

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Emerson Alex Figueroa Flores**

**Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes  
Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alberto S. F. Jardim Sayão



**Emerson Alex Figueroa Flores**

## **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Alberto S. F. Jardim Sayão**  
Orientador  
Puc - Rio

**Prof. Sérgio Augusto B. Fontoura**  
Puc - Rio

**Prof. Leonardo B. Becker**  
UFRJ

**Prof. Michéle Dal Toé Casagrande**  
UFCE

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de fevereiro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Emerson Alex Figueroa Flores**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidad Ricardo Palma (Lima-Perú) em 2003. Trabalhou na área de projetos, construção e supervisão de obras de Mineração. Ingressou em 2006 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa experimental.

#### Ficha Catalográfica

Emerson Alex Figueroa Flores

Flores, Emerson Alex Figueroa

Análises probabilísticas da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo / Emerson Alex Figueroa Flores ; orientador: Alberto S. F. Jardim Sayão. – 2008.

v., 178 f. : il. ; 29,7 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estabilidade de taludes. 3. Análises probabilísticas. 4. Variabilidade espacial. 5. Probabilidade de ruptura. I. Sayão, Alberto S. F. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

A minha esposa Kathia com amor  
Para os meus queridos pais, Benito e Domitila.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus por estar sempre quando mais necessite, e por todas as graças recebidas.

Agradeço à Kathia, minha Esposa, por tudo o apoio, compreensão e por ter sido minha fonte de inspiração e motivação.

Aos meus queridos pais Benito e Domitila pelo grande apoio, confiança e amor. Graças por acreditar em meus sonhos e por a ajuda recebida durante todos meus projetos.

A meu querido irmão Enrique, graças pelo apoio e confiança.

Aos meus sogros Felipe e Erenia, pelo apoio e ajuda para lograr este objetivo.

Ao Professor Alberto Sayão, pela orientação, amizade e grande ajuda para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores da PUC-Rio, graças pela formação.

A todos os amigos e companheiros de estudos do curso de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio.

À CAPES pela ajuda financeira indispensável ao desenvolvimento deste trabalho.

## Resumo

Flores, Emerson Alex Figueroa; Jardim, Alberto de Sampaio Ferraz. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo.** Rio de Janeiro, 2008. 178p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Freqüentemente as análises de estabilidade de taludes são feitas por métodos determinísticos, nos quais é obtido um Fator de Segurança (FS). Estes métodos não quantificam as incertezas existentes nas variáveis de entrada (parâmetros de resistência) na análise. Tampouco mostram detalhes sobre qual variável afeta mais o resultado. Os métodos probabilísticos permitem superar estes problemas. A presente pesquisa tem como objetivo comparar dois métodos probabilísticos geralmente utilizados (Estimativas Pontuais e Segundo Momento). Três projetos utilizados comumente na geotecnia são analisados: barragem de rejeitos, talude de solo e aterro sobre argila mole. Um aspecto importante na análise probabilística é a quantificação adequada do desvio padrão. É sabido que as propriedades dos solos mostram uma correlação no espaço, pelo que o desvio padrão calculado por métodos clássicos da estatística é superestimado em comparação ao valor real no campo. El-Ramly (2001) desenvolveu uma metodologia para o cálculo da probabilidade de ruptura considerando a correlação espacial das propriedades do solo. Esta metodologia é de difícil aplicação prática. Serão, portanto, avaliadas na presente pesquisa as técnicas geralmente usadas de probabilidade e estabilidade de taludes, juntamente com um fator de correção proposto por Vanmarcke (1977a). Estas técnicas de probabilidade de estabilidade de taludes são factíveis de serem utilizadas junto com este fator de correção. Verificou-se que o Método de Segundo Momento é de mais fácil utilização, e portanto adequado para emprego em projetos geotécnicos.

## Palavras-chave

Estabilidade de Taludes, Análises Probabilísticos, Variabilidade Espacial, Probabilidade de Ruptura.

## Abstract

Flores, Emerson Alex Figueroa; Jardim, Alberto de Sampaio Ferraz. **Probabilistic Analysis of Slope Stability Considering Spatial Variability of Soil**. Rio de Janeiro, 2008. 178p. Msc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The analysis of slope stability is often determined by deterministic methods, in which a Factor of Security (FS) is obtained. These methods do not quantify the uncertainty in the input variables (strength parameters). Neither these methods show details which variable affects mostly the outcome results. The probabilistic methods allow overcoming these restrictions. This study aims at comparing two probabilistic methods of general use (Point Estimates and First Order Second Moment). Three projects commonly used in geotechnical engineering are analyzed: tailings dam, slope soil and embankment on soft clay. An important aspect of the probabilistic analysis is the proper quantification of the standard deviation. It is known that the soil properties show a correlation in space, so the standard deviation, calculated by traditional methods of statistics, is overestimated when compared to the real field value. El-Ramly (2001) developed a methodology for calculating the probability of failure considering the spatial correlation of the soil properties. This methodology is difficult to apply in practice. The present study will therefore evaluate the techniques generally used in probability of failure of slopes. These probability techniques applied to slope stability can be used together with a correction factor proposed by Vanmarcke (1977b). The Second Moment Method was found to be easier to use, and therefore more suitable for geotechnical projects.

## keywords

Slope Stability, Probabilistic Analysis, Spatial Variability, Probability of failure.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	19
2 CONCEITOS BÁSICOS DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA	22
2.1. Introdução	22
2.2. Variáveis Aleatórias	22
2.3. Função Densidade de Probabilidade	23
2.4. Tratamento Estatístico dos Dados	27
3 INCERTEZAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS	38
3.1. Introdução	38
3.2. Fontes de Incerteza	39
3.3. Variabilidade Espacial dos Parâmetros dos Solos	45
3.4. Estimativa dos Erros Sistemáticos	56
3.5. Uso da Média Espacial na Quantificação da Variabilidade Espacial dos Solos	58
4 ANÁLISES DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES	71
4.1. Introdução	71
4.2. Análise Determinística de Estabilidade de Taludes	72
4.3. Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes	73
4.4. Superfície de Deslizamento Crítica	98
5 BARRAGEM DE REJEITOS SYNCRUDE	99
5.1. Considerações do Projeto	100
5.2. Descrição da Pilha 23	101
5.3. Estratigrafia	102
5.4. Parâmetros de Resistência	102
5.5. Poropressões	107



5.6. Análise Determinística da Estabilidade do Talude	111
5.7. Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes	112
5.8. Conclusões	121
6 DESLIZAMENTO EM LODALEN, NORUEGA (1954)	122
6.1. Introdução	122
6.2. Estratigrafia e Propriedades do Solo	123
6.3. Poropressões	125
6.4. Análises Determinísticas de Estabilidade de Taludes	129
6.5. Análises Probabilísticas da Estabilidade	130
6.6. Análises Probabilísticas com Variações da inclinação do Talude	140
6.7. Análises Probabilísticas Considerando Coeficientes de Correlação entre os Parâmetros de Resistência	145
6.8. Conclusões	147
7 INVESTIGAÇÃO DO ATERRO EM MUAR	149
7.1. Introdução	149
7.2. Estratigrafia do Terreno e Características do Aterro	150
7.3. Propriedades de Resistência do Solo de Fundação	151
7.4. Propriedades de Resistência do Aterro	153
7.5. Fator de Correção de Bjerrum	154
7.6. Análise Determinística de Estabilidade de Taludes	155
7.7. Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes	156
7.8. Análises Probabilísticas para Diferentes Alturas do Aterro	161
7.9. Conclusões	164
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	165
8.1. Conclusões	165
8.2. Sugestões	167
BIBLIOGRAFÍA	168

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Função de distribuição cumulativa.	23
Figura 2.2 - Variação de uma densidade de probabilidade normal, para vários valores de $\mu$ , $\sigma^2$ .	24
Figura 2.3 - Distribuições log-normal da variável x.	26
Figura 2.4 – Histograma típico.	28
Figura 2.5 – “Three Sigma Rule” , Daí e Wand (1992).	31
Figura 2.6 – “Three Sigma Rule” aplicado graficamente na obtenção dos parâmetros de resistência c e $\phi$ , Duncan (2000).	31
Figura 2.7 – Correlação negativa forte entre duas variáveis, Holtz e Krizek (1972).	34
Figura 2.8 - Correlação positiva baixa entre duas variáveis, Holtz e Krizek (1972).	34
Figura 2.9 – Efeito da não remoção da tendência no cálculo da variância ou Cov, em dados de N do SPT em areias, Baecher e Christian (2003).	37
Figura 3.1 – Perfil da permeabilidade do solo de um depósito glacial, Terzaghi, Peck e Mesri (1996).	39
Figura 3.2 – Fontes de incerteza nos parâmetros, El-Ramly (2001).	40
Figura 3.3 – Fator de correção da resistência não drenada $S_u$ , Bjerrum (1972).	43
Figura 3.4 – Distribuição espacial em dois conjuntos de dados com histogramas semelhantes, El-Ramly (2001).	46
Figura 3.5 – Variação espacial das propriedades em dois solos, modificado de Baecher e Christian (2003)	46
Figura 3.6 – Modelo de variabilidade espacial, aplicados a medidas de pressão de um dilatômetro, DeGroot (1996).	47
Figura 3.7 – Modelo de variabilidade espacial sem tendência.	48
Figura 3.8 - Modelo de variabilidade do solo, Neter et al (1990).	49
Figura 3.9 - Funções usuais de uma tendência, Baecher e Christian (2003).	50

Figura 3.10 – Componentes da função de autocovariância, DeGroot (1996).	54
Figura 3.11 – Semivariograma de dados de palheta, Baecher e Christian (2003).	55
Figura 3.12 – Redução do desvio padrão produto de incrementos de $z_i$ , modificado de Vanmarcke (1983).	59
Figura 3.13 - Variabilidade espacial inerente do solo, Phoon e Kulhawy (1999a).	60
Figura 3.14 – Definição de fator de redução da variância, Vanmarcke (1983).	61
Figura 3.15 – Função de variância versus a média de intervalos $\Delta z$ , normalizados com respeito à escala de flutuações, Vanmarcke (1983).	63
Figura 3.16 – Coeficiente de correlação entre dois pares de médias locais $(\Delta z_1, \Delta z_2)$ , modificado de Vanmarcke (1983).	64
Figura 3.17 – Distância de autocorrelação horizontal ou vertical, El-Ramly (2001).	65
Figura 3.18 – Definição de escala de flutuações.	68
Figura 3.19 – Determinação de escala de flutuações vertical, Phoon e Kulhawy (1999a).	69
Figura 4.1 – Probabilidade de ruptura de estacas, Lacasse e Nadim (1996).	73
Figura 4.2 – Conceito de análise probabilísticas de estabilidade de taludes.	74
Figura 4.3 – Probabilidade de ruptura vs Índice de confiabilidade $(\beta)$ .	77
Figura 4.4 – Probabilidades de ruptura admissíveis, Baecher (1982b).	79
Figura 4.5 - Probabilidades de ruptura, US Army Corps of Engineers (1995).	79
Figura 4.6 - Risco social aceitável proposto pelo departamento de planejamento de Hong Kong para deslizamentos, Baecher e Christian (2003).	80
Figura 4.7 - Probabilidade de ruptura crítica para barragens, proposta pela British Columbia Hydro, Canadá, Nielsen et al (1994).	80
Figura 4.8 – Estimativas pontuais da função $f(x)$ .	88

Figura 4.9 – Subdivisão da superfície de deslizamento dentro de uma camada, El-Ramly (2001).	95
Figura 4.10 – Modelagem da variabilidade espacial de um parâmetro de entrada sobre uma superfície de deslizamento, El-Ramly (2001).	96
Figura 5.1 – Vista em planta das pilhas e lagoa de rejeitos.	100
Figura 5.2 – Geometria e estratigrafia da seção 53+00E.	102
Figura 5.3 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto para o material Kca.	104
Figura 5.4 – Localização dos piezômetros na zona de estúdio.	107
Figura 5.5 – Poropressões ao longo da seção 53+00E na camada Kca	107
Figura 5.6 – Poropressões ao longo da seção 53+00E na camada Pgs.	109
Figura 5.7 – Posição da linha freática dentro do rejeito.	110
Figura 5.8 – Superfícies de ruptura críticas.	111
Figura 5.9 – Contribuição de cada variável na variância de FS.	115
Figura 5.10 – Análise probabilística pelo método de segundo momento, com distribuição normal do fator de segurança.	117
Figura 5.11 - Análise probabilística pelo método de segundo momento com distribuição log-normal do fator de segurança.	118
Figura 5.12 - Análise probabilística pelo método de estimativas pontuais, com distribuições normal e log-normal do fator de segurança.	118
Figura 5.13 - Contribuição de cada variável na variância de FS, para uma distância de autocorrelação ( $\rho$ ) de 33m.	120
Figura 6.1 – Seção transversal do talude em estudo.	124
Figura 6.2 – Correlação entre ângulo de atrito e a coesão da argila marinha de Oslo.	125
Figura 6.3 – Posição dos piezômetros e da linha freática no talude.	126
Figura 6.4 – Distribuição das cargas de pressão, considerando todos os piezômetros.	126
Figura 6.5 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro A.	127
Figura 6.6 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro B.	127
Figura 6.7 – Distribuição das cargas de pressão, no piezômetro C.	128
Figura 6.8 – Superfícies de deslizamento determinísticas.	130

Figura 6.9 – Distribuições de carga piezométrica com a profundidade – piezômetro A.	131
Figura 6.10 – Contribuição na variância do fator de segurança das cinco variáveis, considerando o total do desvio padrão.	133
Figura 6.11 – Contribuição na variância do fator de segurança das três variáveis, considerando o total do desvio padrão.	134
Figura 6.12 – Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento com distribuição normal do FS.	136
Figura 6.13 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição log-normal do FS.	137
Figura 6.14 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição normal do FS.	137
Figura 6.15 - Probabilidade de ruptura obtida no método de segundo momento, com distribuição log-normal do FS.	138
Figura 6.16 - Probabilidade de ruptura obtida no método de estimativas pontuais, com distribuição normal e log-normal do FS.	138
Figura 6.17 - Probabilidade de ruptura obtida no método de estimativas pontuais, com distribuição normal e log-normal do FS.	139
Figura 6.18 – Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes inclinações de taludes: método de Bishop.	141
Figura 6.19 - Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes inclinações de taludes: método de Spencer.	142
Figura 6.20 – Variação da probabilidade de ruptura no talude 4h:1v, para diferentes distâncias de autocorrelação ( $r_0$ ), método de segundo momento.	143
Figura 6.21 – Variação da probabilidade de ruptura no talude 4h:1v, para diferentes distâncias de autocorrelação ( $r_0$ ), método de estimativas pontuais.	144
Figura 6.22 – Valores de probabilidade de ruptura em função do coeficiente de correlação.	146
Figura 7.1 - Superfície de ruptura observada no aterro sobre solo mole, Brand e Premchitt (1989)	150

Figura 7.2 – Estratigrafia e resistência não drenada encontrada no campo.	151
Figura 7.3 – Ruptura do aterro após 100 dias de construção.	152
Figura 7.4 – Fator de correção da resistência não drenada.	154
Figura 7.5 – Superfície de ruptura segundo Bishop.	156
Figura 7.6 – Probabilidade de ruptura, método de Bishop.	157
Figura 7.7 – Contribuição na variância do fator de segurança dos parâmetros.	157
Figura 7.8 – Probabilidade de ruptura, método de segundo momento, distribuição normal do fator de segurança.	159
Figura 7.9 - Probabilidade de ruptura, método de segundo momento, distribuição log-normal do fator de segurança.	159
Figura 7.10 - Probabilidade de ruptura, método de estimativas pontuais, distribuição normal e log-normal do fator de segurança.	160
Figura 7.11 – Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes alturas do aterro, distribuição normal do FS.	162
Figura 7.12 - Variação da probabilidade de ruptura e fator de segurança para diferentes alturas do aterro, distribuição log-normal do FS.	162
Figura 7.13 – Variação da probabilidade de ruptura para diferentes distâncias de autocorrelação numa altura do aterro de 4.0m.	163

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Proporção de área sobre a distribuição normal.	25
Tabela 2.2 – Valores do fator $N_n$ para estimar o desvio padrão, Burintong e May (1970).	30
Tabela 2.3 – Coeficientes de variação típicos de solos.	36
Tabela 3.1 – Funções de correlação e variância.	62
Tabela 3.2 – Relação entre distância de autocorrelação e escala de flutuações.	66
Tabela 3.3 – Distâncias de autocorrelações $r_0$ , El-Ramly (2001).	67
Tabela 3.4 – Valores de escala de flutuações reportadas na literatura.	69
Tabela 4.1 – Importância da análise probabilística de estabilidade de taludes, Duncan (2001).	74
Tabela 4.2 – Representação esquemática do método de estimativas pontuais.	90
Tabela 5.1 – Características geotécnicas do argilito (kca).	103
Tabela 5.2 – Características geotécnicas da areia glacial (Pgs).	105
Tabela 5.3 – Coeficiente de poropressão $r_u$ , nos intervalos propostos na camada kca.	108
Tabela 5.4 – Coeficiente de poropressão $r_u$ , camada Pgs.	110
Tabela 5.5 – Resultados das análises determinísticas.	111
Tabela 5.6 – Propriedades das variáveis aleatórias consideradas na análise.	112
Tabela 5.7 – Probabilidades de ruptura, considerando distribuição normal.	113
Tabela 5.8 - Probabilidades de ruptura, considerando distribuição log-normal.	113
Tabela 5.9 – Probabilidades de ruptura encontradas com o método de Bishop.	119
Tabela 5.10 – Efeito da correção da variância da variabilidade espacial.	120
Tabela 6.1 – Parâmetros de resistência, argila aarinha.	124

Tabela 6.2 – Valores de carga piezométrica no talude.	128
Tabela 6.3 – Fatores de segurança determinísticos.	129
Tabela 6.4 – Combinações da tendência das cargas piezométricas.	131
Tabela 6.5 – Análises probabilísticas com 5 variáveis aleatórias, distribuição normal.	132
Tabela 6.6 - Análises probabilísticas com 5 variáveis aleatórias, distribuição log-normal.	132
Tabela 6.7 - Análises probabilística com 3 variáveis aleatórias.	134
Tabela 6.8 – Probabilidade de ruptura com o método de Bishop.	136
Tabela 6.9 - Probabilidade de ruptura com o método de Spencer.	136
Tabela 6.10 - Efeito da correção da variância da variabilidade espacial.	140
Tabela 6.11 - Efeito da correção da variância da variabilidade espacial.	140
Tabela 6.12 – Comparação das probabilidades de ruptura, segundo momento.	144
Tabela 6.13 - Comparação das probabilidades de ruptura, segundo momento.	144
Tabela 6.14 - Comparação das probabilidades de ruptura, estimativas pontuais.	144
Tabela 6.15 - Comparação das probabilidades de ruptura, estimativas pontuais.	145
Tabela 7.1 - Propriedades físicas e mecânicas das camadas argilosas.	152
Tabela 7.2 – Linhas de tendência da resistência não drenada ( $S_u$ ).	153
Tabela 7.3 – Propriedades de resistência do aterro.	153



## Lista de Símbolos

$f_x(x)$	Função densidade de probabilidade
$F_x(x)$	Função acumulativa da densidade de probabilidade
$E(x)$	Média da amostra
$\mu$	Média populacional
$V(x)$	Variância da amostra
$\sigma$	Desvio padrão da amostra
$\sigma'$	Desvio padrão da população
$\sigma'^2$	Variância da população
$Z$	Variável aleatória padronizada
$FS$	Fator de segurança
$E(FS)$	Média do fator de segurança
$\sigma(FS)$	Desvio padrão do fator de segurança
$Cov(X)$	Coefficiente de variação
$r_x$	Amplitude da amostra
$x_{max}$	Máximo valor da amostra
$x_{min}$	Mínimo valor da amostra
$S_u$	Resistência ao cisalhamento não drenada do solo
$c$	Coessão do solo
$\emptyset$	Ângulo de atrito do solo
$C(x, y)$	Covariância entre duas variáveis

$\rho(x, y)$	Coefficiente de correlação entre duas variáveis
$x, y$	Variáveis aleatórias
$C_x(r)$	Auto-covariância de uma variável
$R_x(r)$	Coefficiente de auto-correlação de uma variável
$t_i$	Tendência de uma variável aleatória
$\varepsilon_i$	Componente residual da variável aleatória
$\varepsilon_{ei}$	Erros aleatórios das propriedades dos solos
$\varepsilon_{vi}$	Erros inerentes à variabilidade das propriedades dos solos
$a_0$	Intercepto da linha de tendência
$a_1$	Pendente da linha de tendência
$n$	Número de dados
$\gamma_x(r)$	Semivariograma
$\delta$	Escala de flutuações
$r_0$	Distância de autocorrelação
$r_{0h}$	Distância de autocorrelação horizontal
$r_{0v}$	Distância de autocorrelação vertical
$r_{0-e}$	Distância de autocorrelação isotrópica equivalente
$\Gamma$	Fator de redução na variância
$\beta$	Índice de confiabilidade
$P(r)$	Probabilidade de ruptura
$\Phi(-\beta)$	Curva normal padronizada