



Rômulo Castello Henriques Ribeiro

**APLICAÇÕES DE PROBABILIDADE
E ESTATÍSTICA EM ANÁLISES GEOTÉCNICAS**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Alberto S. Ferraz Jardim Sayão



Rômulo Castello Henriques Ribeiro

APLICAÇÕES DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA EM ANÁLISES GEOTÉCNICAS

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

Prof. Alberto Sampaio Ferraz Jardim Sayão
Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. João Luis Pascal Roehl
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Ana Cristina Castro Fontenla Sieira
UERJ

Prof^a. Katia Vanessa Bicalho
UFES

Prof. Paulo Cesar de Almeida Maia
UENF

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de junho de 2008.

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

Rômulo Castello Henriques Ribeiro

Graduou-se em Engenharia Civil na UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em 1997. Obteve o título de mestre em Engenharia Civil (área de concentração: Geotecnia) pela PUC-Rio, em 2000. É professor da UFES e engenheiro consultor em projetos geotécnicos.

Ficha Catalográfica

Ribeiro, Rômulo Castello Henriques

Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas / Rômulo Castello Henriques Ribeiro ; orientador: Alberto S. Ferraz Jardim Sayão. – 2008.

161 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Probabilidade. 3. Estatística. 4. Recalques. 5. Ruptura. 6. Fundações. 7. Muros de arrimo. 8. Taludes. I. Sayão, Alberto S. Ferraz Jardim. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

A Deus, por iluminar meus caminhos.

Ao professor Alberto S. F. J. Sayão, pelo empenho na correção deste trabalho e por confiar em minhas propostas.

Ao professor, primo e amigo Reno R. Castello, pelos valiosos conselhos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Aos meus queridos pais, Vicente e Ana Maria, pelo carinho.

Em especial, à minha esposa Rachel, que com amor, carinho e companheirismo, criou um ambiente inspirador para o desenvolvimento deste trabalho.

Em especial, ao meu filho Rafael, pelas brincadeiras, pelo sorriso, pelo cafuné, por me acordar no meio da noite pedindo suco e dormir logo em seguida, pelos passeios de bicicleta, pelos beijos, pelos abraços e por uma infinidade de outros bons momentos que surgiram no decorrer desta tese, com o nascimento do nosso amado.

Resumo

Ribeiro, Rômulo Castello Henriques; Sayão, Alberto Sampaio Ferraz Jardim. **Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas**. Rio de Janeiro, 2008. 161p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em análises geotécnicas, previsões de deformações ou de fatores de segurança são desenvolvidas com base em métodos determinísticos, que admitem como fixos e conhecidos os parâmetros do solo ou da rocha. Entretanto, tais previsões são afetadas por incertezas provenientes da impossibilidade de reprodução das condições de campo em laboratório, da perturbação do solo devida à instalação de instrumentos, das ocorrências geomecânicas não detectadas durante a campanha de sondagens, da variabilidade inerente ao maciço, entre outras. O estudo da influência dessas incertezas sobre os cálculos determinísticos, com a possibilidade da quantificação do risco de insucesso associado a um projeto geotécnico, desenvolveu-se durante as últimas décadas com base nas teorias de probabilidade e estatística. O presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica de conceitos básicos de probabilidade e estatística, mostrando alguns avanços da aplicação desses conceitos na engenharia geotécnica. Visando apresentar formas de estimarem-se probabilidades de recalque inadmissível ou de ruptura são realizadas análises para os seguintes casos: recalques de argila mole solicitada por aterro e de fundações superficiais em areia, estabilidade de fundação superficial em solo residual e de fundação profunda em solo sedimentar, deslizamento de um muro de arrimo e estabilidade de um talude. Com o objetivo de inferir acerca dos fatores que influenciam as estimativas probabilísticas, para cada caso são realizadas comparações entre resultados obtidos com base em diferentes métodos probabilísticos e/ou determinísticos.

Palavras-chave

Probabilidade; estatística; recalques; ruptura; fundações; muros de arrimo; taludes.

Abstract

Ribeiro, Rômulo Castello Henriques; Sayão, Alberto Sampaio Ferraz Jardim. **Applications of Probability and Statistics in Geotechnical Analyses**. Rio de Janeiro, 2008. 161p. DSc Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In geotechnical analyses, forecasts of safety factors or deformations are developed on the basis of deterministic methods, that admit as fixed and known the parameters of the soil or the rock. However, such forecasts are affected by uncertainties proceeding from the reproduction impossibility of the field conditions in laboratory, of the disturbance of the soil under installation of instruments, of the not detected geomechanics occurrences during the soundings campaign, of the inherent variability to the soil, among others. The study of the influence of these uncertainties on the deterministic calculations, with the possibility of the risk quantification of failure associated with a geotechnical project, developed during the last decades on the basis in theories of probability and statistics. The present work make a bibliographical revision of basic concepts of probability and statistics, showing some advances of the application of these concepts in geotechnical engineering. With the objective to show forms of computing probabilities of rupture or of inadmissible settlement are make analyses for the following cases: settlement of fill on soft clay, settlement of superficial foundations in sand, stability of superficial foundation in residual soil, stability of deep foundation in sand, stability of retaining wall and dam slope stability. With the objective to verify the factors that influence the probabilist estimates, for each case is make comparisons between results given of different probabilist and/or deterministic methods.

Keywords

Probability; statistics; settlements; rupture; foundations; retaining walls; slopes.

Sumário

1. Introdução	23
2. Revisão bibliográfica	26
2.1. Introdução	26
2.2. Conceitos de probabilidade	26
2.2.1. Função de probabilidade	27
2.2.2. Momentos probabilísticos	28
2.2.3. Algumas distribuições probabilísticas	29
2.2.3.1. Distribuição normal	29
2.2.3.2. Distribuição lognormal	31
2.2.3.3. Distribuição gama	32
2.2.3.4. Distribuição qui-quadrado	32
2.2.3.5. Distribuição t de Student	33
2.3. Análise estatística	34
2.3.1. Análise gráfica da amostra	34
2.3.2. Análise aritmética da amostra	36
2.3.3. Obtenção de dados estatísticos para análises probabilísticas em estudos geotécnicos	37
2.3.4. Correções da variância devidas à variabilidade espacial do solo	39
2.3.5. Inferência estatística	42
2.4. Métodos Probabilísticos	45
2.4.1. Método do Segundo Momento de Primeira Ordem	45
2.4.2. Método das Estimativas Pontuais	47
2.4.3. Simulação de Monte Carlo	48
2.5. Confiabilidade	49
2.6. Risco Admissível	52
2.7. Aplicações de probabilidade e estatística na geotecnia	53
2.7.1. Distribuições estatísticas de parâmetros geotécnicos	54
2.7.2. Probabilidade e estatística em análises de aterro sobre argila mole	55

2.7.3. Probabilidade e estatística em análises de fundações superficiais	55
2.7.4. Probabilidade e estatística em análises de fundações profundas	57
2.7.5. Probabilidade e estatística em análises de estabilidade de muro de arrimo	58
2.7.6. Probabilidade e estatística em análises de estabilidade de taludes	59
3. Análises probabilísticas associadas a previsões de recalques	65
3.1. Introdução	65
3.2. Análise probabilística aplicada a previsões de recalques edométricos	65
3.2.1. Aplicação do Método do Segundo Momento	66
3.2.2. Aplicação do Método das Estimativas Pontuais	70
3.3. Análise probabilística aplicada a previsões de recalques imediatos de fundações superficiais apoiadas em areia	72
3.3.1. Análises determinísticas	74
3.3.1.1. Método de Schmertmann	74
3.3.1.2. Previsões determinísticas	77
3.3.2. Análise probabilística	78
3.4. Análise dos resultados	81
3.4.1. Análise dos resultados referentes a probabilidades associadas a recalques edométricos	81
3.4.2. Análise dos resultados referentes a probabilidades de recalques imediatos de fundações superficiais em areias e apreciação da metodologia proposta	82
4. Análises de probabilidade de ruptura de fundações	85
4.1. Introdução	85
4.2. Análise de probabilidade de ruptura de fundações superficiais	85
4.2.1. Probabilidades de ruptura de fundações superficiais pelo Método do Segundo Momento	87

4.2.2. Probabilidades de ruptura de fundações superficiais pelo Método das Estimativas Pontuais	90
4.3. Análise de probabilidade de ruptura de fundações profundas	92
4.3.1. Previsões determinísticas dos fatores de segurança	92
4.3.1.1. Formulações semi-empíricas para previsão de carga última de fundações profundas	93
4.3.1.2. Estimativas determinísticas de fatores de segurança associados à ruptura de um solo solicitado por uma estaca isolada	97
4.3.2. Análises de probabilidade de ruptura de uma estaca de concreto pré-moldado instalada em um solo sedimentar	98
4.3.2.1. Previsões de probabilidades de ruptura de fundações profundas pelo Método do Segundo Momento	99
4.3.2.2. Previsões de probabilidades de ruptura de fundações profundas pelo Método das Estimativas Pontuais	100
4.4. Análise dos Resultados	101
4.4.1. Considerações sobre os resultados obtidos na análise de probabilidade de ruptura de fundações superficiais	101
4.4.2. Considerações sobre os resultados obtidos na análise de probabilidade de ruptura de fundações profundas	102
5. Análises de probabilidade de deslizamento de muro de arrimo	103
5.1. Introdução	103
5.2. Aplicação do Método do Segundo Momento de Primeira Ordem para a estimativa de probabilidade de deslizamento de um muro de arrimo	103
5.3. Aplicação do Método das Estimativas Pontuais para a estimativa de probabilidade de deslizamento de um muro de arrimo	108
5.4. Análises dos resultados e sugestão para dimensionamento de muro de arrimo com base em uma probabilidade de deslizamento admissível	110

5.4.1. Análise dos resultados	110
5.4.2. Sugestão para dimensionamento de muro de arrimo com base em uma probabilidade de deslizamento admissível	111
6. Análises de probabilidade de ruptura de um talude	113
6.1. Introdução	113
6.2. Aplicação de métodos determinísticos para as estimativas dos fatores de segurança do talude	115
6.2.1. Métodos determinísticos de análise de estabilidade de taludes	115
6.2.2. Médias e variâncias para o fator de segurança correspondente ao talude de jusante da barragem de Benguê	121
6.3. Aplicação do Método do Segundo Momento para estimativas de probabilidades de ruptura do talude	122
6.4. Aplicação do Método das Estimativas Pontuais para estimativas de probabilidade de ruptura do talude	124
6.5. Análise dos resultados	126
7. Conclusões	127
8. Referências bibliográficas	130
9. Apêndice 1 – Valores da função distribuição acumulada normal	136
10. Apêndice 2 – Cálculos dos recalques	137
11. Apêndice 3 – Cálculos de média e variância de FS, pelos métodos do Segundo Momento e das Estimativas Pontuais, para o muro de arrimo analisado no Capítulo 5, com diversas posições de nível d'água	143
12. Apêndice 4 – Cálculos de média e variância de FS, pelo método do Segundo Momento, variando-se a dimensão B para o muro de arrimo analisado no Capítulo 5	160

Lista de figuras

Figura 1.1. Comparação entre duas situações com médias e distribuições de FS diferentes	24
Figura 2.1. Área hachurada representando a probabilidade de $FS \leq 1$	28
Figura 2.2. Gráfico de uma distribuição gaussiana com média μ e desvio padrão σ	30
Figura 2.3. Gráfico de uma distribuição lognormal	31
Figura 2.4. Gráfico de uma distribuição gama, com $\alpha=3$ e $\beta=1$	32
Figura 2.5. Gráficos de uma distribuição qui-quadrado	33
Figura 2.6. Comparação entre a distribuição t de Student e a distribuição normal padrão	34
Figura 2.7. Exemplo de um histograma de uma variável aleatória	35
Figura 2.8. Valores usuais de probabilidade e conseqüências de ruptura, Whitman (1984)	53
Figura 2.9. Esquema das provas de carga, Campos (1980)	56
Figura 2.10. Comparação entre histograma e distribuição lognormal, Fenton e Griffiths (2002)	57
Figura 2.11. Esquema de muro de arrimo para análise probabilística, Falabella (2006)	58
Figura 2.12. Seção típica do talude, Sandroni e Sayão (1992)	59
Figura 2.13. Seção transversal do talude submerso, antes e após o deslizamento, Duncan (1999)	63
Figura 2.14. Seção transversal da barragem de Curuá-Uma, Falabella (2006)	63
Figura 3.1. Perfil geotécnico e carregamento (aterro), Duncan (1999)	66
Figura 3.2. Influência dos parâmetros na variância do recalque	69

Figura 3.3. Gráfico para obtenção da probabilidade do recalque ser inadmissível com base no Método do Segundo Momento	69
Figura 3.4. Distribuição probabilística do recalque com área hachurada para a determinação da probabilidade de $\rho \geq 0,5m$	70
Figura 3.5. Gráfico para obtenção da probabilidade do recalque ser inadmissível com base no Método das Estimativas Pontuais	71
Figura 3.6. Perfil geotécnico da área experimental, Cordeiro (2004)	72
Figura 3.7. Edifício típico do bairro de Jardim Camburi, Vitória-ES	74
Figura 3.8. Distribuição do fator de influência (Schmertmann et al., 1978)	75
Figura 3.9. Gráfico para determinação da probabilidade de $\rho \geq 25mm$, com $\alpha = 5$	79
Figura 3.10. Gráfico para determinação da probabilidade de $\rho \geq 25mm$, com $\alpha = 6$	79
Figura 3.11. Gráfico para determinação da probabilidade de $\rho \geq 25mm$, com $\alpha = 10$	80
Figura 3.12. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para $\alpha = 5$	80
Figura 3.13. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para $\alpha = 6$	81
Figura 3.14. Comparação entre histograma e distribuições normal e lognormal, para $\alpha = 10$	81
Figura 3.15. Probabilidades de recalque inadmissível segundo dois métodos probabilísticos	82
Figura 4.1. Esquema de sapata	85
Figura 4.2. Representação gráfica da probabilidade de ruptura	89
Figura 4.3. Equilíbrio limite de um elemento de fundação profunda	94

Figura 4.4. Perfil geotécnico de um solo sedimentar arenoso de Vila Velha-ES	97
Figura 4.5. Esquema de estaca pré-moldada de concreto instalada no solo sedimentar arenoso de Vila Velha-ES	98
Figura 5.1. Esquema do muro de arrimo (dimensões em m), Duncan (1999)	104
Figura 5.2. Diagramas de tensões efetivas atuantes no muro	106
Figura 5.3. Gráfico de variação da probabilidade de ruptura com a profundidade do nível d'água no terrapleno	108
Figura 5.4. Gráfico de variação da probabilidade de deslizamento com a largura da base do muro	112
Figura 6.1. Seção transversal da barragem de Benguê, Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (2000)	114
Figura 6.2. Envoltória de resistência obtida a partir de regressão linear	115
Figura 6.3. Esquema de talude com malha de pontos para pesquisa da superfície crítica de ruptura	116
Figura 6.4. Esquema de forças na fatia, Método de Fellenius	117
Figura 6.5. Esquema de forças na fatia, Método de Bishop Simplificado	118
Figura 6.6. Variação do fator f_0 em função do parâmetro d/L e do tipo de solo	119
Figura 6.7. Forças atuantes em uma fatia pelo Método de Morgenstern & Price (1965)	120

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Coeficientes de variação de parâmetros geotécnicos	39
Tabela 2.2. Valores de escala de flutuação	42
Tabela 2.3. Valores de $\tau = \frac{t_\alpha}{\sqrt{n}}$ em função de n e α	44
Tabela 3.1. Médias e desvios padrão dos parâmetros da argila mole da baía de São Francisco, Duncan (1999)	66
Tabela 3.2. Dados para o cálculo determinístico do recalque	67
Tabela 3.3. Termos para o cálculo da variância de ρ	68
Tabela 3.4. Valores dos recalques correspondentes às dezesseis combinações	71
Tabela 3.5. Resultados dos ensaios CPT realizados após a remoção do aterro, Cordeiro (2004)	73
Tabela 3.6. Valores típicos de α , Coduto (2001)	77
Tabela 4.1. Fatores de capacidade de carga propostos na literatura geotécnica	86
Tabela 4.2. Fatores de profundidade propostos na literatura geotécnica	86
Tabela 4.3. Valores de tensão de ruptura e fator de segurança obtidos pelas três soluções consideradas	87
Tabela 4.4. Coeficientes de variação para parâmetros geotécnicos referentes a solos residuais, Guedes (1997)	88
Tabela 4.5. Variância de FS com base nos coeficientes máximos de variação e nos fatores de Meyerhof (1963)	88
Tabela 4.6. Variância de FS com base nos coeficientes máximos de variação e nos fatores de Hansen (1970)	89

Tabela 4.7. Variância de FS com base nos coeficientes máximos de variação e nos fatores de Vesic (1973, 1975)	89
Tabela 4.8. Valores de FS correspondentes às oito combinações com tensões de ruptura estimadas pela solução de Meyerhof (1963)	90
Tabela 4.9. Valores de FS correspondentes às oito combinações com tensões de ruptura estimadas pela solução de Hansen (1970)	91
Tabela 4.10. Valores de FS correspondentes às oito combinações com tensões de ruptura estimadas pela solução de Vesic (1973, 1975)	91
Tabela 4.11. Valores médios de FS pelo método das Estimativas Pontuais	91
Tabela 4.12. Variâncias de FS pelo método das Estimativas Pontuais	92
Tabela 4.13. Valores de k e α , Aoki e Velloso (1975)	95
Tabela 4.14. Valores de F_1 e F_2 , Aoki e Velloso (1975)	95
Tabela 4.15. Valores de k e α , Laprovitera (1988)	96
Tabela 4.16. Valores de F_1 e F_2 , Laprovitera (1988) e Benegas (1993)	96
Tabela 4.17. Valores de C , Décourt e Quaresma (1978)	97
Tabela 4.18. Fatores de segurança de acordo com os métodos determinísticos	98
Tabela 4.19. Valores de $V[FS]$ de acordo com os métodos determinísticos de estimativa de carga última com base no Método do Segundo Momento	100
Tabela 4.20. Resultados das análises determinísticas, Método de Aoki e Velloso (1975)	100
Tabela 4.21. Resultados das análises determinísticas, Método de Aoki e Velloso com fatores k , α , F_1 e F_2 de Laprovitera (1988) e Benegas (1993)	100
Tabela 4.22. Resultados das análises determinísticas, Método de Décourt e Quaresma (1978)	101

Tabela 4.23. Valores de $V[FS]$ de acordo com os métodos determinísticos de estimativa de carga última com base no Método das Estimativas Pontuais	101
Tabela 5.1. Valores de média e desvio padrão dos parâmetros para análise de estabilidade, Duncan (1999)	102
Tabela 5.2. Cálculo da variância de FS, referente ao deslizamento do muro, com empuxos calculados pela teoria de Rankine (1857)	106
Tabela 5.3. Cálculo da variância de FS, referente ao deslizamento do muro, com empuxos calculados pela teoria de Coulomb (1776)	107
Tabela 5.4. Variação da probabilidade de deslizamento com a profundidade do nível d'água em relação à superfície do terrapleno – Método do Segundo Momento	107
Tabela 5.5. Resultados das análises determinísticas para o Método das Estimativas Pontuais	109
Tabela 5.6. Variação da probabilidade de deslizamento com a profundidade do nível d'água em relação à superfície do terrapleno – Método das Estimativas Pontuais	110
Tabela 5.7. Variação da probabilidade de deslizamento com a largura da base do muro	112
Tabela 6.1. Valores de média e variância dos parâmetros de resistência	113
Tabela 6.2. Valores médios dos fatores de segurança para o talude da barragem de Benguê, para a situação de ausência do N.A. no talude	121
Tabela 6.3. Valores médios dos fatores de segurança para o talude da barragem de Benguê em situação crítica, com nível d'água na altura máxima	122
Tabela 6.4. Variância de FS, utilizando-se o método de Fellenius (1936), com N.A. ausente	122

Tabela 6.5. Variância de FS, utilizando-se o método de Bishop Simplificado (1955), com N.A. ausente	123
Tabela 6.6. Variância de FS, utilizando-se método de Janbu Simplificado(1973), com N.A. ausente	123
Tabela 6.7. Variância de FS, utilizando-se o método de Morgenstern & Price (1965), com N.A. ausente	123
Tabela 6.8. Variância de FS, utilizando-se o método de Fellenius (1936), com N.A. máximo	123
Tabela 6.9. Variância de FS, utilizando-se o método de Bishop Simplificado (1955), com N.A. máximo	123
Tabela 6.10. Variância de FS, utilizando-se método de Janbu Simplificado (1973), com N.A. máximo	123
Tabela 6.11. Variância de FS, utilizando-se o método de Morgenstern & Price (1965), com N.A. máximo	124
Tabela 6.12. Probabilidades de ruptura para a situação de ausência do N.A. no talude	124
Tabela 6.13. Probabilidades de ruptura para a situação de fluxo com nível d'água máximo	124
Tabela 6.14. Valores de FS para a condição de ausência de N.A. no talude	125
Tabela 6.15. Valores de FS para a condição de N.A. máximo no talude	125
Tabela 6.16. Probabilidades de ruptura, de acordo com Método das Estimativas Pontuais, para uma condição de ausência de N.A. no talude	125
Tabela 6.17. Probabilidades de ruptura, de acordo com Método das Estimativas Pontuais, para uma condição de N.A. máximo no talude	125

Lista de símbolos

a' - intercepto da envoltória no plano p' - q'

A_b - área da base

A_l - área lateral

b - largura da fatia

B - menor dimensão da fundação

C - fator de correlação dependente do tipo de solo, método de Décourt e

Quaresma (1978)

c' - coesão efetiva do solo

$Cov()$ - coeficiente de variação

C_c - índice de compressão

C_r - índice de recompressão

cv - coeficiente de adensamento vertical

CPT - cone penetration test

d_c - fator de profundidade dependente do ângulo de atrito e da razão D/B

d_q - fator de profundidade dependente do ângulo de atrito e da razão D/B

d_γ - fator de profundidade dependente do ângulo de atrito e da razão D/B

D - profundidade de embutimento

DMT - Flat Dilatometer Test

e - índice de vazios

E - módulo de elasticidade

E - empuxo

$E[J]$ - valor esperado

f_s - resistência lateral do ensaio de cone holandês

f_0 - fator de correção empírico, método de Janbu (1955)

$f()$ - função densidade de probabilidade

$F()$ - função de distribuição

F1 - fator de escala e execução das estacas

F2 - fator de escala e execução das estacas

FS - fator de segurança

Gs - densidade real dos grãos

G(X) - função de desempenho

H - espessura

I_ε - fator de influência para recalques

k - coeficiente de permeabilidade

k - fator de correlação entre N e q_c

K_a - coeficiente de empuxo ativo

K_p - coeficiente de empuxo passivo

L - comprimento da estaca

n - número de determinações

N - força normal

N - número de golpes da sondagem SPT

N_{60} - número de golpes da sondagem SPT para uma energia igual a 60% da energia teórica

\bar{N}_i - média dos números de golpes do SPT obtidos ao longo da superfície lateral da estaca em um intervalo ΔL_i

\bar{N}_p - média dos números de golpes do SPT para a zona de ponta da estaca

N_c - fator de capacidade de suporte adimensional

N_q - fator de capacidade de suporte adimensional

N_γ - fator de capacidade de suporte adimensional

OCR - over consolidation ratio

P_f - probabilidade de ruptura

p' - semi-soma entre tensões efetivas principais maior e menor

q' - semi-diferença entre tensões efetivas principais maior e menor

q - tensão imposta ao solo pela fundação

q_c - resistência de ponta do ensaio CPT

q_{DMT} - resistência do ensaio dilatométrico

q_p - tensão resistente de ponta

q_{li} - tensão resistente lateral, considerada constante em um intervalo de comprimento ΔL_i

Q_t - carga última ou capacidade de carga total do sistema estaca-solo

Q_p - resistência de ponta

Q_l - resistência lateral

R - capacidade de resistência

s - desvio padrão da amostragem

S - grau de saturação

S - demanda de sollicitação

SPT - standard penetration test

S_u - resistência não drenada

$t(\)$ - função de frequência

$T(\)$ - função de frequência acumulada

T - Força tangencial

t_α - valor obtido através da função de Student

u - poro-pressão

U - perímetro da estaca

U - resultante de poro-pressões

$V[]$ - variância da distribuição

w - teor de umidade

W - peso

x - variável aleatória

\bar{x} - média da amostragem

Z - variável aleatória padronizada

α - fator de correlação entre f_s e q_c

α - fator de correlação empírico entre módulo de elasticidade e resistência de ponta do cone

α - nível de confiança

α - parâmetro da função gama

α - ângulo de inclinação do tardoz

α' - ângulo de inclinação da envoltória no plano p' - q'

β - índice de confiabilidade

β - ângulo de inclinação do terrapleno

δ - escala de flutuação

δ - ângulo de atrito solo/muro

Δ - acurácia

$\Delta\sigma$ - acréscimo de tensão

Δz - comprimento total considerado em uma dada direção

ε_z - deformação específica vertical

ϕ' - ângulo de atrito efetivo do solo

$\phi(Z)$ - função densidade de probabilidade e distribuição acumulada aferidas em Z

γ - peso específico

γ_t - peso específico total

γ_{nat} - peso específico natural

$\Gamma(\alpha)$ - função gama

Γ - função de variância

λ - constante a ser determinada por processo iterativo do método de Morgenstern &

Price (1965)

μ - média da distribuição

μ_G - valor médio da função de desempenho

ρ - recalque

θ - inclinação da base da fatia

σ - desvio padrão

σ' - tensão efetiva

σ'_p - tensão de pré-adensamento

σ'_j - desvio padrão da distribuição

τ - tensão cisalhante