PROBABILIDADE DE ROTURA DE TALUDES. APLICAÇÃO A TALUDES DE UM SOLO RESIDUAL GRANÍTICO

Probability of failure of slopes. Application to slopes of a granitic residual soil

Francisco F. Martins*
Júlio Barreiros Martins**
Castorina F. S. Vieira***
Bruno D. S. S. Valente****

RESUMO - É estudada a estabilidade de taludes de um solo residual granítico da cidade de Braga. Este estudo é baseado no cálculo de probabilidades. São calculados o índice de confiabilidade do factor de segurança e a probabilidade de rotura. O índice de confiabilidade é calculado como uma função dos valores da média e do desvio padrão do factor de segurança. O valor médio do factor de segurança é considerado o valor mínimo deste factor obtido usando o método de Bishop com os valores médios dos parâmetros geotécnicos (ϕ, c e γ). A probabilidade de rotura é a probabilidade do factor de segurança ser menor ou igual a 1 e é obtida assumindo uma distribuição de probabilidade normal. É analisado o peso relativo dos parâmetros geotécnicos no factor de segurança. Também é efectuado um estudo paramétrico variando a altura e a inclinação do talude.

SYNOPSIS - It is studied the stability of slopes of a granitic residual soil from the city of Braga in the north region of Portugal. This study is based on probabilities. The reliability index of the factor of safety and the probability of failure are computed. The reliability index is computed as a function of the mean and standard deviation values of the factor of safety. The mean value of the factor of safety is considered the minimum value of this factor obtained using the Bishop method with the average values of the geotechnical parameters (ϕ, c and γ). The probability of failure is the probability of the factor of safety be less than or equal 1 and is obtained assuming a normal probability distribution. It is analyzed the relative weight of the geotechnical parameters in the factor of safety. A parametric study varying the height and the inclination of the slope is also performed.

1 – INTRODUÇÃO

No presente trabalho é aplicada a análise probabilística à estabilidade de taludes. Essa análise tem como base principal a comunicação apresentada por Sayão (1999) num curso curto dedicado à estabilidade de taludes onde foram apresentados os conceitos básicos relacionados com a probabilidade de rotura. Essa apresentação foi ilustrada através de exemplos concretos.

Neste trabalho é estudada a estabilidade de taludes de um solo residual granítico da cidade de Braga. As amostras intactas foram colhidas há alguns anos no local onde agora está construído o Campus de Gualtar da Universidade do Minho. O peso volúmico das amostras foi

* Professor Associado da Universidade do Minho. Email: ffm@civil.uminho.pt

**Professor Catedrático Jub. da Universidade do Minho. Email: jbm@civil.uminho.pt

*** Assistente da FEUP. Email: cvieira@fe.up.pt

**** Estudante de Mestrado em Engenharia Civil na Universidade do Minho.

obtido directamente e as características de resistência ao corte foram obtidas através de ensaios triaxiais. Com os resultados disponíveis só foi possível ter uma amostra estatística com dez conjuntos de valores. Esses valores incluem o peso volúmico (γ), a coesão em termos de tensões efectivas (c') e o ângulo de atrito também em termos de tensões efectivas (ϕ').

A análise efectuada inclui o uso das características de resistência correspondentes ao pico e a grandes deformações axiais num gráfico relacionando a tensão de desvio com a deformação axial. Para calcular o factor de segurança ao deslizamento é usado o método de Bishop (1955).

2 – CONCEITOS BÁSICOS

Os conceitos básicos da análise probabilística podem encontrar-se em Christian *et al.* (1994) e Sayão (1999). O factor de segurança F associado ao deslizamento de taludes está associado a alguma incerteza. O valor médio ou esperado e o desvio padrão do factor de segurança são designados por E[F] e σ[F], respectivamente. O índice de confiabilidade β é definido por

$$\beta = \frac{E[F]-1.0}{\sigma[F]} \tag{1}$$

A probabilidade de rotura P[F] é uma função do índice de confiabilidade e pode ser obtida em quase todos os livros relacionados com probabilidades e estatística. Para realizar uma análise probabilística é, em primeiro lugar, necessário ter a melhor estimativa de cada variável com interesse para a estabilidade do talude que é analisado. Geralmente são usados os valores médios $E[x_i]$. Usando um programa de computador baseado num método das fatias com $E[x_i]$ é determinado o factor de segurança mínimo que é designado por E[F]. O desvio padrão do factor de segurança é obtido por

$$\sigma[F] = \sqrt{V[F]} \tag{2}$$

onde V[F] é a variância do factor de segurança que é uma função das variâncias das variáveis, $V[x_i]$, que afectam a estabilidade do talude:

$$V[F] = \Sigma\left[\frac{dF}{dx_i}\right]^2 V[x_i] \tag{3}$$

Para calcular o termo dF/dx_i é necessário impor uma pequena variação em cada variável separadamente e para cada variação calcular a variação no factor de segurança.

As variáveis x_i consideradas neste trabalho são γ, c' e ϕ'. As variações do factor de segurança são consideradas em relação ao seu valor para a superfície crítica obtido com os valores médios dos parâmetros geotécnicos γ, c' e ϕ'.

3 – EXEMPLOS

3.1 – Exemplo base

Considere-se o talude representado na Fig. 1. Consideram-se duas situações para efectuar a análise probabilística. Na situação 1 usam-se as características de resistência de pico e na

situação 2 usam-se as características de resistência correspondentes a grandes deformações axiais nos ensaios de compressão triaxial. As características do solo para estas situações são as seguintes:

Situação 1: coesão, c'= 17,9 kPa; ângulo de atrito, ϕ'= 32,8°; peso volúmico= 20,1 kN/m^3

Situação 2: coesão, c'= 9 kPa; ângulo de atrito, ϕ'= 31,8°; peso volúmico= 20,1 kN/m^3

O factor de segurança para a situação 1 é 2,56 e para a situação 2 é 1,96.

A determinação da variância do factor de segurança para ambas as situações é apresentada nos Quadros 1 e 2.

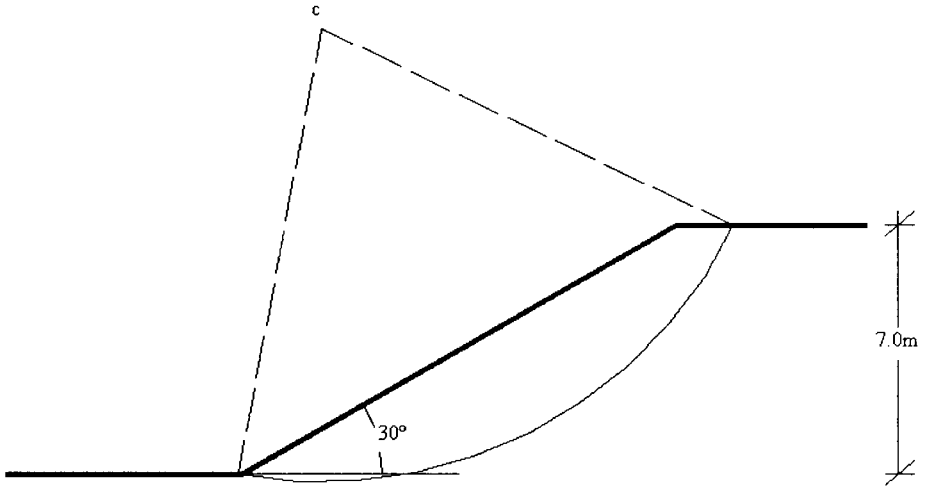

Fig. 1 – Aterro analisado.

Quadro 1 – Composição da variância, valores de pico.

x_i	δx_i	δF	$\delta F/\delta x_i$	$V[x_i]$	$(\delta F/\delta x_i)^2.V[x_i]$	%
γ=20,1kN/m^3	2	-0,093	-0,0465	0,2617	0,0006	0,26
c'=17,9 kN/m^2	1,8	0,1034	0,0575	63,0512	0,2082	95,12
tanϕ'=0,644	0,0848	0,2019	2,3820	0,0018	0,0101	4,62
				V[F]	0,2189	100

Quadro 2 – Composição da variância, valores para grandes deformações axiais.

x_i	δx_i	δF	$\delta F/\delta x_i$	$V[x_i]$	$(\delta F/\delta x_i)^2.V[x_i]$	%
γ=20,1kN/m^3	2	-0,048	-0,0242	0,2617	0,0001	0,03
c'=9 kN/m^2	0,9	0,0536	0,0596	152,73	0,5418	96,43
tanϕ'=0,620	0,0802	0,1859	2,3189	0,0037	0,0199	3,54
				V[F]	0,5618	100

Vê-se que, para ambas as situações, a variância da coesão, c', tem uma grande influência na variância do factor de segurança.

A probabilidade de rotura é a probabilidade do factor de segurança ser menor ou igual a 1 e é obtida supondo uma distribuição de probabilidade normal. Essa probabilidade é muito baixa (2/5 000) na situação 1 mas é muito alta (1/10) na situação 2. Isto deve-se ao facto de, neste caso, a variância da coesão, c', ser muito alta (152,73), o que representa uma grande variabilidade deste parâmetro. Se for usada a mesma variância da situação 1, a probabilidade de rotura é cerca de 2,5/100.

Em geral, a coesão para grandes valores de deformação foi muito baixa (zero ou próxima de zero). Contudo, nalguns ensaios triaxiais a grandes deformações axiais corresponderam a valores de pico e os valores da coesão foram altos. Isto justifica a grande variabilidade deste parâmetro.

3.2 – Estudos paramétricos

A análise probabilística é também efectuada variando a inclinação do talude e mantendo a altura (7 m) (Fig. 2) ou variando a altura e mantendo a inclinação (Fig. 3). Os resultados são apresentados nos Quadros 3, 4, 5 e 6.

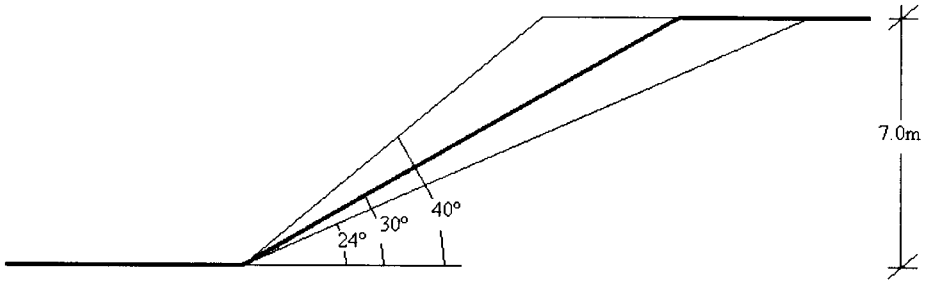

Fig. 2 – Variação da inclinação do talude.

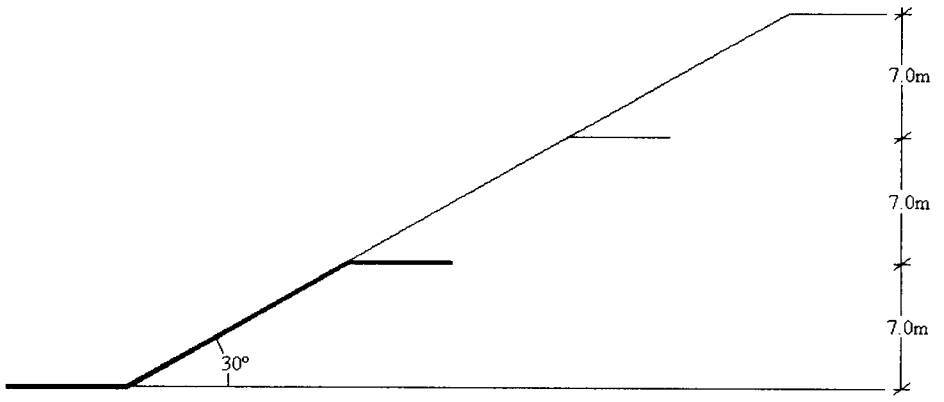

Fig. 3 – Variação da altura do talude.

Quadro 3 – Factores de segurança, probabilidade de rotura e contribuição dos parâmetros para V[F] variando a inclinação do talude para valores de pico.

			Contribuições (%)		
Inclinação (°)	F	P_f	γ	c'	tanϕ'
24	3,02	<1/10000	0,25	92,63	7,12
26	2,85	1/10000	0,25	93,68	6,07
28	2,71	1/10000	0,26	94,18	5,56
30	2,56	2/5000	0,26	95,12	4,62
32	2,46	3/5000	0,26	95,19	4,55
34	2,37	9/10000	0,26	95,31	4,43
36	2,26	2/1000	0,26	96,12	3,62
38	2,16	5/1000	0,26	96,76	2,98
40	2,08	2/250	0,26	97,28	2,46
42	2,02	2/250	0,26	96,85	2,89

Quadro 4 – Factores de segurança, probabilidade de rotura e contribuição dos parâmetros para V[F] variando a inclinação do talude para grandes valores da deformação axial.

			Contribuições (%)		
Inclinação (°)	F	P_f	γ	c'	tanϕ'
24	2,34	1/20	0,03	95,51	4,46
26	2,20	1/16	0,03	95,78	4,19
28	2,07	1/12	0,03	96,10	3,87
30	1,96	1/10	0,03	96,43	3,54
32	1,85	1/8	0,03	96,97	3,00
34	1,76	1/6	0,03	97,45	2,52
36	1,68	1/6	0,03	97,55	2,42
38	1,63	1/6	0,03	97,38	2,59
40	1,54	1/5	0,02	97,92	2,06
42	1,48	1/4	0,03	97,99	1,98

Pode ver-se que, para ambas as situações, o factor de segurança diminui à medida que a inclinação aumenta e a probabilidade de rotura aumenta com o aumento da inclinação. Isto está de acordo com o esperado. A contribuição do peso volúmico para a variância de F é muito pequena e praticamente não varia com a inclinação para ambas as situações. A contribuição da coesão, c', para a variância de F aumenta gradualmente e a contribuição do ângulo de atrito, ϕ', decresce gradualmente à medida que a inclinação aumenta para ambas as situações. No entanto, para a situação 1 existe uma diminuição na contribuição de c' e um aumento na contribuição de tan ϕ' para a inclinação de 42°. Existe uma excepção para a situação 2 para a tan ϕ' correspondente à inclinação de 38°.

Para ambas as situações o factor de segurança diminui à medida que a altura aumenta. Para a situação 1 a probabilidade de rotura quase não varia com a variação da altura. Para a situação

2 a probabilidade de rotura é irregular desde os 7 m até aos 35 m e permanece a mesma para alturas superiores a 35 m. Em relação à contribuição dos parâmetros na variância de F, pode ver-se que a do peso volúmico decresce, a da coesão decresce e a do ângulo de atrito aumenta com o aumento da altura. Em relação à contribuição do peso volúmico para a situação 1 existe uma excepção para 63 m de altura onde este parâmetro aumenta ligeiramente. É também importante mencionar que, para a situação 1, a contribuição do ângulo de atrito é maior do que a da coesão a partir dos 56 m de altura.

Quadro 5 – Factores de segurança, probabilidade de rotura e contribuição dos parâmetros para V[F] variando a altura do talude para valores de pico.

			Contribuições (%)		
Altura (m)	F	P_f	γ	c'	tanϕ'
7	2,56	4/10000	0,26	95,12	4,62
14	2,00	1/10000	0,22	87,84	11,94
21	1,79	1/10000	0,22	79,60	20,18
28	1,67	<1/10000	0,20	73,33	26,47
35	1,59	1/10000	0,19	68,43	31,38
42	1,54	1/10000	0,15	61,92	37,93
49	1,50	<1/10000	0,14	54,84	45,02
56	1,47	<1/10000	0,14	49,78	50,08
63	1,45	<1/10000	0,16	46,06	53,78
70	1,42	1/10000	0,12	43,65	56,23

Quadro 6 – Factores de segurança, probabilidade de rotura e contribuição dos parâmetros para V[F] variando a altura do talude para grandes valores da deformação axial.

			Contribuições (%)		
Altura (m)	F	P_f	γ	c'	tanϕ'
7	1,96	10/100	0,03	96,43	3,54
14	1,62	11/100	0,03	92,36	7,61
21	1,50	16/100	0,03	86,02	13,95
28	1,42	13/100	0,02	83,21	16,76
35	1,38	15/100	0,02	77,82	22,16
42	1,34	16/100	0,02	72,27	27,71
49	1,32	16/100	0,02	68,03	31,95
56	1,30	16/100	0,02	63,97	36,01
63	1,28	16/100	0,02	60,93	39,05
70	1,27	16/100	0,02	57,46	42,52

4 – DISCUSSÃO

O estudo que se apresenta considera o maciço terroso homogéneo. Todavia, é importante mencionar que os solos residuais graníticos são normalmente muito heterogéneos, muitas vezes incluem bolas rochosas dispersas e a topografia do "bedrock" ou firme pode ser muito irregular. Estas características afectam a geometria da superfície de deslizamento que pode não ter directriz circular.

Para além disso, o número de conjuntos de parâmetros usado na análise probabilística foi apenas de 10. Seria, pois, desejável obter um maior número de amostras para realizar ensaios triaxiais.

Na análise probabilística usaram-se os valores médios das variáveis de interesse para a estabilidade dos taludes. Contudo, se fossem usados os valores "característicos" os factores de segurança seriam inferiores e o valor calculado da probabilidade de rotura provavelmente seria mais elevado.

Quase todas as propriedades dos solos utilizados estão dentro da gama de variação do coeficiente de variação (desvio padrão/valor médio) dado por Orr e Farrel (1999). Só a coesão para grandes deformações axiais tem um coeficiente de variação (1,38) fora dos limites apresentados por aqueles autores (0,30-0,50). Como se viu acima, a dispersão dos valores da coesão afecta significativamente os resultados obtidos.

Viana da Fonseca *et al.* (1994) apresentaram para solos residuais graníticos da região norte limites inferiores de 27° a 30°. Esses valores são menores que os utilizados em ambas as situações.

Um parâmetro de interesse que não foi aqui considerado é a posição do nível freático.

5 – CONCLUSÕES

Este trabalho foi o primeiro contacto dos autores com a análise probabilística. Como se viu, este estudo tem algumas limitações tais como o reduzido número de parâmetros para efectuar a análise, a consideração de solo homogéneo, a consideração de superfícies de deslizamento de directriz circular e o uso de valores médios das características de resistência ao corte. No entanto, podem ser extraídas algumas conclusões. A alta variância de c' no caso de valores obtidos para grandes deformações axiais afecta significativamente a probabilidade de rotura. A probabilidade de rotura não tem variações significativas com a variação da altura do talude. A influência de c' decresce à medida que a altura aumenta e a influência de ϕ' aumenta à medida que a altura aumenta. A influência de c' aumenta à medida que a inclinação do talude aumenta e a influência de ϕ' decresce à medida que a inclinação aumenta. A probabilidade de rotura aumenta à medida que a inclinação aumenta. A influência do peso volúmico não é relevante na análise efectuada.

Os resultados da análise probabilística podem ser melhorados se for usado um maior número de conjuntos de parâmetros. Para além disso, é necessário realizar um tratamento estatístico para estudar o tipo de distribuição do factor de segurança.

O uso de valores de resistência ao corte correspondentes a grandes deformações axiais origina resultados conservativos. Contudo, neste estudo, devido à grande variabilidade de c', a probabilidade de rotura é alta mesmo para altos factores de segurança.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (Projecto I/D PRAXIS/3/3.1/CEG/2521/95).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bishop, A. W. *The use of slip circle in the stability analysis of slopes*. Geotechnique, 5(1), pp. 7-17, 1955.

Christian, J. T., Ladd, C. C. e Baecher, G. B. *Reliability Applied to Slope Stability Analysis*. J. Geotech. Eng., ASCE 120 (12), pp. 2180-2207, 1994.

Orr, T. L. L. e Farrel, E. R. *Geotechnical Design to Eurocode 7*, London: Springer, 1999.

Sayão, A. *Probabilidade de Ruptura de Taludes*. Curso de curta duração em estabilização de taludes, Comunicação privada, Porto, 1999.

Viana da Fonseca, A.; Matos Fernandes, M.; Cardoso, A. S. e Barreiros Martins, J. *Portuguese experience on geotechnical characterization of residual soils from granite*, Proc. XIII ICSMFE, New Delhi, India, 5-10 January, New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., 1994.