

INTRODUÇÃO / 13

PARTE I - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS SOLOS

CAPÍTULO 1 - Propriedades físicas dos solos / 19

1.1 Introdução / 19. 1.2 Índices físicos do solo / 20. 1.2.1 Teor de umidade ou umidade natural / 20. 1.2.2 Índice de vazios / 21. 1.2.3 Porosidade / 21. 1.2.4 Grau de saturação / 22. 1.2.5 Grau de aeração / 23. 1.3 Pesos específicos do solo / 23. 1.3.1 Peso específico natural / 23. 1.3.2 Peso específico dos grãos (ou dos sólidos) / 24. 1.3.3 Peso específico da água / 24. 1.3.4 Densidade relativa das partículas (ou dos grãos) / 25. 1.3.5 Peso específico do solo seco / 26. 1.3.6 Peso específico saturado / 26. 1.3.7 Peso específico submerso / 27. 1.4 Relações entre os índices físicos do solo / 27. 1.4.1 Correlação dos índices físicos com o índice de vazios / 27. 1.4.2 Peso específico saturado / 28. 1.4.3 Peso específico do solo seco / 29. 1.4.4 Porosidade / 29. 1.4.5 Teor de umidade / 30. 1.5 Correlação dos índices físicos com a porosidade / 30. 1.5.1 Peso específico natural / 31. 1.5.2 Peso específico do solo saturado / 31. 1.5.3 Peso específico do solo seco / 31. 1.5.4 Índice de vazios / 32. 1.5.5 Teor de umidade / 32. 1.6 Determinação da umidade, do peso específico e da porosidade do solo em laboratório / 35. 1.6.1 Determinação da umidade / 35. 1.6.2 Determinação do peso específico dos grãos / 35. 1.6.3 Determinação da porosidade / 36. 1.7 Exemplos de aplicação / 37.

CAPÍTULO 2 - Limites de consistência e outras propriedades dos solos / 49

2.1 Introdução / 49. 2.2 Limites de consistência / 49. 2.3 Determinação dos limites de consistência / 50. 2.3.1 Limite de liquidez / 51. 2.3.2 Limite de plasticidade / 53. 2.3.3 Limite de contração / 53. 2.4 Outros índices e propriedades dos solos / 56. 2.4.1 Grau de contração / 56. 2.4.2 Índice de plasticidade / 56. 2.4.3 Índice de consistência / 57. 2.4.4 Consistência das argilas / 58. 2.4.5 Índice de contração / 58. 2.4.6 Índice de liquidez / 59. 2.4.7 Grau de sensibilidade / 59. 2.4.8 Grau de compacidade / 60. 2.4.9 Atividade coloidal / 63. 2.4.10 Superfície específica / 64. 2.5 Perfis geotécnicos / 65. 2.6 Exemplos de aplicações / 66.

CAPÍTULO 3 - Pressões atuantes no solo / 71

3.1 Pressão vertical devida ao peso de terra. Nível de terreno horizontal / 71. **3.2** Nível de terreno inclinado / 72. **3.3** Pressões de água no solo / 74. **3.3.1** Pressão neutra e pressão efetiva / 74. **3.3.2** Peso específico submerso / 76. **3.4** Força de percolação / 81. **3.5** Areia movediça / 84. **3.6** Mecânica do entubamento (*Piping*) / 94. **3.6.1** Mecânica da ruptura por levantamento / 96. **3.6.2** Compensação do levantamento por filtros pesantes / 98. **3.7** Fenômenos capilares / 98. **3.7.1** Forças de coesão e de adesão / 101. **3.7.2** Tensão superficial / 102. **3.7.3** Ascensão em tubos capilares / 103. **3.7.4** Importância dos fenômenos capilares / 106. **3.8** Pressão lateral de um solo em repouso / 108. **3.9** Exemplos de aplicação / 111.

CAPÍTULO 4 - Resistência ao cisalhamento dos solos / 119

4.1 Análise das tensões / 119. **4.1.1** Tensão atuante em um plano / 120. **4.1.2** O elipsoide de tensões / 122. **4.1.3** Tensão uniaxial / 123. **4.1.4** Tensões biaxiais / 126. **4.1.5** Estado bidimensional geral de tensões / 131. **4.1.6** Tensões principais / 134. **4.1.7** Tensões máximas de cisalhamento / 137. **4.1.8** Tensões atuando em uma superfície inclinada em relação aos eixos principais / 138. **4.2** O círculo de Mohr / 140. **4.2.1** Círculo de Mohr para tensões planas / 143. **4.2.2** O círculo de Mohr para tensões triaxiais / 145. **4.3** Noções de atrito entre os sólidos / 146. **4.3.1** Envoltória de Mohr / 149. **4.3.2** Materiais coesivos / 151. **4.3.3** Efeitos da pressão de fluidos ou de poros / 155. **4.3.4** Polo do círculo de Mohr / 157. **4.4** Exemplos de aplicação / 158.

PARTE II - ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS

CAPÍTULO 5 - Superfície de ruptura planar / 169

5.1 Introdução / 169. **5.2** Taludes de extensão ilimitada, sem percolação de água / 172. **5.3** Taludes de extensão ilimitada, com percolação de água paralelamente à vertente / 176. **5.4** Ângulo crítico de inclinação de uma vertente / 182. **5.5** Coesão do solo no plano de ruptura / 183. **5.6** Profundidade crítica de uma escavação / 183. **5.7** Taludes de extensão ilimitada, com percolação de água - Caso geral / 187. **5.8** Taludes de extensão limitada / 192. **5.8.1** Superfície de ruptura planar, sem percolação de água / 192. **5.9** Superfície crítica de deslizamento / 196. **5.9.1** Superfície planar de ruptura, com percolação de água / 199. **5.10** Altura crítica de um talude vertical com fendas de tração / 201. **5.11** Caso Geral. Talude com fendas de tração e sobrecarga / 204. **5.12** Exercícios / 208.

CAPÍTULO 6 - Superfície de ruptura curva / 211

6.1 Método sueco ou de fatias / 211. **6.2** Método de Bishop / 213. **6.2.1** Método simplificado de Bishop / 216. **6.3** Método de Janbu / 218. **6.3.1** Fórmula de Bishop simplificada, para coesão nula / 219. **6.4** Ábacos de Taylor para o cálculo da estabilidade de taludes / 224. **6.5** Ábacos de Bishop e Morgenstern / 228. **6.6** Exemplos de aplicação / 241.

CAPÍTULO 7 - Métodos de Hoek e Stimpson / 245

7.1 Método de Hoek / 245. 7.1.1 Fenda de tração posicionada no topo da vertente / 249. 7.1.2 Altura do lençol freático desconhecido / 252. 7.1.3 Fenda de tração posicionada na face da vertente / 253. 7.1.4 Fluxo de água subterrâneo desconhecido / 254. 7.1.5 Vertente drenada ou seca / 254. 7.1.6 Presença de água somente na fenda de tração / 255. 7.1.7 Presença de água na fenda de tração e no plano de deslizamento / 255. 7.1.8 Vertente saturada com intensa recarga / 255. 7.1.9 Profundidade crítica da fenda de tração / 255. 7.1.10 Reforço do talude com tirantes / 257. 7.1.11 Funções X e Y para o acompanhamento do ábaco de ruptura plana / 259. 7.1.12 Ábacos de Hoek para o estudo da estabilidade de vertentes / 261. 7.2 Método de Lopes para a determinação da estabilidade de taludes / 270. 7.3 Exemplos de aplicação / 274. 7.4 Método de Stimpson / 279. 7.4.1 Vertente drenada (com ou sem fendas de tração) / 284. 7.4.2 Vertente saturada, sem fendas de tração / 284. 7.4.3 Vertente saturada, com fenda de tração vertical / 284. 7.4.4 Vertente parcialmente saturada, com fenda de tração vertical / 285. 7.4.5 Vertente parcialmente saturada, sem fenda de tração e superfície freática horizontal / 285. 7.4.6 Vertente parcialmente saturada, sem fenda de tração vertical e superfície freática bilinear / 286. 7.4.7 Exemplo / 287. 7.5 Análise da probabilidade de escorregamentos / 288. 7.5.1 Volume de material movimentado / 291. 7.5.2 Exemplo prático / 291.

CAPÍTULO 8 - Influência da vegetação na estabilidade de taludes / 295

8.1 Introdução / 295. 8.2 Resistência do sistema solo-raiz / 296. 8.3 Medida da resistência à tensão das raízes / 304. 8.4 Peso das árvores / 307. 8.5 Força do vento / 307. 8.6 Análise da estabilidade de vertentes / 308. 8.6.1 Vertente infinita / 308. 8.6.1.1 Sobrecarga exercida pelas árvores na vertente / 309. 8.6.1.2 Peso do solo / 309. 8.6.1.3 Pressão neutra atuante no plano de ruptura potencial / 310. 8.6.1.4 Pressão de percolação / 310. 8.6.1.5 Força de arrasto do vento na copa da árvore, transmitida ao solo / 310. 8.6.1.6 Resistência ao cisalhamento (τ) / 311. 8.6.1.7 Esforço mobilizante / 311. 8.6.1.8 O fator de segurança / 312. 8.6.2 Vertente ou talude de extensão limitada / 317. 8.7 Efeito de cunha das raízes / 318. 8.8 Exercícios / 318.

CAPÍTULO 9 - Intensidade da chuva e escorregamentos / 321

9.1 Processo precipitação-vazão / 321. 9.2 Hidrologia da vertente / 326. 9.3 Transmissividade do solo / 328. 9.4 Fluxo de água subsuperficial e o índice de umidade do solo numa vertente infinita / 329. 9.5 Deslizamento nas encostas / 333. 9.6 Intensidade crítica da chuva / 334. 9.6.1 Exemplo / 336. 9.7 Delimitação das zonas de saturação nas vertentes / 337. 9.8 Deslizamentos rasos devidos à zona de umidade provocada pela chuva / 339.

CAPÍTULO 10 - Limiar do processo erosivo / 343

10.1 Fatores de controle da velocidade de fluxo / 343. 10.2 Rugosidade da superfície de escoamento / 345. 10.3 Resistência ao fluxo / 352. 10.4 Escoamento superficial / 352. 10.4.1 Fluxo turbulento / 353. 10.4.2 Fluxo laminar / 355. 10.5 Condições críticas para o início do processo de erosão / 356. 10.6 Erosão pelo escoamento superficial por saturação / 356.

PARTE III - MECÂNICA DAS ROCHAS

CAPÍTULO 11 - Descontinuidades em maciços rochosos / 361

11.1 Introdução / 361. **11.2** Definição / 362. **11.3** Tipos de descontinuidades / 364. **11.3.1** Planos de acamamento / 364. **11.3.2** Planos de juntas / 364. **11.3.3** Planos de falha / 365. **11.3.4** Foliação metamórfica / 365. **11.3.5** Discordâncias ou inconformidades / 366. **11.3.6** Margens de intrusões ígneas / 367. **11.3.7** Planos de cisalhamento e fendas de tração / 367. **11.4** Características das descontinuidades / 367. **11.4.1** Orientação espacial / 368. **11.4.2** Espaçamento ou frequência / 369. **11.4.3** Persistência ou extensão / 371. **11.4.4** Rugosidade da superfície de descontinuidade / 374. **11.4.5** Abertura e preenchimento das juntas / 378. **11.4.5.1** Evidências de deslocamentos / 381. **11.4.5.2** Resistência do preenchimento ao cisalhamento / 382. **11.4.6** Resistência das paredes ao cisalhamento / 383. **11.5** Influência da interface solo-rocha no cisalhamento / 385. **11.6** Alteração de maciços rochosos / 386. **11.7** Efeito de alívio de tensão por erosão / 389. **11.8** Falhas e horizontes preferenciais de alteração / 390. **11.9** Análise das descontinuidades / 392. **11.9.1** Métodos de levantamento sistemático de descontinuidades / 392.

CAPÍTULO 12 - Resistência das rochas e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb / 395

12.1 Introdução / 395. **12.2** Esforço e deformação / 397. **12.3** Esforço hidrostático / 397. **12.4** Critério de ruptura de Mohr-Coulomb / 398. **12.5** Efeito da pressão da água / 401. **12.6** Descontinuidades sem coesão ao longo do plano / 406. **12.7** Descontinuidade com coesão ao longo do plano / 407.

CAPÍTULO 13 - Percolação de água em maciços rochosos / 409

13.1 Água subterrânea / 409. **13.2** Percolação / 411. **13.3** Fluxo através de rochas fraturadas / 414. **13.4** Grau de conectividade das descontinuidades / 422. **13.5** Método do paralelogramo / 428. **13.6** Fluxo da água em maciços fraturados / 431.

CAPÍTULO 14 - Sistemas de classificação de maciços rochosos / 435

14.1 Introdução / 435. **14.2** Índice de qualidade da rocha / 436. **14.3** O IQR teórico / 440. **14.3.1** Distribuição do espaçamento de descontinuidades / 440. **14.3.2** Influência do espaçamento no IQR / 442. **14.3.3** Variações de IQR em função do valor limiar / 446. **14.4** Ensaio de compressão uniaxial / 447. **14.5** Ensaio de carga pontual / 447. **14.6** Ensaio com o martelo de Schmidt / 451. **14.7** Ensaio de durabilidade a úmido / 453. **14.8** Classificação dos maciços rochosos / 456. **14.9** Predição do nível de vibração em detonações / 466. **14.9.1** Vibrações transmitidas através dos maciços rochosos / 467. **14.9.2** Vibrações transmitidas pelo ar / 469.

PARTE IV - ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHAS

CAPÍTULO 15 - Análise cinemática de taludes em rochas / 475

15.1 Introdução / 475. **15.2** Tratamento de dados estruturais / 477. **15.3** Escorregamento segundo estruturas planares / 480. **15.4** Deslizamento em cunha / 485. **15.5** Escorregamentos em vertentes multifacetadas / 491. **15.6** Tombamento de blocos / 493. **15.7** Mecanismos de escorregamentos em escavações / 496. **15.7.1** Desprendimento de blocos em teto de escavações / 496. **15.7.2** Forma e volume dos blocos / 499. **15.8** Escorregamentos de blocos em paredes de escavações / 502.

CAPÍTULO 16 - Ruptura em cunha / 507

16.1 Introdução / 507. **16.2** Análise da ruptura em cunha / 507. **16.3** Análise de ruptura em cunha, considerando-se a coesão e a pressão de água / 512. **16.4** Ábacos de estabilidade para atrito somente / 516. **16.5** Exercício / 517.

CAPÍTULO 17 - Análise dinâmica da estabilidade de taludes em rocha / 529

17.1 Introdução / 529. **17.2** Representação do cone de atrito em projeção estereográfica / 529. **17.3** Condições para a movimentação de blocos / 531. **17.4** Análise dos esforços atuantes no plano potencial de deslocamento / 532. **17.4.1** Projeção de vetores força no estereograma / 532. **17.4.2** Atuação das forças / 534. **17.4.3** Fator de segurança de um bloco / 535. **17.4.4** Uso de tirante para aumentar o fator de segurança / 536. **17.4.5** Força induzida por terremoto / 538. **17.4.6** Inclusão da coesão no cone de atrito / 538.

CAPÍTULO 18 - Análise da removibilidade de blocos / 541

18.1 Introdução / 541. **18.2** Tipos de blocos / 543. **18.3** Teorema de Shi da removibilidade de blocos / 544. **18.4** Elementos da teoria de blocos / 545. **18.5** Uso da projeção estereográfica na análise da removibilidade de blocos / 547. **18.6** Aplicação da teoria de blocos no estudo de aberturas subterrâneas / 552. **18.6.1** Teto de galerias / 552. **18.6.2** Paredes de galerias / 553. **18.6.3** Forma da face livre do bloco removível / 554. **18.7** Aplicação da teoria de blocos no estudo da estabilidade de vertentes / 557. **18.7.1** Vertente formada por um único plano / 561. **18.7.2** Vertentes formadas por mais de um plano / 562. **18.7.2.1** Vertentes convexas / 562. **18.7.2.2** Vertentes côncavas / 564. **18.7.3** Determinação da inclinação máxima de um talude de escavação, dada a direção / 566. **18.7.4** Determinação da direção do corte do talude em rocha, sendo dado o mergulho / 569. **18.8** Individualização dos blocos removíveis de uma superfície escavada / 572. **18.9** Probabilidade de remoção de um bloco / 581.

REFERÊNCIAS / 585