976; Morgenstern-Price, 1965; dentre outros) adotam em suas formulações parâmetros de resistência solo, obtidos normalmente na sua condição saturada.

Define-se intervalo de confiança aquele baseado em observações de uma amostra e construído de modo que haja uma probabilidade

específica de o verdadeiro valor desconhecido de um parâmetro estar contido nesse intervalo. Nível de confiança é a probabilidade de o intervalo conter o verdadeiro valor do parâmetro (Andriotti, 2005).

Diversos estudos em solos não saturados (Fredlund et al., 1978, Escario e Sáez, 1986, Escario e Jucá, 1987) abordam os mecanismos de variação dos parâmetros de resistência dos solos arenosos e argilosos para diferentes graus de saturação e, consequentemente, diferentes níveis de sucção matricial.

Este trabalho busca estudar, através de uma abordagem probabilística, as variações do fator de segurança de um talude de referência para diferentes condições de saturação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaios de Caracterização do Solo

O solo utilizado foi coletado nos fundos da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, sendo de vasta ocorrência na cidade de Salvador, Bahia, Brasil e foi submetido a caracterizações Geotécnica, Física e Química.

2.1.1 Preparação das amostras e Caracterização Geotécnica

O solo foi submetido aos ensaios de Granulometria conjunta (NBR 7181/ABNT–1984), Limite de liquidez (NBR 6459/ABNT–1984), Limite de plasticidade (NBR 7180/ABNT–1984) e Massa específica dos sólidos (NBR 6508/ABNT–1984).

Todos os ensaios de curva de retenção de água e de compressão triaxial foram executados com corpos de prova compactados. Para tanto, foi realizado o ensaio convencional de compactação, na energia do proctor normal, de acordo com a norma NBR 7182/ABNT – 1986, o qual definiu os parâmetros a serem reproduzidos nos corpos de prova compactados para o programa experimental ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot}). Os corpos de prova foram compactados com base nesses parâmetros e com dimensões de 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Vale ressaltar que para os ensaios de curva de retenção os

corpos de prova tiveram seu tamanho reduzido após a compactação, sendo que cada CP de 10 cm de altura foi transformado em três CPs de aproximadamente 30 mm para utilização no ensaio.

2.2 Curva de Retenção de Água no Solo

Para a definição da curva de retenção de água no solo utilizou-se a técnica do papel filtro para altos valores de sucção e as técnicas do tensiômetro e da placa de pressão (câmara de Richards) para determinação de sucções até 70 kPa e 400 kPa, respectivamente. Para ajuste dos pontos da curva de retenção foram utilizados os modelos propostos por Van Guenuchten (1980) e Fredlund e Xing (1994), Equações 1 e 2, respectivamente, em que θ_r é o teor de umidade volumétrico residual, θ_{sat} é o teor de umidade volumétrico de saturação, ψ é a sucção, ψ_r é sucção correspondente à umidade volumétrica residual e a, n e m são constantes empíricas.

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

$$\theta = \theta_s \left[\frac{1 - \ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \left[\frac{1}{\ln\left(e + \frac{\psi^n}{a}\right)} \right]^m \quad (2)$$

2.3 Ensaios Triaxiais

Todos os ensaios triaxiais executados foram do tipo consolidado e drenado em corpos de prova saturados e não saturados com água. Foram realizados ensaios triaxiais do tipo deformação controlada e tensão controlada.

2.3.1 Ensaios Triaxiais em Corpos de Prova Saturados

Os corpos de prova após compactados na umidade ótima foram levados para a câmara triaxial e submetidos a saturação por contrapressão. Cada CP foi mantido nessa fase

por cinco dias, em média. Posteriormente, na execução do ensaio, essa saturação foi confirmada com a obtenção do parâmetro B em torno de 0,95. Estes ensaios foram realizados com tensões de confinamento de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Após a fase de consolidação, os corpos de prova foram submetidos à fase de cisalhamento com uma taxa de deslocamento axial de 0,05 mm/min. Para cada tensão de confinamento adotada realizou-se ensaios em triplicata e a envoltória média de resistência ao cisalhamento do solo nessa condição de saturação foi definida utilizando os doze ensaios realizados.

2.3.2 Ensaios Triaxiais em Corpos de Prova Não Saturados

A Figura 1 ilustra o processo de preparação e aplicação de sucção nos corpos de prova utilizando a câmara de Richards.



Figura 1 – Processo de saturação e aplicação de sucção na câmara de Richards.

Após a compactação os corpos de prova na umidade ótima foram levados em grupos para a câmara de Richards e submersos por três horas para saturação, conforme a Figura 1. Após esse período a câmara teve o seu excesso de água removido, sendo lacrada em seguida. Em cada grupo de CPs foi aplicada a pressão de ar

correspondente à sucção desejada (100, 200 e 300 kPa).

Passados 15 dias os corpos de prova foram retirados da câmara um a um e submetidos ao ensaio triaxial, com sucção controlada, também utilizando a técnica de translação de eixos de Hilf (1956). Os ensaios foram realizados em triplicata para as tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa. Após a fase de consolidação, os corpos de prova foram submetidos à fase de cisalhamento com uma taxa de carregamento que variou entre 5 e 9 kPa/min, de forma que a duração mínima dessa fase fosse de 120 min. Em seguida, para cada tensão de confinamento utilizada, foram plotadas curvas tensão deformação e estabelecida a envoltória média de resistência ao cisalhamento do solo com os nove ensaios triaxiais realizados para cada nível de sucção. Por fim, avaliou-se a variação da resistência média ao cisalhamento do solo em função da sucção aplicada.

2.4 – Tratamento Estatístico dos Ensaios Triaxiais

Os valores de resistência obtidos para o solo saturado e com diferentes valores de sucção foram utilizados no ajuste da envoltória média de resistência e na obtenção do desvio padrão (σ) dos valores em torno do valor ajustado. Desta forma foi possível obter, para um nível de confiança de 95%, uma região provável de resistência ao cisalhamento do solo. Sendo assim, para cada grupo de envoltórias, determinou-se um valor máximo (média + $1,96 \times \sigma$) e um valor mínimo (média - $1,96 \times \sigma$). Para obtenção das envoltórias máxima e mínima considerou-se que a variação na resistência se dá, estritamente, na coesão, mantendo-se, portanto, o ângulo de atrito constante.

2.5 Análise da estabilidade do Talude de referência

Para a análise da estabilidade de talude proposta adotou-se um talude de aterro como referência, cuja geometria está apresentada na Figura 2. Trata-se de um talude com 20 m de altura e uma declividade de 2/1 (V/H).

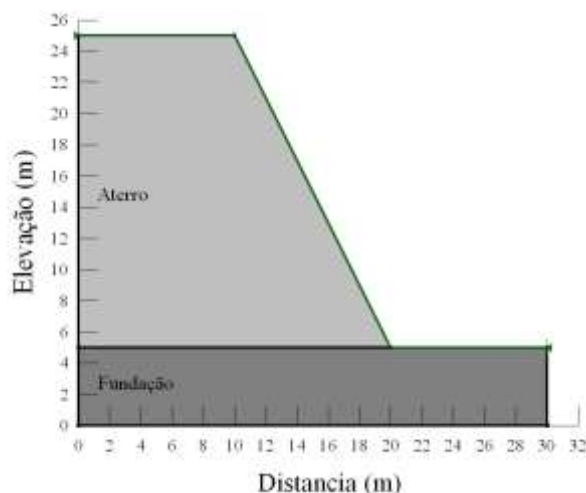


Figura 2 – Talude de referência.

Para essas análises de estabilidade de talude foi utilizado o software Slope/W que é parte integrante do pacote de programas de análises geotécnicas denominado GeoStudio. A rotina adotada consistiu na obtenção dos fatores de segurança do talude, utilizando a análise probabilística ofertada pelo programa.

Para incluir parâmetros de incerteza no cálculo da estabilidade de talude, o Slope/W executa uma análise probabilística utilizando o método de Monte Carlo. Nessa análise, cada um dos parâmetros de entrada é especificado em conjunto com um valor do desvio padrão de forma a possibilitar a definição de uma distribuição de probabilidade para cada um desses parâmetros. A partir dessa análise probabilística o programa define uma distribuição de probabilidade do fator de segurança, um índice de confiabilidade, e a probabilidade de ruptura do talude. A probabilidade de ruptura é definida como a probabilidade de que o fator de segurança seja menor do que 1,0.

O índice de confiabilidade é definido segundo a Equação 3, proposta por Morlá-Catalan e Cornell (1976):

$$\beta = \frac{FS_{med} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (3)$$

Em que β é o índice de confiabilidade, FS_{med} é o fator de segurança médio e σ_{FS} é o desvio padrão do fator de segurança.

A relação entre a probabilidade de ruptura do talude (PR) e o índice de confiabilidade (β) está apresentado na Figura 3.

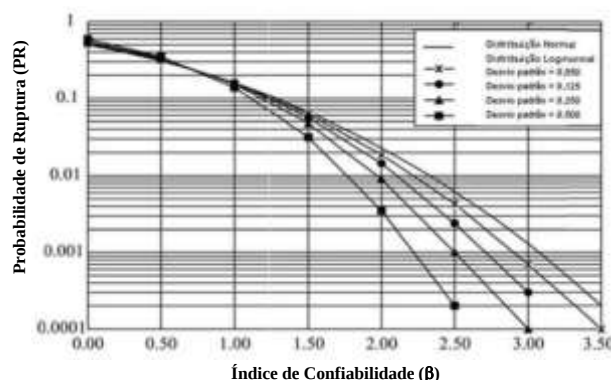


Figura 3 - Relação entre probabilidade de Ruptura e índice de confiabilidade para distribuição normal e log-normal de FS (adaptado de Dell'Avanzi e Sayão, 1998).

Para a análise de estabilidade do talude proposto nesse trabalho considerou-se dois tratamentos: I - variações na coesão e ângulo de atrito do solo, função da média e desvio padrão encontrados para cada envoltória de ruptura; II - variações na resistência do solo integralmente devidas às variações na coesão, mantendo-se o ângulo de atrito como uma constante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Geotécnica

Os resultados dos ensaios de caracterização, englobando granulometria conjunta, composto pelas fases de peneiramento e sedimentação, limites de consistência (W_L , W_P e IP), compactação ($\gamma_{dm\acute{a}x}$ e w_{ot}), massa específica dos sólidos, além dos parâmetros obtidos dos corpos de prova compactados na umidade ótima (índice de vazios e porosidade), estão apresentados nas Tabelas 1 a 3.

Tabela 1. Granulometria Conjunta.

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
26	18	56

Tabela 2. Limites de Consistência do Solo.

W_L	W_P	IP
(%)	(%)	(%)
77,8	41,6	36,2

Tabela 3. Compactação e Demais Índices Físicos.

Compactação		γ_s	e	n
$\gamma_{dm\acute{a}x}$	W_{ot}	(kN/m^3)		
(kN/m^3)	(%)			
13,34	31,8	27,04	1,03	0,51

Do ensaio de granulometria conjunta apresentado na Tabela 1 é possível observar que o granulito-gnaiss é um solo de predominância argilosa, com 74% passando na peneira # 200 (silte + argila), com abertura de 0,074 mm. Essa predominância da parcela fina confere ao solo elevados valores de W_L e W_P , conforme apresentado na Tabela 2. Dos resultados de granulometria e índices físicos é possível definir o Índice de Atividade de Skempton (IAS), definido por Skempton (1953), que relaciona o índice de plasticidade (IP) e a fração argila do solo através da Equação 4.

$$IAS = \frac{IP}{\% \text{ fração argila}} \quad (4)$$

Este índice classifica a atividade do solo como inativa ($IAS < 0,75$), normal ($0,75 < IAS < 1,25$) e ativa ($IAS > 1,25$). Considerando-se o percentual da fração argila e o IP das Tabelas 1 e 2, o solo do presente trabalho possui um IAS de 0,65 sendo, portanto, classificado como inativo.

3.2 Curva de Retenção de Água no Solo

A curva de retenção de água no solo, obtida com a técnica do papel filtro juntamente com o tensiômetro e a placa de pressão (câmara de Richards) é apresentada na Figura 4, juntamente com o ajuste através da equação proposta por Van Guenuchten (1980) e seus parâmetros de ajuste.

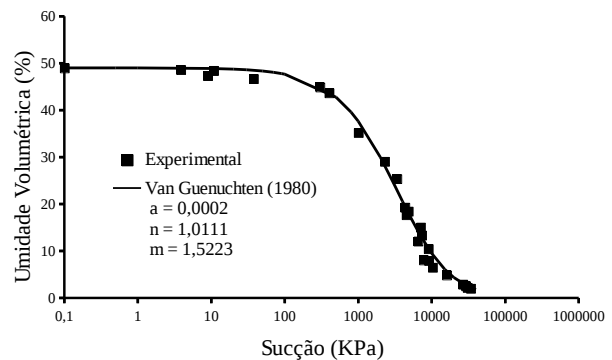


Figura 4 – Curva de retenção de água no solo com ajuste de Van Guenuchten (1980).

Na Figura 5 apresenta-se o ajuste da curva de retenção através da equação proposta por Fredlund e Xing (1994), bem como seus respectivos parâmetros de ajuste.

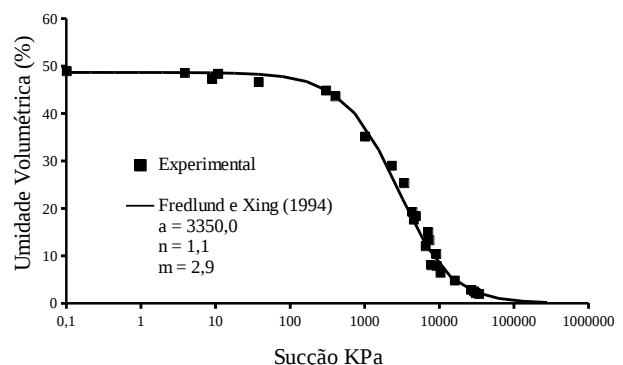


Figura 5 – Curva de retenção de água no solo com ajuste de Fredlund e Xing (1994).

3.3 Ensaios Triaxiais Saturados

A envoltória média dos ensaios triaxiais saturados está apresentada na Figuras 6.

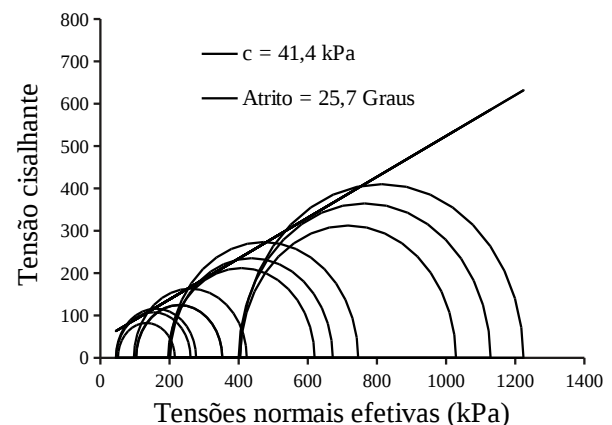


Figura 6 – Envoltória média de resistência do solo saturado.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de média e desvio padrão da coesão (c_m , σ_c), ângulo de atrito (ϕ_m , σ_ϕ) e desvio padrão da resistência ao cisalhamento (σ_τ) obtidos dos ensaios em triplicata com o solo saturado.

Tabela 4. Parâmetros de resistência do solo saturado.

Sucção (kPa)	c_m (kPa)	σ_c (kPa)	ϕ_m (°)	σ_ϕ (°)	σ_τ (kPa)
0	41,40	10,41	25,70	1,26	18,49

Na Figura 7 apresenta-se a variação da envoltória de ruptura do solo, na condição saturada, após a aplicação dos valores máximo e mínimo, determinando a faixa de provável ruptura do solo com nível de confiança de 95%.

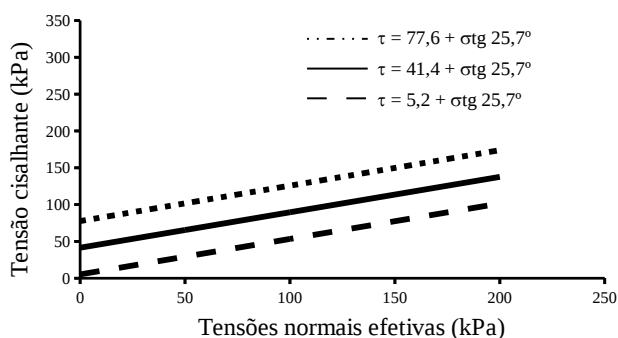


Figura 7 – Faixa de ruptura com nível de confiança de 95% para o solo saturado.

3.4 Ensaios Triaxiais Não Saturados

As envoltórias médias dos ensaios triaxiais do tipo consolidado isotropicamente e drenado (CD), executados com os corpos de prova não saturados e com sucção controlada estão apresentados nas Figuras 8 a 10.

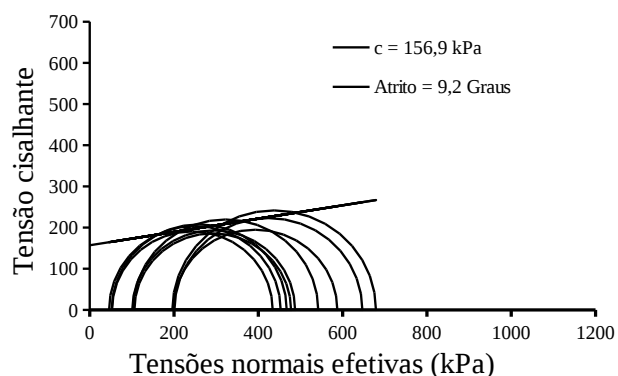


Figura 8 – Envoltória média de resistência do solo não saturado com sucção = 100 kPa.

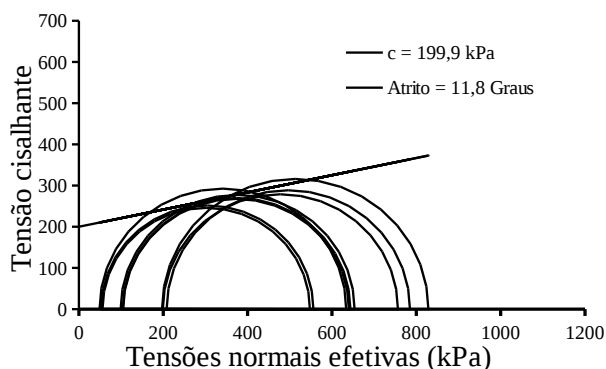


Figura 9 – Envoltória média de resistência do solo não saturado com sucção = 200 kPa.

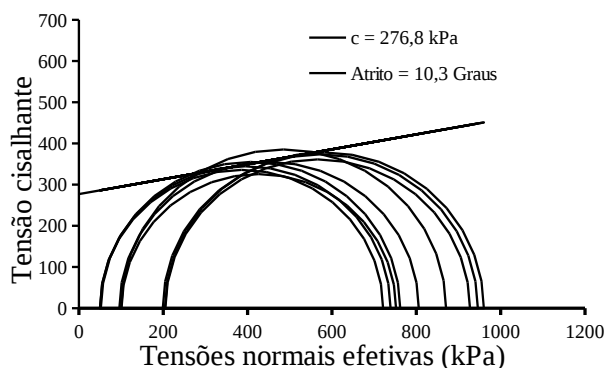


Figura 10 – Envoltória média de resistência do solo não saturado com sucção = 300 kPa.

A variação da resistência ao cisalhamento do solo observada nas Figuras 8 a 10 pode ser analisada em função da variação da coesão média do solo, nas condições saturada e não saturada, em função da sucção, conforme a Figura 11.

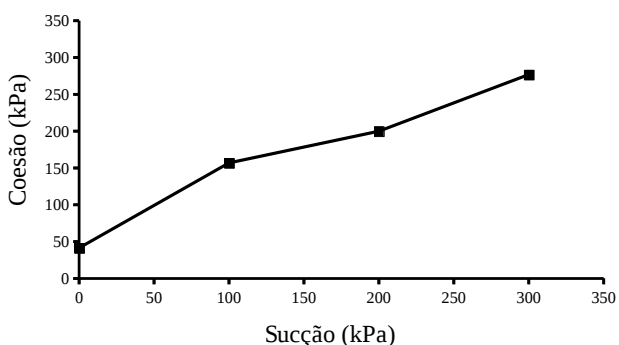


Figura 11 – Variação do intercepto coesivo do solo em função da sucção matricial.

Da Figura 11 é possível observar que o ganho de resistência do solo está de acordo com as constatações da literatura (Escario e Sáez (1986), Escario e Jucá (1987)), ou seja, para diferentes níveis de sucção, a variação da

resistência ao cisalhamento do solo ocorre devido a variações no intercepto coesivo, de forma não linear, e variações no ângulo de atrito interno do solo.

Na Tabela 5 são apresentados os valores de média e desvio padrão da coesão (c_m , σ_c), ângulo de atrito (ϕ_m , σ_ϕ) e desvio padrão da resistência ao cisalhamento (σ_τ) obtidos dos ensaios em triplicata com o solo não saturado, com sucção controlada.

Tabela 5. Parâmetros de resistência do solo não saturado.

Sucção (kPa)	c_m (kPa)	σ_c (kPa)	ϕ_m (°)	σ_ϕ (°)	σ_τ (kPa)
100	156,90	22,85	9,20	3,94	14,72
200	199,90	25,56	11,80	3,63	14,49
300	276,80	31,17	10,30	3,71	14,71

Nas Figuras 12 a 14 apresenta-se a variação das envoltórias de ruptura do solo, na condição não saturada, após a aplicação dos valores máximo e mínimo, determinando a faixa de provável ruptura do solo com nível de confiança de 95%.

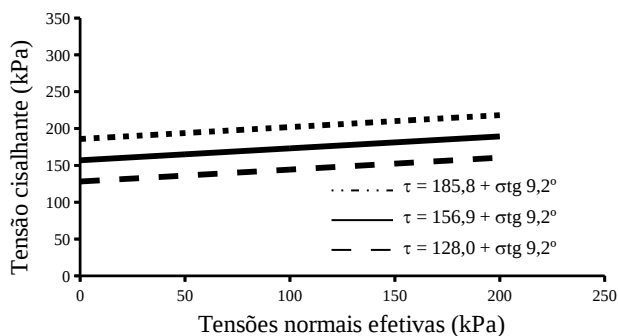


Figura 12 – Faixa de ruptura, sucção = 100 kPa e com nível de confiança de 95%.

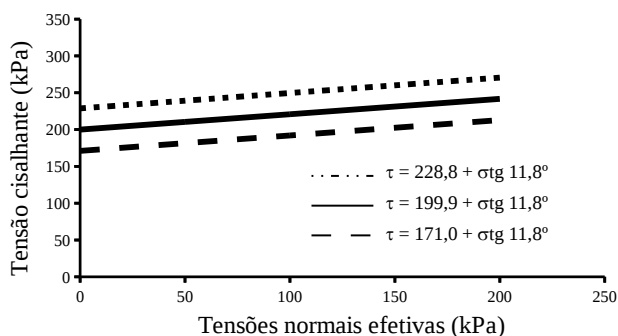


Figura 13 – Faixa de ruptura, sucção = 200 kPa e com nível de confiança de 95%.

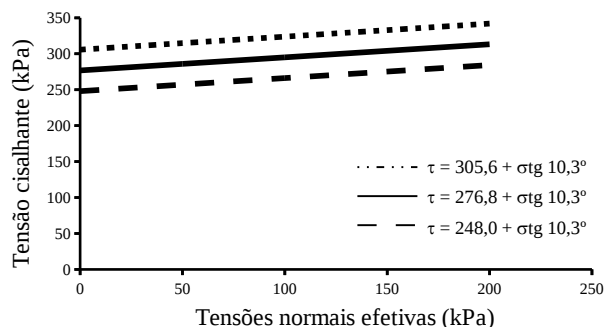


Figura 14 – Faixa de ruptura, sucção = 300 kPa e com nível de confiança de 95%.

3.5 Análise da estabilidade do talude

Na Tabela 6 estão apresentados os fatores de segurança obtidos nas análises através do método de Bishop (1955), considerando-se o tratamento I.

Tabela 6. Fatores de segurança para o tratamento I.

Sucção (kPa)	FSmin	FSmax	FSmed	σ_{FS}	PR (%)
0	0,51	1,85	1,26	0,16	5,64
100	0,88	4,00	2,64	0,38	0,02
200	1,36	4,79	3,31	0,42	-
300	2,08	6,30	4,49	0,51	-

É possível observar da Tabela 6 que há, na condição saturada, uma probabilidade de ruptura (PR) de 5,64% para o talude. Isso significa que com base no valor médio de FS, tem-se um nível de confiança sobre a integridade do talude de, aproximadamente, 94,36% (~95%). Na análise com diferentes níveis de sucção a probabilidade de ruptura do talude tende a zero a partir da sucção de 100 kPa em diante.

Na Tabela 7 estão apresentados os fatores de segurança obtidos nas análises através do método de Bishop (1955), considerando-se o tratamento II.

Tabela 7. Fatores de segurança para o tratamento II.

Sucção (kPa)	FSmin	FSmax	FSmed	σ_{FS}	PR (%)
0	0,17	2,29	1,26	0,28	16,61
100	1,49	3,49	2,64	0,24	-
200	2,18	4,13	3,30	0,23	-
300	3,34	5,34	4,49	0,24	-

A probabilidade de ruptura do talude para o tratamento II, na condição saturada, conforme a Tabela 7, aumentou para 16,61 %. Isso significa que ao considerar-se que as variações na resistência do solo foram integralmente devidas às variações na coesão, mantendo-se o ângulo de atrito como uma constante, a PR aumentou cerca de 3 vezes (200%). Na condição não saturada o comportamento observado no tratamento I se reproduziu, com a PR tendendo a zero a partir da sucção de 100 kPa.

4 CONCLUSÕES

A desconsideração das variações estatísticas dos parâmetros do solo, mesmo na condição saturada para a análise de estabilidade de taludes, pode levar a adoção de fatores de segurança indesejáveis.

A variação da resistência ao cisalhamento do solo, como uma variação da parcela de coesão exclusivamente, levou a um valor de probabilidade de ruptura do talude que, em função da sua importância, pode demandar obras auxiliares de contenção a fim de aumentar a confiabilidade quanto a sua integridade estrutural.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Análise granulométrica*. (NBR-7181).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de liquidez*. (NBR-6459).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica*. (NBR-6508).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. (NBR-7180).
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986) *Solo – Ensaio de compactação*. (NBR-7182).
- Andriotti, J. L. S. (2005) *Técnicas estatísticas aplicáveis a tratamento de informações oriundas de procedimentos laboratoriais*. CPRM, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 41p.
- Bishop, A. W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, vol. 5, no. 1, 91-128.
- Dell’avanzi, E. e Sayão, A.S. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: *COBRAMSEG*, 11, 1998, Brasília, Anais. Brasília, 1998. v. 2, p. 1289-1295.
- Escario, V. e Jucá, J. F. T. (1986) Strength and deformation of partly saturated soils. *Proceedings of 12th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rio de Janeiro, volume 36, n. 3, p. 453-456.
- Escario, V. e Sáez, J. (1989) The shear strength of partly saturated soil. *Géotechnique*, volume 36, n. 3, p. 453-456.
- Fredlund, D. G., Morgenstem, N. R. e A. Widger, R. (1978) The Shear Strength of Unsaturated Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, número 3, p. 313-321.
- Fredlund, D. G. e Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, número 3, p. 521-532.
- Geo-Slope (2007) *Slope/W. User’s Manual*. Geoslope Inc. Edmonton, Canada. www.geoslope.com.
- Hilf, J. W. (1956) An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils. Ph.D. Thesis. Faculty of the Graduate School of the University of Colorado, Denver, 109p.
- Janbu, N. (1973) Slope Stability Computations. *Embankment Dam Engineering*, Casagrande Volume, J. Wiley and Sons, p. 47-86.
- Morgenstern, N.R. e Price, V.E. (1965) The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, Vol. 15, p. 79-93.
- Morlá-Catalán, J.; Cornell, C.A. (1976) Earth slope reliability by a level-crossing method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 102 (GT6), p. 591-604.
- Skempton, A.W. (1953) The colloidal “Activity” of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (1) p. 57-60.
- Van Genuchten, M.T. (1980) A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, p. 892-898.