



Juan Pablo Ibañez

Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados

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. Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, Outubro de 2003



Juan Pablo Ibañez

Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados

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.

Celso Romanel

Orientador
PUC/Rio

Prof. Tácio Mauro P. de Campos

PUC/Rio

Prof. Roberto Azevedo

UFV

Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC/Rio

Rio de Janeiro, 17 de Outubro de 2003

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

Juan Pablo Ibañez

Graduou-se em Engenharia Civil na UBA (Universidad de Buenos Aires, Argentina) em 2000. Em 2001 cursou o 'Master internacional' em mecânica dos solos e engenharia de fundações no CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas) de Madri, Espanha. Atualmente cursa no programa de doutorado oferecido pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Ibañez, Juan Pablo

Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados / Juan Pablo Ibañez; orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

241 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. Modelos constitutivos. 3. Solos residuais. 4. Solos não saturados. 5. Plasticidade. 6. Tensão. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Agradecimentos

A Deus meu Senhor, pela sua fidelidade e misericórdia, as quais nunca faltaram nestes dois anos aqui no Brasil.

À Verônica, minha princesa, pelo seu doce amor, amizade e constante apoio ao longo da nossa caminhada juntos.

À Sofia, estrelinha vinda do céu, cuja luz foi fonte de inspiração e motivação para o meu trabalho.

À minha família em Argentina, pais, avó, irmão, sogra, cunhadas, restante da família e amigos que se preocuparam em manter os laços de amizade e carinho a pesar da distancia.

Aos amigos e irmãos de PIB de Botafogo, por ter-se constituído na nossa segunda família aqui no Brasil.

À minha amiga Ana Cristina Castro Sieira, que com a sua ajuda e disposição facilitou a minha participação neste programa de mestrado.

Ao Celso, pela orientação recebida, os conceitos transmitidos e pela confiança depositada em mim ao longo deste último ano.

À CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a presente dissertação.

A todas as pessoas vinculadas ao Departamento de Engenharia Civil, pelo trato afetuoso e respeitoso que fizeram o convívio cordial e agradável.

Resumo

Ibañez, Juan Pablo; Romanel Celso. **Modelagem Constitutiva para Solos com Ênfase em Solos Não Saturados**. Rio de Janeiro, 2003. 241p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação tem por objeto a análise teórica – comparativa, implementação computacional e avaliação da capacidade de simulação dos modelos constitutivos para solos, com ênfase nos solos não saturados.

Primeiramente, são analisados os modelos básicos, clássicos e avançados formulados para solos saturados ou secos, assim como os modelos desenvolvidos para solos não saturados, incluindo também alguns modelos para solos estruturados.

A seguir, e para testar a sua capacidade de modelagem, são implementadas as matrizes constitutivas de alguns dos modelos analisados para a retroanálise e previsão de comportamento de três solos residuais na condição saturada e não saturada.

Como complemento da pesquisa, um dos modelos é utilizado na simulação de provas de carga com placa em solo residual pelo MEF, para os casos de saturação e umidade natural.

Finalmente, são apresentadas organizadamente as conclusões gerais e particulares obtidas, assim como sugestões para futuras pesquisas no tema do presente trabalho.

Palavras-chave

Modelos constitutivos; Solos residuais; Solos não saturados; Plasticidade, Tensão

Abstract

Ibañez, Juan Pablo; Romanel Celso (Advisor). **Constitutive Modeling of Soils with Emphasis in Unsaturated Soils**. Rio de Janeiro, 2003. 241p. MSc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this thesis is to present a critical review of the main constitutive soil models published in the literature, discussing and evaluating their abilities to simulate the mechanical behavior of geological materials under the theoretical and numerical points of view, with emphasis on unsaturated soils.

Firstly, some basic, classical and advanced soil models are presented and discussed, as well as a few other recent constitutive relationships specially developed for unsaturated and structured materials.

In the sequence, in order to assess the efficiency and overall performance of some selected models, the respective constitutive matrices were numerically implemented for prediction and back-analysis of the response of three residual soils, in saturated and unsaturated conditions.

As a complement of this research, one of the soil models is used to simulate the results of some plate load tests on a residual soil deposit through the finite element method.

Finally, the general conclusions of this work are presented and some suggestions are made to aid future research in the area of soil modeling.

Keywords

Constitutive Modeling; Residual Soil; Unsaturated Soil; Plasticity, Stress

Sumário

1 Introdução	28
2 Modelos Constitutivos Elásticos	33
2.1 Modelos Elásticos	33
2.1.1 Modelo Elástico Linear	33
2.1.2 Modelo Elástico Não-Linear	36
2.1.3 Modelo Hiperelástico	37
2.2 Modelos Hipoelásticos	39
2.3 Modelos Quase-Lineares	40
2.3.1 Modelo Bi-Linear	41
2.3.2 Modelo K-G	42
2.3.3 Modelo Hiperbólico	44
2.3.4 Modelo EC-K ₀	51
3 Modelos Constitutivos Elasto-Plásticos Básicos	53
3.1 Conceitos fundamentais da Teoria da Plasticidade Infinitesimal	53
3.1.1 Definições básicas	53
3.1.2 Tipos de Endurecimento	54
3.1.3 Lei de Fluxo Generalizada	57
3.1.4 Critérios para escoamento plástico de metais	59
3.2 Critérios para escoamento plástico de solos	60
3.2.1 Modelo Mohr-Coulomb	61
3.2.2 Modelo Drucker-Prager	67
3.3 Modelos do Estado Crítico	69
3.3.1 Modelo Cam Clay modificado	72
3.3.2 Modelo Cap	79
3.4 Modelos implementados em programas computacionais comerciais	82
3.4.1 Modelo Generalizado	82
3.4.2 Modelo HSM - Hardening Soil Model	86

4 Modelos Constitutivos Elasto-Plásticos Avançados	92
4.1 Modelos com Endurecimento Isotrópico	92
4.1.1 Modelo de Lade – Kim	92
4.1.2 Modelo Hierárquico (HiSS)	99
4.1.3 Modelo de Matsuoka – Nakai	106
4.2 Modelos de Endurecimento Cinemático	114
4.2.1 Modelo de Superfícies Aninhadas	115
4.2.2 Modelo de Superfície Limite	119
4.2.3 Modelo Bolha	121
4.3 Avanços recentes	126
4.3.1 Teoria do Estado Perturbado (DSC).	127
4.3.2 Teoria da Hipoplasticidade	133
5 Modelos Constitutivos para Solos Não Saturados e Estruturados	136
5.1 Características básicas dos Solos Não Saturados e Residuais	136
5.1.1 Solos Não Saturados	136
5.1.2 Solos Residuais	137
5.2 Modelos Constitutivos para Solos Não Saturados	140
5.2.1 Modelo Quase Saturado	141
5.2.2 Teoria do Estado Perturbado (DSC)	143
5.2.3 Modelo Barcelona (BBM)	143
5.3 Modelos Constitutivos para Solos Estruturados	152
5.3.1 Modelo Cam Clay Estruturado	153
5.3.2 Teoria do Estado Perturbado (DSC)	156
6 Exemplos de modelagem em solos saturados e não saturados	158
6.1 Resultados experimentais	158
6.1.1 Solo 1 - solo residual de biotita Gnaisse saturado	158
6.1.2 Solo 2 - solo residual de arenito não saturado	158
6.1.3 Solo 3 - silte eólico não saturado compactado	162
6.2 Matrizes Constitutivas	165
6.3 Modelagem Constitutiva para o Solo 1	167
6.3.1 Modelo Hiperbólico	167
6.3.2 Modelo de Mohr-Coulomb com amolecimento	171

6.3.3 Modelo Lade-Kim	174
6.4 Modelagem Constitutiva para o Solo 2	180
6.4.1 Modelo Barcelona	181
6.4.2 Teoria do Estado Perturbado (HiSS-DSC)	186
6.4.2.1 Estado FA	187
6.4.2.2 Estado RI	189
6.4.2.3 Função de Perturbação D	191
6.4.2.4 Resultados	191
6.4.3 Modelo Hierárquico (HiSS- $\delta_{1\text{modif}}$)	196
6.4.4 Modelo HSM modificado	198
6.5 Modelagem Constitutiva para o Solo 3	203
6.5.1 Teoria do Estado Perturbado (HiSS-DSC)	203
7 Simulação numérica de uma prova de carga em placa sobre solo residual pelo MEF.	211
7.1 Descrição da prova de carga em placa	211
7.2 Simulação numérica da prova de carga pelo MEF	212
8 Conclusões e Sugestões	217
8.1 Conclusões sobre os modelos para solos saturados ou secos	217
8.2 Conclusões sobre os modelos para solos não saturados e estruturados	223
8.3 Sugestões para futuras pesquisas	227
Referências Bibliográficas	229
Apêndice. Tensores e espaços de tensões e deformações	238

Listado de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1: Origem dos solos não saturados.	28
Figura 1.2: Modelos constitutivos básicos.	29
Figura 1.3: Modelos constitutivos clássicos.	29
Figura 1.4: Modelos constitutivos avançados.	30
Figura 1.5: Formulações constitutivas para solos não saturados e estruturados.	30
Figura 1.6: Roteiro da dissertação.	32

Capítulo 2

Figura 2.1: Modelo elástico linear e isotrópico: a) Módulo de deformação volumétrica K ; b) Módulo cisalhante G .	35
Figura 2.2: Curva tensão-deformação de material conservativo e representações de U_0 e U_{C0} .	37
Figura 2.3: Modelo Bi-linear: a) Módulo de deformação volumétrica; b) Módulo cisalhante.	42
Figura 2.4: Modelo K - G : a) Módulo cisalhante tangente G_t ; b) Módulo de deformação volumétrica tangente K_t .	43
Figura 2.5: Modelo Hiperbólico: a) Curva tensão-deformação hiperbólica; b) Trajetória do ensaio CTC.	44
Figura 2.6: Ciclo de descarregamento e recarregamento com módulo de elasticidade E_{ur} .	46
Figura 2.7: Critério de descarregamento SS: a) Duncan <i>et al</i> (1980); b) Duncan <i>et al</i> (1984); c) Saboya Jr. & Byrne (1993).	49
Figura 2.8: Modelo EC- K_0 : a) Relação tensão-deformação; b) Módulo confinado E_c .	52

Capítulo 3

Figura 3.1: Tipos de endurecimento plástico: a) Isotrópico; b) Cinemático.	55
Figura 3.2: Leis de endurecimento cinemático: a) Drucker; b) Shield e Ziegler.	56
Figura 3.3: Critérios de escoamento no plano \mathbf{p} : a) Tresca; b) von Mises.	60
Figura 3.4: Critério de ruptura Mohr-Coulomb: a) plano (\mathbf{s}, \mathbf{t}) ; b) plano octaédrico.	62
Figura 3.5: Leis de fluxo associadas às superfícies de escoamento: a) Criterio de Tresca; b) Critério de Mohr-Coulomb.	63
Figura 3.6: Circulo de Mohr em deformações plásticas e ângulo de	

dilatância.	64
Figura 3.7: Modelo Mohr-Coulomb com fluxo não associado. Potencial plástico Q .	65
Figura 3.8: Evolução dos parâmetros c e f com a deformação de desvio.	66
Figura 3.9: a) Critério Drucker-Prager e von Mises; b) Critérios de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager no plano octaédrico.	67
Figura 3.10: Ensaio CTC para solo denso e fofo: a) Curva $q - \varepsilon_v$; b) Curva $\varepsilon_v - \varepsilon_v$.	70
Figura 3.11: Ensaio CTC não drenado em argila mole: a) Curva $p - q$; b) Curva $e - p$.	70
Figura 3.12: a) Resultado de ensaios CTC não drenado no plano $e - \ln p$ b) Resultado de ensaios CTC drenados no plano $p - q$.	71
Figura 3.13: Superfície de estado crítico (SEC) no espaço $p - q - e$.	71
Figura 3.14: a) Superfícies de escoamento SE e linha de estado crítico no plano $p - q$; b) Linhas de consolidação isotrópica LCI e de descarga LD no plano $e - p$.	73
Figura 3.15: Superfície de escoamento SE e direção do fluxo plástico: a) Modelo Cam Clay original; b) Modelo Cam Clay modificado.	75
Figura 3.16: Superfície de Hvorslev no plano $p - q$.	78
Figura 3.17: Modelo MELANIE.	78
Figura 3.18: Modelo Cap. Superfícies de escoamento f_1 e f_2 .	80
Figura 3.19: Modelo Cap. Superfície f_2 .	81
Figura 3.20: Modelo Cap. Superfície f_1 .	81
Figura 3.21: Modelo generalizado. Função elíptica $r(q, e)$.	83
Figura 3.22: Secções no plano desviador do critério triaxial: a) $e=0.5$; b) $e=0.6$	85
Figura 3.23: Módulo E_{oed}^{ref} obtido a partir do ensaio oedométrico.	87
Figura 3.24: Relação tensão-deformação hiperbólica para primeiro carregamento em ensaio triaxial drenado.	87
Figura 3.25: Modelo HSM. Superfícies de escoamento f para vários valores de g^p .	88
Figura 3.26: Modelo HSM. Superfície cap no plano $p' - q$.	88
Figura 3.27: Modelo HSM. Curva de deformação volumétrica para ensaio triaxial drenado com cut-off.	90

Capítulo 4

Figura 4.1: Modelo de Lade-Kim. Superfície de ruptura: a) no plano triaxial; b) no plano octaédrico (adaptado de Lade e Kim, 1988).	94
Figura 4.2: Modelo de Lade-Kim. Potencial plástico: a) Plano octaédrico; b)	

Plano triaxial (adaptado de Lade e Kim, 1988).	95
Figura 4.3: Modelo de Lade-Kim. Superfície de escoamento: a) Plano octaédrico; b) Plano triaxial (adaptado de Lade e Kim, 1988).	97
Figura 4.4: Modelo de Lade-Kim. Curva de endurecimento-amolecimento (adaptado de Lade e Kim, 1988).	98
Figura 4.5: Modelo Hierárquico: a) Superfície de escoamento no plano ($J_1, \sqrt{J_{2D}}$); b) Superfície de escoamento no plano octaédrico (adaptado de Desai, 1980).	101
Figura 4.6: Modelo HiSS. Evolução da função de endurecimento a . a) Solos sem pico de resistência; b) Solos com pico de resistência e amolecimento plástico.	102
Figura 4.7: Modelo HiSS. Pontos da envoltória para diferentes trajetórias de tensão.	104
Figura 4.8: Modelo HiSS. Pontos de câmbio de fase ($d\mathbf{e}_v = 0$) para solos fofos e densos.	104
Figura 4.9: Acréscimos de deformação elástica e plástica na curva $\tau \times \gamma$ (adaptado de Desai, 2000).	105
Figura 4.10: Modelo HiSS. Determinação dos parâmetros de endurecimento a_1 e \mathbf{h}_1 (adaptado de Desai, 2000).	105
Figura 4.11: Modelo de Matsuoka-Nakai: a) Plano mobilizado; b) Circulo de Mohr (modificado de Matsuoka, 1982).	107
Figura 4.12: Modelo Matsuoka-Nakai. Sup. escoamento e ruptura no plano (\mathbf{s}, \mathbf{t}).	108
Figura 4.13: Modelo Matsuoka-Nakai. Lei de fluxo.	108
Figura 4.14: Modelo Matsuoka - Nakai. Relação hiperbólica entre $(\mathbf{t}_{pm} / \mathbf{s}_{pm})$ e \mathbf{g}_{pm} no plano mobilizado (modificado de Matsuoka, 1982).	109
Figura 4.15: Modelo Matsuoka-Nakai. Conceito de Plano espacial mobilizado (PEM) (modificado de Matsuoka, 1982).	110
Figura 4.16: Modelo de Matsuoka-Nakai e Mohr-Coulomb: a) Plano octaédrico; b) PEM (modificado de Matsuoka, 1982).	112
Figura 4.17: Modelo de Matsuoka-Nakai. Planos mobilizados (Matsuoka, 1982).	114
Figura 4.18: Curva tensão-deformação para carregamento cíclico (adaptado de Desai & Siriwardane, 1984).	116
Figura 4.19: Movimento das superfícies aninhadas durante o carregamento (adaptado de Desai & Siriwardane, 1984).	116
Figura 4.20: Movimento das superfícies aninhadas em descarga: a) Ponto D; b) Ponto E (adaptado de Desai & Siriwardane, 1984).	117
Figura 4.21: Direção do movimento das superfícies aninhadas (adaptado de Desai & Siriwardane, 1984).	

Desai & Siriwardane, 1984).	118
Figura 4.22: Esquema da superfície limite, superfície de escoamento inicial e atual (modificado de Potts e Zravkovic, 1999).	120
Figura 4.23: Modelo tipo bolha: a) Elementos básicos do modelo; b) Trajetória de tensões.	122
Figura 4.24: Modelo de bolha simples (adaptado de Al-Tabbaa e Wood, 1989).	124
Figura 4.25: Translação da bolha dentro da superfície limite	125
Figura 4.26: Curva tensão-deformação de argila pré-adensada. Conceito de <i>perturbação</i> (modificado de Desai, 1974).	127
Figura 4.27: Conceito do estado perturbado (DSC): a) Representação simbólica do DSC; b) Comportamento tensão-deformação esquemático (modificado de Desai, 2000).	128
Figura 4.28: DSC. Representação esquemática da função perturbação $D(\mathbf{x}_D)$ (modificado de Desai, 2000).	130
Figura 4.29: Curva $\mathbf{s} - \mathbf{e}$. Diferentes rigidezes para carregamento e descarregamento.	134

Capítulo 5

Figura 5.1: Perfil de intemperismo: a) Rocha metamórfica; b) Rocha ígnea intrusiva. (modificado de Deere & Patton, 1971).	139
Figura 5.2: Comportamento de solo residual jovem e maduro: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ (modificado de Sandroni e Maccarini, 1981).	139
Figura 5.3: Critério de ruptura Mohr-Coulomb modificado por Frendlund <i>et al</i> (1978).	142
Figura 5.4: Ensaio de compressão isotrópica para solo saturado e não saturado: a) Curvas de compressão isotrópica no plano $v - \ln p$; b) Curva de escoamento no plano (ps) (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	145
Figura 5.5: Curvas LC no plano (p, s) (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	147
Figura 5.6: Modelo BBM. Comportamento do solo em função de s_0 .	148
Figura 5.7: Modelo BBM. Curvas LC e SI.	148
Figura 5.8: Superfícies de escoamento: a) Plano (p, q) ; b) Plano (p, s) (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	150
Figura 5.9: superfície de escoamento do modelo Barcelona no espaço (p, q, s) (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	151
Figura 5.10: Trajetórias dos ensaios básicos com controle da sucção para obtenção dos parâmetros (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	152
Figura 5.11: Modelo Cam Clay estruturado: a) Comportamento de um solo estruturado sob compressão isotrópica; b) Influência do parâmetro b na evolução do índice de vazios e (adaptado de Liu e Carter, 2002).	154

Figura 5.12: Ensaio CTC em solo estruturado: a) Trajetórias de tensão; b) Curva de resposta do solo, mostrando amolecimento plástico. 156

Figura 5.13: Aplicação da teoria DSC ao caso dos solos estruturados: a) Modelagem da resposta do solo estruturado durante carregamento; b) Função perturbação D . 157

Capítulo 6

Figura 6.1: Ensaio CTC para tensões de confinamento de 25, 40, 70 e 150 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 159

Figura 6.2: Ensaio CTE para tensões de confinamento de 20 e 70 kPa, e RTE para confinamentos de 25, 40, 70 e 150 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 159

Figura 6.3: Curvas $e - \log(p')$ de ensaios HC e EDO. 159

Figura 6.4: Curvas $V/V_0 - \log(p')$ de ensaios HC, para as condições de saturação e não saturação. (V = volume específico). 160

Figura 6.5: Ensaio CTC em condição saturada para tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 160

Figura 6.6: Ensaio CTC-EMS para $s = 40$ kPa e tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 161

Figura 6.7: Ensaio CTC-EMS para $s = 80$ kPa e tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 161

Figura 6.8: Ensaio CTC-EMS para $s = 120$ kPa e tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 161

Figura 6.9: Ensaio CTC-EMS para $s = 160$ kPa e tensões de confinamento de 50, 100 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 162

Figura 6.10: Ensaio de compressão isotrópica (HC) para sucções de 200, 400, 800 e 1500 kPa: a) Carregamento incremental; b) Carregamento contínuo. 162

Figura 6.11: Ensaio CTC para $\sigma_3 = 50$ kPa e sucções de 200, 400, 800 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 163

Figura 6.12: Ensaio CTC para $\sigma_3 = 100$ kPa e sucções de 200, 400, 800 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 163

Figura 6.13: Ensaio CTC para $\sigma_3 = 200$ kPa e sucções de 200, 400, 800 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 164

Figura 6.14: Ensaio CTC para $\sigma_3 = 400$ kPa e sucções de 200, 400, 800 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 164

Figura 6.15: Ensaio triaxiais de carregamento proporcional (PL) para a condição $q/p = 0,5$ e sucções de 200 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 164

Figura 6.16: Modelo Hiperbólico. Ajuste linear das curvas tensão-

deformação dos ensaios CTC.	168
Figura 6.17: Modelo Hiperbólico. Ajuste do módulo E_{ti} em função de σ_3 .	168
Figura 6.18: Modelo Hiperbólico. Retroanálise dos ensaios CTC para $\sigma_3 = 25, 40, 70$ e 150 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	170
Figura 6.19: Modelo Hiperbólico. Retroanálise de ensaios CTC para $\sigma_3 = 25, 40, 70$ e 150 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	170
Figura 6.20: Modelo Mohr-Coulomb. Envoltória de resistência no plano $p-q$.	171
Figura 6.21: Modelo Mohr-Coulomb. Variação de f com a deformação plástica de desvio.	172
Figura 6.22: Modelo Mohr-Coulomb. Trajetórias de deformação N°1 para $\sigma_3 = 25, 40$ e 70 kPa.	173
Figura 6.23: Modelo Mohr-Coulomb. Trajetórias de deformação N°2 para $\sigma_3 = 25, 40$ e 70 kPa e comparação com ensaios CTC.	174
Figura 6.24: Modelo Lade-Kim. Ajuste dos parâmetros elásticos K_{ur} e n .	175
Figura 6.25: Modelo Lade-Kim. Ajuste dos parâmetros do critério de ruptura h_l e m .	175
Figura 6.26: Modelo Lade-Kim. Ajuste dos parâmetros c e p da lei de endurecimento.	176
Figura 6.27: Modelo Lade-Kim. Ajuste do parâmetro a da superfície de plastificação.	176
Figura 6.28: Modelo de Lade-Kim. Simulação de ensaios CTC para $\sigma_3 = 25$ e 70 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	179
Figura 6.29: Modelo de Lade-Kim. Simulação de ensaios CTE para σ_3 (inicial) = 20 e 70 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	179
Figura 6.30: Modelo Barcelona: a) Variação de c com a sucção; b) Variação de f com a sucção.	181
Figura 6.31: Modelo Barcelona. Variação da tensão desviadora com a sucção.	181
Figura 6.32: Modelo Barcelona. Ajuste da função LC a partir dos dados experimentais.	182
Figura 6.33: Variação do módulo cisalhante G com a sucção.	183
Figura 6.34: Modelo Barcelona BBM. Simulações de ensaios CTC, para a condição saturada, e para $\sigma_3 = 50, 100$ e 200 kPa. Comparação com os resultados experimentais: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$; c) Trajetória dos ensaios no plano $p - q$.	184
Figura 6.35: Modelo de Barcelona. Simulação do ensaio CTC para $\sigma_3 = 100$ kPa e sucções de $40, 80, 120$ e 160 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	185
Figura 6.36: Modelo Barcelona. Simulação de ensaio CTC para $s = 80$ kPa e $\sigma_3 = 50, 100$ e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	185

- Figura 6.37: Modelo Barcelona. Ensaio segundo trajetória -30° para $\sigma_3 = 80$ kPa: a) Curva $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curva $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 185
- Figura 6.38: Teoria HiSS-DSC: a) Ajuste linear dos pontos últimos de ensaios CTC e RTC no plano $J_1 - \sqrt{J_{2D}}$; b) Ajuste dos resultados experimentais pela eq (6.28). 188
- Figura 6.39: Teoria HiSS-DSC: Ajuste linear dos pontos (\mathbf{x}, \mathbf{a}) obtidos dos ensaios CTC para a obtenção dos parâmetros da função de endurecimento. 189
- Figura 6.40: Ajuste da coesão aparente em função da sucção. 190
- Figura 6.41: Teoria HiSS-DSC. Função perturbação D definida como dependendo da sucção em forma linear. 191
- Figura 6.42: Simulação de ensaio CTC pelo modelo HiSS para o estado FA (saturado): a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 192
- Figura 6.43: Simulação de ensaio CTC pelo modelo HiSS para o estado RI ($s = 200$ kPa): a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 192
- Figura 6.44: Simulação de ensaio CTC pelo modelo HiSS-DSC para $s = 80$ kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 193
- Figura 6.45: Simulação de ensaio CTC pelo modelo HiSS-DSC para $s = 120$ kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 193
- Figura 6.46: Simulação de ensaio segundo a trajetória -30° para a condição saturada: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 194
- Figura 6.47: Simulação de ensaio segundo a trajetória 30° e 50° para a condição saturada: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 194
- Figura 6.48: Modelos BBM e HiSS-DSC. Simulações de ensaios CTC para $\sigma_3 = 100$ kPa e $s = 80$ e 120 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 195
- Figura 6.49: Modelo HiSS (δ_{1m}): a) Ajuste do parâmetro $3R$; b) Ajuste do módulo elástico E_{ur} . 197
- Figura 6.50: Modelos BBM e HiSS (δ_{1m}). Simulações de ensaios CTC para $\sigma_3 = 100$ kPa e $s = 80$ e 120 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 198
- Figura 6.51: Modelo HSM modificado. Ajuste da coesão aparente em função da sucção. 200
- Figura 6.52: Modelo HSM modificado. Ajuste de E_{50}^{ref} com a sucção. 200
- Figura 6.53: Modelo HSM. Simulação de ensaios CTC na condição saturada, para $\sigma_3 = 50, 100$ e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 202
- Figura 6.54: Modelo HSM. Simulação de ensaios CTC para $\sigma_3 = 50$ kPa e $s = 40, 80, 120$ e 160 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 202
- Figura 6.55: Evolução dos parâmetros de Mohr-Coulomb com a sucção: a) Coesão efetiva; b) Ângulo de atrito interno. 204
- Figura 6.56: Simulações de ensaios CTC pelo modelo HiSS para o estado RI ($s = 200$ kPa) e comparação com resultados experimentais: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$. 206

Figura 6.57: Simulações de ensaios CTC pelo modelo HiSS para o estado FA ($s = 1500$ kPa) e comparação com resultados experimentais: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	206
Figura 6.58: Função D . Ajuste logarítmico dos pontos R_s para a obtenção de fator D_s .	206
Figura 6.59: Função D . Fator de perturbação D_x para distintos valores de σ_3 .	207
Figura 6.60: Aplicação da função D na previsão de ensaios CTC para $\sigma_3 = 50$ kPa e sucções de 800 e 1500 kPa, a partir dos estados RI e FA.	208
Figura 6.61: Retroanálise de ensaios CTC pelo modelo HiSS-DSC, para sucção de 400 kPa e tensões de confinamentos de 50 e 200 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	208
Figura 6.62: Simulações de trajetórias de ensaios $q / p = 0,5$ pelo modelo HiSS-DSC para sucções de 200 e 1500 kPa: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	209
Figura 6.63: Simulação de ensaios CTC com $\sigma_3 = 200$ kPa e $s = 400$ e 800 kPa pelos modelos BBM e HiSS-DSC: a) Curvas $\sigma_d - \varepsilon_1$; b) Curvas $\varepsilon_v - \varepsilon_1$.	209

Capítulo 7

Figura 7.1: Esquema do ensaio de carga em placa.	212
Figura 7.2: Malha de elementos finitos empregada para a simulação de prova de carga com placa em solo saturado.	212
Figura 7.3: Malha de elementos finitos empregada para a simulação de prova de carga com placa em solo com umidade natural.	213
Figura 7.4: Tensões principais no solo no estágio final da prova de carga com placa para o caso de saturação total (tensão máxima = 160 kPa).	215
Figura 7.5: Tensões principais no solo no estágio final da prova de carga com placa para o caso de saturação total (tensão máxima = 200 kPa).	215
Figura 7.6: Curva <i>tensão vertical – recalque</i> correspondente à prova de carga com placa para o caso de saturação total.	216
Figura 7.7: Curva <i>tensão vertical – recalque</i> correspondente à prova de carga com placa para o caso de umidade natural.	216

Apêndice

Figura A1: Convenção de tensões num elemento diferencial de solo.	238
Figura A2: Plano octaédrico e tensões octaédricas.	240
Figura A3: Espaço de tensões: a) Espaço de Westergaard, plano triaxial e octaédrico; b) Trajetórias de tensão no plano triaxial.	241

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1: Definição dos parâmetros do critério generalizado.	85
--	----

Capítulo 4

Tabela 4.1: Versões do modelo Hierárquico – HiSS.	99
---	----

Capítulo 5

Tabela 5.1: Análise comparativa entre solos residuais e transportados (Brenner <i>et al</i> , 1997).	140
--	-----

Capítulo 6

Tabela 6.1: Matrizes constitutivas implementadas.	167
---	-----

Capítulo 8

Tabela 8.1: Conclusões gerais sobre os modelos básicos.	217
Tabela 8.2: Conclusões gerais sobre os modelos clássicos.	219
Tabela 8.3: Conclusões gerais sobre os modelos avançados.	220
Tabela 8.4: Conclusões gerais sobre os modelos para solos não saturados e estruturados.	224

Lista de Símbolos

a	parâmetro do modelo Hiperbólico.
a	parâmetro do critério de ruptura. Modelo Lade-Kim.
a	parâmetro da função de endurecimento. modelo Hierárquico.
a	parâmetro de ajuste do modelo Hipoplástico.
a	parâmetro que define a variação do volume específico com a sucção. Modelo Barcelona.
a_0	constante para lei de endurecimento dependente da sucção. Modelo Hierárquico.
a_1	constante para lei de endurecimento dependente da sucção. Modelo Hierárquico.
a_i	cossenos diretores.
a_i	parâmetros do modelo de Cauchy.
a_i	parâmetros do modelo Hipoeástico.
A	módulo plástico.
A	parâmetro da função D. Teoria DSC.
b	parâmetro do modelo Hiperbólico.
b	parâmetro que define a variação da rigidez do solo com a sucção. Modelo Barcelona.
b	taxa de desestruturação. Modelo Cam Clay estruturado.
A	constante de amolecimento plástico. Modelo Lade-Kim.
A_0	parâmetro do modelo EC- K_0 .
A_e	parâmetro do modelo EC- K_0 .
A_f	parâmetro do critério de ruptura Generalizado.
B	constante de amolecimento plástico. Modelo Lade-Kim.
B_0	parâmetro do modelo EC- K_0 .
B_e	parâmetro do modelo EC- K_0 .
B_f	parâmetro do critério de ruptura Generalizado.
B_{70}	módulo de deformação volumétrica definido para o 70% da tensão de ruptura.
B_{tgh}	módulo de deformação volumétrica definido quando a curva de deformação volumétrica apresenta tangente horizontal.
c	coesão efetiva do critério de Hoek & Brown.
c	coesão efetiva do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
c	parâmetro que define a variação do volume específico com a sucção. Modelo Barcelona.
C_{ap}	coesão aparente do solo não saturado.
c_{pico}	coesão efetiva de pico do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
c_{res}	coesão efetiva residual do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
c_i	parâmetros do modelo de Green.
C	valor da superfície cao no centro da elipse. Modelo Cap.
C	parâmetro da função de endurecimento. Modelo Lade-Kim.
C	parâmetro do material. Modelo de superfícies aninhadas.
C_{ijkl}	matriz constitutiva genérica.

C_{ijkl}^{DSC}	matriz constitutiva da Teoria DSC.
C_i	parâmetros da função hipoplástica.
C_f	parâmetro do critério de ruptura Generalizado.
d	parâmetro que define a variação da rigidez do solo com a sucção. Modelo Barcelona.
D	parâmetro do modelo Cap.
D	variável definida no Modelo Lade-Kim.
D	função perturbação. Teoria DSC.
D_f	valor de ruptura da função perturbação. Teoria DSC.
D_s	fator de sucção da função D . Teoria DSC.
D_u	valor último da função perturbação. Teoria DSC.
D_x	fator de amolecimento da função D . Teoria DSC.
D_{est}	função D para solos estruturados.
e	índice de vazios do solo.
e_{min}	índice de vazios mínimo do solo.
e_{cr}	índice de vazios crítico do solo.
e^*	índice de vazios do solo remoldado.
e_{IC}^*	índice de vazios para $p' = 1\text{kPa}$. Modelo Cam Clay estruturado.
e	excentricidade. Modelo Generalizado.
E	módulo elástico (de Young).
E_c	módulo elástico confinado.
E_t	módulo elástico tangente.
E_{ti}	módulo elástico tangente inicial.
E_{ur}	módulo elástico para descarga e recarga.
E^e	módulo elástico.
E^p	módulo plástico.
E_0	constante que define o módulo elástico. Modelo Hierárquico.
E_{50}	módulo elástico tangente (50% da tensão de ruptura).
E_{50}^{ref}	rigidez de referência em carregamento (50% da tensão de ruptura). Modelo HSM.
E_{ur}^{ref}	rigidez de referência em descarga e recarga. Modelo HSM.
E_{oed}^{ref}	rigidez de referência em compressão confinada. Modelo HSM.
E_{ij}	tensor de deformações de desvio.
E^p	deformação plástica de desvio.
f_{ij}	função de escoamento.
f_c'	resistência à compressão uniaxial.
f_t'	resistência à tração uniaxial.
f_{est}	parâmetro da função D para solos estruturados.
f_1	superfície de colapso. Modelo Cap.
f_2	superfície cap. Modelo Cap.
F	função de escoamento.
F_b	função básica. Modelo Hierárquico.

F_s	função de forma. Modelo Hierárquico.
g	função de forma do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
g_p	potencial plástico do modelo de Lade-Kim.
g_{pp}	função de forma do potencial plástico do modelo Mohr-Coulomb.
G	módulo cisalhante.
G_e	módulo cisalhante do modelo Bi-Linear.
G_p	parâmetro da lei de endurecimento do modelo Matsuoka-Nakai.
G_{pi}	valor inicial de G_p . Modelo Matsuoka-Nakai.
G_{pt}	valor tangente de G_p . Modelo Matsuoka-Nakai.
G_{ur}	módulo cisalhante para descarga e recarga.
G_1	parâmetro para ajuste do módulo cisalhante do modelo K-G.
h	parâmetro da superfície de escoamento. Modelo Lade-Kim.
h	parâmetro escalar de endurecimento. Modelo tipo Bolha.
h	parâmetro da função D. Teoria DSC.
h	função hipoplástica.
H	função de correção do modelo tipo Bolha.
H^p	módulo de endurecimento. Modelo de superfícies aninhadas.
I_1	1º invariante do tensor de deformações.
I_2	2º invariante do tensor de deformações.
I_3	3º invariante do tensor de deformações.
I_e	fator de dilatação. Modelo Hipoplástico.
J_1	1º invariante do tensor de tensões.
J_2	2º invariante do tensor de tensões.
J_3	3º invariante do tensor de tensões.
J_{2D}	2º invariante do tensor de tensões de desvio.
\bar{J}_1	1º invariante do tensor de tensões modificado. Modelo Hierárquico.
\bar{J}_{2D}	2º invariante do tensor de tensões de desvio modificado. Modelo Hierárquico.
k	parâmetro do critério de ruptura de Drucker-Prager.
k	raio da superfície aninhada. Modelo de superfícies aninhadas.
k	parâmetro de proporcionalidade. Teoria DSC.
k	parâmetro de controla o incremento da coesão com a sucção. Modelo Barcelona.
k_E	constante que define o módulo elástico. Modelo Hierárquico.
K	módulo de deformação volumétrica.
K_e	módulo de deformação volumétrica do modelo Bi-Linear.
K_b	parâmetro para modulo elástico E dependente do confinamento.
K_h	parâmetro para modulo elástico E dependente do confinamento.
K_{ur}	parâmetro para modulo elástico E dependente do confinamento.
K_m	variável definida pelo modelo Matsuoka-Nakai.
K_F	parâmetro do critério de ruptura. Modelo Matsuoka-Nakai.
K_{GP}	parâmetro da lei de endurecimento. Modelo Matsuoka-Nakai.

K_0	coeficiente de empuxo ao repouso.
K_0^{NC}	coeficiente de empuxo ao repouso para solo normalmente adensado: K_0^{NA} .
m	parâmetro de atrito interno do critério de Hoek & Brown.
m	parâmetro do modelo HSM.
m	parâmetro do critério de ruptura. Modelo Lade-Kim.
m	expoente, parâmetro para módulo elástico E dependente do confinamento.
M	inclinação da linha de estado crítico.
M_J	inclinação da linha de estado crítico. Modelo tipo Bolha.
M	constante do modelo Drucker-Prager.
n	expoente, parâmetro para módulo elástico E dependente do confinamento.
n	parâmetro de câmbio de fase. Modelo Hierárquico.
np	expoente de cisalhamento. Modelo Matsuoka-Nakai.
n_f	vetor normal unitário.
N_{ij}	vetor normal unitário.
$N(0)$	parâmetro que define o volume específico. Modelo Barcelona.
$N(s)$	parâmetro que define o volume específico do solo não saturado. Modelo Barcelona.
p	tensão esférica.
p	variável de Lambe.
p	parâmetro da função de endurecimento. Modelo Lade-Kim.
p_a	pressão atmosférica.
p_{at}	pressão atmosférica.
p_i	parâmetros de ajuste do modelo Hipoplástico.
p_p	tensão de pré-adensamento isotrópico.
p_s	resistência coesiva do solo não saturado. Modelo Barcelona.
p_w	tensão na água, em solos não saturados.
p'_s	parâmetro de endurecimento. Modelo Cam Clay estruturado.
p'_{yi}	tensão de escoamento de solo remoldado. Modelo Cam Clay estruturado.
p^c	tensão de referência. Modelo Barcelona.
p^{ref}	pressão de referência. Modelo HSM.
p_0	tensão de pré-adensamento, caso não saturado. Modelo Barcelona.
p_0^*	tensão de pré-adensamento, caso saturado. Modelo Barcelona.
q	tensão de desvio.
q	variável de Lambe.
q	parâmetro da superfície de escoamento. Modelo Lade-Kim.
q_a	valor assintótico da resistência cisalhante. Modelo HSM.
q_i	parâmetros de ajuste do modelo Hipoplástico.
q_f	valor da resistência cisalhante em ruptura. Modelo HSM.
Q	função potencial plástico.
r	função elíptica. Modelo Generalizado.
r	parâmetro que define a variação da rigidez do solo com a sucção. Modelo Barcelona.

r_v	relação de deformações volumétrica e total. Modelo Hierárquico.
\vec{r}	vetor direção do movimento da bolha. Modelo tipo Bolha.
R	relação entre o eixo maior e menor da elipse. Modelo Cap.
R	a razão de tamanho entre a bolha e a superfície limite. Modelo tipo Bolha.
R	resistência à tração. Modelo Hierárquico.
R_f	razão de ruptura.
R_s	relação de resistência. Teoria DSC.
s	sucção (deficiência de poro-pressão).
s	parâmetro da função D. Teoria DSC.
s_0	máxima sucção já experimentada pelo solo. Modelo Barcelona.
S_{ij}	tensor de tensões de desvio.
S_r	relação de tensões. Modelo Hierárquico.
S_u	resistência ao cisalhamento não drenada.
SL	nível de tensão (modelo Hiperbólico).
SS	estado de tensão (modelo Hiperbólico).
T	função escalar do modelo tipo Bolha.
U_0	função densidade de energia interna de deformação.
U_{CO}	função densidade de energia interna de deformação complementar.
V	volume de solo.
V	volume de solo em estado FA. Teoria DSC.
x	função escalar definido pelo modelo MIT-E3.
X	parâmetro de endurecimento. Modelo Cap.
w	parâmetro da função D. Teoria DSC.
W	trabalho.
W	parâmetro do modelo Cap.
W^p	trabalho plástico.
dW	diferencial de trabalho.
z	parâmetro da função D. Teoria DSC.
Z	parâmetro do modelo Cap.

Símbolos gregos:

a	parâmetro do critério de ruptura de Drucker-Prager.
a	parâmetro auxiliar da superfície cap. Modelo HSM.
a	parâmetro da superfície de colapso. Modelo Cap.
a	função de tensão definida no modelo de Lade-Kim.
a	função de endurecimento do modelo Hierárquico.
a	parâmetro de ajuste da lei de fluxo. Modelo Barcelona.
a_Q	função de endurecimento do modelo Hierárquico (fluxo não associado).
a_0	valor inicial da função de endurecimento do modelo Hierárquico.
a_i	funções de resposta do modelo Hipoelástico.
a_{ij}	vetor que indica o centro das superfícies de escoamento no modelo de superfícies aninhadas.
a_K	parâmetro do modelo K-G.

a_G	parâmetro do modelo K-G.
b	parâmetro auxiliar da superfície cap. Modelo HSM.
b	parâmetro da superfície de colapso. Modelo Cap.
b	parâmetro de forma do modelo Hierárquico.
b	parâmetro que define a variação da rigidez do solo com a sucção. Modelo Barcelona.
b_G	parâmetro do modelo K-G.
b^m	centro das superfícies aninhadas. Modelo de superfícies aninhadas.
δ_{ij}	delta de Kronecker.
e_{ij}	vetor deformação.
e_{ij}^a	deformações no estado atual. Teoria DSC.
e_{ij}^i	deformações no estado RI. Teoria DSC.
e_{ij}^c	deformações no estado FA. Teoria DSC.
\dot{e}	taxa de deformação.
e_q	deformação de desvio.
e_v	deformação volumétrica.
e_v^e	deformação volumétrica elástica.
e_v^p	deformação volumétrica plástica.
e_{vp}^p	deformação volumétrica plástica para carregamento isotrópico. Modelo Barcelona.
e_{vs}^p	deformação volumétrica plástica para variação da sucção. Modelo Barcelona.
e_{pm}	deformação normal no plano mobilizado.
e_{pem}	deformação normal no plano espacial mobilizado.
f	ângulo de atrito interno do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
f_b	ângulo de atrito interno devido à sucção do solo.
f_m	ângulo de atrito interno mobilizado.
f_{cv}	ângulo de atrito interno para o estado crítico.
f_{pico}	ângulo de atrito interno de pico do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
f_{res}	ângulo de atrito interno residual do critério de ruptura Mohr-Coulomb.
f_F	ângulo de atrito de ruptura. Modelo Matsuoka-Nakai.
f_0	parâmetro para definir o ângulo de atrito interno dependendo do confinamento.
f_i	funções elásticas de resposta do modelo de Cauchy.
f_{TC}	ângulo de atrito interno para ensaio triaxial de compressão.
f_{TE}	ângulo de atrito interno para ensaio triaxial de extensão.
Δf	parâmetro para definir o ângulo de atrito interno dependendo do confinamento.
g	distorção.

g	parâmetro da superfície de colapso. Modelo Cap.
g	parâmetro de escoamento do modelo Hierárquico.
g_{pm}	distorção no plano mobilizado.
g_{pem}	distorção no plano espacial mobilizado.
g^p	distorção plástica.
g^{oct}	distorção octaédrica.
h	parâmetro da função de endurecimento. modelo Hierárquico.
h	relação entre a tensão de desvio e a esférica.
h_0	constante para lei de endurecimento dependente do confinamento. Modelo Hierárquico.
h_1	constante para lei de endurecimento dependente do confinamento. Modelo Hierárquico.
h_l	parâmetro do critério de ruptura. Modelo Lade-Kim.
k	parâmetro de não associatividade do modelo Hierárquico.
k	inclinação da linha de inchamento no plano ($n - \ln p'$).
k^*	inclinação da linha de inchamento no plano ($\ln n - \ln p'$).
k^*	inclinação da linha de inchamento para solo remoldado. Modelo Cam Clay estruturado.
k_s	inclinação da linha de inchamento para variações na sucção. Modelo Barcelona
k_0	constante para fluxo não associado dependente do confinamento. Modelo Hierárquico.
k_1	constante para fluxo não associado dependente do confinamento. Modelo Hierárquico.
l	1º constante de Lamé.
l	inclinação da linha virgem de adensamento no plano ($n - \ln p'$).
l^*	inclinação da linha virgem de adensamento no plano ($\ln n - \ln p'$).
l^*	inclinação da linha virgem de adensamento para solo remoldado. Modelo Cam Clay estruturado.
$l(s)$	inclinação da linha virgem de adensamento para solo não saturado. Modelo Barcelona.
l	parâmetro da lei de fluxo do modelo Matsuoka-Nakai.
l	escalar relacionado com a deformação plástica. Modelo de superfícies aninhadas.
l_s	inclinação da linha virgem de adensamento para variações na sucção. Modelo Barcelona
dI	constante de proporcionalidade da lei de fluxo.
m	Ângulo de dilatação.
m	2º constante de Lamé.
m	parâmetro do potencial plástico. Modelo de Lade-Kim.
m	parâmetro da lei de fluxo do modelo Matsuoka-Nakai.
m'	parâmetro da lei de endurecimento do modelo Matsuoka-Nakai.

m_{res}	Ângulo de dilatação residual.
dm	variável definida no modelo de superfícies aninhadas.
n	coeficiente de Poisson.
n	volume específico.
n_t	coeficiente de Poisson tangente.
n_{ur}	módulo de Poisson para a condição de descarga e recarga.
n_{100}	volume específico do solo normalmente adensado para $p' = 100 kPa$.
q	Ângulo de Lode.
q	Ângulo polar de desvio. Coordenada de Haigh-Westergaard.
Θ	Invariante alternativo do tensor de tensões.
r	Invariante de tensão de desvio. Coordenada de Haigh-Westergaard.
r	variável definida no Modelo Lade-Kim.
s_{ij}	vetor tensão.
s_{ij}^a	tensões no estado atual. Teoria DSC.
s_{ij}^i	tensões no estado RI. Teoria DSC.
s_{ij}^c	tensões no estado FA. Teoria DSC.
\dot{s}	taxa de tensão.
s_d	tensão de desvio
s_{oct}	tensão normal octaédrica.
s_{pm}	tensão normal no plano mobilizado.
s_{pem}	tensão normal no plano espacial mobilizado.
s_q	tensão de desvio.
s_N	tensão normal no plano mobilizado.
\bar{s}_u	tensão assintótica do modelo Hiperbólico.
t_{pm}	tensão cisalhante no plano mobilizado.
t_{pem}	tensão cisalhante no plano espacial mobilizado.
w	parâmetro de não associatividade. Modelo Cam Clay estruturado.
W	densidade de energia complementar. Modelo Hiperbólico.
x	Invariante de tensão hidrostática. Coordenada de Haigh-Westergaard.
x	Trajetória de deformação plástica total. Modelo Hierárquico.
x_V	Trajetória de deformação plástica volumétrica. Modelo Hierárquico.
x_D	Trajetória de deformação plástica de desvio. Modelo Hierárquico.
y	parâmetro de amolecimento do modelo Mohr-Coulomb.
y	parâmetro do modelo tipo Bolha.
y_i	funções escalares de resposta. Modelo Hipoplástico.
y_1	parâmetro definido no modelo de Lade-Kim.
y_2	parâmetro do potencial plástico. Modelo de Lade-Kim.

“Além disso, filho meu, sê avisado. De fazer muitos livros não há fim; e o muito estudar é enfado da carne. Este é o fim do discurso; tudo já foi ouvido: Teme a Deus, e guarda os seus mandamentos; porque isto é todo o dever do homem. Porque Deus há de trazer a juízo toda obra, e até tudo o que está encoberto, quer seja bom, quer seja mau.”

Eclesiastes 12.12-14