

# ÍNDICE

Simbologia, Alfabeto latino, Alfabeto grego, Siglas . . . . .	xi
<b>1 AS EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS NA MODELAÇÃO GEOTÉCNICA</b>	<b>1</b>
<b>2 A MODELAÇÃO NA MECÂNICA DOS SOLOS CLÁSSICA</b>	<b>7</b>
2.1 Considerações sobre o material solo num contexto mais geral de outros materiais normalmente usados em engenharia civil . . . . .	9
2.1.1 Solo, um material particulado . . . . .	10
2.1.1.1 Rotura . . . . .	10
2.1.1.2 Deformação volumétrica. Dilatância . . . . .	13
2.1.2 Materiais sólidos . . . . .	13
2.1.2.1 Rotura . . . . .	14
2.1.2.2 Fratura. Resiliência e tenacidade . . . . .	15
2.1.2.3 Deformabilidade volumétrica . . . . .	19
2.2 A mecânica clássica e a modelação estrutural . . . . .	19
2.2.1 Estruturas de solos . . . . .	19
2.2.1.1 Resistência . . . . .	19
2.2.1.2 Deformabilidade . . . . .	20
2.2.2 Estruturas de materiais sólidos . . . . .	22
2.2.2.1 Resistência . . . . .	22
2.2.2.2 Deformabilidade . . . . .	24
2.3 Considerações finais . . . . .	25
<b>3 A MODELAÇÃO E OS MÉTODOS DE ANÁLISE</b>	<b>27</b>
3.1 Requisitos teóricos de uma análise estrutural . . . . .	30
3.1.1 Condição de equilíbrio . . . . .	30

3.1.2	Condição de compatibilidade . . . . .	31
3.1.3	Comportamento constitutivo . . . . .	32
3.1.4	Condições de fronteira . . . . .	33
3.1.5	Trabalho conjugado . . . . .	33
3.2	Métodos correntes de análise estrutural . . . . .	36
3.2.1	Métodos ditos exatos (soluções exatas) . . . . .	36
3.2.2	Métodos convencionais . . . . .	37
3.3	Métodos numéricos . . . . .	39
	Exemplos de aplicação . . . . .	41
<b>4</b>	<b>CRITÉRIOS DE CEDÊNCIA</b>	<b>53</b>
4.1	Considerações gerais sobre critérios de cedência . . . . .	55
4.2	Espaço das tensões principais . . . . .	56
4.3	Descrição de alguns critérios de cedência . . . . .	64
4.3.1	Critérios de cedência baseados num só parâmetro . . . . .	64
4.3.2	Critérios de cedência baseados em dois parâmetros . . . . .	67
4.3.3	Critérios de cedência baseados em modificações do critério de Mohr-Coulomb . . . . .	73
	Exemplos de aplicação . . . . .	78
<b>5</b>	<b>MÉTODOS NUMÉRICOS</b>	<b>93</b>
5.1	Método das diferenças finitas . . . . .	95
5.1.1	Conceitos e formulação . . . . .	95
5.1.2	Consolidação unidimensional . . . . .	100
5.1.2.1	Formulação . . . . .	100
5.1.2.2	Condições de fronteira . . . . .	102
5.1.2.3	Esquema explícito . . . . .	103
5.1.2.4	Esquema implícito . . . . .	105
5.2	Método dos elementos finitos . . . . .	108
5.2.1	Discretização do domínio . . . . .	109
5.2.2	Representação das variáveis primárias nos elementos . . . . .	111
5.2.2.1	Funções de interpolação . . . . .	111
5.2.2.2	Funções de forma . . . . .	118
5.2.3	Estabelecimento das equações para a resolução do problema . . . . .	121
5.2.3.1	Métodos dos resíduos pesados . . . . .	121

5.2.3.2	Aplicação do método de Galerkin ao escoamento em meios porosos . . . . .	124
5.2.3.3	Matriz de permeabilidade de um elemento plano triangular do primeiro grau . . . . .	129
5.2.3.4	Matriz de permeabilidade de um elemento plano quadrangular de 4 pontos nodais . . . . .	129
5.2.3.5	Quadratura de Gauss . . . . .	132
5.2.3.6	Aplicação do <i>MEF</i> ao estado plano de deformação . . .	138
5.2.4	Equações globais . . . . .	142
5.2.5	Condições de fronteira . . . . .	144
	Exemplos de aplicação . . . . .	145
<b>6</b>	<b>COMPORTAMENTO HIPERELÁSTICO, ELÁSTICO E HIPOELÁSTICO</b>	<b>165</b>
6.1	Algumas considerações de natureza teórica sobre o comportamento elástico	167
6.2	Equações constitutivas elásticas lineares . . . . .	169
6.3	Quantificação dos parâmetros . . . . .	170
	Exemplos de aplicação . . . . .	172
<b>7</b>	<b>LEIS CONSTITUTIVAS PARA COMPORTAMENTO ELÁSTICO VARIÁVEL</b>	<b>179</b>
7.1	Modelo hiperbólico . . . . .	182
7.2	Modelo <i>K-G</i> . . . . .	192
	Exemplos de aplicação . . . . .	199
<b>8</b>	<b>COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO BASEADO NO CRITÉRIO DE CEDÊNCIA DE MOHR-COULOMB</b>	<b>213</b>
8.1	Comportamento elástico perfeitamente plástico . . . . .	216
8.2	Comportamento elastoplástico com endurecimento e amolecimento . . .	228
8.2.1	Comportamento elastoplástico com endurecimento . . . . .	231
8.2.2	Comportamento elastoplástico com amolecimento . . . . .	240
8.2.3	Comportamento elastoplástico com resistência dependente de um parâmetro de estado . . . . .	246

8.3 Considerações gerais sobre o modelo de comportamento de solos baseado no critério de cedência de <i>MC</i> bem como extensões desse modelo por incorporação de princípios fundamentais da elastoplásticidade . . . . .	251
Exemplos de aplicação . . . . .	256
<b>9 COMPORTAMENTO ELASTOPLÁSTICO BASEADO NO CONCEITO DOS ESTADOS CRÍTICOS</b>	<b>265</b>
9.1 Os modelos Cam Clay . . . . .	268
9.1.1 Resistência ao corte . . . . .	271
9.1.2 Variação de volume . . . . .	271
9.1.3 Cedência . . . . .	274
9.2 Equações constitutivas no modelo <i>CC</i> . . . . .	277
9.2.1 Comportamento drenado do solo . . . . .	277
9.2.1.1 Comportamento elástico . . . . .	277
9.2.1.2 Critério de cedência . . . . .	278
9.2.1.3 Lei de fluxo plástico . . . . .	279
9.2.1.4 Lei de endurecimento . . . . .	280
9.2.2 Comportamento não drenado do solo . . . . .	286
9.3 Modelo que combina o de <i>MC</i> com o baseado nos estados críticos . . . . .	287
Exemplos de aplicação . . . . .	289
<b>10 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS APLICÁVEIS A SOLOS NÃO SATURADOS</b>	<b>299</b>
10.1 Sobre a utilidade prática da mecânica dos solos não saturados na engenharia geotécnica . . . . .	302
10.2 A sucção . . . . .	303
10.2.1 Conceito de potencial da sucção . . . . .	303
10.2.2 A sucção capilar . . . . .	304
10.3 Relação entre a sucção e a humidade relativa . . . . .	307
10.4 Propriedades de retenção da água por parte dos solos. Curvas de retenção	309
10.5 Tensões a considerar nos solos não saturados para descrever o seu comportamento mecânico . . . . .	313
10.5.1 Tensões a considerar nos solos não saturados . . . . .	314
10.5.1.1 O uso de duas variáveis de estado na descrição do comportamento dos solos não saturados . . . . .	315

10.5.1.2 Superfícies de estado . . . . .	315
10.5.1.3 Resistência ao corte de solos não saturados . . . . .	317
10.6 Modelos constitutivos para solos não saturados com base na mecânica dos solos dos estados críticos . . . . .	320
10.6.1 Modelo <i>BBM</i> . . . . .	321
10.6.1.1 Formulação do modelo elastoplástico . . . . .	322
10.6.1.2 Superfícies de cedência do modelo . . . . .	322
10.6.1.3 Comportamento do solo não saturado submetido a compressão isotrópica com sucção controlada . . . . .	323
10.6.1.4 Leis de endurecimento relativamente às curvas de cedência <i>LC</i> e <i>SI</i> . . . . .	331
10.6.1.5 Comportamento do solo não saturado quando submetido a tensão de corte em compressão triaxial . . . . .	331
10.6.1.6 Deformações elásticas associadas à tensão deviatórica . .	336
10.6.2 Gama de valores típicos dos parâmetros do modelo BBM . . . . .	336
10.7 Algumas considerações sobre o uso da tensão efetiva em função da escolha das variáveis de tensão nos solos não saturados . . . . .	337
Exemplos de aplicação . . . . .	346
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>371</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b>	<b>381</b>