

XVI ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA

Universidade de Fortaleza
17 a 20 de outubro de 2016

Análise de Métodos de Estabilidade de Taludes para Determinação de Fatores de Segurança através de Estudos Analíticos e Computacionais

Fernando Feitosa Monteiro ^{1*} (PG), Leila Maria Coelho de Carvalho ²(IC), Yago Machado Pereira de Matos ³ (PG), Marcos Fábio Porto de Aguiar ⁴(PQ), Francisco Heber Lacerda de Oliveira ⁵ (PQ)

1 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE;

2 Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE

3 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Geotecnia), Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza-CE

4 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza-CE

5 Professor de Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE.

yago_mpm@hotmail.com

Palavras-chave: Estabilidade de taludes. Fator de segurança. Talude estratificado

Resumo

O presente artigo abrange, através de pesquisa bibliográfica, realização de análises analíticas e computacionais, métodos de estabilidade de taludes para determinar os fatores de segurança de um talude estratificado. São apresentados os métodos de Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955). Por fim, realiza-se uma comparação dos fatores de segurança obtidos pelos métodos, bem como a comparação dos tipos de análises realizadas. O método de Fellenius (1936) apresentou fatores de segurança razoáveis, com valores de 1,50 e 1,58 para análises analíticas e computacionais respectivamente, apresentando uma discrepância de 5%. Já para o método de Bishop Simplificado (1955), os fatores de segurança apresentaram uma diferença de 2,22%, sendo o fator de segurança obtido pela análise analítica de 1,76 e para a análise computacional de 1,80. Ao comparar-se os dois métodos, verifica-se uma diferença de 12% na análise computacional e uma diferença de 14% na análise analítica, de tal forma que os maiores fatores de segurança são determinados pelo método de Bishop simplificado (1955).

Introdução

Estabilidade de Taludes

As análises de estabilidade de taludes normalmente utilizam a abordagem do equilíbrio limite supondo a existência de uma superfície de escorregamento com forma conhecida (plana, circular ou irregular) e a aplicabilidade do critério de resistência de Mohr-Coulomb. Calculam-se os esforços atuantes e a força de resistência ao cisalhamento necessária ao equilíbrio do maciço. Então, essa força é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível no solo, obtendo-se o coeficiente de segurança ou fator de segurança

Segundo Soares (1996), o enfoque determinístico nos métodos de estudo de estabilidade de taludes consiste em selecionar valores adequados para as variáveis dominantes e calcular seus fatores de segurança correspondentes a diversas situações de solicitação. O cálculo da relação entre resistências e solicitações é medido pelo fator de segurança que, na verdade, é um outro coeficiente aplicado ao modelo de cálculo selecionado. Assim, nos cálculos fica implícito a inclusão das incertezas que vêm da variabilidade dos parâmetros de resistência e as incertezas sobre a aplicabilidade do modelo para representar o mecanismo de ruptura. A escolha do coeficiente de minoração e do próprio fator de

segurança é um processo arbitrário que demonstra a confiança (ou incerteza) sobre os parâmetros e métodos adotados. No caso particular de um talude, o fator de segurança também demonstrará o seu grau de responsabilidade. Na análise determinística calcula-se o Fator de Segurança (FS) baseado num valor fixo de parâmetros de materiais componentes do talude. Se o FS é maior que 1, o talude é considerado estável, caso contrário, o talude é considerado instável ou susceptível à ruptura. O Fator de Segurança determinístico é dado pela relação:

$$FS = \frac{M_R}{M_S} \quad (1)$$

Onde: M_R é o momento resistente ao deslizamento e M_S o momento solicitante que tende provocar o deslizamento

Método das Fatias

Segundo Brito (2003), Fellenius apresentou o Método das Fatias em 1936, no Segundo Congresso de Grandes Barragens realizado em Washington. Esse método foi desenvolvido pela Comissão Sueca de Geotecnia e melhorado por Fellenius. Basicamente o método consiste em dividir a massa acima da superfície de ruptura em fatias verticais, assumindo-se que as forças resultantes nos lados opostos de cada fatia são iguais e de sentidos opostos atuando numa mesma linha, paralela à base da fatia. Assim, as forças normais e cisalhantes nas laterais das fatias podem ser desprezadas e o problema torna-se estaticamente determinado. O Método das Fatias apresentado por Fellenius satisfaz somente o equilíbrio das forças na direção normal à base e dos momentos, e o fator de segurança é expresso em termos de momento. Este método consiste em dividir a superfície potencial de ruptura em fatias, aplicando-se em cada uma delas as seguintes equações de equilíbrio:

$$\sum \text{Forças horizontais} = 0 \quad (2)$$

$$\sum \text{Forças verticais} = 0 \quad (3)$$

$$\sum \text{Momentos} = 0 \quad (4)$$

Aplicando as equações de equilíbrio, encontra-se um sistema no qual o número de incógnitas é maior do que o número de equações. Para resolver o problema, algumas hipóteses simplificadoras são necessárias. Estas hipóteses simplificadoras é que diferenciam os diversos métodos, caracterizando-os como menos ou mais conservadores.

Método de Fellenius (1936)

De acordo com (Das, 2007), esse método admite uma superfície de ruptura circular e o fator de segurança do talude é calculado unicamente através de equilíbrio de momentos, não levando em consideração as forças tangenciais e normais às paredes das fatias (Figura 1). Este método baseia-se na análise estática do volume de material situado acima da superfície de escorregamento, sendo este volume dividido em fatias verticais. Assim, determinam-se as forças normais às bases das lamelas e aplica-se o equilíbrio de forças na direção da normal à base (BORGATTO, 2006).

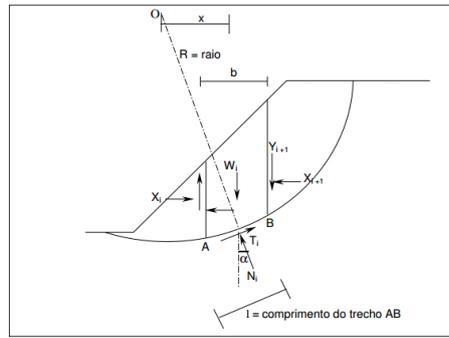


Figura 1: Forças atuantes em uma fatia pelo Método de Fellenius

Desprezando as forças nas laterais das fatias, considerando que a componente sísmica é nula, aplicando o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo de ruptura (ponto O) e o equilíbrio de forças na direção perpendicular à superfície de ruptura pode-se determinar o fator de segurança (FS) através da seguinte equação:

$$FS = \frac{\sum [c'(b/\cos\alpha) + (W \cos\alpha - u(b/\cos\alpha))\text{tg}\phi']}{\sum W \text{sen}\alpha} \quad (5)$$

Onde: u é a poropressão média na base da fatia; c' é a coesão efetiva do solo e ϕ o ângulo de atrito efetivo do solo. Esse procedimento é repetido para diversas posições da superfície de ruptura. O fator de segurança crítico corresponde ao de menor valor encontrado para FS.

Método de Bishop Simplificado (1955)

O método de Bishop Simplificado, da mesma forma que o de Fellenius, considera a superfície de ruptura com forma circular. Tem como hipótese que a resultante das forças entre as fatias é horizontal. Acrescenta-se a equação que impõem o equilíbrio das forças verticais. O fator de segurança é dado pela a seguinte equação:

$$FS = \frac{1}{\sum W \text{sen}\alpha} \sum [c' b + (W - ub)\text{tg}\phi'] / m_\alpha \quad (6)$$

$$m_\alpha = \cos\alpha \left[1 + \frac{\text{tg}\alpha \text{tg}\phi'}{FS_i} \right] \quad (7)$$

A solução resulta de um processo iterativo, no qual é arbitrado o valor do fator de segurança FS_i da Equação 6 e calcula-se o fator FS. O processo repete-se até que o valor calculado (FS) se iguale ao valor arbitrado (FS_i). O método de Bishop Simplificado fornece resultados mais próximos aos dos métodos mais rigorosos, quando comparado com o método de Fellenius.

Metodologia

A metodologia utilizada na composição deste trabalho consistiu, inicialmente de uma revisão bibliográfica feita a partir de livros, artigos e dissertações de mestrado. Em seguida, foram realizadas análises comparativas de métodos de estabilidade de taludes, ainda verificando-se a possível existência de discrepância entre resoluções computacionais e analíticas. Nas análises empregados os métodos de Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955) para determinação dos fatores de segurança do talude estratificado proposto no estudo.

Resultados e Discussão

O talude proposto para o estudo de estabilidade pode ser visualizado na Figura 2, apresentando os parâmetros geotécnicos de cada solo que compõe o talude. Na análise da estabilidade do talude proposto, foram empregados os métodos de Fellenius (1936) e Bishop Simplificado (1955).

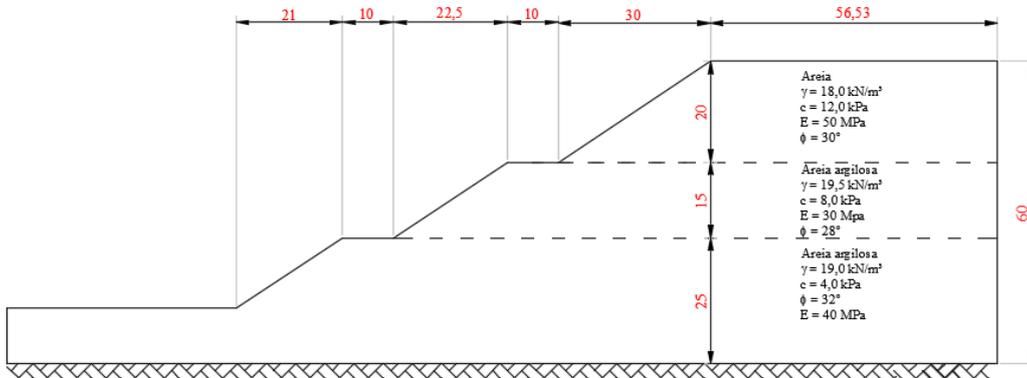


Figura 2: Talude proposto para o estudo

Ao se realizar o equilíbrio de momentos entre as forças resistentes e atuantes de acordo com o método de Fellenius (1936), partindo de uma solução analítica, obteve-se um fator de segurança de 1,50 como visto na Figura 3.

FELLENIUS (1936)											
F.S. = 1,50											
$F.S. = \frac{\sum (b/\cos \alpha) + (W \cos \alpha - ub/\cos \alpha) \tan \phi}{\sum W \sin \alpha}$											
Faixa	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
	Area (m²)	Peso (kN/m)	α	b	u	c (b/cos α)	(P cos α - u (b / cos α) tg ϕ)	P sen α	[6+7]	γ (kN/m³)	ϕ (kPa)
1	63,81	1212,39	-20	17,81	0	75,81202451	711,90	-414,662	787,71	19	4
2	66,75	1268,25	-11	8,87	0	36,14406834	777,93	-241,994	834,07	19,5	8
3	129,4	2458,6	-4,5	10,5	0	42,12987234	1531,57	-192,9	1573,70	18	12
4	183,32	3483,08	2,6	10,5	0	42,04328062	2174,23	158,0029	2216,27		30
5	204,83	3891,77	9,8	10	0	40,56811437	2397,79	649,0256	2438,36		
6	261,44	4977,39	16,8	11,25	0	47,00625039	2977,47	1438,624	3024,48		
7	297,8	5719,55	24,9	11,25	0	49,61170493	2758,45	2408,135	2808,06		
8	244,24	4718,65	33,4	10	0	47,91292134	2094,59	2597,526	2142,51		
9	149,52	3068,05	40,1	7,29	0	38,12156382	1247,82	1976,204	1285,95		
10	85,5	1628,55	45,5	4,48	0	25,56679004	606,93	1161,564	632,49		
11	133,28	2445,24	52,6	8,31	0	54,72723448	857,47	1942,534	912,20		
12	74,1	1337,4	63,6	9,91	0	89,15174025	343,32	1197,925	432,48		
							18479,47	12679,99	19068,27		

Figura 3: Determinação do fator de segurança a partir de uma análise analítica pelo método de Fellenius (1936)

Verificou-se que a partir da simulação computacional que para o talude estratificado utilizando o método de Fellenius (1936), que o fator de segurança crítico possui um valor de 1,58, como exibido na Figura 4.

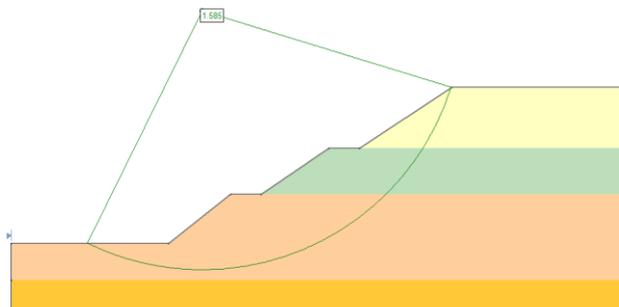


Figura 4: Análise computacional pelo método de Fellenius (1936)

Pelo método Bishop Simplificado (1955), estimou-se um fator de segurança de 1,76 realizando o equilíbrio de momentos entre as forças resistentes e atuantes, como se observa na Figura 5.

BISHOP SIMPLIFICADO (1955)												
FS =		1,76										
FSI		1,76										
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[6/8]	[9]	[10]	[11]
Fatia	Area (m ²)	Peso (kN/m)	α	b	u	$c' \text{ br} + (P-ub) \text{ tg } \phi'$	$P \sin \alpha$	M ₀	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ	
1	63,81	1212,39	-20	17,81	0	828,83	-414,662	0,818262	1012,91	19	4	32
2	66,75	1268,25	-11	8,67	0	827,97	-241,994	0,913882	905,9934	19,5	8	28
3	129,4	2458,6	-4,5	10,5	0	1578,30	-192,9	0,969061	1628,694	18	12	30
4	183,32	3483,08	2,6	10,5	0	2218,47	158,0029	1,015076	2185,521			
5	204,83	3891,77	9,6	10	0	2471,85	649,0256	1,045206	2364,939			
6	261,44	4977,39	16,8	11,25	0	3155,22	1438,624	1,059937	2976,798			
7	297,8	5719,55	24,9	11,25	0	3131,14	2408,135	1,034242	3027,472			
8	244,24	4718,65	33,4	10	0	2588,95	2597,526	1,001152	2585,971			
9	149,52	3068,05	40,1	7,29	0	1689,63	1976,204	0,959516	1760,92			
10	85,5	1628,55	45,5	4,48	0	901,76	1161,564	0,934884	964,5641			
11	133,28	2445,24	52,6	8,31	0	1511,48	1942,534	0,867976	1741,385			
12	74,1	1337,4	63,6	9,91	0	891,07	1197,925	0,738464	1206,65			
						Σ						
							12679,99		22361,82			

Figura 5: Determinação do fator de segurança a partir de uma análise analítica pelo método de Bishop (1955)

Na Figura 6, observa-se a partir da análise computacional que para o método Bishop Simplificado (1955), verificou-se um fator de segurança de 1,80.

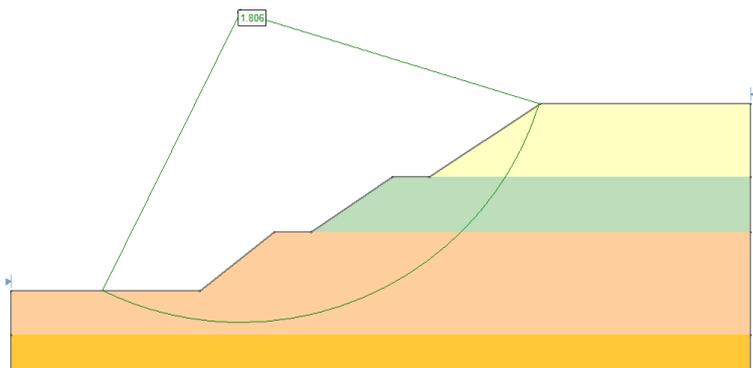


Figura 6: Análise computacional pelo método de Bishop (1955)

Avaliando os valores obtidos das análises analíticas e computacionais, observa-se que os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Fellenius (1936) foram os menores, ainda é possível observar que nenhum dos fatores de segurança analisados foram menores do que 1, como visto na Tabela 1, assim garantindo a segurança do talude estudado.

Tabela 1: Valores de F.S obtidos

Método	F.S	
	Análítico	Computacional
Fellenius	1,5	1,58
Bishop Simplificado	1,76	1,80

Considerando o talude estratificado, verifica-se que para uma situação em que não há presença de lençol freático, o fator de segurança é de 1,76 para uma análise analítica considerando o método de Bishop simplificado (1955), já para uma análise computacional, têm-se um fator de segurança de 1,8, havendo assim uma diferença de 2,22% entre os fatores de segurança. Para uma mesma situação, a análise pelo método de Fellenius (1936) apontou um fator de segurança de 1,5 partindo de uma análise analítica e de

1,58 para a análise numérica, evidenciando uma diferença de 5%. Ao comparar-se os dois métodos, verifica-se uma diferença de 12% na análise computacional e uma diferença de 14% na análise analítica, de tal forma que os maiores fatores de segurança são determinados pelo método de Bishop simplificado (1955).

Conclusão

Qualquer análise realizada apresentará incertezas sobre os resultados obtidos, seja em função dos modelos utilizados, que geralmente constituem simplificações da realidade, seja em função dos parâmetros que alimentam esses modelos, que carregam consigo uma variabilidade intrínseca decorrente da heterogeneidade do material estudado. Nas análises de estabilidade de taludes as incertezas também são muito importantes, pois o solo, ao contrário de outros materiais de construção, possui um processo de formação natural que torna suas propriedades altamente dependentes dos processos geológicos atuantes em sua gênese. Para uma situação onde não há a ocorrência de lençol freático e o talude é estratificado, o método de Fellenius (1936) apresentou fatores de segurança razoáveis, com valores de 1,50 e 1,58 para análises analíticas e computacionais respectivamente, apresentando uma discrepância de 5%, sendo essa diferença relativamente inexistente. Quanto ao método de Bishop Simplificado (1955), os fatores de segurança apresentaram uma diferença de 2,22%, sendo o fator de segurança obtido pela análise analítica de 1,76 e para a análise computacional de 1,80. Uma divergência de 12% na análise computacional e uma diferença de 14% na análise analítica foi percebida ao comparar os métodos de estabilidade. Na conjuntura apresentada, o talude estratificado apresentou maiores fatores de segurança a partir do método de Bishop simplificado (1955), mostrando-se a situação mais estável.

Referências

BISHOP, A. W., "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", *Geotechnique*, 5(1), 7- 17, 1955.

BORGATTO, A. V. A. Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRITO, C. B. – PROGRAMAÇÃO DINÂMICA APLICADA À ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES NÃO SATURADOS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, 2003, 47p.

DAS, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo. Cengage Learning, 2007.612 p.

FELLENIUS, W., "Calculation of the Stability of Earth Dams.", 2 nd International Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, Washington, DC, 445-459, 1936.

SOARES, E. P. – Análise de Estabilidade de um Talude da Mina de Águas Claras – MBR: Uma Visão Probabilística. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1996, 66p.

Agradecimentos

Agradecemos a CAPES pela a bolsa de ¹