

COMPARAÇÃO ENTRE A ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES POR MÉTODO DETERMINÍSTICO E PROBABILÍSTICO

Eduardo Antonio Guimarães Tenório¹; Jefferson Honório Gomes da Silva²; Paulo Roberto Barreto Torres³; Wesley Rodrigues de Menezes⁴; Carina Silvani⁵

¹ Universidade Federal de Campina Grande; eduardo_agt123@hotmail.com

² Universidade Federal de Campina Grande; jefferson389@hotmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande; paulobarretot@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Campina Grande; wesleyrrm@gmail.com

⁵ Universidade Federal de Campina Grande; carinasilvani@hotmail.com

Resumo: Os movimentos de massa são eventos nos quais uma quantidade de solo desloca-se de um talude. Esse fenômeno ocorre devido ao estado de tensões ao qual o maciço está sujeito que pode variar conforme o uso do maciço, características do solo e condições ambientais. A depender dos carregamentos, parâmetros do solo talude pode ser entendido como estável ou instável. Para mensurar a estabilidade de um talude recorre-se ao fator de segurança (FS). Este parâmetro relaciona as forças, estabilizadoras e desestabilizadoras atuantes em um talude, e permite mensurar o quão estável é o maciço. Os métodos usuais de estabilidade de talude adotam uma abordagem determinística, estes assumem valores constantes para os parâmetros do solo, carregamentos e pressões. A hipótese de constância nos parâmetros do solo é questionável devido a heterogeneidade deste material e no caso de taludes naturais a própria variabilidade do processo de formação. Visando considerar a variabilidade do solo na análise de estabilidade de taludes os métodos probabilísticos aplicam os princípios da estatística e probabilística ao modelo de cálculo. Desta forma, este trabalho visa comparar o emprego do método determinístico e probabilístico na análise de estabilidade de taludes. Para este estudo foi realizado a análise probabilística pelo método das estimativas pontuais e determinística pelo método de Fellenius de um talude natural localizado na cidade de Maceió -AL. Observou-se que ambos os métodos indicaram a ruptura do talude, contudo a maior quantidade de informação fornecida pelo método probabilístico permitiu melhor análise de risco da situação.

Palavras-chave: Fellenius, estimativas pontuais, probabilidade.

INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são deslocamentos súbitos de parte da massa de solo que compõem um talude. Esses eventos são desencadeados devido as propriedades dos solos de taludes naturais e artificiais em associação com condicionantes ambientais como clima e índice de precipitação e ação humana (FERNANDES et al., 2001. e SAMPAIO, PIMENTEL, et al., 2013). Segundo Filho & Cortez (2010) os movimentos coletivos de massa implicam em alto risco para a população quando comparado outros desastres geológicos. A Tabela 1 classifica o risco dos sinistros geológicos ao qual a população brasileira está sujeita.

Tabela 1 - Risco de sinistros geológicos

Riscos geológicos no Brasil	Risco
Escorregamentos	Alta
Erosão e assoreamento	Média
Subsidência	Baixa
Solos expansivos	Baixa
Terremotos	Baixa

Fonte: Adaptado de FILHO e CORTEZ (2010)

Segundo Aoki (2008), obras de engenharia civil estão sujeitas a aleatoriedade de fatores independentes. Para se avaliar os riscos de uma obra faz-se necessário uma abordagem probabilística das variáveis aleatórias vinculadas ao empreendimento. No tocante a estabilidade de encostas a aleatoriedade deve-se a natureza do material, o solo, e aos modelos de cálculo usados para mensurar a estabilidade. Isto posto, fica claro a necessidade de considerar as incertezas na análise de estabilidade de taludes (Sandoval, 2012).

Segundo Flores (2008) os ensaios empregados para mensurar os parâmetros do solo, em laboratório e campo, possuem limitações técnicas e conseqüentemente inferem incertezas as medições. Associado as limitações dos ensaios tem-se a variabilidade do solo que constitui uma das fontes mais significantes de incertezas.

Pode-se dividir as incertezas geotécnicas em incertezas de parâmetro, modelo e humana. As incertezas de parâmetro ocorrem em virtude da dispersão das características do solo (Morgenstern, 1995 *apud* Flores, 2008). Os modelos utilizados para avaliar o comportamento de obras geotécnicas incorrem em incertezas devido as simplificações matemáticas adotadas para tornar os cálculos factíveis (Morgenstern 1995, Whitman, 1996, *apud* FLORES 2008). As incertezas humanas ocorrem em virtude da execução distinta dos procedimentos e por vezes falta de comunicação entre as partes envolvidas no processo de investigação geotécnica (FLORES, 2008).

Devido a esta variabilidade o emprego de métodos determinísticos de análise de estabilidade tem sua credibilidade questionada. A luz destes fatos a análise probabilística surge como uma ferramenta capaz de lidar com as incertezas dos parâmetros geotécnicos (Sandoval, 2012).

A análise de estabilidade de taludes visa mensurar o quão estável é uma encosta e desta forma identificar o risco de ocorrência de movimentos de massa. Para avaliar a estabilidade do maciço considera-se as propriedades geotécnicas e as influências externas como carregamentos, precipitação e ações humanas. Por fim o equilíbrio do talude é determinado pela relação entre as forças estabilizantes, oriundas do próprio solo e

eventuais reforços, e forças desestabilizantes, provenientes de cargas na superfície, poropressão e do peso próprio do maciço (GERSCOVICH, 2009).

As técnicas mais usuais de análise de estabilidade de taludes são determinísticas, assumem constância das variáveis utilizadas no modelo de cálculo. Para expressar se um talude é estável ou não os métodos determinísticos utilizam um índice chamado de fator de segurança (FS). FS maior que um indica que o talude está estável, igual a um instável e FS menor que um não apresenta significado físico pois nestas condições o talude já desmoronou (SANDOVAL, 2005). A Figura 1 exemplifica de forma simplória a filosofia do FS.

Fonte: Adaptado de GUIDICINI NIEBLE (1983)

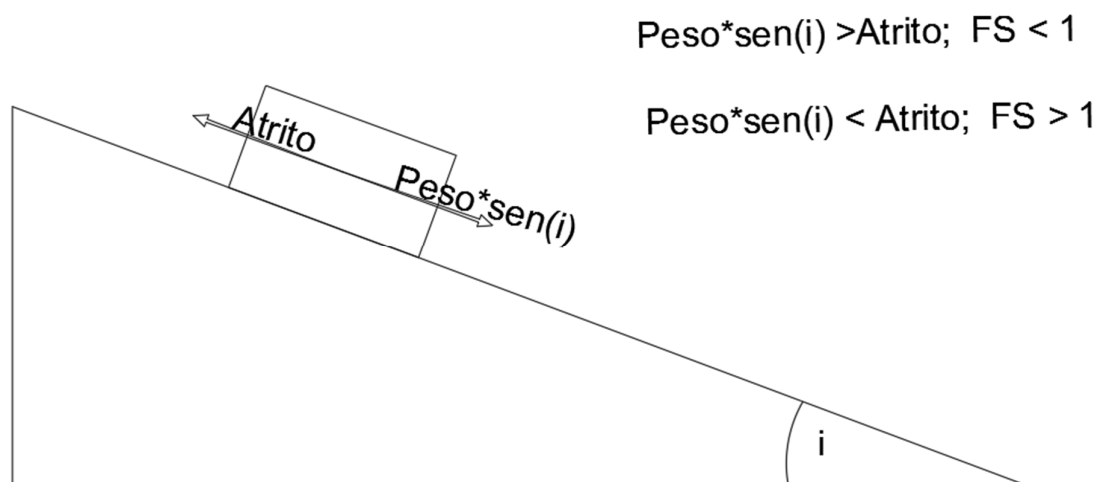


Figura 1 - filosofia do fator de segurança

No exemplo da Figura 1 a força de atrito desempenha a função de força estabilizadora, em um maciço esta força estaria relacionada aos parâmetros de resistência do solo, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). O peso comporta-se como as forças desestabilizadoras, no solo estas forças devem-se ao peso próprio, cargas na superfície e pressões internas como poropressão (Guidicini e Nieble, 1983). A Equação 1 expressa a formulação matemática do fator de segurança, nesta as forças mobilizadoras são representadas por (F_{mob}) e as estabilizadoras por (F_f) (GERSCOVICH, 2009).

$$FS = \frac{F_f}{F_{mob}} \quad (\text{Eq. 1})$$

As análises probabilísticas ao contrário das determinísticas não assume que a constância dos parâmetros, mas sim, consideram a variabilidade destes no processo de mensurar da estabilidade de um talude. Enquanto a análise determinística retorna o FS a probabilística retorna indicadores de desempenho como índice de confiabilidade (β) e probabilidade de falha (P_f). Esses indicam, respectivamente, o quão estável é o sistema e qual a probabilidade de o talude colapsar (SANDOVAL, 2009).

Para a aplicação do método probabilístico precisa-se definir uma função de falha, esta deve receber como argumento as variáveis e retornar um resultado que possa ser interpretado com sucesso ou falha (MORALES, 2013). No caso de estabilidade de taludes a função de falha pode ser entendida como o método determinístico no qual FS maior que um representa sucesso e menor representam falha (MORALES, 2013).

As variáveis que alimentam a função de falha são os parâmetros geotécnicos. Como na análise probabilística os parâmetros não são constantes define-se uma distribuição de probabilidade para reger a forma como estes iram variar, usualmente trabalha-se com a distribuição gaussiana. O resultado da análise probabilística também será variável e seguirá a mesma distribuição de probabilidade dos argumentos (FLORES, 2008).

As duas metodologias de análises de estabilidade têm abordagens distintas dos problemas. Em vista da notável variabilidade dos parâmetros do solo e dos ônus causados por movimentos de massa faz-se necessário comparar os resultados obtidos por estes dois métodos. Afim de compreender como interpreta-los e usa-los em favor de taludes mais estáveis, seguros e com menor custo.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um talude natural localizado na cidade de Maceió – AL. As propriedades geotécnicas do talude são apresentadas na Tabela 2. (RAMOS, 2014).

Tabela 2 - Propriedades geotécnicas do talude

Angulo de Atrito (graus)	Coesão Efetiva (KPa)	Peso específico saturado (KN/m ³)
35,05	4,15	20,71

Fonte: Adaptado de RAMOS (2014)

A geometria da seção transversal do talude estudado é apresentada na Figura 2. Para o desenvolvimento das análises é necessário delimitar a área de pesquisa da seção transversal do talude em que poderá ocorrer um movimento de massa. A área de pesquisa foi delimitada de acordo com seções, próximas, já rompidas (RAMOS, 2014). A Figura 2 ilustra, também, a área de pesquisa.

Fonte: Adaptado de RAMOS (2014)

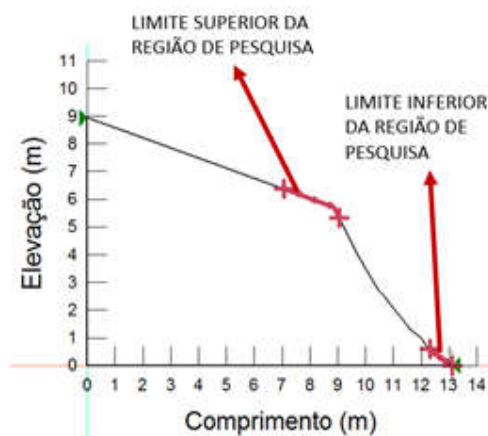


Figura 2 – Geometria da seção transversal do talude e área de pesquisa da seção de ruptura

Para a análise determinística foi utilizado o método determinístico de Fellenius. Este método parte do princípio que a ruptura do talude ocorrerá em uma superfície circular inserida na seção transversal do talude denominada superfície de ruptura. Para os desenvolvimentos dos cálculos Fellenius divide a área acima da superfície de ruptura em fatias trapezoidais homogêneas conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e considera as forças mobilizadoras e estabilizantes atuantes nesta para calcular o FS (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Fonte: GERSCOVICH (2009)

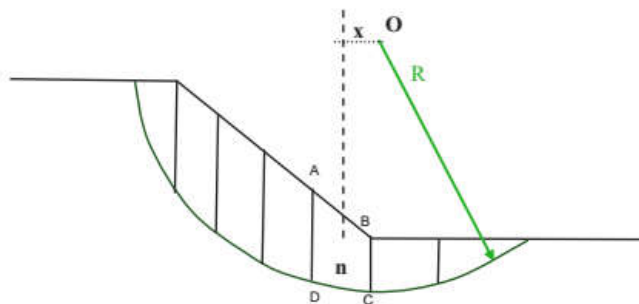


Figura 3 – Talude com seção transversal e divisão das fatias

Os procedimentos para o cálculo do FS pelo método de Fellenius podem ser divididos nas seguintes etapas (Gerscovich (2009)).

- I. Definir uma superfície de ruptura para o talude;
- II. Dividir o talude em lamelas iguais e assumir a base dessa como linear;
- III. Calcular o equilíbrio do talude por meio do somatório do equilíbrio de todas as fatias que o compõe;
- IV. Repetir o procedimento para outras seções de ruptura até encontrar o menor fator de segurança;

A equação 2 demonstra a forma de cálculo do FS pelo método de Fellenius. A Figura 4 mostra uma lamela de um talude com direção das forças atuantes (GERSCOVICH, 2009).

$$FS = \frac{\sum(c' * l + (w * \cos(\alpha) - u * l) * \text{tg}(\phi'))}{\sum w * \text{sen}(\alpha)} \quad \text{eq. (2)}$$

Sendo: c' a coesão efetiva do solo da fatia, l o comprimento da fatia, w o peso da fatia, α o ângulo de inclinação da fatia com relação ao plano vertical, u a poro pressão, ϕ' o ângulo de atrito efetivo do solo presente na fatia.

Fonte: GERSCOVICH (2009)

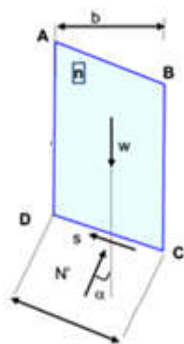


Figura 4 - Exemplo de lamela do método de Fellenius

Para determina-se o menor fator de segurança de um talude deve-se realizar múltiplos cálculos da equação (2) variando-se o traçado da superfície de ruptura até encontrar o menor fator de segurança do sistema (GERSCOVICH, 2009).

A análise probabilística foi realizada pelo método das estimativas pontuais (MEP). Este método consiste em variar os argumentos que alimentam a

função de falha em mais ou menos o desvio padrão dos próprios argumentos (FABRICIO, 2006). A equação 3 demonstra como funciona o cálculo das dos fatores de segurança pelo MEP.

$$FS_i = f(A_i \pm S_i; \dots; A_n \pm S_n) \quad \text{eq.(1)}$$

Sendo: A_i os argumentos do fator de segurança, S_i os respectivos desvios padrão dos argumentos e FS_i os fatores de segurança calculados com cada conjunto de argumentos.

Por meio dos fatores de segurança calculados o MEP calcula a média e do desvio padrão dos FS_i , o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha. Segundo Fabrício (2006) o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha podem ser calculados pelas equações 4 e 5 respectivamente.

$$\beta = \frac{E(FS) - 1}{S_{FS}} \quad \text{eq.(4)}$$

$$P_f = \int_{-\infty}^1 \frac{1}{S_{FS}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(FS-E(FS))^2}{2S_{FS}^2}} dFS \quad \text{eq.(5)}$$

Sendo: $E(FS)$ a média aritmética dos fatores de segurança, S_{FS} o desvio padrão dos fatores de segurança.

Para a aplicação do MEP faz-se necessário possuir os desvios padrão dos parâmetros do solo.

Para o MEP os valores da Tabela 2 foram utilizados como média dos parâmetros e adotou-se como desvio padrão os valores apresentados na Tabela 3. Estes foram obtidos da literatura específica (Fabrício, 2006; Sandoval, 2012; Ribeiro 2008).

Tabela 3 - Desvio padrão dos parâmetros geotécnicos do solo

Variáveis Aleatórias:	Angulo de atrito (Graus)	Coesão (Kpa)	Peso específico saturado (KN/m ³)
Desvio Padrão	3,505	0,581	0,4142

Fonte: RAMOS (2014), FABRÍCIO (2006), SANDOVAL (2012), RIBEIRO (2008)

A Tabela 4 apresenta todas as combinações usadas no MEP.

Tabela 4 - Combinação dos argumentos usados no MEP

Combinações (materiais)	Angulo de atrito (Graus)	Coesão (Kpa)	Peso específico saturado (KN/m ³)
1	38,56	4,73	21,12
2	38,56	4,73	20,30
3	38,56	3,57	21,12
4	38,56	3,57	20,30
5	31,55	3,57	20,30
6	31,55	3,57	21,12
7	31,55	4,73	20,30
8	31,55	4,73	21,12

Os cálculos foram realizados com os softwares Microsoft Excel e SLOPE/W GEOSTUDIO 2016.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise determinística pelo método de Fellenius forneceu um fator de segurança de 0,971. Este valor indica que para as condições em que os parâmetros de resistência foram mensurados o talude em estudo já teria rompido.

O método das estimativas pontuais forneceu os FS apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de segurança do MEP para cada combinação

Combinações	1	2	3	4	5	6	7	8
FS	1,097	1,113	1,001	1,013	0,851	0,839	0,942	0,929

Com os dados da Tabela 5 foi realizado a análise probabilística que forneceu os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da análise probabilística pelo MEP

Média do fator de segurança	0,9731
Desvio Padrão	0,0956
Coefficiente de variação	9,82%
Índice de confiabilidade	-0,2812
Probabilidade de falha	61,07%

Como pode-se observar na Tabela 6, a probabilidade de falha foi elevada e o índice de confiabilidade baixo corroboram o resultado determinístico. Também se visualiza que o FS médio obtido pelo MEP é bastante próximo do FS fornecido pelo método de Fellenius. Isso sugere que o FS obtido de forma determinística é uma representação central da condição do talude.

Salienta-se que o talude possui 38.93% de chances de não colapsar. Esta observação só é possível devido a análise probabilística. Juntamente com a probabilidade de falha pode-se, por meio do método probabilístico, observar o desvio padrão dos fatores de segurança e compará-lo aos desvios padrões dos parâmetros do solo apresentados na Tabela 3. Vê-se que o desvio padrão dos fatores de segurança é menor que o desvio padrão dos argumentos. Este fato sugere que a variabilidade do fator de segurança é menor que a variabilidade dos parâmetros do solo.

CONCLUSÃO

Conforme apresentado na seção anterior ambas as análises, determinística e probabilística, mostraram que o talude está instável, na iminência de romper-se, para as condições em que foram mensurados os parâmetros geotécnicos. Contudo apenas a análise probabilística permite uma noção de quão seguro é o talude.

A análise probabilística permitiu avaliar as chances do talude ruir assim como de manter-se estável. Salienta-se que para as quatro primeiras combinações da Tabela 4 o talude apresentou FS maior que um, indicando estabilidade. Assim mesmo um talude com fator de segurança abaixo de um ainda pode permanecer estável. Contudo a recíproca deste raciocínio é verdadeira. Um talude que apresente FS maior que um, ainda pode apresentar probabilidade de falha elevadas.

Conforme apresentado ambas as análises são viáveis para avaliar segurança do talude. A determinística destaca-se por um resultado de fácil interpretação e por menor custo computacional. Contudo a análise probabilística fornece uma base de dados mais abrangentes que permite mensurar melhor o risco de movimento de massa e facilita a tomada de decisão.

REFERÊNCIA

AOKI, Nelson; CARLOS, USP–São. Dogma do fator de segurança. **SEFE VI–Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo**, v. 1, p. 9-42, 2008.

FABRICIO, João Vicente Falabela. **Análise probabilística da estabilidade de taludes e contenção**. 2006. Dissertação de mestrado. PUC – RIO

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-57, outubro 2001.

FLORES, Emerson Alex Figueroa. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. 2008. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

FILHO, A. R.; CORTEZ, A. T. C. A problemática socioambiental da ocupação Urbana em áreas de risco de deslizamento da “Suíça Brasileira”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, p. 33-40, 2010.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

MORALES, Marlene Susy Tapia. **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas-não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático**. 2013. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

MORGENSTERN, N. R. Managing risk in geotechnical engineering. In: **Proceeding of the 10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. 1995. p. 102-126.

RAMOS, Dimas Leão. **Avaliação da estabilidade de um talude na avenida Pierre Chalita, Maceió - AL**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas - UFAL.

SAMPAIO, Thales de Queiroz et al. **A atuação do serviço geológico do Brasil (CPRM) na questão de riscos e resposta a desastres naturais**. 2013.

SANDOVAL, Martin Alexander Purizaga. **Análise probabilística e determinística da estabilidade de taludes**. 2012. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica - PUC-RIO

WHITMAN, Robert V. Organizing and evaluating uncertainty in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 7, p. 583-593, 2000.