

Aplicação de retroanálise probabilística para avaliação da estabilidade de taludes

Application of reverse engineering for probabilistic assessment of slope stability

Paulo César de Almeida Maia*
Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão**
Raquel Ofrante Salles***

Este trabalho apresenta a retroanálise do escorregamento de um aterro ocorrido na BR-153. São apresentados o histórico do escorregamento e os parâmetros geotécnicos obtidos em um programa experimental de laboratório e campo. A estabilidade do talude foi analisada com base em métodos determinísticos e probabilísticos. Esta obra enfatiza a metodologia probabilística utilizada na análise de estabilidade do talude, considerando a variação do nível freático do maciço. Observou-se que o valor estimado da probabilidade de ruptura foi influenciado pela geometria do talude, posição do lençol freático, posição da superfície crítica de ruptura e método de análise da estabilidade, além da variação dos parâmetros geotécnicos. A análise indicou a vantagem de se proceder a uma avaliação conjunta dos valores de fator de segurança e probabilidade de ruptura na retroanálise de escorregamentos de taludes.

This paper presents a back-analysis study of a landslide occurred on BR-153 Highway. The landslide history, the climate characteristics of the region and the geotechnical parameters obtained in a laboratory and field experimental program are presented. Retroanalysis shows that the rupture occurred due to groundwater rising to the soil surface. The estimated value of the rupture probability was influenced by the slope geometry, the groundwater position, position of critical surface and method of stability analysis, in addition to the variation in geotechnical parameters.

Palavras Chave: Escorregamento. Retroanálise probabilística. Estabilidade de taludes. BR-153

Keywords: Landslide. Probabilistic back-analysis. Slope stability. BR-153.

1. Introdução

A análise da estabilidade de taludes pode ser feita utilizando-se métodos determinísticos ou probabilísticos. Uma análise de estabilidade é realizada, normalmente, para determinação das condições de projeto que garantam a segurança mínima

* Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000 –Laboratório de Engenharia Civil - Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28013-602, e-mail: maia@uenf.br

** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, sayao@civ.puc-rio.br

*** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000 –Laboratório de Engenharia Civil - Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, CEP: 28013-602, e-mail: salles@uenf.br

necessária. No entanto, mesmo sob condições favoráveis de projeto, não são raros os casos de rupturas de taludes. Nestes casos pode-se fazer a análise da estabilidade do talude rompido a fim de se determinar os parâmetros dos materiais, as condições de carregamento e as características geométricas que provocaram a ruptura. Esse tipo de análise é denominada retroanálise e é conduzida normalmente utilizando-se métodos determinísticos. O objetivo maior das retroanálises é a procura de informações a fim de se projetar o reforço mais adequado.

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo principal fazer uma retroanálise probabilística do escorregamento de um talude rodoviário e a aplicação dos resultados para uma alternativa de projeto. A seleção do caso de estudo se justifica pelos dados disponíveis que permitem o desenvolvimento deste tipo de análise e pela importância da obra. Além disso, a ruptura relatada representa um caso típico, observado frequentemente nas rodovias brasileiras. Neste trabalho, apresenta-se um resumo dos dados do caso de estudo relatado por Maia *et al.* (2009), dando-se ênfase à metodologia aplicada na retroanálise probabilística.

Apresentam-se, a seguir, algumas informações teóricas sobre os métodos determinísticos e probabilísticos para o entendimento da aplicação destas metodologias de análise para o caso de estudo abordado neste trabalho.

2. Considerações Iniciais

Nas análises determinísticas convencionais, o cálculo do fator de segurança contra a ruptura de taludes envolve dados que podem apresentar significativa variabilidade, devido à própria heterogeneidade natural dos solos. A análise probabilística é aplicada com o objetivo de quantificar as incertezas desconsideradas nos métodos determinísticos, de forma a se obter o índice de confiabilidade β . Este índice exprime a confiabilidade do fator de segurança e é diretamente relacionado com a probabilidade de ruptura PR do talude (DELLAVANZI; SAYÃO, 1998).

Os valores β e PR consideram apenas as incertezas relativas aos parâmetros geotécnicos, à geometria do problema e às cargas atuantes. Existem, porém, diversas outras fontes de incertezas que não podem ser quantificadas. Desta forma, β e PR são índices relativos, que dependem do número de incertezas consideradas (SANDRONI; SAYÃO, 1992).

Segundo Guedes (1997), a avaliação probabilística da estabilidade de um talude é feita considerando-se usualmente o fator de segurança médio \overline{FS} como uma função de variáveis aleatórias X_i , independentes, que representam os parâmetros geotécnicos $e/$ ou geométricos. Pode-se obter a probabilidade de ruptura do talude como sendo igual à área sob a curva da distribuição de FS definida por $FS \leq 1,0$. Para isso, as variáveis envolvidas são usualmente representadas por curvas de distribuição normal, conforme

sugerido por Priest e Brown (1983) e Sandroni e Sayão (1992).

Morlá-Catalán e Cornell (1976), considerando o fator de segurança como normalmente distribuído, chegaram à seguinte formulação para o índice β :

$$\beta = \frac{\overline{FS} - 1.0}{\sigma_{FS}} \quad (1)$$

3. Descrição do Caso de Estudo

O aterro estudado foi concluído durante as obras de duplicação da rodovia BR-153, no município de Morrinhos, GO. Cerca de dois anos após a construção do aterro, ocorreram trincas no pavimento asfáltico (Figura 1). Deslocamentos mais acentuados foram observados nos quatro meses seguintes, até a ruptura completa do talude do aterro, em março de 2004 (Figura 2).



Figura 1: Trincas no pavimento na crista do talude rodoviário.



Figura 2: Ruptura completa do talude rodoviário.

A cobertura de solo da região é formada por solo parcialmente laterizado, laterito-conglomerático, latossolo e aluvião (DNPM, 1984). Ao longo da extensão do local de estudo, são observados solos eluvionares, derivados de micaxisto, granito e basalto (MAESTRI JUNIOR, 2004).

A topografia da região apresenta-se ondulada, com pequenas elevações e encostas suaves, evidenciando intensa ação erosiva. Vale destacar que a construção da rodovia interceptou vários talwegues. Isto provoca o acúmulo de água a montante dos aterros da rodovia, necessitando de atenção especial na manutenção do sistema de drenagem.

A Figura 3 apresenta uma seção transversal do aterro estudado, com a faixa de variação do nível freático. O aterro foi executado com solo argilo-arenoso compactado na umidade ótima determinada em ensaios de compactação com energia Proctor Normal. O grau de compactação das camadas de solo do corpo do aterro variou de 95% a 100%. O terreno natural é constituído por uma camada de solo argiloso de consistência média a rija, sobrepondo um bolsão de solo argiloso mole. Em maior profundidade, observa-se solo residual. Deve-se ressaltar que a presença deste bolsão de argila mole saturada não foi identificada nas investigações geotécnicas realizadas antes da construção.

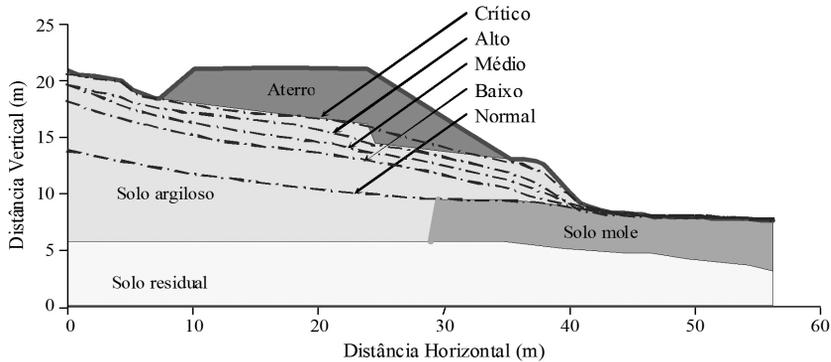


Figura 3: Seção transversal típica do aterro da BR-153 antes do escorregamento e faixa de variação do nível freático.

A precipitação mensal e acumulada anual referente à época da ruptura do talude teve valores sempre superiores à média, considerando o tempo de retorno de 20 anos.

4. Investigações Geotécnicas

O programa de investigações de campo e de laboratório objetivou determinar as características físicas e de resistência dos solos no perfil estudado. A Tabela 1 apresenta os valores médios e de desvio padrão do número de golpes SPT, do peso específico natural γ_{nat} e dos parâmetros de atrito ϕ' e coesão c' ou resistência não drenada S_u dos diferentes solos considerados nas análises. Detalhes sobre a determinação dos parâmetros geotécnicos é apresentado por Maia *et al.* (2009).

Tabela 1: Características geotécnicas dos solos.

Solo	N_{SPT}	γ_{nat} (kN/m^3)	ϕ' (graus)	c' (kPa)	S_u (kPa)
Aterro	15 ± 4	$16,06 \pm 1,17$	$30 \pm 3,6$	$10 \pm 4,0$	---
Solo argiloso	11 ± 3	$15,87 \pm 0,98$	$25 \pm 3,0$	$7,5 \pm 2,5$	---
Solo mole	04 ± 2	$19,30 \pm 0,76$	---	---	$51,8 \pm 19,5$
Solo residual	26 ± 4	$16,68 \pm 1,14$	$35 \pm 3,5$	0,0	---

5. Análises de Estabilidade

Para a análise da estabilidade do talude do aterro, foi utilizado o programa SLOPE/W (GEO-SLOPE, 2004). Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos através do método para a avaliação do fator de segurança proposto por Bishop (1955).

Detaca-se que este método é normalmente utilizado em análises de estabilidade de taludes.

Na estudo de estabilidade foram consideradas as variações das características dos solos apresentadas na Tabela 1. Cinco diferentes posições do lençol freático foram consideradas nas análises, desde a condição normal no campo, até a posição crítica que corresponde à ruptura do talude. Os três níveis freáticos intermediários, denominados baixo, médio e alto, estão mostrados na Figura 3. A posição considerada normal corresponde ao nível freático máximo admitindo que não ocorre acúmulo d'água a montante do aterro.

Para a retroanálise, fez-se inicialmente um estudo determinístico, variando-se os parâmetros geotécnicos e a posição do nível freático da condição normal até uma situação crítica. Essa retroanálise indicou que a utilização dos valores médios dos parâmetros dos solos e a elevação do lençol freático até o nível crítico (superfície do terreno abaixo do aterro da estrada) explicam a condição de ruptura do talude. A superfície de ruptura crítica prevista pelo método de Bishop Simplificado mostrou-se similar à superfície de ruptura observada no campo. A Figura 5 ilustra a análise de estabilidade (Método de Bishop Simplificado) para a posição normal do lençol freático. A superfície de ruptura obtida na condição crítica do nível freático foi similar à representada na Figura 5.

6. Análises Probabilística da Estabilidade

A análise probabilística da estabilidade foi do tipo relativa e baseada no Método FOSM - Segundo Momento de Primeira Ordem (SANDRONI; SAYÃO, 1992; DELL'AVANZI, 1995). A análise probabilística relativa considera o fator de segurança como sendo o valor médio de sua distribuição de probabilidade (LI; LUMB, 1987; OKA; WU, 1990). Na análise, para a determinação da variância do fator de segurança, foi seguida a recomendação de Sandroni e Sayão (1992), fazendo-se incrementos iguais a 10% nos parâmetros dos solos.

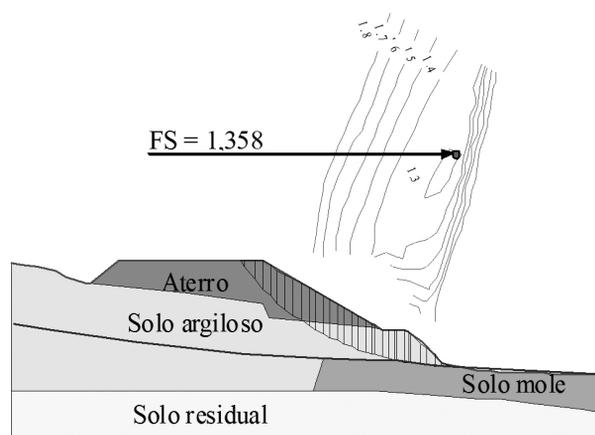


Figura 5: Análise de estabilidade (Método de Bishop) - talude com nível freático inferior.

Para a aplicação da retroanálise probabilística, foram utilizadas planilhas de cálculo. A Tabela 2 apresenta uma planilha utilizada para a determinação do índice de confiabilidade β e das contribuições relativas de cada parâmetro. Nesta Tabela, as análises foram determinadas pelo método de Bishop Simplificado, considerando o nível normal do lençol freático e o fator de segurança médio $\overline{FS} = 1,358$.

Tabela 2: Planilha de análise de confiabilidade com fator de segurança médio $\overline{FS} = 1,358$.

Parâmetro	X_i	δX_i	$V[X_i]$	$\frac{FS_i(X_i + \delta X_i)}{\delta X_i}$	δFS_i	$\frac{\delta FS_i}{\delta X_i}$	$\frac{(\delta FS_i / \delta X_i)^2}{V[X_i]}$	Contribuição (%)	
Aterro	γ_{nat}	16,06	1,61	1,37	1,316	-0,042	-0,03	0,0009	3,9
	ϕ'	30,00	3,00	12,96	1,387	0,029	0,01	0,0012	5,0
	c'	10,00	1,00	16,00	1,374	0,016	0,02	0,0041	17,0
Solo argiloso	γ_{nat}	15,87	1,59	0,96	1,361	0,003	0,00	0,0000	0,0
	ϕ'	25,00	2,50	9,00	1,440	0,082	0,03	0,0097	40,3
	c'	7,50	0,75	6,25	1,385	0,027	0,04	0,0081	33,7
Solo mole	γ_{nat}	19,30	1,93	0,58	1,358	0,000	0,00	0,0000	0,0
	Su	51,80	5,18	380,25	1,358	0,000	0,00	0,0000	0,0
Solo residual	γ_{nat}	16,68	1,67	1,30	1,358	0,000	0,00	0,0000	0,0
	ϕ'	35,00	3,50	12,25	1,358	0,000	0,00	0,0000	0,0
$V[FS] = 0,0240$								100,0	

Para construção da Tabela 2 é preciso determinar os desvios padrões δX_i e variâncias $V[X_i]$ de cada m dos parâmetros X_i utilizados na análise. Calcula-se, então, o fator de segurança $FS_i(X_i + \delta X_i)$ considerando apenas uma variação igual δX_i no valor médio do parâmetro X_i e mantendo-se os outros parâmetros iguais ao próprio valor médio. Deste modo, pode-se calcular a variação do fator de segurança δFS_i em relação ao valor médio \overline{FS} devido a uma variação δX_i do parâmetro X_i .

A variância do fator de segurança $V[FS]$ pode ser calculada pelo somatório dos valores de $(\delta FS_i / \delta X_i)^2 V[X_i]$. A contribuição que cada parâmetro tem na análise probabilística é determinado pela fração que cada $(\delta FS_i / \delta X_i)^2 V[X_i]$ em relação à variância $V[FS]$.

Considerando $V[FS] = 0,024$, calculado na Tabela 2, obtém-se o desvio padrão do fator de segurança $\sigma[FS] = 0,155$. Com base na Equação 1, calcula-se $\beta = 2,310$, que corresponde a $PR = 1,05\%$ ou 1 : 96.

A Figura 6 apresenta os fatores de segurança médios e os valores do índice β e da probabilidade de ruptura PR , obtidos nas análises probabilísticas.

Dos resultados da Figura 6, observa-se uma redução significativa de \overline{FS} e um conseqüente aumento de PR quando o lençol freático se eleva, aproximando-se da superfície do terreno natural. Nota-se que a condição de ruptura é definida tanto na análise determinística ($\overline{FS} = 1$) quanto na probabilística ($PR = 50\%$).

Os valores da contribuições apresentados na Figura 7 indicam que os parâmetros de resistência da camada de solo argiloso são os mais importantes no cálculo da estabilidade do talude.

A Figura 7 mostra a contribuição relativa de cada parâmetro na probabilidade de ruptura com a variação do nível freático. Nota-se que os parâmetros de resistência da camada de solo argiloso têm a influência mais significativa na estabilidade do talude, independente do nível freático.

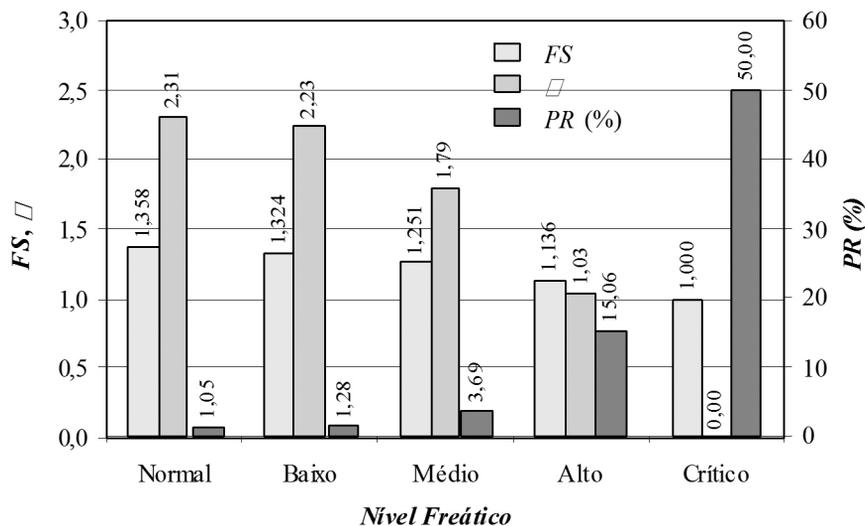


Figura 6: Resultados das análises probabilísticas para diferentes níveis freáticos no talude.

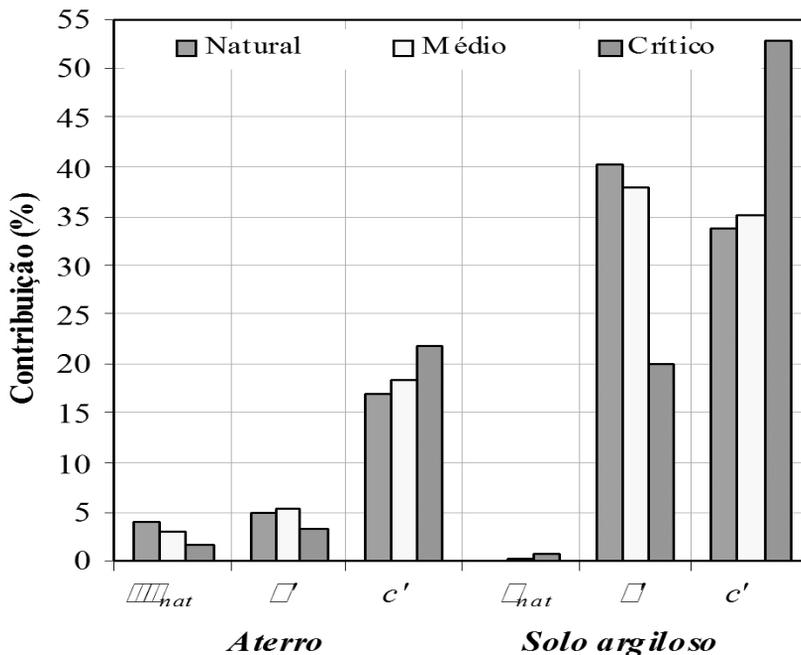


Figura 7: Contribuição relativa dos parâmetros geotécnicos na análise de estabilidade (Método de Bishop), para diferentes posições do lençol freático.

7. Conclusões

A avaliação da estabilidade de um talude rodoviário que sofreu ruptura durante um período de chuva intensa foi feita com base em análises paramétricas, determinísticas e probabilísticas.

O estudo paramétrico da ruptura indica que o talude sofreu uma elevação do nível freático, provocada pelo elevado índice pluviométrico ocorrido nos meses que antecederam a ruptura.

A aplicação de metodologia probabilística para análise da estabilidade do talude estudado mostrou-se uma ferramenta simples de aplicação de significativo potencial de uso para projetos de estabilidade de taludes.

O cálculo da probabilidade de ruptura é significativamente influenciado pela variabilidade dos parâmetros geotécnicos, posição do lençol freático, método de análise da estabilidade e geometria do talude.

No projeto de estabilidade do talude estudado, ficou indicada a vantagem de se proceder a uma avaliação conjunta dos valores de fator de segurança e probabilidade de ruptura. Esse procedimento indica que o valor de probabilidade de ruptura praticado em condições normais de projeto, da ordem de 1%, não foi suficiente para garantir a estabilidade da obra numa condição crítica provocada pela falha do sistema de drenagem. Deste modo, pode-se admitir que, em situações adversas, a probabilidade de ruptura da ordem de 1% ainda não indica uma condição favorável de projeto.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao DENIT-GO pelo fornecimento dos dados necessários para as análises de estabilidade apresentadas neste trabalho.

9. Referências

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v. 5, n. 1, p. 91-128, 1955.

DELL'AVANZI, E. *Confiabilidade e probabilidade em análises de estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, 1995. 135 p.

DELL'AVANZI, E.; SAYÃO, A.S.F.J. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., Brasília, 1998. Brasília: ABMS, 1998. v.2, p.1289-1296.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Geologia do Brasil*, 1984. 501 p.

GEO-SLOPE. *Slope W. User's Manual*. Edmonton, Canada: Geoslope Inc., 2004. Disponível em: <<http://www.geo-slope.com>>. Acesso em: 2004.

GUEDES, M. C. S. *Considerações sobre análise probabilística da estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, 1997. 146 p.

LI K.S; LUMB, P. Probabilistic design of slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 24, n. 4, p. 520-535, 1987.

MAESTRI JR, E. D. Estudo técnico da ruptura do aterro das estacas 646/649. *Relatório ONA S.A.*, n. 34, 2004. 41p.

MAIA, P. C. A.; SAYÃO, A. F. J. S.; SALLES, R. O.; PEREIRA, J, F. *Retroanálise probabilística da ruptura de um talude rodoviário na BR-153*. [S.l.]: COBRAE, 2009. 8p.

MORLÁ-CATALÁN, J.; CORNELL, C.A. Earth slope reliability by a level-crossing method. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.102, n. GT6, p. 591-604, 1976.

OKA, Y.; WU, T. System reliability of slope stability. *Journal of Geotechnical Eng.*, ASCE, v. 116, n. 8, p.1185-1189, 1990.

PRIEST, S.D.; BROWN, E.T. *Probabilistic stability analysis of variable rock slopes*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1983. Section A.

SANDRONI, S.S.; SAYÃO, A.S.F.J. Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992. [S.l.]: COBRAE, 1992. v. 2, p. 523-536.

Artigo recebido em: 29 dez. 2008

Aceito em: 25 dez. 2009