



**João Vicente Falabella Fabrício**

**Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e  
Contenções**

**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.

Orientadores: Prof. Alberto S. F. Jardim Sayão  
Prof Paulo César de Almeida Maia



**João Vicente Falabella Fabrício**

## **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**

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. Paulo César de Almeida Maia**  
Co-orientador  
UENF

**Prof. Anna Laura Lopes da Silva Nunes**  
COPPE

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

**Prof. Willy de Alvarenga Lacerda**  
COPPE

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

Rio de Janeiro, 20 de fevereiro de 2006

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

### **João Vicente Falabella Fabrício**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 1986. Pós-graduação Executiva em Meio Ambiente COPPE-UFRJ no ano de 2001. Coordenou e atuou em inúmeros projetos fiscalização de implantações e restaurações de pavimentos rodoviários e urbanos. Participou das pesquisas “Monitoramento de Variáveis Geoambientais com o Emprego de Imagens Orbitais” e “Estabelecimento para critérios de qualidade para agregados pétreos” contratadas pelo Instituto de Pesquisa Rodoviárias respectivamente em 1992 e 1998.

#### Ficha Catalográfica

Fabrício, João Vicente Falabella

Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções / João Vicente Falabella Fabrício ; orientadores: Alberto S. f. Jardim Sayão, Paulo César de Almeida Maia. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

170 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Estatística. 3. Análises Determinísticas de Ruptura de Taludes e Muro de Contenção. 4. Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contensões. I. Sayão, Alberto S. F. Jardim. II. Maia, Paulo César de Almeida. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A todos aqueles que  
direta ou indiretamente  
contribuíram para este trabalho.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Sayão, que com seu vasto conhecimento técnico proporcionou um excelente respaldo para a conclusão desse trabalho.

Ao Prof. Paulo Maia, que pela competência, amizade e dedicação teve grande importância nessa pesquisa.

À minha mulher pela ajuda prestada.

## Resumo

Fabício, João Vicente Falabella; Sayão, Alberto S. F. Jardim; Maia, Paulo César de Almeida. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções**. Rio de Janeiro, 2006. 170p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os projetos geotécnicos são, em geral, avaliados através do cálculo de um coeficiente de segurança, obtido de forma determinística. A presente pesquisa tem como objetivo a comparação de dois métodos probabilísticos (Estimativas Pontuais e Segundo Momento) empregados em análises de estabilidade. Os métodos probabilísticos quantificam as incertezas oriundas da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, calculando-se um índice de confiabilidade ( $\beta$ ), que expressa o quanto o fator de segurança é confiável. No entanto, o índice  $\beta$  é um parâmetro relativo, pois não exprime todas as incertezas contidas em um projeto geotécnico. O trabalho apresenta uma comparação das análises probabilísticas de estabilidade da barragem de Curuá-Una, no Pará, e de um muro de arrimo, em São Fidélis, no Estado do Rio de Janeiro. No caso da barragem, estudou-se a influência de um eventual aumento no nível d'água do reservatório no cálculo da probabilidade de ruptura. Para o muro, foram consideradas diversas alturas do nível d'água no retroaterro a montante. As análises enfocaram, ainda, detalhes dos métodos probabilísticos, no que se refere à aplicabilidade para projetos práticos. Verificou-se que o método do Segundo Momento é de mais fácil utilização em geotecnia. Recomenda-se, portanto, a sua aplicação em conjunto com as análises determinísticas, mais usuais na prática.

## Palavras-chave

Métodos probabilísticos; Segundo Momento; Análises determinísticas.

## Abstract

Fabício, João Vicente Falabella; Sayão, Alberto S. F. Jardim (Advisor); Maia, Paulo César de Almeida (Advisor). **Probabilistic analyses of slopes and retainments stability**. 170p. Rio de Janeiro, 2006. MSc. Dissertation – Departamen of Civi Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Geotechnical projects are generally assessed through the calculus of the safety factor obtained by deterministic methodologies. The purpose of the present research work is to compare two probabilistic methods (Estimate Punctual and Second Moment) employed in stability analyses. Probabilistic methods quantify the uncertainties derived from the variability of geotechnical parameters, calculating a confidence ratio that expresses how reliable the safety factor is. However, the ratio is a relative parameter, since it does not account for all the uncertainties contained in a geotechnical project. In view of this situation, the study compares the stability probabilistic analyses of Curuá-Una dam, in Pará, and those of a retaining wall in São Fidélis, Rio de Janeiro. Regarding the dam, the influence of a possible rise in the resevoir water level in the calculus of failure probability has been investigated. In respect to the wall, several water levels have been considered in the upstream backfill. Moreover, the analyses have focused on the details of probabilistic methods and their application to practical projects. It has been verified that the Second Moment Method is more easily employed in geothecnics. Therefore, it is recommended that it should be applied together with the deterministic analyses currently used in practice.

## Keywords

Probabilistic methods; Second Moment; deterministic analyses.

## Sumário

1 Introdução	17
2 Análises Determinísticas de Estabilidade	20
2.1 Introdução	20
2.2 Métodos Determinísticos de estabilidade de taludes	20
2.2.1 Hipóteses Básicas Consideradas nos Métodos de Equilíbrio Limite	21
2.2.2 Método das Fatias	21
2.2.3 Método de Fellenius (1927)	22
2.2.4 Método de Bishop Simplificado (1955)	24
2.2.5 Método de Janbu Simplificado (1955)	25
2.2.6 Método de Spencer (1967)	26
2.2.7 Método de Morgenstern & Price (1965)	29
2.2.8 Método de Sarma (1973)	30
2.2.9 Comentários	30
2.3 Empuxo de Terra	31
2.3.1 Teoria de Rankine (1857)	31
2.3.2 Teoria de Coulomb (1776)	34
2.3.3 Métodos das Cunhas	35
2.4 Análise Determinística de um Muro de Contenção	36
2.4.1 Segurança contra o Tombamento	36
2.4.2 Segurança contra o Escorregamento	37
2.4.3 Segurança contra a Ruptura e Deformação Excessiva do Terreno de Fundação	38
2.4.4 Segurança Contra a Ruptura do Conjunto Solo/Muro	39
3 Análises Probabilísticas de Estabilidade	40
3.1 Introdução	40
3.2 Conceitos de Estatística	40

3.2.1 Definições Gerais	40
3.2.2 Tendência Central	41
3.2.3 Medidas de Dispersão	42
3.2.4 Distribuição da Probabilidade dos Parâmetros Geotécnicos	44
3.2.5 Distribuição Normal	45
3.2.6 Distribuição Log-Normal	47
3.2.7 Estimativa de Intervalos de Confiança	47
3.3 Tipos de Análises Probabilísticas	50
3.4 Formulação do Índice de Confiabilidade e da Probabilidade de Ruptura	51
3.5 Métodos Probabilísticos	55
3.5.1 Simulação de Monte Carlo	55
3.5.2 Método das Estimativas Pontuais	56
3.5.3 Método do Segundo Momento de 1ª Ordem	58
3.6 Parâmetros para Análise Probabilística	62
3.6.1 Fontes de Incertezas	62
3.6.2 Erros Sistemáticos	62
3.6.3 Dispersão de Dados	63
3.7 Número Mínimo de Ensaios	63
3.8 Cálculo dos Momentos Probabilísticos do Ângulo de Atrito e da Coesão	66
3.8.1 Ensaio de Cisalhamento Direto	66
3.8.2 Ensaio Triaxial	67
3.9 Considerações Finais	67
 4 Análise Probabilística de Ruptura da Barragem de Curuá-Una para Diversos Níveis do Reservatório.	 69
4.1 Localização	69
4.2 Geometria, Parâmetros Geotécnicos e Posicionamento da Linha Freática.	70
4.3 Estudos Probabilísticos	73
4.3.1 Programa Determinístico	73
4.3.1.1 Dados de Entrada	74
4.3.1.2 Dados de Saída	74
4.3.2 Procedimentos e Resultados	74
4.4 Análises dos Resultados	78
4.4.1 Números de Variáveis	78
4.4.2 Fixação ou Não da Superfície de Ruptura	78
4.4.3 Comparação Entre os Métodos	80

5	Análise Probabilística de Um Muro de Contenção	82
5.1	Introdução	82
5.2	Localização Geográfica	82
5.3	Perfil do Talude	82
5.4	Parâmetros dos Solos	84
5.5	Programa Utilizado	87
5.5.1	Introdução	87
5.5.2	Dados de Entrada	87
5.5.2.1	Dados Geométricos em Relação à Geometria do Muro	87
5.5.2.2	Dados em Relação a Geometria do Solo e Suas Propriedades	87
5.5.2.3	Dados em Relação ao Nível D'água e as Cargas Atuantes	89
5.5.3	Cálculo do Empuxo	89
5.5.4	Dados de Saída	90
5.6	Análises Probabilísticas	90
5.6.1	Geometria do Muro de contenção	90
5.6.2	Parâmetros de Entrada	91
5.6.3	Análise de Sensibilidade	92
5.7	Análise dos Resultados	95
5.8	Comentários	102
6	Conclusões	106
6.1	Barragem de Curuá-Una	106
6.1.1	Fixação ou Não da Superfície de Ruptura	106
6.1.1	Comparação Entre os Métodos	106
6.2	Muro de Contenção	106
6.3	Conclusões Gerais	107
6.4	Sugestões para Futuras Pesquisas	108
7	Referências Bibliográficas	109
	Anexo 1 – Tabelas estatísticas	113
	Anexo 2 – Tabelas de cálculo do Capítulo 4	115
	Anexo 3 – Tabelas de cálculo do Capítulo 5	142

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Forças atuantes em uma fatia genérica	22
Figura 2.2 – Forças atuantes em uma fatia	23
Figura 2.3 - Fator $f_0$ em função do parâmetro $d/L$	26
Figura 2.4 – Forças atuantes na base da fatia	27
Figura 2.5 – Fator de segurança que satisfaz as equações 2.13 e 2.14	28
Figura 2.6 – Forças atuantes em uma fatia	29
Figura 2.7 – Empuxo de terra em um muro contendo um terreno com inclinação $\beta$ em relação a horizontal	32
Figura 2.8 – Distribuição das tensões horizontais em um solo coesivo	33
Figura 2.9 – Forças atuantes em uma possível cunha de ruptura.	34
Figura 2.10 – Equilíbrio das forças que atuam na cunha de ruptura	35
Figura 2.11 – Método das cunhas	36
Figura 2.12 – Forças atuantes em um muro de peso	37
Figura 2.13 – Distribuição de pressões no solo	38
Figura 2.14 – Distribuição triangular de pressões no solo	39
Figura 2.15 – Formas de instabilidade em um muro de contenção	39
Figura 3.1 – Distribuição estatística das médias das amostras da população densidade natural do solo	41
Figura 3.2 – Distribuição estatística das médias das amostras da população coesão do solo	43
Figura 3.3 – Comparação das dispersões entre as distribuições $\bar{X}_i$ e $\bar{Y}_i$	43
Figura 3.4 – Gráfico de uma distribuição normal	45
Figura 3.5 – Transformação linear da curva normal geral em curva normal padrão	46
Figura 3.6 – Gráfico de $X \times f(x)$ de uma distribuição log –normal	47
Figura 3.7 – Comparação entre a curva normal e as curvas de Student	48
Figura 3.8 – Curvas de distribuição de probabilidade do Fator de Segurança e a curva de Gauss normalizada	52
Figura 3.9 - Confiabilidade x Probabilidade de Ruptura	53
Figura 3.10 – Aumento do $\bar{FS}$ mantendo-se constante $\sigma_{FS}$	53

Figura 3.11 – Aumento do $\sigma_{FS}$ mantendo-se $\overline{FS}$ constante	54
Figura 3.12- Distribuição probabilística de duas curvas com desvios padrões diferentes	54
Figura 3.13 - Ângulo de Atrito x FS	61
Figura 3.14 - Densidade x FS	61
Figura 3.15 - Gráfico da Acurácia x Número de Ensaios	65
Figura 4.1 - Localização da Barragem de Curuá-Uma	69
Figura 4.2 - Desenho da Barragem de Coruá-Uma em escala deformada	70
Figura 4.3 – Posicionamento dos piezômetros ao longo da estaca 35	72
Figura 4.4 -Cota Piezométrica Para o Nível do Reservatório Igual a 67 m	73
Figura 4.5 – Influências dos parâmetros geotécnicos na variância do FS para o caso do NA igual a 67,0m e mantendo-se a superfície de ruptura fixa	75
Figura 4.6 - Fator de segurança em função do nível do reservatório	76
Figura 4.7 - Comparação do método do Segundo Momento de Primeira Ordem utilizando 3 variáveis e 18 variáveis	77
Figura 4.8 - Comparação entre os métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais utilizando para ambos 3 parâmetros e; fixando e deixando móvel a superfície de ruptura	77
Figura 4.9 - Razão da probabilidade de ruptura entre os métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais utilizando, para ambos, 3 parâmetros e fixando a superfície de ruptura.	78
Figura 5.1 – Levantamento topográfico planialtimétrico e localização da área de estudo	83
Figura 5.2 – Seção crítica da área de estudo e o perfil geológico	84
Figura 5.3 – Dados da geometria do muro	88
Figura 5.4 – Dados geométricos em relação ao solo	88
Figura 5.5 posição do nível d'água	89
Figura 5.6 – Valor do empuxo em relação ao ângulo da possível cunha de ruptura	90
Figura 5.7 – Geometria do muro de contenção usado na análise probabilística	92
Figura 5.8 – Análise de sensibilidade para o tombamento	93
Figura 5.9– Análise de sensibilidade para o deslizamento	93
Figura 5.10 – Análise de sensibilidade para o terreno de fundação	94
Figura 5.11 – Variação do fator de segurança contra o tombamento com a largura da base do muro e o nível d'água.	95

Figura 5.12 – Fator de segurança contra o deslizamento x largura da base do muro x nível d'água	96
Figura 5.13 – Fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação x largura da base do muro x nível d'água.	96
Figura 5.14 – Confiabilidade contra o tombamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento.	97
Figura 5.15 – Confiabilidade contra o deslizamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento de Primeira Ordem	97
Figura 5.16 – Confiabilidade contra a ruptura do solo de fundação x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento	98
Figura 5.17 – Confiabilidade contra o tombamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método das Estimativas Pontuais	98
Figura 5.18 – Confiabilidade contra o deslizamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método das Estimativas Pontuais	99
Figura 5.19 – Confiabilidade contra a ruptura do solo de fundação x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método das Estimativas Pontuais	99
Figura 5.20 – Variância do Fator de Segurança contra o tombamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento	100
Figura 5.21 – Variância do Fator de Segurança contra o deslizamento x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento.	100
Figura 5.22 – Variância do Fator de Segurança contra a ruptura do solo de fundação x largura da base do muro x nível d'água obtida através do método do Segundo Momento.	101

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Número de simulações necessárias para manter uma precisão ( $\epsilon\%$ ), com um nível de confiança ( $1-\alpha$ ), considerando $n$ variáveis aleatórias	56
Tabela 3.2 – Permutações possíveis usando-se 3 variáveis aleatórias	57
Tabela 3.3 – Coeficientes de variação para os parâmetros do solo	65
Tabela 4.1 – Parâmetros do solo	71
Tabela 4.2 – Posição dos piezômetros com as respectivas cotas para cada nível do reservatório	72
Tabela 4.3 – Resultados das análises	76
Tabela 5.1 - Pesos específico dos solos	85
Tabela 5.2 - Coesão e ângulo de atrito dos solos obtidos através de ensaios triaxiais e pelo método das combinações de tensões	85
Tabela 5.3 - Coesão e ângulo de atrito dos solos obtidos através de ensaios triaxiais e pelo método dos mínimos quadrados.	86
Tabela 5.4 - Coesão e ângulo de atrito dos solos obtidos através de ensaios de cisalhamento direto e pelo método das combinações de tensões.	86
Tabela 5.5 - Coesão e ângulo de atrito dos solos obtidos através de ensaios de cisalhamento direto e pelo método dos mínimos quadrados.	86
Tabela 5.6 – Estudo comparativo entre $\beta$ e $\beta^*$	105

## Lista de Símbolos

$\bar{X}$	Média
$\bar{R}$	Média da capacidade resistiva
$\bar{S}$	Média da capacidade solicitante
$\overline{FS}$	Fator de segurança média
$\gamma$	Peso específico
$\mu$	1º momento probabilístico
$\sigma$	Desvio padrão da população
$\beta$	Índice de confiabilidade calculado através do FS
$\beta^*$	Índice de confiabilidade calculado através da MS
$\varepsilon$	Precisão em %
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo do solo
$\sigma_1$	Tensão principal maior
$\sigma_3$	Tensão principal menor
$\sigma^2$	Variância da população
$\gamma_{nat}$	Peso específico natural
$\gamma_{sat}$	Peso específico saturado
C.V.	Coeficiente de variação
$c'$	Coesão do solo
$e$	Erro de amostragem
$E_a$	Empuxo ativo
$E_p$	Empuxo passivo
FS	Fator de segurança
MS	Margem de segurança
NA	Nível d'água
g.l.	Grau de liberdade
$h_{\alpha/2}$	Função de confiabilidade
Pr	Probabilidade de ruptura
$s$	Desvio padrão da amostra
$s^2$	Variância da amostra
$t_0$	Valor tabelado para g.l.

$u$	Poropressão
$V$	Variância
$z$	Variável aleatória padronizada
$\delta$	ângulo de atrito solo/muro
$\Phi(\beta)$	Curva normal padronizada