

Análise geoestatística da estabilidade de um talude rodoviário

Nelson Henrique Joly

UFPR, Curitiba, Brasil, nelsonjoly91@gmail.com

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

UTFPR, Guarapuava, Brasil, petroniomello@utfpr.edu.br

RESUMO: O transporte rodoviário no Brasil é o principal sistema logístico. A obstrução de alguma rodovia devido a causas naturais é um problema que ocorre frequentemente. É imprescindível conhecer métodos que possam estabilizar taludes, em especial os rodoviários. Este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade de um talude rodoviário, situado em Queluz no Estado de São Paulo, através do método probabilístico de Monte Carlo. As análises foram efetuadas através do software desenvolvido pela Geostudio chamado Slope/W. As análises prosseguiram de retroanálise identificando as condições que se encontravam o talude. quanto maior for a resistência do solo menor serão os custos com elementos de reforço, tornando-se de tamanha importância a correta determinação dos parâmetros geotécnicos do perfil.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, rodoviário, monte carlo, análise probabilística

1 INTRODUÇÃO

Problemas relacionados às encostas acarretam diversos problemas para a sociedade, tanto econômicos quanto relacionados à perda de vidas humanas. No caso particular de um talude rodoviário, existe além das dificuldades inerentes à ruptura de um talude a ocorrência do bloqueio do fluxo de rodovias, que poderão em um caso extremo, causar o isolamento de alguma cidade.

Os fenômenos de instabilidade de taludes continuam sendo um dos grandes problemas da Mecânica dos Solos no que se refere aos aspectos teóricos da previsão do seu mecanismo de desencadeamento, correta quantificação dos parâmetros e a exata análise dos esforços resistentes (Caputo, 1987).

1.1 Análise de estabilidade de taludes

Os atuais métodos para a análise de estabilidade de taludes baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo-rígido plástico, na iminência de entrar em um processo de escorregamento (MASSAD, 2010).

Alternativamente aos métodos determinísticos, atualmente, existem métodos probabilísticos para a análise de estabilidade de taludes. No presente trabalho, o método estatístico utilizado é o Método de Monte Carlo.

Este método é usado em diversas áreas do conhecimento sendo considerado um método direto e exato (FARIAS E ASSIS, 1998).

Segundo EL-Ramly (2001) a simulação de Monte Carlo se destaca sobre as demais análises probabilísticas por não exigir uma compreensão matemática e estatística tão apurada, pois fornece uma função distribuição de probabilidade sem que seja necessário assumir uma forma para esta curva.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo verificar os fatores de segurança do talude através de análises feitas considerando-se o método probabilístico de Monte Carlo para as situações mais críticas identificadas na retro análise.

2 DESCRIÇÃO DO CASO ESTUDADO

O talude está situado na pista sul da Rodovia Presidente Dutra, no município de Queluz, estado de São Paulo. Trata-se de um trecho

aterado, onde houve instabilização da massa de solo na lateral do aterro de encontro com a ponte sobre um rio. O talude encontra-se em uma das rodovias mais movimentadas do Brasil. Considerando-se este aspecto, poderia ter ocorrido a interdição da pista, o que acarretaria diversos transtornos aos usuários.

Foi considerado, neste estudo, que o N.A fosse horizontal. A Figura 1 apresenta uma vista do talude rompido.



Figura 1: Vista da ruptura, a partir do encontro oposto da ponte.

A proximidade da ruptura a rodovia impôs uma situação de alto risco para o fluxo, uma vez que se ocorresse um progresso da instabilização esta poderia atingir o greide da rodovia.

Na véspera do escorregamento foi registrado que a profundidade do nível de água estava acima do comumente registrado.

Para esta conclusão, foi feita uma análise da variação de valores de leitura obtidos de uma régua linimétrica instalada em um dos pilares da ponte próxima ao talude em estudo. Verificou-se que era registrada uma taxa média de dois metros de lâmina de água, na cota 478,5 metros acima do nível do mar.

No dia do acidente, a água encontrava-se na cota 484,5 metros acima do mar, gerando uma lâmina de água de oito metros conforme visto

na Figura 2.



Figura 2 Nível de água registrado à véspera do escorregamento

2.1 Aspectos geotécnicos do terreno

Para definição do perfil geotécnico do local de execução da obra foram realizadas sondagens a percussão além de uma análise tátil-visual preliminar do terreno local. As sondagens com ensaio SPT foram realizadas conforme a norma NBR 6484:2001.

O ensaio SPT foi realizado em três pontos sobre o talude. O subsolo local pode ser caracterizado como uma camada de aterro de silte argiloso, micáceo, muito mole a mole com espessura variável de 6 a 10 metros (aterro de formação do greide da via). Abaixo do aterro encontra-se uma camada de solo residual composto por argila siltosa, estendendo-se até o final das sondagens, a cerca de 10 a 15 metros.

O nível de água horizontal foi detectado por ocasião das sondagens, a profundidades que variam entre 1,5 metros no pé do talude e 10 metros no topo do talude.

Pode-se verificar, na Figura 3, o perfil do terreno com os valores das sondagens realizadas em três pontos.

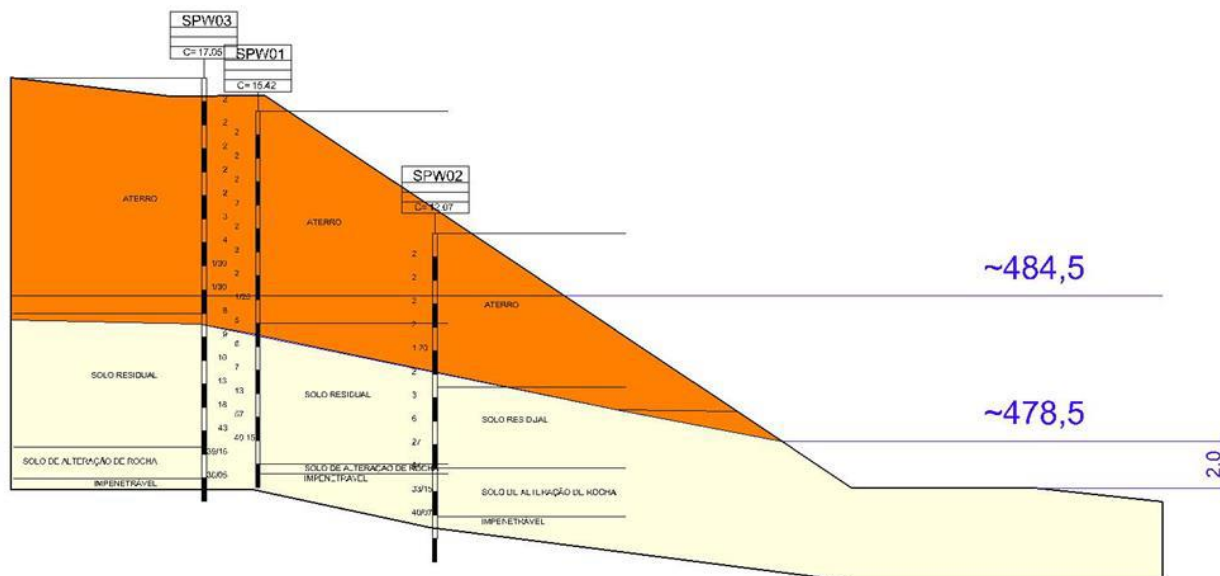


Figura 3: Geometria do talude com o resultado das sondagens

2.2 Dados básicos para a análise

Devido à natureza dos resultados das sondagens SPT na camada de solo residual, decidiu-se por subdividir a camada. Portanto, na camada de solo residual tem-se uma subcamada logo abaixo do aterro chamada “Camada A” e logo abaixo desta, a “Camada B”.

O ângulo de atrito não drenado pelo método de Teixeira (1996 apud Cintra et al., 2011, P.45) através do índice de resistência a penetração é dado pela Equação (1).

$$\phi = \sqrt{20N_{spt}} + 15 \quad (1)$$

A partir do N_{spt} obtemos outros parâmetros importantes do solo. O peso específico de solos argilosos é definido na Tabela 1

Tabela 1: Peso específico de solos argilosos (ABNT NBR 6484:2001)

NSPT	Consistência	γ_n (kN/m ³)
≤ 2	Muito mole	13
3 a 5	Mole	15
6 a 10	Média	17
11 a 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

A partir das correlações apresentadas serão definidos os parâmetros geotécnicos adotados para as análises. A Tabela 2 apresenta os

valores adotados para o número de golpes do ensaio SPT e dos valores do peso específico.

Tabela 2: Parâmetros geotécnicos adotados (NSPT e Peso específico).

Camada	NSPT	γ_n (kN/m ³)
Aterro	2	15 kN/m ³
Aterro Sat.	2	16 kN/m ³
Camada A	11.5	18 kN/m ³
Camada B	33	21 kN/m ³

Ao sofrer saturação com a elevação do nível do lençol freático o peso específico do aterro tem seu valor acrescido, pois, soma-se com o peso da água.

A Tabela 3 fornece os dados de coesão e ângulos de atrito adotados. Os valores da coesão foram obtidos através das interpretações das sondagens e com aqueles obtidos através de interpretações conforme Guidicini e Nieble (1976) para materiais da mesma gênese.

Tabela 3: Parâmetros geotécnicos adotados (coesão e ângulo de atrito).

Camada	Coesão	Ângulo de atrito
Aterro	15kPa	21°
Aterro Sat.	9kPa	21°
Camada A	18kPa	30°
Camada B	23kPa	40°

Observa-se, a partir da tabela 3, que o valor de coesão para o aterro sofreu um decréscimo acentuado, tendo seu valor reduzido para quase a metade do valor considerado na situação não

saturada. Esta redução surge em função da diminuição da “coesão aparente” do solo, que ocorre quando da saturação de um solo, como consequência da redução da sucção interna. Cabe lembrar que a saturação do solo, que está na franja capilar, reduz drasticamente a interação entre as fases sólido, água e ar que gera a pressão intersticial negativa, conhecida como sucção.

Para a consideração da variação dos parâmetros em estudo na análise probabilística e cálculo dos FS, foi aplicada a recomendação de Della Avanzi (1995) que sugere a variação de 10% do valor de cada parâmetro. A seguir, são apresentadas tabelas 4, 5, 6 e 7 com os valores de coesão, ângulo de atrito, peso específico mínimo e máximos obtidos com esta consideração. São também apresentados os valores de desvio padrão correspondentes para cada situação.

As modelagens realizadas neste artigo foram realizadas utilizando o Software Slope/W (2007).

Cabe mencionar que, dentre os parâmetros estudados, o ângulo de atrito e o peso específico são os menos suscetíveis a variações, enquanto coesão e nível de água são mais suscetíveis a variações.

Tabela4: Variação do parâmetro peso específico para as camadas do talude

Camada	Mínimo	Máximo	Desv. Pad
Aterro	13,5kN/m ³	16,5 kN/m ³	1,5
Aterro Sat.	14,4kN/m ³	17,6kN/m ³	1,6
Camada A	16,2kN/m ³	19,8kN/m ³	1,8
Camada B	23,1kN/m ³	18,9kN/m ³	2,1

Tabela 5: Variação do parâmetro coesão para as camadas do talude

Camada	Mínimo	Máximo	Desv. Pad
Aterro	13,5 kPa	16,5 kPa	1,5
Aterro Sat.	8,1 kPa	9,9 kPa	0,9
Camada A	16,2 kPa	19,8 kPa	1,8
Camada B	20,7 kPa	25,3 kPa	2,3

Tabela 6: Variação do parâmetro ângulo de atrito para as camadas do talude

Camada	Mínimo	Máximo	Desv. Pad
Aterro	18,9°	23,1°	2,1
Aterro Sat.	18,9	23,1°	2,1
Camada A	27°	33°	3
Camada B	36°	44°	4

2.3 Modelos utilizados nas análises

Após serem realizadas as interpretações do modelo geotécnico, geometria e níveis do lençol freático normal e no dia anterior a ruptura foram criados modelos dentro do software Slope/w simulando essas situações.

A sobrecarga simulando o fluxo de veículos da rodovia foi adotada conforme a norma brasileira NBR 7188:1982 como uma carga distribuída de 5 kN/m², trem tipo classe 45.

A Figura 4 representa a situação “normal” do reservatório, quando a lâmina de água estava na cota 478,5 metros (2 metros de lâmina d’água).

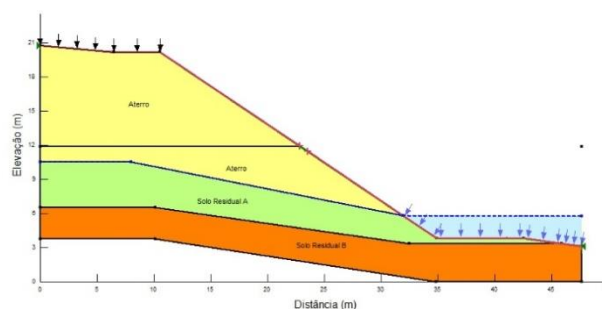


Figura 4: Representação gráfica do modelo utilizado nas análises(reservatório normal).

A Figura 5 representa a situação “cheia” do reservatório, quando a lâmina de água estava na cota 484,5 metros (8 metros de lâmina d’água). Com a subida do lençol freático temos então uma parcela saturada do aterro.

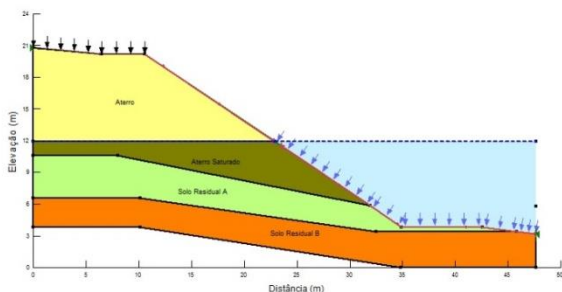


Figura 5: Representação gráfica do modelo utilizado nas análises (reservatório cheio)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, são apresentados detalhes sobre os modelos escolhidos para representar as situações pesquisadas. Estas situações abrangem a possibilidade de o reservatório de água estar com cota normal de enchimento (478,5 m) e sua elevação até a cota de 484,5 m.

Assim, são discutidos os resultados obtidos e verificadas quais as possíveis causas para o escorregamento do talude.

3.1 Análises obtidas com o reservatório “normal”

A Figura 4 apresenta o detalhamento do modelo usado para análise do caso em estudo. Para o caso do aterro, procurando-se detalhar um pouco mais a modelagem, sua seção foi subdividida em uma parte saturada e outra não.

Observa-se, na figura 6, para o caso estudado, que não existe valor menor do que 1 no gráfico do fator de segurança em função da frequência. Assim, nesta situação, o talude encontra-se estável.

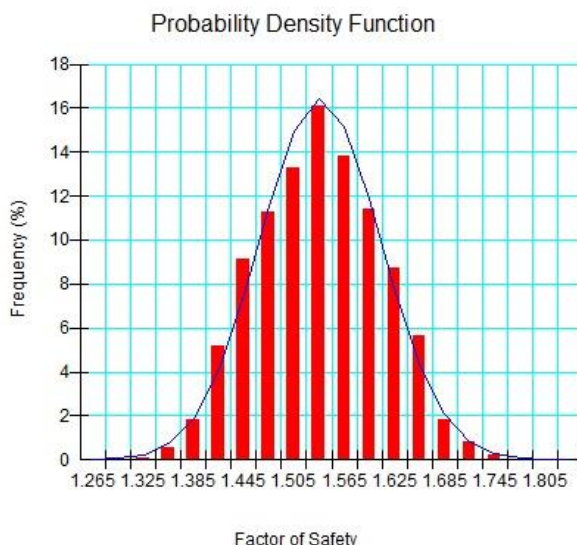


Figura 6 Curva da frequência do fator de segurança

Além disto, pode-se observar, na tabela 8, os resultados de valor médio de fator de segurança, índice de confiabilidade, probabilidade de ruptura, desvio padrão, valor mínimo e máximo de fator de segurança obtidos a partir de 2000 tentativas usando o modelo de Monte Carlo.

Tabela 8: Parâmetros obtidos na análise realizada

Média do FS	1,5363
Índice de confiabilidade	7,317
Probabilidade de ruptura (%)	0,0
Desvio Padrão	0,073
Mínimo FS	1,3268
Máximo FS	1,7542

A figura 7 apresenta o círculo provável de ruptura, onde se obteve o menor fator de segurança para esta situação. Observa-se que a região acima da região saturada do aterro é a que apresenta maior probabilidade de ruptura.

Este comportamento, já era esperado, considerando-se os parâmetros de resistência do solo que correspondem a esta camada. O FS obtido é de 1,5363. Nesta situação, a camada de aterro não se encontra na zona provável de ruptura.

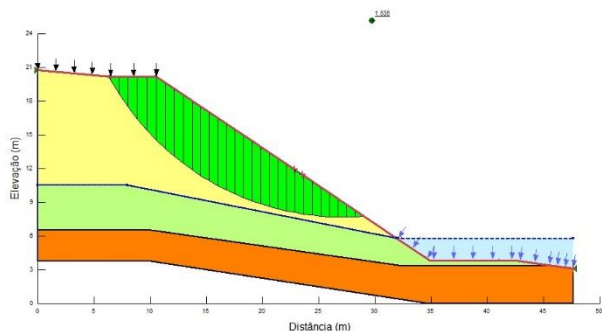


Figura 7. Provável superfície de ruptura e FS correspondente para o caso do reservatório com cota normal.

3.2 Análises obtidas com o reservatório “cheio”

A figura 5 apresenta o detalhamento do modelo usado para análise do caso em estudo. Para o caso do aterro, procurando-se detalhar um pouco mais a modelagem, sua seção foi subdividida em uma parte saturada e outra não.

Novamente, observa-se, para o caso estudado, que não existe valor menor do que 1 (um) no gráfico do fator de segurança em função da frequência. Assim, nesta situação, o talude encontra-se estável, conforme pode ser verificado na figura 8.

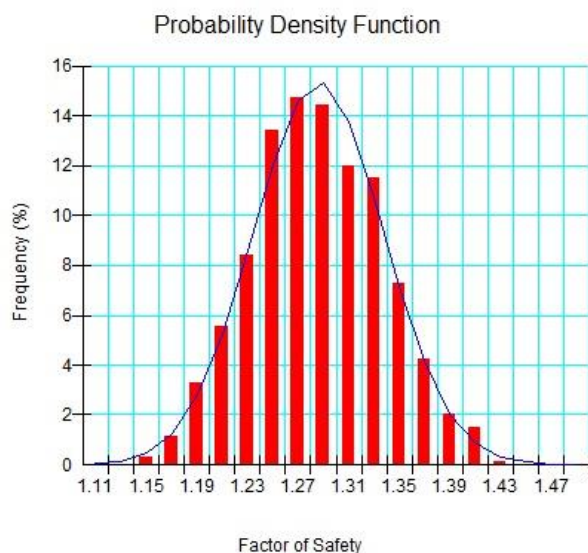


Figura 8: Curva da frequência do fator de segurança

A tabela 9 apresenta os resultados de valor médio de fator de segurança, índice de confiabilidade, probabilidade de ruptura, desvio padrão, valor mínimo e máximo de fator de segurança obtidos a partir de 2000 tentativas usando o modelo de Monte Carlo.

Tabela 9: Parâmetros obtidos na análise realizada

Média do FS	1,286
Índice de confiabilidade	5,531
Probabilidade de ruptura (%)	0,0
Desvio Padrão	0,052
Mínimo FS	1,1405
Máximo FS	14281

Da mesma forma que no estudo anterior, pode-se notar, na figura 9, o círculo provável de ruptura, onde se obteve o menor fator de segurança para esta situação.

Observa-se, agora, que a região do aterro saturado, cuja coesão teve seus valores reduzidos pela saturação, está incluída na zona de probabilidade de ruptura.

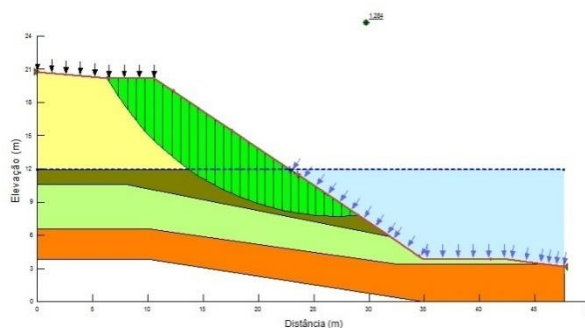


Figura 9: Provável superfície de ruptura e FS correspondente para o caso do reservatório com cota a 12 metros.

4 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada sugere que a utilização da recomendação de Dell’AVanzi (1995) para o cálculo do FS pelo método de diferenças divididas possa ser usada para obtenção de parâmetros máximo e mínimo a serem aplicados em estudos com o método de Monte Carlo.

Pode-se considerar a redução do valor da coesão para o solo do aterro saturado como consequência da saturação da franja capilar, com consequente diminuição da contribuição da sucção para a estabilidade da massa de solo.

Verificou-se que as camadas A e B não influenciaram no fator de segurança por não estarem contidas na superfície de ruptura.

Resumidamente, pode-se creditar que uma das causas mais prováveis de ruptura do talude tenha sido o rebaixamento rápido do rio.

Provavelmente o decréscimo da tensão efetiva resultante do processo de rebaixamento rápido acabou gerando uma redução dos

parâmetros resistentes do solo

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7188.
Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestres. Rio de Janeiro, 1982.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6484.
Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento som SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- Caputo, H. P.; **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos S.A., 1987.
- Cintra, José; Aoki, Nelson; Albiero, José. **Fundações diretas: projeto geotécnico.** São Paulo: Oficina de textos, 2011.
- Dell’Avanzi, Eduardo., **Confiabilidade e probabilidade em análises de estabilidade de taludes.** Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC RIO, Rio de Janeiro, 1995
- El-Ramly, H. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice.** Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Edmonton, Alberta, Canada, 2001.
- Farias, M.M. e Assis, A. **Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados a estabilidade de taludes.** Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG. Brasília, 1998.
- Guidicini, N; Nieble, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 1976.
- Massad, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia.** São Paulo: editora Ofinina de Textos, 2ª edição, 2010.
- Morales, M.S.T Susy, **Análise de confiabilidade de taludes em condições saturadas – não saturadas via análise limite no espaço cônico quadrático.** Departamento de Engenharia Civil – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC RIO, Rio de Janeiro, 2013.