

# Sumário

Prefácio	v	Estrutura da massa	21
Lista de símbolos	xv	Grau de intemperismo	22
Sobre as unidades	xxi	Origem geológica	22
Estudos de casos	xxiii	<b>Classificação dos solos</b>	22
		Densidade das partículas	23
		Formato das partículas	24
		Distribuição granulométrica	24
		Características da distribuição granulométrica	27
		Massa específica	28
		Densidade Relativa	29
		Teor de umidade	30
		Limites de Atterberg	31
		Gráfico da plasticidade	34
		Índice de atividade	35
		Limite de retração	36
		Modelo de solos	36
		<i>Resumo</i>	39
		<i>Exemplos resolvidos</i>	39
		<i>Exercícios</i>	46
<b>1 Formação e natureza dos solos</b>	<b>1</b>		
<b>Objetivos</b>	1		
<b>Formação dos solos</b>	1		
Solos artificiais	1		
Solos contaminados e poluídos	1		
Solos naturais	2		
Solos <i>in situ</i> – rochas intemperizadas	2		
Solos <i>in situ</i> – turfa	3		
Solos transportados pela água	3		
Depósitos glaciais	3		
Solos transportados pelo vento	6		
<b>Partículas dos solos</b>	6		
Natureza das partículas	6		
Minerais de argila	6		
<b>Estrutura dos solos</b>	9		
Solos coesos	9		
Solos granulares	13		
<i>Resumo</i>	13		
<b>2 Descrição e classificação dos solos</b>	<b>14</b>	<b>3 Permeabilidade e percolação</b>	<b>47</b>
<b>Objetivos</b>	14	<b>Objetivos</b>	47
<b>Descrição dos solos</b>	14	<b>Permeabilidade</b>	47
Categorias de solos	14	Introdução	47
Aterros	15	Água subterrânea	47
Solos orgânicos	15	Problemas referentes ao fluxo	47
Solo vulcânico	15	Fluxo em escavações	48
Frações granulométricas – base fundamental	16	Fluxo em torno de ensecadeiras	48
Solo muito grosso	16	Rebaixamento do nível de água	48
Solo grosso	17	Fluxo em estruturas de terra	49
Fração de finos	18	Problemas de estabilidade – “areia corrente”	49
Solos compostos	18	Borbulha ou empolamento em ensecadeiras	49
Solo fino	19	<i>Piping</i>	50
		Empolamento abaixo de uma camada de argila	50
		Subpressões	50
		Vazios no solo	50
		Tensão e carga	51
		Lei de Darcy	51
		Efeito da temperatura	52
		Correlações empíricas de <i>k</i>	52

Solos divididos em camadas	53	Tensões horizontais e verticais <i>in situ</i>	104
Ensaio de laboratório – permeâmetro de carga constante	55	Variações de tensão devidas a estruturas de engenharia	108
Ensaio de laboratório – permeâmetro de carga decrescente	56	Parâmetros da poro-pressão – teoria	110
Ensaio de laboratório – célula hidráulica – permeabilidade vertical	57	Parâmetros <i>A</i> e <i>B</i> da poro-pressão	110
Ensaio de laboratório – célula hidráulica – permeabilidade horizontal	58	Ascensão capilar acima do lençol freático	112
Ensaio de laboratório – célula triaxial – permeabilidade vertical	58	Tensões efetivas acima do lençol freático	114
Ensaaios em furos de sondagem – furo aberto	58	Secagem de solos de argila	115
Ensaaios em furos de sondagem – ensaios com obturadores	61	Sucções	116
Ensaaios em furos de sondagem – piezômetros	62	Ação do congelamento nos solos	117
Ensaaios de bombeio	63	Ensaio de expansão por congelamento	119
<b>Percolação</b>	63	Pergelissolo	120
Teoria da percolação	63	Congelamento do solo	121
Redes de fluxo	66	<i>Resumo</i>	122
Construção de uma rede de fluxo	67	<i>Estudo de caso</i>	123
Coefficiente de permeabilidade	69	<i>Exemplos resolvidos</i>	125
Carga total, carga de elevação e carga de pressão	70	<i>Exercícios</i>	130
Pressão intersticial e subpressão	71		
Falha por subpressão (empuxo)	71	<b>5 Pressão de contato e distribuição de tensão</b>	<b>132</b>
Força de percolação	72	<b>Objetivos</b>	132
Condição movediça, borbulho e erosão interna	72	<b>Pressão de contato</b>	132
Gradiente hidráulico crítico	73	Pressão de contato – carga uniforme	132
Falha por erosão interna	73	Pressão de contato – carga pontual	133
Falha por empolamento – uso de estacas-pranchas	73	<b>Distribuição de tensões</b>	134
Falha por <i>piping</i>	74	Tensões abaixo da carga pontual e da carga linear	134
Percolação em barragens de aterro	74	Considerações	134
Percolação em margens de inundação e diques	74	Tensões abaixo de áreas uniformemente carregadas	136
Filtros do solo	76	Bulbos de pressão	136
<i>Resumo</i>	78	Tensões abaixo de um retângulo flexível	137
<i>Estudo de casos</i>	79	Princípio da sobreposição	137
<i>Exemplos resolvidos</i>	83	Tensões abaixo de uma área flexível de qualquer formato	137
<i>Exercícios</i>	94	Tensões abaixo de um retângulo flexível – solo com espessura finita	137
		Tensões abaixo de um retângulo rígido	139
		Carga em aterro	141
		<i>Resumo</i>	143
		<i>Exemplos resolvidos</i>	144
		<i>Exercícios</i>	149
<b>4 Tensão efetiva e poro-pressão</b>	<b>97</b>		
<b>Objetivos</b>	97		
Tensão total	97	<b>6 Compressibilidade e adensamento</b>	<b>150</b>
Poro-pressão abaixo do lençol freático	97	<b>Objetivos</b>	150
Tensão efetiva	98	<b>Introdução</b>	150
Tensão efetiva sobre o solo	98	<b>Compressibilidade</b>	150
Histórico de tensões	98		
Argila normalmente adensada	98		
Argila pré-adensada	101		
Crosta ressecada	102		
Estado atual de tensão sobre o solo	103		
Círculo de tensões de Mohr	103		

Gráfico do índice de vazios/tensão efetiva	150	Relações idealizadas de tensão-deformação	197
Curvas de recarga	151	Escoamento e plasticidade	197
Pressão de pré-adensamento $\sigma_p'$ e índice de pré-adensamento (OCR)	152	Lei de Fluxo e normalidade	198
Método de Casagrande para $\sigma_p'$	152	Critério de ruptura	199
Efeito da deformação de amostragens	152	Ruptura do solo	199
Curva <i>in situ</i> para a argila normalmente adensada	153	Trajetoárias de tensões	201
Curva <i>in situ</i> para a argila pré-adensada	153	Efeitos da drenagem	202
Efeito dos incrementos de carga	154	Procedimentos de ensaio	205
Efeito da duração da carga	154	<b>Resistência ao cisalhamento de areia</b>	206
Efeito da compressão secundária	154	Comportamento tensão-deformação	206
Compressão isotrópica	155	Ensaio de cisalhamento direto	207
Compressão anisotrópica	156	Efeito do adensamento e da natureza das partículas	208
<b>Adensamento</b>	157	Condição de volume constante	210
Teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi	157	Efeito da densidade relativa	210
Solução da equação do adensamento	158	<b>Resistência da argila ao cisalhamento</b>	211
Isócronas	159	Efeito da amostragem	211
Grau médio de adensamento	160	Coesão não drenada, $c_u$	211
Ensaio edométrico	162	Ensaio do índice de resistência	211
Coefficiente de adensamento, $c_v$ – método da raiz quadrada do tempo	164	Ensaio de resistência	212
Coefficiente de adensamento, $c_v$ – método do logaritmo do tempo	166	Ensaio de palheta em laboratório	212
Valores de $c_v$ <i>in situ</i>	167	Ensaio de queda do cone	212
Célula de adensamento de Rowe	167	Ensaio de compressão não confinada	212
Adensamento bidimensional e tridimensional	168	Ensaio de vane no campo	213
Correção para o período de construção	170	Ensaio triaxial	214
Pré-compressão por sobrecarga	171	Ensaio triaxial não adensado e não drenado (UU)	216
Adensamento radial para drenos verticais	172	Ensaio de estágios múltiplos (UU)	217
<i>Resumo</i>	175	Efeito do teor de argila e da mineralogia	217
<i>Estudo de casos</i>	176	Argilas parcialmente saturadas	218
<i>Exemplos resolvidos</i>	180	Argilas fissuradas	218
<i>Exercícios</i>	188	Variação com a profundidade	219
		Atrito entre partículas	221
		Procedimentos de ensaio	221
		Ensaio triaxial adensado não drenado (CU)	222
		Ensaio triaxial adensado drenado (CD)	224
		<b>Teoria do estado crítico</b>	224
		Parâmetros	224
		Superfície limítrofe de estados	225
		Linha de adensamento normal isotrópica (ICL)	225
		Linha de adensamento normal $K_0$ ( $K_0$ CL)	226
		Linha de estado crítico (CSL)	227
		Superfície de Roscoe	228
		Envoltória de resistência	229
		Superfície de Hvorslev	229
		Parede elástica	230
		Solos reais	231
		<b>Resistência residual</b>	231
		<i>Resumo</i>	233
		<i>Exercícios</i>	241
		<i>Estudo de caso</i>	234
		<i>Exemplos resolvidos</i>	236
<b>7 Resistência ao cisalhamento</b>	<b>190</b>		
<b>Objetivos</b>	190		
<b>Introdução</b>	190		
<b>Tensões e deformações em solos</b>	191		
Representação das tensões	191		
Polo	191		
Tensões principais	191		
Simetria axial	192		
Deformação plana	192		
Condição $K_0$	192		
Deformações normais e de cisalhamento	192		
Círculo de deformações de Mohr	194		
Deformações volumétricas	194		
<b>Resistência ao cisalhamento</b>	194		
Efeito da deformação	194		

**8 Eurocódigos geotécnicos 243**

<b>Objetivos</b>	243
Eurocódigos relevantes	243
Equipes	243
Relatório de Projeto Geotécnico	243
Riscos geotécnicos	243
Durabilidade	245
Dados geométricos	245
Estados limites	246
Verificação dos estados limites	246
Projeto baseado em medidas prescritivas	247
Projeto baseado em modelos experimentais e ensaios de carga	247
Método observacional	247
Projeto baseado em cálculo	247
Modelos e fatores de modelo	248
Ações	248
Situações de projeto e valores das ações	248
Valores característicos e representativos das ações	248
Valores das ações de projeto	249
Efeitos das ações $E_d$	249
Resistências de projeto	249
Abordagem de projetos e fatores parciais	249
Valores característicos de parâmetros geotécnicos	250
<i>Resumo</i>	254

**9 Fundações rasas – estabilidade 255**

<b>Objetivos</b>	255
<b>Fundações rasas</b>	255
Definição	255
Sapatas	255
Tipos de fundação	255
Profundidade das fundações	259
<b>Projeto de fundações</b>	263
Requisitos de projeto	263
Abordagem tradicional comparada com os eurocódigos	264
<b>Resistência de carga</b>	264
Modos de ruptura	264
Capacidade de carga e resistência de carga	266
Fatores referentes à forma	267
Fatores referentes à profundidade	267
Fatores referentes à inclinação da base	268
Resistência de carga – tombamento	268
Carga excêntrica	269
Carga inclinada	270
Diversos casos de resistência do solo	270
Efeito do lençol freático	271

Capacidade de carga máxima líquida	271
Efeito da compressibilidade do solo	271
Deslizamento	272
<b>Pressão de carga admissível da areia</b>	272
Introdução	272
Limite de recalque	272
Pressão de carga admissível	272
Valores de $N$ corrigidos pelo SPT	273
<i>Resumo</i>	275
<i>Estudo de casos</i>	276
<i>Exemplos resolvidos</i>	279
<i>Exercícios</i>	285

**10 Fundações rasas – recalques 287**

<b>Objetivos</b>	287
<b>Introdução</b>	287
É necessário calcular o recalque?	288
<b>Recalque imediato</b>	289
Método geral	289
Princípio da sobreposição	289
Princípio da divisão em camadas	290
Correção de rigidez	290
Correção de profundidade	291
Recalque médio	291
Módulo crescente com a profundidade	291
Efeito do escoamento local	292
Estimativa do módulo não drenado $E_u$	294
<b>Recalque por adensamento</b>	295
Geral	295
Método do índice de compressão $C_c$	296
Método do módulo edométrico $E_{oed}$ ou $m_v$	297
<b>Recalque total</b>	298
Método de Skempton-Bjerrum	298
Método drenado elástico	299
Estimativa do módulo drenado $E^*$	299
Proporção entre recalque imediato e total	299
<b>Compressão secundária</b>	302
Introdução	302
Método geral	302
Estimativa dos valores de $C_\alpha$ ou $\varepsilon_\alpha$	303
<b>Areias</b>	304
Métodos de estimativa de recalques	304
Método de Schmertmann	304
Método de Burland e Burbridge	306
<b>Recalques admissíveis</b>	307
Definições de movimento do solo e das fundações	307
Critérios de movimento	309
Limites de recalque comuns	309
<i>Resumo</i>	311

<i>Estudo de casos</i>	312
<i>Exemplos resolvidos</i>	317
<i>Exercícios</i>	324

## 11 Fundações com estacas 326

<b>Objetivos</b>	326
<b>Fundações em estacas</b>	326
Introdução	326
Tipos de estaca	326
Condições de carga	326
Incerteza dos métodos de cálculo de projeto	327
Estados limites	328
Provas de carga em estacas	328
Resistência máxima à compressão obtida em provas de carga estática	329
Resistência máxima à compressão obtida em resultados de ensaios no solo	330
Resistência máxima à compressão obtida em outros métodos	330
Peso da estaca	331
<b>Estacas escavadas em argila</b>	331
Resistência da carga de ponta $q_b$	331
Aderência $c_a$	332
<b>Estacas cravadas em argila</b>	334
Resistência à carga de ponta $q_b$	334
Aderência $c_a$ – efeitos da instalação	334
Aderência $c_a$ – valores	334
Abordagem da tensão efetiva para a aderência	336
<b>Estacas cravadas em areia</b>	336
Efeitos da instalação	336
Resistência à carga de ponta $q_b$	337
Profundidade crítica	337
Atrito superficial $f_s$	339
<b>Estacas escavadas em areia</b>	340
<b>Mobilização das cargas da base do fuste</b>	340
<b>Atrito lateral negativo</b>	341
Causas do atrito negativo	341
Determinação do atrito negativo	342
<b>Grupos de estacas</b>	342
Rigidez do bloco de estacas e da estrutura	342
Espaçamento das estacas	342
Zonas sob tensão	342
Variação de carga	343
Eficiência	343
Capacidade máxima	344
Coeficiente de recalque	345
Recalque de grupos de estacas	347
<i>Resumo</i>	348
<i>Estudo de casos</i>	349
<i>Exemplos resolvidos</i>	352
<i>Exercícios</i>	358

## 12 Empuxos laterais do solo e estruturas de contenção 360

<b>Objetivos</b>	360
<b>Empuxos laterais do solo</b>	360
Introdução	360
Efeito do movimento horizontal	360
Efeito da flexibilidade e do escoramento de muros	364
Efeito do atrito com os muros	364
Teoria de Coulomb – força ativa	365
Teoria de Coulomb – força passiva	366
Limitações da teoria de Coulomb	366
Coeficientes de empuxo do solo	367
Efeito do ponto de interseção de coesão $c'$	369
Tensão mínima do fluido equivalente	369
Efeito do lençol freático – muros de gravidade	370
Efeito do lençol freático – muros engastados	371
Condições não drenadas	372
Empuxos do solo – condição não drenada	372
Trincas por tensão	373
Sobrecarga uniforme	373
Cargas lineares e cargas pontuais	374
Empuxos do solo devidos à compactação	374
<b>Estruturas de contenção</b>	376
Introdução	376
Muros de subsolo	376
Encontros de pontes	379
Gabiões e muros em fogueira (cribwall)	379
<b>Projeto de muros de contenção de gravidade</b>	379
Estados limite de utilização	379
Estado de limite último	379
Perda da estabilidade geral	380
Ruptura por tombamento ou rotação	380
Tensão de carga sob a base	380
Capacidade de carga	381
Deslizamento	381
Ruptura de elementos estruturais	382
<b>Projeto de muros engastados</b>	382
Muros engastados em balanço – geral	382
Muros engastados em balanço – projeto	383
Muros engastados com tirante ou escora única – geral	383
Muros engastados com tirante ou escora única – projeto	383
Métodos de projeto	384
Método da tensão bruta	384
Método da resistência passiva líquida disponível	384
Fator sobre o método da resistência	385
Método BS8002	385
Ancoragem para muros engastados	385

<b>Escavações e ensecadeiras escoradas</b>	387	Coefficientes de estabilidade – método do lençol freático	438
Introdução	387	Taludes submersos	439
Cargas de escoras	387	Rebaixamento rápido	439
Estabilidade da base de escavações	388	Superfícies de deslizamento não circulares	440
Estabilidade da base – escavações rasas	388	Método da cunha – plano único	441
Estabilidade da base – escavações profundas	389	Método da cunha – vários planos	441
<b>Solo reforçado</b>	389	Fatores que afetam a estabilidade e o projeto de taludes	443
Muros com solo reforçado – construção	389	<i>Resumo</i>	444
Efeitos do reforço	390	<i>Estudo de casos</i>	445
Muros com solo reforçado – projeto	390	<i>Exemplos resolvidos</i>	449
Estabilidade externa	391	<i>Exercícios</i>	459
Estabilidade interna – geral	392		
Ruptura por tração	393		
Resistência ou aderência de arrancamento	393		
Estabilidade interna – método da faixa de ancoragem	394		
Método da gravidade coerente	395		
<i>Resumo</i>	397		
<i>Estudo de casos</i>	398		
<i>Exemplos resolvidos</i>	402		
<i>Exercícios</i>	415		
		<b>14 Terraplenagem e compactação dos solos</b>	<b>462</b>
<b>13 Estabilidade de taludes</b>	<b>417</b>	<b>Objetivos</b>	462
<b>Objetivos</b>	417	<b>Terraplenagem</b>	462
<b>Taludes naturais e artificiais</b>	417	Introdução	462
Introdução	417	Máquinas de construção	462
Tipos de movimento das massas de solo	417	Finalidade e tipos de materiais	463
Taludes naturais	417	Requisitos dos materiais	466
Taludes e terraplenagens artificiais	420	Adequação do material de aterro	466
Condições no curto e no longo prazo	421	Adequação dos solos granulares	467
<b>Métodos de análise</b>	425	Adequação dos solos coesos	468
Deslizamento plano por translação – geral	425	Ensaio da condição de umidade	469
Deslizamento plano por translação – abordagem do Eurocódigo	425	Eficiência da terraplenagem	471
Deslizamento plano por translação – casos especiais	426	Problemas com materiais	471
Estabilidade de cortes verticais	428	Amolecimento	471
Análise do arco circular – geral	429	Empolamento	472
Análise do arco circular – condição não drenada ou análise de $\phi_u = 0^\circ$	429	<b>Compactação de solos</b>	474
Trinca por tração	430	Fatores que afetam a compactação	474
Gráficos da análise de estabilidade não drenada – método de Taylor	431	<b>Compactação em campo</b>	476
Análise da tensão efetiva	432	Máquinas de compactação	476
Análise da tensão efetiva – método das fatias	432	Especificação da compactação	478
Método simplificado de Bishop	433	Controle da compactação no campo	480
Método simplificado de Bishop – abordagem do estado limite	434	<b>Compactação em laboratório</b>	482
Índice da poro-pressão $r_u$	435	Ensaio de compactação leve	482
Coefficientes de estabilidade – método $r_u$	435	Compactação pesada	483
		Martelo vibratório	483
		Linhas de vazios de ar	484
		Correção para partículas superdimensionadas	484
		Ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR)	484
		Adição de cal	485
		Estabilização com cimento	486
		<i>Resumo</i>	487
		<i>Estudo de caso</i>	488
		<i>Exemplos resolvidos</i>	490
		<i>Exercícios</i>	497

<b>15 Investigação do terreno</b>	<b>499</b>		
<b>Objetivos</b>	499	Tipo de amostras	509
<b>Investigação do terreno</b>	499	Métodos de ensaio <i>in situ</i>	512
Introdução	499	Observações referentes à água subterrânea	515
Relação com o projeto geotécnico	500	Investigação de solos contaminados	519
Etapas da investigação	500	<b>Relatório da investigação do solo</b>	520
Estudo teórico	501	Apresentação de informações geotécnicas	520
Inspeção do local	501	Relatório de fatos	520
<b>Investigação do terreno</b>	501	Avaliação geotécnica	521
Extensão da investigação do terreno	501	<i>Resumo</i>	525
Profundidade de exploração	502		
Escolha do método de investigação	503	Respostas dos exercícios	526
Métodos de investigação do terreno	504	Glossário	528
Amostragem indeformada – qualidade da amostragem	508	Referências	530
		Índice	540