



Martin Alexander Purizaga Sandoval

**Análise determinística e probabilística
da estabilidade de taludes**

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. Celso Romanel

Rio de Janeiro

Julho de 2012



Martin Alexander Purizaga Sandoval

**Análise determinística e probabilística
da estabilidade de taludes**

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. Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Bernadete Ragoni Danziger

UERJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico

Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Julho de 2012

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

Martin Alexander Purizaga Sandoval

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Ricardo Palma (Lima-Peru) em 2006. Trabalhou na área de projetos e supervisão de obras de mineração. Ingressou em 2010 no curso de mestrado em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, na área de Geotecnia.

Ficha Catalográfica

Sandoval, Martin Alexander Purizaga

Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes / Martin Purizaga; orientador: Celso Romanel – 2012.

194 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Estabilidade de taludes. 3. Abordagem determinística. 4. Abordagem probabilística. 5. Anisotropia de resistência. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624

Agradecimentos

Agradeço a Deus por sempre me acompanhar em todo momento da minha vida.

Agradeço a minha maravilhosa família, que sempre estiveram para dar-me ânimos e força quando eu mais precisei, além do amor brindado durante todo este tempo longe de casa.

Ao Professor Celso Romanel pela orientação, companheirismo e exemplo de profissional.

Aos representantes da banca examinadora formada pelas professoras; Michéle Dal Toé Casagrande e Bernadete Ragoni Danziger, cujas observações ajudarão no meu crescimento profissional.

Aos meus colegas do curso de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio, em especial a Jackeline Castañeda; Lidiane Alves; Andrea Rojas; Alexandre Brandão e Ricardo Amado, por fazer este tempo mais simples para mim, e principalmente pela valiosa amizade.

Aos amigos que desde o Peru sempre me apoiaram em todo este tempo, como a Sra. Rosa Chung e Fiorella Rangel, fico grato com vocês.

A Rita de Cassia e Paula Enoy pelas informações fornecidas antes e durante o Mestrado.

À PUC-Rio e a CAPES pela ajuda financeira indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Sandoval, Martin Alexander Purizaga; Romanel, Celso (Orientador)
Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes. Rio de Janeiro, 2012. 194p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Na abordagem determinística compara-se o método do equilíbrio limite com o método dos elementos finitos na análise 2D da estabilidade de taludes em solo, determinando-se o valor do fator de segurança para vários exemplos de aplicação. No método dos elementos finitos quantifica-se a região da potencial superfície de ruptura que se comporta sob extensão, analisando-se a ocorrência de anisotropia de resistência ao longo da potencial superfície de deslizamento para situações envolvendo diferentes tipos de solo, ângulos de inclinação do talude e sequências de escavação. Conclui-se que o efeito da anisotropia é pouco significativo quando o ângulo de atrito do solo exceder a 10^0 . Por outro lado, devido à crescente aplicação da abordagem probabilística na prática da engenharia geotécnica, foram realizadas análises de confiabilidade de taludes empregando os métodos de Monte Carlo, do hipercubo latino e o método das estimativas pontuais alternativas, comparando-se os diferentes resultados obtidos e discutindo as principais vantagens da aplicação destes métodos.

Palavras-chave

Estabilidade de taludes; abordagem determinística; abordagem probabilística; anisotropia de resistência.

Abstract

Sandoval, Martin Alexander Purizaga; Romanel, Celso (Advisor)
Deterministic and probabilistic analysis of slope stability, Rio de Janeiro, 2012. 194p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the deterministic approach the limit equilibrium method and the finite element method are compared for 2D analysis of soil slope stability, calculating the value of the safety factor in several numerical examples. In the finite element method the region of soil under strain extension is determined and the occurrence of strength anisotropy is investigated along the potential sliding surface for situations involving different types of soil, angles of slope inclination and excavation sequences. It is concluded that the effect of the anisotropy is negligible when the angle of friction is higher than 10^0 . Moreover, due to the increasing application of the probabilistic approach in the practice of geotechnical engineering, some reliability analyses were carried out using the Monte Carlo method, the Latin hypercube method and the method of alternative point estimates, comparing their different outputs and discussing the main advantages of their application in the analysis of soil slope stability problems.

Keywords

Slope stability; deterministic approach; probabilistic approach; strength anisotropy.

Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Objetivos	24
1.2.	Organização da dissertação	25
2	Revisão Bibliográfica	26
2.1.	Métodos de análise de estabilidade de taludes	26
2.1.1.	Métodos de equilíbrio limite	26
2.1.2.	Métodos dos elementos finitos	36
2.1.3.	Métodos da análise limite	41
2.2.	Influência da anisotropia na análise de estabilidade de taludes	43
2.3.	Métodos probabilísticos para avaliação da estabilidade de taludes	45
2.3.1.	Métodos de análise probabilística	47
3	Abordagem determinística na análise de estabilidade de taludes	49
3.1.	Método dos elementos finitos na estabilidade de talude	49
3.1.1.	Método Direto	51
3.1.2.	Método do Equilíbrio Limite Aperfeiçoado	54
3.1.3.	Justificativa para o uso do MEF	54
3.1.4.	Requisitos para a análise dos elementos finitos	55
3.1.5.	Mecanismos de ruptura	57
3.1.6.	Fatores que afetam a determinação do mecanismo de ruptura	57
3.1.7.	Programa computacional – PLAXIS 2D	58
3.2.	Influência da anisotropia na estabilidade de taludes	62
3.3.	Dependência da resistência ao cisalhamento não drenado sobre a tensão principal intermediária	68
3.4.	Resistência anisotrópica representativa para análises de estabilidade de taludes	71
4	Abordagem probabilística de estabilidade de taludes	73
4.1.	Incertezas na engenharia geotécnica	73

4.1.1. Variabilidade do solo	74
4.1.2. Tipos de incerteza	81
4.1.3. Variáveis aleatórias	82
4.2. Análises de confiabilidade	88
4.2.1. Margem de segurança e fator de segurança	88
4.2.2. Probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade	89
4.2.3. Probabilidade aceitável de ruptura na análise de confiabilidade	91
4.2.4. Probabilidade de ruptura considerando a distribuição normal	92
4.3. Modelos probabilísticos utilizados na análise de confiabilidade	93
4.3.1. Método de Monte Carlo	93
4.3.2. Método do Hipercubo Latino	94
4.3.3. Método das estimativas pontuais	96
4.4. Análise de sensibilidade	106
4.5. Diferenças entre as abordagens probabilísticas e determinísticas	110
5 Exemplos de aplicação	113
5.1. Exemplo Nº1: Escavação aberta da rua “Congress”	113
5.1.1. Análise determinística	114
5.1.2. Análise probabilística	119
5.2. Exemplo Nº2: Talude de solo homogêneo	126
5.2.1. Análise determinística	127
5.2.2. Análise probabilística	131
5.3. Exemplo Nº3: Aterro de teste no depósito de “Champlain”	134
5.3.1. Análise determinística	136
5.3.2. Análise probabilística	142
5.4. Exemplo Nº4: Escavação em solo mole	147
5.4.1. Análise determinística	148
5.4.2. Análise probabilística	153
5.5. Exemplo Nº5: Construção incremental do aterro	157
5.5.1. Análise determinística	158
5.5.2. Análise probabilística	164
5.6. Exemplo Nº6: Escavação a céu aberto na mina Robert.	166
5.6.1. Análise determinística	167

5.6.2. Análise probabilística	173
6 Conclusões e Sugestões	177
6.1. Análise determinística	177
6.2. Análise probabilística	179
6.3. Conclusões gerais	180
6.4. Sugestões	181
Referências bibliográficas	182

Lista de figuras

Figura 2.1 Pontos de mudança que definem a superfície de deslizamento (Adaptado de Celestino e Duncan, 1981).	33
Figura 2.2 O esquema da aproximação analítica de Baker (Adaptado de Baker, 1980)	35
Figura 2.3 Função densidade de probabilidade do fator de segurança e a probabilidade de ruptura. (Adaptado de Christian et al., 1994).	47
Figura 3.1 Curva típica de deslocamento nodal (adaptado de Donald e Giam, 1988)	53
Figura 3.2 Critério de ruptura do Mohr Coulomb com parâmetros de resistência efetiva e não drenados (adaptado de Bringreuve et al., 2010)	60
Figura 3.3 A figura mostra a idéia principal de um modelo elástico perfeitamente plástico (adaptado de Bringreuve et al., 2010)	61
Figura 3.4 Superfície de escoamento do modelo Cam Clay Modificado no plano p' - q (adaptado de Bringreuve et al., 2010)	62
Figura 3.5 Anisotropia da resistência não drenada das argilas de Londres (adaptado de Lo, 1965)	65
Figura 3.6 Variação da resistência não drenada com a tensão de adensamento em ensaios do tipo HPS e VPS (adaptado de Duncan e Seed, 1966)	66
Figura 3.7 Sistema de tensões possíveis por meio de diversos equipamentos para ensaios CK_0U (adaptado de Ladd, 1991 – Depois de Germaine, 1982)	68
Figura 3.8 Variação da resistência não drenada no estado de deformação plana e compressão triaxial com a tensão de adensamento (adaptado de Duncan e Seed, 1966)	70
Figura 3.9 Relações da resistência não drenada normalizada para os principais ensaios de cisalhamento de laboratório (adaptado de Kulhawy e Mayne, 1990).	71

Figura 3.10 Número de estabilidade vs. Ângulo do talude (adaptado de Lo, 1965).	72
Figura 4.1 Incertezas nas estimativas das propriedades do solo (Adaptado de Phoon e Kulhawy, 1999a).	76
Figura 4.2 Modelo de variabilidade espacial, aplicados a medidas de pressão de um dilatômetro (Adaptado de DeGroot, 1996).	77
Figura 4.3 Variabilidade espacial inerente do solo, (Adaptado de Phoon e Kulhawy, 1999a).	78
Figura 4.4 Exemplo de distribuições de: (a) assimetria positiva e (b) assimetria negativa.	85
Figura 4.5 Função distribuição cumulativa CDF e função densidade de probabilidade FDP, de uma variável aleatória contínua.	86
Figura 4.6. a) Distribuição de capacidade C e demanda D , ambos considerados como variáveis aleatórias. (b) Distribuição da margem de segurança MS considerada como variável aleatória.	90
Figura 4.7 Probabilidade de ruptura P_f versus o índice de confiabilidade β , para uma distribuição normal. (Adaptado de Christian et al., 1994)	91
Figura 4.8 Fluxograma do método de Monte Carlo (Adaptado de Wang et al., 2011).	95
Figura 4.9 Concentrações da função de densidade de probabilidade (adaptado de Rosenblueth, 1981).	98
Figura 4.10 Concentrações para uma função de duas variáveis aleatórias considerando $\gamma_1[x] = 0$ (adaptado de Rosenblueth, 1981).	100
Figura 4.11 Número de avaliações de FS , exigido por vários métodos probabilísticos (Adaptado de Fredlund e Fredlund, 2011).	105
Figura 4.12 Um modelos simples de análise de decisão para estabilidade de taludes (a) Diagrama de influência, (b) Árvore de decisão (Adaptado de Gitirana Jr., 2005).	106
Figura 4.13 Diagrama do evento probabilístico do tipo tornado para o modelo W-GHA (Adaptado de Fredlund e Fredlund, 2011).	110
Figura 5.1 Geometria do talude	115
Figura 5.2 Malha de elementos finitos	115

Figura 5.3 Distribuição das tensões totais σ_x .	116
Figura 5.4 Distribuição das tensões totais σ_y .	116
Figura 5.5 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	116
Figura 5.6 Distribuição das deformações cisalhantes γ_{xy} .	117
Figura 5.7 Malha deformada ampliada 4E-2 vezes.	117
Figura 5.8 Potenciais superfícies de ruptura determinadas pelo MEL e MEF.	117
Figura 5.9 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx} .	119
Figura 5.10 Distribuição da probabilidade de ruptura pelo coeficiente de variação normalizado considerando uma distribuição de probabilidade Normal.	125
Figura 5.11 Variação do índice de confiabilidade pelo coeficiente de variação normalizado considerando uma distribuição de probabilidade Normal.	126
Figura 5.12 Relação entre o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura para o Fator de segurança considerando uma distribuição de probabilidade normal.	126
Figura 5.13 Geometria do modelo	127
Figura 5.14 Malha de elementos finitos	128
Figura 5.15 Distribuição das tensões cisalhantes σ_x .	128
Figura 5.16 Distribuição das tensões cisalhantes σ_y .	128
Figura 5.17 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	128
Figura 5.18 Distribuição das deformações cisalhantes.	129
Figura 5.19 Vetores de deslocamento incremental	129
Figura 5.20 Potenciais superfícies de ruptura determinadas pelo MEL e MEF.	129
Figura 5.21 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx} .	130
Figura 5.22 Porcentagem da área em extensão na superfície de ruptura em relação à inclinação do talude	131
Figura 5.23 Comparação dos métodos analisados entre a P_f e o ângulo de inclinação do talude, considerando uma distribuição de probabilidade normal e log-normal.	133
Figura 5.24 Comparação dos métodos analisados entre a β e o	

ângulo de inclinação do talude, considerando uma distribuição de probabilidade normal e log-normal.	134
Figura 5.25 Ensaio de laboratório que simulam as condições de tensão ao longo da superfície de ruptura (Adaptado de Bjerrum, 1973).	135
Figura 5.26 Geometria do modelo	137
Figura 5.27 Malha de elementos finitos	137
Figura 5.28 Distribuição das tensões totais σ_x .	137
Figura 5.29 Distribuição das tensões totais σ_y .	138
Figura 5.30 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	138
Figura 5.31 Comparação entre o deslocamento vertical observado e o predito do aterro (dados observados após La Rochelle <i>et. al.</i> , 1974).	139
Figura 5.32 Comparação entre o deslocamento horizontal observado e o predito (dados observados após La Rochelle <i>et. al.</i> , 1974).	139
Figura 5.33 Vetores do deslocamento incremental ampliado 3E2 vezes.	140
Figura 5.34 Malha deformada ampliada 2 vezes.	140
Figura 5.35 Distribuição das deformações totais principal ϵ_1 .	140
Figura 5.37 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx} .	141
Figura 5.38 Otimização do número de iterações.	143
Figura 5.39 Distribuição da probabilidade de ruptura pelo coeficiente de variação normalizado considerando uma distribuição de probabilidade Normal.	146
Figura 5.40 Variação do índice de confiabilidade pelo coeficiente de variação normalizado considerando uma distribuição de probabilidade Normal.	147
Figura 5.41 Geometria do modelo	149
Figura 5.42 Malha de elementos finitos	149
Figura 5.43 Distribuição das tensões totais σ_x .	149
Figura 5.44 Distribuição das tensões totais σ_y .	150
Figura 5.45 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	150
Figura 5.46 Distribuição das deformações totais principais ϵ_1 .	150

Figura 5.47 Vetores do deslocamento incremental.	151
Figura 5.48 Potenciais superfícies de ruptura determinadas pelo MEL e MEF.	151
Figura 5.49 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx} .	152
Figura 5.50 Efeitos das etapas de escavação na zona de extensão.	152
Figura 5.51 Porcentagem da área em extensão na superfície de ruptura em relação á inclinação do talude	153
Figura 5.52 Análise de sensibilidade da análise determinística.	156
Figura 5.53 Análise de sensibilidade da análise probabilística.	156
Figura 5.54 Geometria do exemplo	158
Figura 5.55 Malha de elementos finitos	158
Figura 5.56 Distribuição das tensões totais σ_x .	159
Figura 5.57 Distribuição das tensões totais σ_y .	159
Figura 5.58 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	159
Figura 5.59 Distribuição das deformações totais principais ϵ_1	159
Figura 5.60 Malha deformada ampliada 2E-3 vezes.	160
Figura 5.61 Potenciais superfícies de ruptura determinadas pelo MEL e MEF.	160
Figura 5.62 Comparação das superfícies de ruptura determinadas e observadas	161
Figura 5.63 Comparação entre os deslocamentos totais U_y , obtidos por fase única e análise incremental.	162
Figura 5.64 Comparação entre os deslocamentos totais U_x , obtidos por fase única e análise incremental.	162
Figura 5.65 Comparação entre as tensões totais σ_{xx} e σ_{yy} , obtidos por fase única e análise incremental.	163
Figura 5.66 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx} .	163
Figura 5.67 Análise de sensibilidade da análise determinística.	165
Figura 5.68 Análise de sensibilidade da análise probabilística	166
Figura 5.69 Geometria do modelo	167
Figura 5.70 Malha de elementos finitos	168
Figura 5.71 Distribuição das tensões totais σ_x .	168
Figura 5.72 Distribuição das tensões totais σ_y .	168

Figura 5.73 Distribuição das tensões cisalhantes σ_{xy} .	169
Figura 5.74 Região plastificada do solo na sexta etapa de escavação.	169
Figura 5.75 Distribuição das deformações totais principais ϵ_1	169
Figura 5.76 Distribuição das deformações cisalhantes γ_{xy}	169
Figura 5.77 Potenciais superfícies de ruptura determinadas pelo MEL e MEF	170
Figura 5.78 Malhas de elementos finitos considerando distintas quantidades de elementos: (a) FSM-SRM1=802; (b) FSM-SRM2=880; (c) FSM-SRM1=1249; (d) FSM-SRM1=2225).	171
Figura 5.79 Variação do <i>FS</i> considerando: LEM, MEF e as variações na quantidade de elementos que conformam a malha de elementos finitos do exemplo.	171
Figura 5.80 Influência do coeficiente de repouso K_0 no cálculo do <i>FS</i> .	172
Figura 5.81 Distribuição das deformações totais ϵ_{xx}	172
Figura 5.82 Valores de probabilidade de ruptura em função do coeficiente de correlação.	175
Figura 5.83 Resultado da análise de sensibilidade em uma direção considerando os parâmetros da coesão e o ângulo de atrito do solo.	176
Figura 5.84 Resultado da análise de sensibilidade em duas direções considerando os parâmetros da coesão e o ângulo de atrito do solo.	176

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Classificação dos métodos disponíveis na análise de estabilidade	28
Tabela 2.2 Suposições, condições de equilíbrio e incógnitas em procedimentos de Equilíbrio Limite (adaptado de Duncan e Wright, 2005)	29
Tabela 2.3 Influência da anisotropia para os casos: (a) solo homogêneo, (b) coesão aumentando linearmente com a profundidade (após Lo, 1965; Chen et al., 1975).	45
Tabela 3.1 Classificação do MEF para análises de estabilidade de taludes	51
Tabela 3.2 Parâmetro de tensão principal intermediária (b) e o ângulo de Lode.	69
Tabela 4.1 Fontes principais de incertezas na caracterização do solo	75
Tabela 4.2 Valores típicos para o coeficiente de variação (Adaptado de Lacasse e Nadim, 1996).	79
Tabela 4.3 Valores típicos para o coeficiente de variação (Adaptado de Lacasse e Nadim, 1996)	80
Tabela 4.4 Resumo da escala de flutuações de algumas propriedades geotécnicas (Adaptado de Phoon e Kulhawy, 1999a).	81
Tabela 4.5 Tipos de incertezas na caracterização do solo	82
Tabela 4.6 Probabilidade de ruptura aceitável na análise de estabilidade de taludes (Adaptado de Santamarina <i>et al.</i> , 1992)	92
Tabela 5.1 Parâmetros geotécnicos gerais do material	114
Tabela 5.2 Fator de segurança determinado pelo MEL e MEF	117
Tabela 5.3 Parâmetros estatísticos de resistência não drenada.	120
Tabela 5.4 Resultados das análises determinísticas.	122
Tabela 5.5 Resultados das análises probabilísticas.	122
Tabela 5.6 Resultados da análise de sensibilidade pelo método	

de Monte Carlo.	123
Tabela 5.7 Resultados da análise de sensibilidade pelo método do Hipercubo Latino	124
Tabela 5.8 Resultados da análise de sensibilidade pelo MEPA	124
Tabela 5.9 Parâmetros geotécnicos do material	127
Tabela 5.10 Fator de segurança determinado pelo MEL e MEF	130
Tabela 5.11 Porcentagem da área em extensão em relação à inclinação do talude	131
Tabela 5.12 Parâmetros estatísticos de resistência não drenada.	132
Tabela 5.13 Resultados da análise probabilística	133
Tabela 5.14 Parâmetros geotécnicos gerais do material de fundação para o modelo Cam Clay Modificado.	135
Tabela 5.15 Parâmetros geotécnicos gerais do material do aterro para o modelo Mohr - Coulomb.	136
Tabela 5.16 Parâmetros estatísticos considerados na análise.	142
Tabela 5.17 Resultados das análises probabilísticas	144
Tabela 5.18 Parâmetros estatísticos usados na análise de sensibilidade.	144
Tabela 5.19 Resultados da análise de sensibilidade pelo método de Monte Carlo.	144
Tabela 5.20 Resultados da análise de sensibilidade pelo método do Hipercubo Latino.	145
Tabela 5.21 Resultados da análise de sensibilidade pelo MEPA.	145
Tabela 5.22 Parâmetros geotécnicos gerais do material.	148
Tabela 5.23 Fator de segurança determinado pelo MEL e MEF.	151
Tabela 5.24 Porcentagem da área de extensão em relação à inclinação do talude.	153
Tabela 5.25 Resultados da análise de variação da inclinação do talude.	154
Tabela 5.26 Resultados das análises probabilísticas por cada método analisado.	155

Tabela 5.27 Resultados do diagrama tornado determinístico.	155
Tabela 5.28 Resultados do diagrama tomado probabilístico.	156
Tabela 5.29 Parâmetros geotécnicos gerais do material.	157
Tabela 5.30 Fator de segurança para cada etapa de lançamento.	160
Tabela 5.31 Parâmetros estatísticos considerados na análise.	164
Tabela 5.32 Resultados das análises probabilísticas	165
Tabela 5.33 Resultados do diagrama tornado evento probabilístico.	166
Tabela 5.34 Parâmetros geotécnicos gerais do material	167
Tabela 5.35 Fator de segurança para cada etapa de escavação	170
Tabela 5.36 Fator de segurança considerando diferentes valores para K_0 .	171
Tabela 5.37 Valores de Cov adotados para diversos casos de estabilidade de taludes.	173
Tabela 5.38 Parâmetros estatísticos	174
Tabela 5.39 Resultados das análises probabilísticas.	175

Lista de símbolos

α	inclinação da superfície de deslizamento para a horizontal
β	índice de confiabilidade
b	parâmetro da tensão principal intermediária.
C	distribuição de capacidade
\hat{C}	valores estimados da capacidade
\overline{C}	valores médios da capacidade
c_{uk}	resistência ao cisalhamento não drenada na ruptura
C	coesão
c_h	coesão horizontal
c_v	coesão vertical
ρ_{XY}	correlação de duas variáveis
$Cov[\cdot]$	coeficiente de variação
D	distribuição de demanda
\hat{D}	valores estimados da demanda
\overline{D}	valores médios da demanda
d	desvio padrão normal correspondente ao nível de confiança
$E[\cdot]$	valor esperado
E	módulo de young
e	índice de vazios
e_{init}	índice de vazios iniciais
ε_i	componente residual da variável aleatória
ε	nível de confiança desejado (0-100%)
$f(x)$	função distribuição de probabilidade
$F(x)$	função densidade de probabilidade
f	ângulo entre a tensão principal menor e o plano de ruptura
$y(x)$	função de coordenadas
$\mathcal{N}[x]$	assimetria da variável aleatória
i	ângulo de inclinação
K_0	coeficiente de repouso do solo
K_0^{NC}	coeficiente de repouso para o solo normalmente adensado
K_0^{OC}	coeficiente de repouso para o solo pré-adensado

K	grau de anisotropia
κ	índice de inchamento
λ	índice de compressão
M	tangente da linha de estado crítico
μ_x	média da variável aleatória
m	número de variáveis aleatórias de entrada
N_s	número de estabilidade
N	número de tentativas requeridas pelo MCM
N	fator de modificação da resistência
ν	coeficiente de poisson
P_f	probabilidade de ruptura
p'	tensão média efetiva
p_c	tensão de pré-adensamento
ϕ	ângulo de atrito
ϕ_h	ângulo de atrito horizontal
ϕ_v	ângulo de atrito vertical
ψ	ângulo de dilatância
q	tensão de desvio
ρ	coeficiente de correlação
s_h	resistências ao cisalhamento nas direções horizontal
s_v	resistências ao cisalhamento nas direções vertical
s	resistências ao cisalhamento
s_u^{TC}	resistência ao cisalhamento não drenada em compressão triaxial
s_u^{PS}	resistência ao cisalhamento não drenada em deformação plana
σ	desvio padrão
σ_1	tensão principal maior na direção vertical
σ_3	tensão principal menor na direção horizontal
t_i	tendência de uma variável aleatória
τ_f	tensão de cisalhamento
θ	ângulo da tensão principal maior com a horizontal
b	ângulo de Lode
$Var[\cdot]$	variância
X	variável aleatória
x_i	variação espacial das propriedades do solo

Lista de abreviaturas

MEPA	método das estimativas pontuais alternativas
MSB	método de Bishop simplificado
CDF	função densidade cumulativa
FEA	análise dos elementos finitos
MEF	método dos elementos finitos
FOSM	método do segundo momento de primeira ordem
<i>FS</i>	fator de segurança
GIM	método do incremento da gravidade
HLM	método do hipercubo latino
HPS	compressão horizontal de deformação plana
LAM	métodos da análise limite
LEM	método de equilíbrio limite
MCM	método de monte carlo
MDN	método dos deslocamentos nodais
OCR	razão de pré-adensamento
FDP	função densidade de probabilidade
<i>SM</i>	margem de segurança
SOF	escala de flutuação
MRR	método da redução da resistência
VPS	compressão vertical de deformação plana