

Juan Pablo Ibañez

**Modelagem micro-mecânica
discreta de solos residuais**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil



Juan Pablo Ibañez

**Modelagem micro-mecânica
discreta de solos residuais**

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. Tácio Mauro Pereira De Campos

Co-orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Rio de Janeiro, abril de 2008



Juan Pablo Ibañez

**Modelagem micro-mecânica
discreta de solos residuais**

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. Tácio Mauro Pereira De Campos

Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

UFV-MG

Prof. Fernando Antônio Medeiros Marinho

USP

Prof. Leonardo José do Nascimento Guimarães

UFPE

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de abril de 2008

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. Em 2003 obteve o título de Mestre em Engenharia Civil no programa oferecido pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Atualmente se desempenha como analista no laboratório de computação gráfica Tecgraf/PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Ibañez, Juan Pablo

Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais / Juan Pablo Ibañez ; orientador: Tácio M. P. De Campos ; co-orientador: Eurípedes A. Vargas Jr. – 2008.

2 v. : 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. Solos residuais. 3. Método dos elementos discretos. 4. Modelagem numérica. 5. Análise micro-mecânica. I. De Campos, Tácio M. P. II. Vargas Jr., Eurípedes A. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

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

A Verônica, minha esposa e companheira, pelo seu doce amor, amizade e constante apóio.

A Sofia e Micaela, minhas princesinhas, presentes de Deus que enchem minha vida de amor e alegria.

A minha família em Argentina, pais, avó, irmão, sogra, cunhadas, tios, e restante da família e amigos que se preocuparam em manter os laços de amizade e carinho na distância.

Ao professor Tácio, pela orientação recebida, pela confiança depositada em mim ao longo do programa de doutorado, e pela possibilidade de pertencer ao seu grupo de pesquisa no marco do projeto PRONEX.

Ao professor Vargas, pela orientação recebida, pelo compromisso com a minha pesquisa e pelos diversos apoios ao meu desenvolvimento profissional.

Aos professores membros da banca, pela disposição para analisar esta tese e pelos aportes e sugestões dadas.

A Márcio Santi, pela oportunidade de pertencer à família do Tecgraf, e pela boa vontade e apóio manifestos para com a minha pesquisa.

Ao João Luiz e à Raquel, meus colegas *discretos*, pela sua valiosa ajuda no desenvolvimento da minha pesquisa.

Aos colegas do Tecgraf pelo convívio cordial no dia a dia e por todo o aprendizado com eles.

Ao *Andrezinho*, pela sua ajuda desinteressada que facilitou meu convívio com a linguagem Lua.

A CNPq e CAPES, pelo apóio financeiro nos primeiros anos do doutorado.

Ao TECGRAF, pelo apóio financeiro, e por me oferecer um espaço de trabalho, aprendizado e convívio que resultou um apóio fundamental para a minha pesquisa.

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; De Campos, Tácio Mauro Pereira. **Modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais**. Rio de Janeiro, 2008. 394p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho de pesquisa estuda a modelagem numérica de solos residuais no que se refere ao seu comportamento mecânico, a partir da análise micro-mecânica, utilizando como ferramenta de modelagem o método dos elementos discretos (MED), o qual permite a representação do solo como meio particulado 2D por meio de elementos discretos circulares. Diversos são os fenômenos micro e macro-estruturais presentes nos solos residuais, os quais condicionam sua resposta mecânica, podendo-se mencionar a dupla estrutura e dupla porosidade, a presença de uma matriz argilosa, a condição não saturada, a cimentação e quebra de grãos, e a presença de pequenos blocos de rocha não alterada. A partir do estudo destes fenômenos foram propostas formulações matemáticas que os descrevem, as quais foram implementadas no código de elementos discretos *DEMLib*. Após a calibração e validação do programa de análise implementado, a influência de cada um destes fenômenos na resposta mecânica do solo foi estudada pela simulação dos ensaios edométrico e de cisalhamento direto em amostras discretas com compacidade variada, criticando os resultados e obtendo conclusões. Em seguida estes fenômenos foram estudados de forma combinada no intuito de reproduzir a resposta de alguns solos residuais jovens e maduros. Encerrando o trabalho foram resumidas as conclusões obtidas e apontadas sugestões para um aprofundamento e desenvolvimentos subsequentes da linha de pesquisa implementada.

Palavras-chave

Solos não saturados, Solos residuais, Método dos elementos discretos, Modelagem numérica, Análise micro-mecânica.

Abstract

Ibañez, Juan Pablo; De Campos, Tácio Mauro Pereira. **Discrete micro-mechanical modeling of residual soils**. Rio de Janeiro, 2008. 394p. PhD. Thesis – Departament of Civil Engeneering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present research studies the numerical modeling of the mechanical behavior of residual soils, by a micro-mechanical analysis, using as modeling tool the discrete elements method (DEM), which allows the representation of the soil as 2D particle assembly of circular discrete elements. There are several micro and macro structural phenomena present in residual soils, which determine its mechanical response: double structure and double porosity of soil mass, the presence of a clay-like matrix, partially saturated condition, grain cementation, grain crushing, and the presence of small blocks of not-weathered parental rock. Based on the study of these phenomena, mathematical formulations have been proposed in order to describe them, which have been implemented in the DEMlib discrete elements code. After calibration and validation of the implemented analysis program, the influence of each phenomena in soil response was studied by simulating edometrical and direct shear tests in discrete samples with several densities, criticizing the results and getting conclusions. Afterwards, these phenomena were studied in a combined way in order to reproduce the response of some young and mature residual soils. To finish up this work the conclusions obtained have been summarized and suggestions for deepening and further developing of the implemented research line have been stated.

Keywords

Unsaturated soils, Residual soils, Discrete elements method, Numerical Modeling, Micro-mechanical analysis.

Sumário

1.	Introdução ao Objeto de Pesquisa	25
2.	Caracterização dos Solos Residuais: Gênese, Composição e Comportamento Observado	29
2.1.	Gênese dos solos residuais	29
2.1.1.	Os processos intempéricos	29
2.1.2.	Intemperismo físico	34
2.1.3.	Intemperismo químico	36
2.1.4.	Perfil de intemperismo	38
2.1.5.	Grau de intemperismo	40
2.2.	Composição dos solos residuais	41
2.2.1.	Mineralogia dos solos residuais	42
2.2.2.	Formação da estrutura residual	43
2.2.3.	Estrutura dupla dos solos residuais	44
2.3.	Comportamento dos solos residuais	48
2.3.1.	Influência da estrutura residual	48
2.3.2.	Influência da anisotropia	58
2.3.3.	Influência da resistência dos grãos	61
2.3.4.	Influência da compacidade	63
2.3.5.	Influência do grau de saturação	64
2.3.6.	Influência do grau de intemperismo	69
3.	Modelagem Micro-Mecânica Discreta de Solos Residuais	71
3.1.	Modelagem contínua e discreta	71
3.1.1.	Modelagem mecânica	72
3.1.2.	Modelagem micro-mecânica	76
3.2.	Fundamentos do método dos elementos discretos (MED)	82
3.2.1.	Representação de blocos e partículas	82
3.2.2.	Representação do contato	83
3.2.3.	Algoritmo de solução	83
3.2.4.	Perspectivas de desenvolvimento	84
3.3.	Modelos de partículas em geotecnia	86
3.3.1.	Modelagem de ensaios laboratoriais	86
3.3.2.	Modelagem de meios rochosos	87
3.3.3.	Modelagem de meios particulados não saturados	87
3.3.4.	Modelagem de quebra de grãos	88
3.4.	Biblioteca <i>DEMlib</i>	89
3.4.1.	Classes e objetos	90
3.4.2.	Algoritmo de relaxação dinâmica	92
3.4.3.	Estabilidade e convergência	95
3.5.	Modelagem discreta de solos residuais	97
3.5.1.	Modelagem discreta da dupla estrutura	97
3.5.2.	Modelagem discreta das características granulométricas	98
3.5.3.	Modelagem discreta dos fenômenos macro-estruturais	99
3.5.4.	Modelagem discreta dos fenômenos de fluxo	100
3.6.	Outras aplicações da modelagem discreta usando <i>DEMlib</i>	100

4.	Formulações Micro-Mecânicas Discretas	102
4.1.	Modelagem de grumos argilosos	103
4.1.1.	Formulação do problema de adensamento radial	103
4.1.2.	Solução da equação de adensamento radial	107
4.1.3.	Solução com variáveis adimensionais	110
4.1.4.	Implementação numérica do elemento grumo	114
4.1.5.	Validação da formulação implementada	120
4.2.	Modelagem da cimentação de grãos	124
4.2.1.	Formulação da cimentação de contato	124
4.2.2.	Implementação da cimentação de contato	126
4.2.3.	Validação da formulação implementada	127
4.3.	Modelagem da ligação rochosa	129
4.3.1.	Formulação da ligação rochosa	130
4.3.2.	Implementação da ligação rochosa	132
4.3.3.	Validação da formulação implementada	133
4.4.	Modelagem da quebra de grãos	135
4.4.1.	Formulação do mecanismo de quebra	135
4.4.2.	Implementação da quebra de grãos	137
4.4.3.	Validação da formulação implementada	140
4.5.	Modelagem do fluxo não saturado	142
4.5.1.	Formulação do fenômeno de fluxo não saturado	143
4.5.2.	Implementação do fluxo não saturado	157
4.5.3.	Validação da formulação implementada	159
4.6.	Modelagem do fenômeno expansivo	161
4.6.1.	Expansão em solos	161
4.6.2.	O fenômeno da expansão	163
4.6.3.	Modelagem do mecanismo de expansão	171
4.6.4.	Implementação do mecanismo de expansão	174
4.6.5.	Validação da formulação implementada	176
4.7.	Melhorias na interface gráfica do programa de análise	179
5.	Validação do Modelo de Análise Micro-Mecânica	185
5.1.	Critérios para a validação do modelo	185
5.1.1.	Roteiro de validação	185
5.1.2.	Ensaio de referência: cisalhamento direto	186
5.1.3.	Outras simulações do ensaio de cisalhamento direto usando MED	190
5.2.	Calibração dos parâmetros do programa	194
5.2.1.	Rigidez normal (kn)	194
5.2.2.	Rigidez tangencial (ks)	196
5.2.3.	Amortecimento (Cn, Cs)	197
5.2.4.	Massa das paredes (mw)	198
5.3.	Calibração do ensaio de referência	199
5.3.1.	Influência da representação do solo	199
5.3.2.	Influência do índice de vazios da amostra	203
5.3.3.	Influência da separação da caixa	205
5.3.4.	Influência da parte da caixa que desloca	208
5.4.	Validação do programa	211
5.4.1.	Resultados dos ensaios de validação	211
5.4.2.	Crítica dos resultados obtidos	221
5.4.3.	Refinamento da distribuição granulométrica	226

6.	Simulação dos Fenômenos Micro-Mecânicos presentes em Solos Residuais	233
6.1.	Objetivos das simulações	233
6.2.	Quebra de grãos	234
6.2.1.	Ensaio edométrico	235
6.2.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	238
6.2.3.	Resultados da campanha de ensaios	243
6.2.4.	Análise dos resultados	260
6.3.	Cimentação de grãos	265
6.3.1.	Ensaio edométrico	266
6.3.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	272
6.3.3.	Resultados da campanha de ensaios	278
6.3.4.	Análise dos resultados	293
6.4.	Forma dos grãos	296
6.4.1.	Ensaio edométrico	297
6.4.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	298
6.4.3.	Resultados da campanha de ensaios	298
6.4.4.	Análise dos resultados	303
6.5.	Grumos argilosos	305
6.5.1.	Ensaio edométrico	306
6.5.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	310
6.5.3.	Resultados da campanha de ensaios	311
6.5.4.	Análise dos resultados	319
6.6.	Condição não saturada	322
6.6.1.	Ensaio edométrico	323
6.6.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	328
6.6.3.	Resultados da campanha de ensaios	329
6.6.4.	Análise dos resultados	336
6.7.	Condição não saturada e grumos argilosos	341
6.7.1.	Ensaio edométrico	341
6.7.2.	Campanha de ensaios de cisalhamento direto	343
6.7.3.	Resultados da campanha de ensaios	343
6.7.4.	Análise dos resultados	346
7.	Simulação do Comportamento de Solos Residuais	348
7.1.	Comportamento mecânico de solos residuais	348
7.2.	Simulação de solos residuais jovens	356
7.2.1.	Montagem das amostras	356
7.2.2.	Ensaio edométrico	357
7.2.3.	Ensaio de cisalhamento direto	360
7.2.4.	Análise dos resultados	365
7.3.	Simulação de solos residuais maduros	369
7.3.1.	Montagem das amostras	369
7.3.2.	Ensaio edométrico	370
7.3.3.	Ensaio de cisalhamento direto	371
7.3.4.	Análise dos resultados	373
7.4.	Conclusões	374
8.	Considerações finais	375
	Referências Bibliográficas	386

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1	Roteiro da pesquisa.	28
------------	----------------------	----

Capítulo 2

Figura 2.1	Influência do clima na formação de perfis residuais: a) Climas úmidos e desérticos no mundo; b) Regiões quentes e temperadas no mundo; c) Características dos perfis residuais para cada região climática (Strakhov, 1967).	31
Figura 2.2	Influência do clima global na formação de argilominerais (Uehara, 1982).	32
Figura 2.3	Perfil de intemperismo: a) rocha metamórfica; b) rocha ígnea intrusiva. (adaptado de Deere & Patton, 1971).	38
Figura 2.4	Classificação da ISRM para um perfil de alteração (Little, 1969; ISRM, 1981).	39
Figura 2.5	Processo de formação dos solos residuais.	41
Figura 2.6	Cristalização e alteração para uma andesita (Bowen, 1928 & Arnold, 1984).	42
Figura 2.7	a) Distribuição do volume de poros de duas amostras de bentonita compactada (Lloret et al, 2003); b) Representação dos dois níveis estruturais.	45
Figura 2.8	Arranjos micro e macro-estruturais (Collins, 1985).	46
Figura 2.9	Representação esquemática dos níveis estruturais.	48
Figura 2.10	Comportamento do modelo de dupla estrutura no plano p-s.	49
Figura 2.11	Comportamento observado de solos residuais no ensaio triaxial: a) solo jovem; b) solo maduro (Sandroni & Maccarini, 1981).	50
Figura 2.12	a) Características físicas de solo laterítico (1m) e saprolítico (5m); b) Curva característica dos solos (Futai et al, 2004).	51
Figura 2.13	Ensaio triaxial com sucção controlada: a) solo jovem; b) solo maduro (Futai et al, 2004).	52
Figura 2.14	Imagem de microscopia eletrônica de uma areia cimentada: a) Arranjo dos grãos e incrustações cimentíceas; b) Detalhe de cimentação (Cuccovillo & Coop, 1997).	53
Figura 2.15	Esquema de compressão simples de solo fraco e altamente cimentado.	54
Figura 2.16	Esquema dos modos de cisalhamento de solos estruturados.	55
Figura 2.17	Ensaio triaxial de calcarenita natural (Coop & Atkinson, 1993).	55
Figura 2.18	Mecanismo de colapso para areias metaestáveis (Knight, 1961).	56
Figura 2.19	Índice B em função da tensão isotrópica p no estado crítico para um solo residual de granito (Lee & Coop, 1995).	62
Figura 2.20	Relação entre a densidade do solo e a resistência ao cisalhamento, para um solo residual de andesita (Howatt, 1988).	63
Figura 2.21	Influência da sucção no contato entre grãos de solo.	65
Figura 2.22	Curva característica do solo (sucção x umidade volumétrica).	65

Figura 2.23	Critério de ruptura de Mohr-Coulomb no espaço (τ, σ, s) modificado por Frendlund <i>et al</i> (1978).	66
Figura 2.24	a) Evolução da coesão aparente com a sucção; b) Envoltória de resistência não linear para estados não saturados (Lopes <i>et al</i> , 2007).	67
Figura 2.25	Fenômenos de inchamento e colapso sob umedecimento do solo.	68

Capítulo 3

Figura 3.1	Diferentes meios e suas descontinuidades.	72
Figura 3.2	Três escalas de modelagem de argilas (Murad & Cushman, 1996).	78
Figura 3.3	Modelo bimodal para argilas (Murad <i>et al</i> , 2001).	80
Figura 3.4	Modelo bimodal para meios porosos não saturados (Chateau & Dormieux, 2002).	80
Figura 3.5	a) Contato entre elementos e forças de contato geradas; b) Rigidez tipo mola-amortecedor.	83
Figura 3.6	Ciclo de cálculo do algoritmo de Relaxação Dinâmica.	84
Figura 3.7	Interface gráfica original do código de elementos discretos <i>Sand</i> .	89
Figura 3.8	Classe <i>Block</i> e derivadas.	90
Figura 3.9	Classe <i>Wall</i> e derivadas.	90
Figura 3.10	Classe <i>Link</i> e derivadas.	91
Figura 3.11	Classe <i>Damping</i> e derivadas.	91
Figura 3.12	Forças e momentos atuantes em dois elementos discretos em contato.	92
Figura 3.13	Contatos por superposição: a) Δn ; b) Δs .	94
Figura 3.14	Ciclo de cálculo por relaxação dinâmica.	94
Figura 3.15	Simulação discreta da formação de um domo salino.	101

Capítulo 4

Figura 4.1	Elemento grumo representado por um disco 2D. a) Grumo sob a ação de uma carga uniformemente distribuída; b) Elemento diferencial de grumo.	105
Figura 4.2	Funções de Bessel de primeira classe de ordem zero $J_0(\alpha_i r)$, para as seis primeiras raízes.	108
Figura 4.3	Funções de Bessel de primeira classe de ordem um $J_1(\beta_i r)$, para as seis primeiras raízes.	108
Figura 4.4	Distribuição das poro-pressões normalizadas \bar{u} no disco.	111
Figura 4.5	Distribuição do grau de adensamento Ur no disco.	112
Figura 4.6	Evolução do grau de adensamento médio U_{rm} .	112
Figura 4.7	Evolução do deslocamento radial normalizado δ_r^n .	113
Figura 4.8	Volume de água normalizado V_w^n cedido em função do fator de tempo Tr .	114
Figura 4.9	Ajuste exponencial dos deslocamentos radiais normalizados no grumo.	115

Figura 4.10	Ajuste exponencial do volume de água normalizado cedido ao meio.	115
Figura 4.11	a) Forças de contato fc_i^n e de sucção fs_i^n no elemento grumo num instante n ; b) Carregamento equivalente p_0^n como condição de contorno do elemento.	117
Figura 4.12	Adensamentos no grumo para carregamentos diferidos no tempo.	118
Figura 4.13	Adensamento sob carregamento variável. Deslocamento radial.	118
Figura 4.14	Estrutura de dados para o cálculo dos estágios de adensamento do grumo.	120
Figura 4.15	Geometria do exemplo de validação.	120
Figura 4.16	Carga de adensamento teórica e iterativa.	121
Figura 4.17	Curva de adensamento para $q = 100$.	121
Figura 4.18	Curva de adensamento semi-logaritmica para $q = 100$.	122
Figura 4.19	Curva de adensamento para os estágios $q = 100$ e $q = 300$.	122
Figura 4.20	Compressão confinada de solo com grumos: a) Configuração inicial; b, c, d) Configurações durante o adensamento; e) Configuração final; f) Configuração final para o mesmo solo sem grumos.	123
Figura 4.21	Caráter pontual da cimentação entre grãos de solo.	124
Figura 4.22	Comportamento mecânico de contato cimentado.	125
Figura 4.23	Exemplo de validação: a) Solo cimentado; b) Solo não cimentado.	128
Figura 4.24	Perfil de alteração. Blocos de rocha presentes na massa residual.	129
Figura 4.25	Modelo de viga de conexão. Esforço normal, cisalhante e momento.	130
Figura 4.26	Viga de conexão. Geometria, esforços atuantes e campo de tensões.	131
Figura 4.27	Critério de ruptura de Coulomb. Parâmetros do critério.	132
Figura 4.28	Ensaio de compressão confinada: a) Geometria inicial; b) Solo com bloco rochoso; c) Solo sem bloco rochoso.	134
Figura 4.29	Modos de ruptura de um grão de quartzo comprimido diametralmente.	136
Figura 4.30	Mecanismo de quebra de grãos: a) Grão fissurado sob carregamento; b) Ensaio de tração por compressão diametral.	136
Figura 4.31	Microscopia de grãos de solo residual. Detalhe de micro-fissuras aleatórias.	137
Figura 4.32	Montagem do ensaio de compressão diametral no elemento: a) Coleta das forças nos contatos; b) Forças resultantes segundo a direção da máxima força, e normal a esta; c) Forças do ensaio; d) Novos elementos gerados.	139
Figura 4.33	Adensamento de solo com grãos fracos: a) Configuração inicial; b,c,d) Estágios do ensaio; e) Configuração final; f) Configuração final no caso sem grãos fracos.	141
Figura 4.34	Geometria idealizada do menisco: a) Quase-contato; b) Contato estrito; c) Super-contato.	144
Figura 4.35	a) Força capilar no menisco; b) Força capilar em função do ângulo de molhado.	146
Figura 4.36	Processos de transferência de massa partícula-menisco-poro.	147

Figura 4.37	Rede de fluxo baseada nos contatos entre elementos.	149
Figura 4.38	Conectividade de fluxo entre meniscos e partículas.	150
Figura 4.39	Evolução da espessura da película de água aderida numa partícula de raio $R = 0,50\text{mm}$ em função da sucção, segundo o modelo de Kovacs (1981).	151
Figura 4.40	Rede de fluxo em bolsões de grumos argilosos.	152
Figura 4.41	Fusão de meniscos.	154
Figura 4.42	Esquema do acoplamento fluxo-mecânico.	155
Figura 4.43	Ciclo de cálculo no modelo de fluxo.	156
Figura 4.44	Estrutura de dados da rede de fluxo.	158
Figura 4.45	Ensaio edométrico com umedecimento: a) Condição inicial; b,c,d) Seqüência do ensaio.	160
Figura 4.46	Substituição do Mg^{2+} por Al^{3+} causando a carga negativa da partícula.	165
Figura 4.47	Expansão de montmorilonita de cálcio e sódio.	165
Figura 4.48	Aparelho de pressão de ar para realização do ensaio de inchamento com controle da sucção (Jimenez Salas & Alpañes, 1975).	167
Figura 4.49	Pressão de inchamento de uma amostra de solo em função da sucção para três valores de umidade inicial diferentes (Jimenez Salas & Alpañes, 1975).	168
Figura 4.50	Inchamento livre de uma amostra de solo em função da sucção (Jimenez Salas & Alpañes, 1975).	169
Figura 4.51	Ensaio de expansão confinada para 20 e 60 kPa: a) Escala normal; b) Escala logarítmica (adaptado de Jucá e Pontes Filho, 1997).	170
Figura 4.52	Superfície de estado idealizada para solos não saturados.	171
Figura 4.53	Modelo comportamental de solos com dupla estrutura.	172
Figura 4.54	a) Relação entre o espaçamento interpartículas e a pressão de inchamento para uma montmorilonita (Warkentin <i>et al</i> , 1957); b) Deformações volumétricas elásticas na microestrutura segundo o modelo de dupla estrutura.	173
Figura 4.55	Barreira contra infiltração. Condição inicial ($S_r = 4,92\%$).	177
Figura 4.56	Barreira de material não expansivo ($S_r = 5,96\%$).	177
Figura 4.57	Barreira de material expansivo ($S_r = 4,91\%$).	178
Figura 4.58	Utilidades incorporadas na interface gráfica: a) Indicador do número de ciclos e tempo de cálculo e botões para ativar a visualização da numeração de elementos, links e paredes; b) Matriz indicadora de quantidade e atributos de elementos e links.	179
Figura 4.59	Mudanças na interface gráfica do programa de análise: a) Interface do programa Sand original; b) Interface do programa DEMlib-RSM.	180
Figura 4.60	a) Visualização da numeração dos elementos discretos; b) Visualização da numeração dos contatos.	181
Figura 4.61	Visualização das magnitudes físicas nos elementos discretos: a) Velocidades; b) Forças; c) Deslocamentos.	184

Capítulo 5

Figura 5.1	Esquema do ensaio de cisalhamento direto e forças atuantes.	187
Figura 5.2	Técnica de <i>upscaling</i> .	189

Figura 5.3	Simulação de quebra de grãos sob cisalhamento (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005).	192
Figura 5.4	Simulação do ensaio de cisalhamento direto (Zhang & Thornton, 2007).	193
Figura 5.5	Resultados do ensaio: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal (Zhang & Thornton, 2007).	193
Figura 5.6	Parâmetros do sistema de contato entre elementos.	194
Figura 5.7	Superposição (s) de contato entre elementos discretos: a) Entre discos; b) Entre disco e parede.	195
Figura 5.8	Componentes da resistência de areias (Rowe, 1962).	197
Figura 5.9	Upscaling. Deslocamento e discretização da curva granulométrica.	199
Figura 5.10	Ensaio de cisalhamento direto em amostras de solo graduado e uniforme: a) Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	201
Figura 5.11	Ensaio de cisalhamento direto em amostra uniforme: a) Arranjo inicial; b) Detalhe do arranjo denso e estável; c) Detalhe do plano de cisalhamento.	202
Figura 5.12	Técnica dos elementos fictícios: a) Amostra de solo inicial, com os elementos fictícios; b) Configuração final da amostra adensada após a retirada dos elementos fictícios.	204
Figura 5.13	a) Ensaio de cisalhamento direto com as caixas inferior e superior separadas; b) Detalhe da disposição do solo na zona da abertura das caixas.	205
Figura 5.14	Ensaio de cisalhamento direto para caixa fechada e aberta: a) Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	206
Figura 5.15	a) Fuga de material pela separação da caixa durante o cisalhamento da amostra de solo; b) Detalhe da fuga de material e o volume adicional da caixa.	207
Figura 5.16	Ensaio de cisalhamento direto executado com a parte inferior da caixa fixa, e a superior deslocando.	208
Figura 5.17	Ensaio de cisalhamento direto executado com a parte superior da caixa fixa, e a inferior deslocando.	209
Figura 5.18	Forças de atrito nas paredes da caixa superior durante o ensaio.	209
Figura 5.19	Resposta do ensaio de cisalhamento direto: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	210
Figura 5.20	Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 100kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	213
Figura 5.21	Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	214
Figura 5.22	Resposta comparativa da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	215

Figura 5.23	Resposta comparativa da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	216
Figura 5.24	Resposta comparativa da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	217
Figura 5.25	Envoltória de resistência de pico.	218
Figura 5.26	Evolução do índice de vazios e durante o cisalhamento.	219
Figura 5.27	Ensaio de cisalhamento direto. Formação da área de cisalhamento no interior da amostra de solo: a) Configuração inicial; b) c) Amostra cisalhada.	220
Figura 5.28	Componentes da resistência de areias (Rowe, 1962).	223
Figura 5.29	Evolução do ângulo de atrito com o índice de vazios.	224
Figura 5.30	Curvas granulométricas de amostras com 3 e 9 tamanhos de grãos diferentes, a as suas correspondentes curvas de classificação pelo SUCS.	227
Figura 5.31	Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical de 300kPa para amostras muito densas com 3 e 9 tamanhos diferentes de grãos: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	229
Figura 5.32	Elemento de geometria especial formado a partir da ligação rígida de dois elementos circulares.	230
Figura 5.33	Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical de 300kPa para amostras muito densas com 9 tamanhos diferentes de grãos, com e sem grãos especiais: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	231

Capítulo 6

Figura 6.1	Detalhe da quebra de grãos: a) Instante da quebra de dois grãos; b) Rearranjo dos novos grãos que os substituem.	234
Figura 6.2	Quebra de grãos em amostra densa durante o ensaio edométrico.	235
Figura 6.3	a) Curva de adensamento de solo com quebra de grãos; b) Histórico de quebra de grãos com a pressão vertical.	236
Figura 6.4	Histórico de quebra de grãos durante o ensaio de cisalhamento direto, sob uma tensão vertical de 600kPa.	239
Figura 6.5	Histórico de quebra de grãos durante o ensaio de cisalhamento direto, sob uma tensão vertical de 1000kPa.	240
Figura 6.6	Histórico de quebra de grãos durante o ensaio de cisalhamento direto, sob uma tensão vertical de 1500kPa.	241
Figura 6.7	Número total de quebras nas amostras em função da tensão vertical.	242
Figura 6.8	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	244

Figura 6.9	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	245
Figura 6.10	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	246
Figura 6.11	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	247
Figura 6.12	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	248
Figura 6.13	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	249
Figura 6.14	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	250
Figura 6.15	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	251
Figura 6.16	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	252
Figura 6.17	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	253
Figura 6.18	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	254
Figura 6.19	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com quebra de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	255
Figura 6.20	Envoltória de resistência do solo muito fofo com quebra de grãos.	256
Figura 6.21	Envoltória de resistência do solo fofo com quebra de grãos.	256
Figura 6.22	Envoltória de resistência do solo denso com quebra de grãos.	257
Figura 6.23	Envoltória de resistência do solo muito denso com quebra de grãos.	257
Figura 6.24	Evolução do ângulo de atrito com a tensão vertical em amostras com quebra de grãos.	258
Figura 6.25	Índice de vazios inicial e final dos solos com quebra de grãos cisalhados.	259

Figura 6.26	Contribuição do atrito, ditatância, quebra e rearranjo de grãos na envoltória de resistência de Mohr para ensaios drenados em areias (Lee & Seed, 1967).	260
Figura 6.27	Simulação de quebra de grãos sob cisalhamento (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005).	261
Figura 6.28	Resultados relativos à mesma amostra sem quebra: a) Ganho na resistência ao cisalhamento com o número de quebras; b) Variação no índice de vazios com o número de quebras.	263
Figura 6.29	a) Curvas de adensamento normalizada de solos com cimentação de grãos para uma resistência do cimento de $F_c = 5\text{N}$; b) Histórico de quebra de contatos cimentados com a pressão vertical.	267
Figura 6.30	Evolução da tensão virtual de pré-adensamento e o índice de compressão com a porcentagem de contatos cimentados, para amostra fofa de $F_c = 5\text{N}$.	268
Figura 6.31	a) Curvas de adensamento normalizada de solos com e sem cimentação de grãos para igual valor de e_0 ; b) Histórico de quebra de contatos cimentados com a pressão vertical.	269
Figura 6.32	Esquema de uma curva de adensamento de solos fraca e altamente cimentados.	270
Figura 6.33	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras fofas e muito fofas, para tensão vertical de 100 e 300kPa ($F_c = 0,5\text{N}$).	273
Figura 6.34	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras densas e muito densas, para tensão vertical de 300kPa.	274
Figura 6.35	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras fofas e muito fofas, para tensão vertical de 600kPa.	274
Figura 6.36	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras densas e muito densas, para tensão vertical de 600kPa.	275
Figura 6.37	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras densas e muito densas, para tensão vertical de 1000kPa.	275
Figura 6.38	Histórico de quebras de contatos cimentados em amostras densas e muito densas, para tensão vertical de 1500kPa.	276
Figura 6.39	Histórico de quebras de contatos cimentados em função da tensão vertical.	277
Figura 6.40	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa e muito fofa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 100kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	279
Figura 6.41	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa e muito fofa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	280
Figura 6.42	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	281
Figura 6.43	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	282
Figura 6.44	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito fofa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	283

Figura 6.45	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	284
Figura 6.46	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	285
Figura 6.47	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	286
Figura 6.48	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	287
Figura 6.49	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	288
Figura 6.50	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	289
Figura 6.51	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra muito densa com cimentação de grãos, para tensão vertical de 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	290
Figura 6.52	Envoltórias de resistência para solos com cimentação de grãos: a) Solo muito fofo; b) Solo fofo.	291
Figura 6.53	Envoltórias de resistência para solos com cimentação de grãos: a) Solo denso; b) Solo muito denso.	292
Figura 6.54	a) Esquema dos modos de cisalhamento de solos estruturados; b) Envoltória de resistência em solo residual (Vargas, 1974).	293
Figura 6.55	Ensaio triaxial de calcarenita natural (Coop & Atkinson, 1993).	294
Figura 6.56	Amostra de solo com grãos especiais formados pela junção rígida de dois elementos discretos.	296
Figura 6.57	Curva de adensamento de amostra muito fofa com e sem grãos especiais.	297
Figura 6.58	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com grãos de geometria especial, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	299
Figura 6.59	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grãos de geometria especial, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	300
Figura 6.60	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com grãos de geometria especial, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	301
Figura 6.61	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grãos de geometria especial, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	302

Figura 6.62	Envoltória de resistência para amostras com grãos especiais.	303
Figura 6.63	Amostra com grumos argilosos.	305
Figura 6.64	Curva de adensamento em amostras com grumos argilosos de diferente módulo volumétrico K_v .	306
Figura 6.65	Ensaio de expansão confinada (carga vertical de 100 e 300kPa) em amostra de argila expansiva montada com grumos <i>ativos</i> .	307
Figura 6.66	Ensaio de expansão confinada para 20 e 60 kPa (adaptado de Jucá e Pontes Filho, 1997).	308
Figura 6.67	a) Evolução do índice de compressão com o módulo volumétrico K_v ; b) Evolução da tensão virtual de pré-adensamento com o módulo volumétrico K_v .	309
Figura 6.68	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com grumos argilosos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	312
Figura 6.69	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grumos argilosos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	313
Figura 6.70	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra fofa com grumos argilosos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	314
Figura 6.71	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grumos argilosos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	315
Figura 6.72	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grumos argilosos plásticos, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	316
Figura 6.73	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com grumos argilosos plásticos, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	317
Figura 6.74	Envoltória de resistência para amostras com grumos argilosos: a) Solo fofo; b) Solo denso.	318
Figura 6.75	Resultados de ensaios triaxiais drenados em amostras saturadas de um solo residual maduro argilo-arenoso (Toll & Ong, 2003).	319
Figura 6.76	a) Amostra de solo na condição não saturada. Mapa de distribuição da sucção na amostra; b) Detalhe do mapa das sucções médias nos grãos.	322
Figura 6.77	Curva de adensamento de amostras densas não saturadas.	323
Figura 6.78	Curvas de compressão e adensamento de uma amostra densa não saturada com trajetória de umedecimento súbito para simulação de colapso.	324
Figura 6.79	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 (p, s) (modificado de Alonso <i>et al</i> , 1990).	325
Figura 6.80	a) Ensaio edométrico em solo saturado e com umidade natural (Jennings & Knight, 1957); b) Colapso induzido por saturação (Vargas, 1992).	326

Figura 6.81	Parâmetros de adensamento em amostras densas não saturadas: a) Tensão virtual de pré-adensamento; b) Índice de compressão.	327
Figura 6.82	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (25 e 50kPa), para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	330
Figura 6.83	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (75, 100 e 150kPa), para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	331
Figura 6.84	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (25 e 50kPa), para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	332
Figura 6.85	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (75, 100 e 150kPa), para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	333
Figura 6.86	Envoltória de resistência de amostra densa com sucção controlada: a) No plano $\sigma - \tau$; b) No plano $s - \tau$.	334
Figura 6.87	Evolução dos parâmetros de resistência não saturada com a sucção aplicada: a) coesão aparente c ; b) ângulo de atrito ϕ' ; c) ângulo de resistência devido à sucção ϕ_b .	335
Figura 6.88	Curva característica da amostra densa para 300 e 600kPa de tensão vertical.	336
Figura 6.89	a) Evolução da coesão aparente com a sucção; b) Envoltória de resistência não linear para estados não saturados (Lopes et al, 2007).	337
Figura 6.90	Curva de adensamento de amostras densas com grumos e sucção aplicada.	342
Figura 6.91	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (50kPa) e matriz argilosa, para tensão vertical de 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	344
Figura 6.92	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra densa com sucção controlada (50kPa) e matriz argilosa, para tensão vertical de 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	345
Figura 6.93	Envoltória de resistência da amostra densa com sucção controlada (50kPa) e matriz argilosa.	346

Capítulo 7

Figura 7.1	Comportamento observado de solos residuais no ensaio triaxial: a) solo jovem; b) solo maduro (Sandroni & Maccarini, 1981).	349
Figura 7.2	a) Características físicas de solo laterítico (1m) e saprolítico (5m); b) Curva característica dos solos (Futai et al, 2004).	350
Figura 7.3	Ensaio triaxial com sucção controlada: a) solo jovem; b) solo maduro (Futai et al, 2004).	351
Figura 7.4	Ensaio de cisalhamento direto em solo residual de folhelho da região de KwaZulu Natal, Sudáfrica (Brenner et al, 1997).	352

Figura 7.5	Resultados de ensaios triaxiais drenados com amostras saturadas; a) Solo residual jovem; b) Solo residual maduro.	353
Figura 7.6	Resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada em solo residual jovem, para confinamentos de 50, 100 e 200kPa: a) $s = 80\text{kPa}$; b) $s = 320\text{kPa}$ (Reis & Vilar, 2004).	354
Figura 7.7	Resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada em solo residual maduro, para confinamentos de 50 e 200kPa: a) $s = 80\text{kPa}$; b) $s = 320\text{kPa}$ (Reis & Vilar, 2004).	355
Figura 7.8	a) Curvas de adensamento normalizadas das amostras de solo residual jovem. Em detalhe a evolução no tempo da variação de altura da amostra “Jovem V”. b) Parâmetros de compressibilidade.	358
Figura 7.9	Histórico de quebras durante o ensaio edométrico em amostras de solo residual jovem: a) Quebra de cimentação; b) Quebra de grãos.	359
Figura 7.10	Detalhe de amostra de solo residual jovem.	360
Figura 7.11	Histórico de quebras de cimentação e de grãos sob cisalhamento para as sete amostras de solo residual jovem.	361
Figura 7.12	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°1 e N°2, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	362
Figura 7.13	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°3 e N°4, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	363
Figura 7.14	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°5, N°6 e N°7, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	364
Figura 7.15	a) Curvas de adensamento normalizadas das amostras de solo residual maduro; b) Parâmetros de compressibilidade.	370
Figura 7.16	Detalhe de amostra de solo residual maduro.	371
Figura 7.17	Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual maduro N°1, N°2 e N°3, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.	372

Lista de Tabelas

Capítulo 3

Tabela 3.1	Alguns modelos constitutivos elasto-plásticos básicos (Ibañez, 2003).	75
Tabela 3.2	Alguns modelos constitutivos elasto-plásticos avançados (Ibañez, 2003).	75
Tabela 3.3	Alguns modelos para solos não saturados e estruturados (Ibañez, 2003).	76

Capítulo 4

Tabela 4.1	Valores típicos de Atividade (Nelson & Miller, 1992).	162
Tabela 4.2	Propriedades do solo que influenciam o potencial de expansão - contração (Nelson & Miller, 1992).	163
Tabela 4.3	Argilas mais comuns encontradas.	164
Tabela 4.4	Tratamento de cores aplicado aos elementos discretos.	182
Tabela 4.5	Tratamento de cores aplicado aos contatos.	183
Tabela 4.6	Tratamento de cores aplicado aos elementos parede.	183

Capítulo 5

Tabela 5.1	Índice de vazios inicial das amostras de solo usadas na validação.	211
Tabela 5.2	Índice de vazios inicial e final das amostras ensaiadas.	218
Tabela 5.3	Dados granulométricos da amostra com três tamanhos de grãos diferentes.	226
Tabela 5.4	Dados granulométricos da amostra com nove tamanhos de grãos diferentes.	227

Capítulo 6

Tabela 6.1	Campanha de ensaios para simulação da quebra de grãos. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio (Sc: resistência do grão).	238
Tabela 6.2	Valores da tensão virtual de pré-adensamento e do índice de compressão das amostras ensaiadas.	268
Tabela 6.3	Campanha de ensaios para simulação da cimentação de grãos. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio (Fc: resistência do cimento).	272
Tabela 6.4	Campanha de ensaios para simulação de solos com grãos de geometria diferenciada. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio.	298
Tabela 6.5	Campanha de ensaios para simulação de solos com grumos argilosos. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio.	310
Tabela 6.6	Variação do ângulo de atrito em amostras com grumos argilosos.	321
Tabela 6.7	Campanha de ensaios de cisalhamento com sucção controlada em amostras densas. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio.	329
Tabela 6.8	Campanha de ensaios para simulação da presença de matriz argilosa com sucção controlada. Valor inicial e final do índice de vazios 'e' em cada ensaio.	343

Capítulo 7

Tabela 7.1	Amostras discretas para a simulação de solos residuais jovens.	357
Tabela 7.2	Amostras discretas para a simulação de solos residuais maduros.	369

Lista de símbolos

A	área
A_c	atividade de minerais argilosos
c	amortecimento
c_{ap}	coesão aparente
c'	coesão efetiva
C_n	amortecimento normal
C_s	amortecimento tangencial
C_r	coeficiente de adensamento
C_c	índice de compressão
e	Índice de vazios
E	energia
e_0	índice de vazios inicial
F	força
F_c	resistência do cimento
F_w	força capilar
J_μ	função de Bessel
k	rigidez
k_n	rigidez normal
k_s	rigidez tangencial
k_r	permeabilidade radial
K, K_v	módulo volumétrico
M	momento
m	massa
m_w	massa dos elementos parede
N	esforço normal
N, F_n	forças normais
Q	esforço cisalhante
Sc	resistência à quebra dos grãos
p	tensão líquida
p_a	pressão de ar
p_w	pressão de água
q	tensão desviadora
Q	vazão
r	raio
S_r	grau de saturação
s	sucção
t	tempo
T, F_s	forças cisalhantes
u, v	velocidade
U_r	grau de adensamento
V	volume

Lista de símbolos gregos

α	coeficiente de proporcionalidade
β	compressibilidade da água
Δt	passo de tempo
δ_r	deslocamento radial
ϵ_{rr}	deformação radial
$\epsilon_{\theta\theta}$	deformação angular
ϵ_v	deformação volumétrica
$\epsilon_{r\theta}$	deformação cisalhante
γ_w	peso unitário da água
μ	fator de amortecimento
η_w	viscosidade da água
ϕ'	ângulo de atrito efetivo
ϕ_b	ângulo de resistência devido à sucção
θ	umidade volumétrica
θ	ângulo de molhado
τ	tensão cisalhante
σ'	tensão normal efetiva
σ'_{oc}	tensão virtual de pré-adensamento