

20 201001  
K 838491



Renato Lancellotta

# Geotecnica

Quarta edizione



**K** - 8384691  
**D** - 6277004  
CORSO GTEC- 6  
0 (7)  
INGEGNERIA  
Sezione n. 9

# Indice generale

## Prefazione XI

## CAPITOLO 1

### Origine, descrizione e classificazione dei terreni

- 1.1 Origine dei terreni naturali 2
  - 1.1.1 Alterazione 3
  - 1.1.2 Trasporto dei sedimenti 5
  - 1.1.3 Sedimentazione 5
  - 1.1.4 Termini descrittivi basati sulle dimensioni delle particelle 5
- 1.2 Le particelle argillose 6
  - 1.2.1 Struttura dei minerali argillosi 6
  - 1.2.2 Interazione tra particelle argillose 9
- 1.3 Caratteri dei depositi naturali 10
  - 1.3.1 Aspetti generali e terminologia 10
  - 1.3.2 Depositi glaciali 11
  - 1.3.3 Depositi alluvionali 12
  - 1.3.4 Depositi lacustri e palustri 12
  - 1.3.5 Depositi di transizione: ambienti di delta, d'estuario e di lagune costiere 12
  - 1.3.6 Depositi eolici 13
  - 1.3.7 Depositi marini 13
  - 1.3.8 Depositi piroclastici 14
- 1.4 Relazioni tra le fasi 14
- 1.5 Descrizione e classificazione dei terreni 20
  - 1.5.1 Elementi per una descrizione dei terreni 20
  - 1.5.2 Parametri utilizzati per classificare i terreni 21
- 1.6 Limiti di Atterberg e carta di plasticità 24
- 1.7 Sistemi di classificazione 30
  - Principali riferimenti bibliografici 33*

## CAPITOLO 2

### Dal discreto reale al continuo astratto: la meccanica dei continui

- 2.1 Il linguaggio della meccanica dei continui: la notazione tensoriale 36
  - 2.1.1 Simboli di Kroneker e di Levi-Civita 38
- 2.2 Tensori 39
- 2.3 Rappresentazione diadica dei tensori 40
- 2.4 Leggi di trasformazione delle componenti di un tensore 42
- 2.5 Autovalori e autovettori 44
- 2.6 Campi vettoriali e tensoriali 46
- 2.7 Moto 47
- 2.8 Deformazioni finite 49
- 2.9 Descrizione della deformazione finita in termini di gradienti di spostamento 51
- 2.10 Deformazioni infinitesime 54
- 2.11 Equazioni di congruenza 55
- 2.12 Interpretazione geometrica delle deformazioni infinitesime 56
  - 2.12.1 Problemi di deformazione piana 61
- 2.13 Analisi della tensione 61
  - 2.13.1 Il tetraedro di Cauchy 64
  - 2.13.2 Tensioni principali e invarianti 66
  - 2.13.3 Decomposizione del tensore degli sforzi 67
  - 2.13.4 Problemi piani di tensione 68
- 2.14 Cerchi di Mohr 68
- 2.15 I teoremi di Gauss e di Reynolds 73
  - 2.15.1 Teorema della divergenza o teorema di Gauss 73
  - 2.15.2 Teorema del trasporto o teorema di Reynolds 73
- 2.16 Principio di conservazione della massa 75
- 2.17 Bilancio della quantità di moto 75
- 2.18 Bilancio del momento della quantità di moto 76
- 2.19 Introduzione ai legami costitutivi 77
- 2.20 Elasticità 77
- 2.21 Mezzo trasversalmente isotropo 81
- 2.22 Coordinate cilindriche 82
- 2.23 Plasticità 88

- 2.23.1 Le assunzioni fondamentali della teoria della plasticità 88
- 2.23.2 Struttura del modello elasto-plastico incoerente. 90
- 2.23.3 Flusso plastico associato 93
- 2.24 Visco-elasticità 94**
  - 2.24.1 Modello di Maxwell 94
  - 2.24.2 Modello di Kelvin 95
  - 2.24.3 Modello di Burgers 96
- 2.25 Vincoli interni: un'anticipazione del principio degli sforzi efficaci 97**  
*Principali riferimenti bibliografici 100*

## CAPITOLO 3

### Il modello di continui sovrapposti e il principio degli sforzi efficaci

- 3.1 Il principio degli sforzi efficaci 104
- 3.2 Condizioni di stato iniziali: le tensioni geostatiche 105
- 3.3 Capillarità 109
- 3.4 Moto dell'acqua in un mezzo poroso: la legge di Darcy 111
- 3.5 Condizioni di equilibrio in presenza di forze di filtrazione 114
- 3.6 Condizioni idrauliche durante un percorso di sollecitazione e configurazioni estreme: condizioni drenate e condizioni non drenate 118
- 3.7 Percorsi di sollecitazione 120
  - 3.7.1 Condizioni assialsimmetriche 121
  - 3.7.2 Condizioni di deformazione piana 121
  - 3.7.3 Esempi applicativi 122
- 3.8 Variazioni delle pressioni interstiziali indotte da sollecitazioni in condizioni non drenate 123
- 3.9 Sul significato del termine «deviatore» 125  
*Principali riferimenti bibliografici 126*

## CAPITOLO 4

### Storia tensionale e compressibilità

- 4.1 Storia tensionale: compressione per sedimentazione 128
  - 4.1.1 Alcune precisazioni lessicali 128

- 4.1.2 Compressione per sedimentazione 129
- 4.2 Sovraconsolidazione dovuta a erosione e concetto di tensione di snervamento 131
- 4.3 Sovraconsolidazione prodotta da oscillazioni di falda 132
- 4.4 Simulazione della compressione monodimensionale: la prova edometrica 134
- 4.5 Determinazione sperimentale della tensione di sovraconsolidazione 137
- 4.6 Storia tensionale di un deposito: due esempi di particolare interesse 138
- 4.7 Parametri di compressibilità 145
- 4.8 Cedimento in condizioni monodimensionali 147
- 4.9 Compressione secondaria 149
- 4.10 Altri eventi post-deposizionali: leaching, scambio di cationi, cementazione 152
- 4.11 Importanza della sequenza degli eventi 153
- 4.12 Importanza della qualità del campione e delle modalità esecutive 155  
*Principali riferimenti bibliografici 158*

## CAPITOLO 5

### Comportamento meccanico delle terre e Teoria dello Stato Critico

- 5.1 Note introduttive sulla resistenza al taglio e sul criterio di rottura di Coulomb 160
- 5.2 Condizioni drenate e non drenate: velocità relativa di applicazione del carico 162
- 5.3 Requisiti fondamentali delle apparecchiature di laboratorio 163
  - 5.3.1 Apparecchio di taglio diretto 163
  - 5.3.2 Apparecchio triassiale 166
- 5.4 Comportamento meccanico delle sabbie: dilatanza, resistenza di picco, stato critico 169
- 5.5 L'ipotesi di Taylor sul meccanismo di dissipazione 173
- 5.6 Stato corrente e stato critico: un primo sguardo alla teoria dello stato critico 176
- 5.7 Comportamento meccanico delle argille tenere: percorsi di carico drenati e non drenati e unicità del luogo dei punti a rottura 178
  - 5.7.1 Prove drenate 179
  - 5.7.2 Prove non drenate 182
  - 5.7.3 Uso del modello di stato critico per predire le condizioni di rottura 184

- 5.8 Superficie di stato 185
  - 5.9 Comportamento meccanico delle argille sovraconsolidate 188
    - 5.9.1 Aspetti peculiari delle argille consistenti 188
    - 5.9.2 Resistenza di picco 189
    - 5.9.3 Comportamento nel ramo post-picco 193
    - 5.9.4 Resistenza residua 194
  - 5.10 Criterio di normalizzazione di Hvorslev 197
  - 5.11 Resistenza al taglio non drenata 200
    - 5.11.1 Un artificio per le analisi di stabilità a breve termine 200
    - 5.11.2 Dipendenza della resistenza non drenata dalle condizioni di stato 201
    - 5.11.3 Dipendenza della resistenza non drenata dai percorsi di carico 204
  - 5.12 Rigidezza 205
  - 5.13 Livelli deformativi nella fase di esercizio delle opere e misure locali della rigidezza 210
  - 5.14 Prova di colonna risonante 211
  - 5.15 Il modello Cam Clay 213
    - 5.15.1 Superficie di snervamento 214
    - 5.15.2 Legge di incrudimento 216
    - 5.15.3 Calcolo delle deformazioni plastiche 217
    - 5.15.4 Comportamento in fase elastica 217
  - 5.16 Ulteriori annotazioni sull'esecuzione delle prove sperimentali 218
    - 5.16.1 Procedure di riconsolidazione dei campioni di laboratorio 218
    - 5.16.2 Cella triassiale di tipo idraulico 218
    - 5.16.3 Anisotropia 219
- Principali riferimenti bibliografici 221*

## CAPITOLO 6

### Moti di filtrazione

- 6.1 Qualche richiamo di meccanica dei fluidi 224
- 6.2 La legge di Darcy: ulteriori approfondimenti 227
- 6.3 Determinazione sperimentale del coefficiente di conducibilità idraulica 228
  - 6.3.1 Prove a carico costante 228
  - 6.3.2 Prove a carico variabile 229
- 6.4 Meccanismi di collasso di tipo idraulico 230
  - 6.4.1 Requisiti di progetto dei filtri rovesci 233
- 6.5 Modello matematico dei moti di filtrazione 236
  - 6.5.1 Modello di Biot (1941) 238
- 6.6 Moti di filtrazione in regime stazionario 239
  - 6.6.1 Condizioni al contorno 239

- 6.6.2 Due soluzioni di interesse applicativo 241
  - 6.7 Soluzione numerica dell'equazione di Laplace 243
  - 6.8 Filtrazione in mezzi anisotropi e eterogenei 246
    - 6.8.1 Mezzi anisotropi 246
    - 6.8.2 Filtrazione in mezzi eterogenei 246
  - 6.9 Moti a superficie libera 247
  - 6.10 Scavi sotto falda 251
    - 6.10.1 Generalità 251
    - 6.10.2 Filtrazione stazionaria in un acquifero confinato 252
    - 6.10.3 Filtrazione stazionaria in un acquifero non confinato 254
  - 6.11 Teoria della consolidazione monodimensionale 255
  - 6.12 Determinazione sperimentale del coefficiente di consolidazione 263
  - 6.13 Soluzione dell'equazione della consolidazione 265
  - 6.14 Dreni verticali 269
  - 6.15 Consolidazione in condizioni tridimensionali 273
    - 6.15.1 Teoria di Biot 273
    - 6.15.2 Teoria disaccoppiata 273
- Principali riferimenti bibliografici 276*

## CAPITOLO 7

### Indagini in sito

- 7.1 Programma delle indagini 278
- 7.2 Tecniche esplorative dirette: trincee e sondaggi 280
  - 7.2.1 Trincee esplorative 280
  - 7.2.2 Sondaggi 280
  - 7.2.3 Sondaggi eseguiti con elica 280
  - 7.2.4 Sondaggi a percussione 281
  - 7.2.5 Sondaggi a rotazione 281
  - 7.2.6 Stabilizzazione del foro 281
  - 7.2.7 Presentazione dei risultati dei sondaggi 282
- 7.3 Tecniche di campionamento 283
  - 7.3.1 Caratteristiche dei campionatori 283
- 7.4 La misura delle pressioni interstiziali in sito 287
  - 7.4.1 Alcune definizioni 287
  - 7.4.2 La misura delle pressioni interstiziali in terreni saturi 289
  - 7.4.3 La misura delle pressioni interstiziali in terreni non saturi 292

- 7.4.4 Tempo di risposta di un piezometro 292
- 7.5 Le prove in sito 295**
  - 7.5.1 Prova penetrometrica dinamica (SPT) 295
  - 7.5.2 Prove penetrometriche statiche (CPT e CPTU) 297
  - 7.5.3 Dilatometro di Marchetti 300
  - 7.5.4 Prove scissometriche 300
  - 7.5.5 Prove pressiometriche 301
  - 7.5.6 Prove di carico su piastra 303
  - 7.5.7 Prove sismiche 303
- 7.6 Profilo stratigrafico 307**
- 7.7 Stato tensionale 308**
  - 7.7.1 Prove pressiometriche 309
  - 7.7.2 Dilatometro di Marchetti 310
- 7.8 Resistenza al taglio non drenata 311**
  - 7.8.1 Prove scissometriche 311
  - 7.8.2 Resistenza non drenata da prove CPT 313
  - 7.8.3 Prove pressiometriche 314
  - 7.8.4 Prove dilatometriche 318
- 7.9 Resistenza al taglio delle sabbie 320**
  - 7.9.1 Stima della densità relativa da prove SPT 321
  - 7.9.2 Stima della densità relativa da prove CPT 322
- 7.10 Rigidezza 324**
  - 7.10.1 Prove dilatometriche 324
  - 7.10.2 Prove di carico su piastra 325
  - 7.10.3 Prove pressiometriche 326
- 7.11 Metodi sismici 326**
  - 7.11.1 Prove Cross-hole e Down-hole 326
  - 7.11.2 Prove SASW 329
  - 7.11.3 Correlazioni empiriche 332
- 7.12 Elementi di teoria della propagazione ondosa 333**
  - 7.12.1 Propagazione ondosa in un mezzo isotropo 333
  - 7.12.2 Propagazione ondosa in un mezzo anisotropo 335
- 7.13 L'impiego della poroelasticità per la determinazione della porosità 338**
- 7.14 Prove di permeabilità 339**
  - 7.14.1 Prove in foro di sondaggio 340
  - 7.14.2 Prove di pompaggio 341
  - 7.14.3 Interpretazione delle prove di pompaggio in un acquifero confinato 343
  - 7.14.4 Interpretazione delle prove di pompaggio in un acquifero non confinato 345
  - 7.14.5 Prove di permeabilità eseguite mediante piezometri 346
  - 7.14.6 Prove eseguite con attrezzature autoperforanti 348
  - 7.14.7 Prove di dissipazione eseguite con il piezocono 349

**Principali riferimenti bibliografici 351**

## CAPITOLO 8

### L'interpretazione del collasso e le verifiche di sicurezza

#### Parte prima

#### Teoremi dell'analisi limite e criteri di snervamento

- 8.1 I teoremi dell'analisi limite 354**
  - 8.1.1 Teoremi limite per materiali con criterio di flusso associato 354
  - 8.1.2 Meccanismi di collasso 356
  - 8.1.3 Calcolo della potenza dissipata 357
  - 8.1.4 Teoremi limite per materiali con legge di flusso non associata 358
- 8.2 Criteri di snervamento 359**
  - 8.2.1 Piano deviatorico e piano  $\pi$  359
  - 8.2.2 Criteri di snervamento 361

#### Parte seconda

#### La spinta delle terre

- 8.3 Stati di equilibrio limite di Rankine 364**
  - 8.4.1 Sforzi coniugati in un pendio indefinito 366
- 8.4 Il metodo dell'equilibrio limite di Coulomb 368**
  - 8.4.1 Spinta attiva 368
  - 8.4.2 Resistenza passiva 370
  - 8.4.3 Il metodo di Coulomb e il teorema cinematico della plasticità 370
- 8.5 Discontinuità statiche e calcolo della resistenza passiva 371**
  - 8.5.1 Calcolo della resistenza passiva 375
  - 8.5.2 Soluzione statica per la spinta attiva 376
  - 8.5.3 Soluzione statica relativa al caso di piano campagna inclinato 378
  - 8.5.4 Cenni al metodo delle caratteristiche 378

#### Parte terza

#### Le strutture di sostegno

- 8.6 Tipologie delle opere di sostegno e calcolo pratico delle spinte 379**
  - 8.6.1 Il calcolo pratico delle spinte 379
  - 8.6.2 Presenza della coesione e fessure di trazione 381
  - 8.6.3 Analisi in condizioni non drenate 383
  - 8.6.4 Influenza degli spostamenti dell'opera sull'entità e distribuzione delle spinte 385
  - 8.6.5 Spinta dovuta ai sovraccarichi 386
  - 8.6.6 Spinta dovuta alla compattazione del terrapieno 387

- 8.6.7 Sistemi di drenaggio 388
- 8.7 Introduzione alle verifiche di stabilità: la misura della sicurezza 392**
- 8.8 Le verifiche di sicurezza dei muri di sostegno 392**
  - 8.8.1 Verifica allo scorrimento sul piano di posa 394
  - 8.8.2 Verifica al ribaltamento 394
  - 8.8.3 Verifica di capacità portante 395
  - 8.8.4 Verifica di stabilità globale del complesso pendio-opera di sostegno 395
  - 8.8.5 Scelta dei parametri di resistenza al taglio 395
- 8.9 Le verifiche di sicurezza delle paratie 400**
- 8.10 Scavi puntellati 404**
- 8.11 Spinta delle terre in presenza di azioni sismiche 407**
  - 8.11.1 Valutazione della spinta attiva 407
  - 8.12.2 Resistenza passiva in presenza di azioni sismiche 409

#### Parte quarta

##### Le fondazioni dirette

- 8.12 Capacità portante delle fondazioni dirette 414**
  - 8.12.1 Le strutture di fondazione 414
  - 8.12.2 Il carico limite delle fondazioni dirette 417
  - 8.12.3 La determinazione del carico limite attraverso i teoremi della plasticità 418
- 8.13 Carico limite in condizioni non drenate 419**
  - 8.13.1 Applicazione del teorema cinematico 419
  - 8.13.2 Applicazione del teorema statico 422
- 8.14 Scelta dei parametri di resistenza al taglio nelle analisi non drenate: influenza dell'eterogeneità e dei percorsi di carico 425**
  - 8.14.1 Influenza dell'eterogeneità meccanica 425
  - 8.14.2 Influenza dei percorsi di carico 426
- 8.15 Carico limite in condizioni drenate 427**
  - 8.15.1 Influenza del sovraccarico: soluzione statica 428
  - 8.15.2 Influenza del sovraccarico: approccio cinematico 430
  - 8.15.3 Il contributo della coesione 431
  - 8.15.4 Influenza del peso proprio 431
  - 8.15.5 Presenza della falda 432
- 8.16 Margini di sicurezza e scelta dei parametri di resistenza al taglio 432**
- 8.17 Carico limite delle fondazioni dirette: analisi di routine 434**
  - 8.17.1 Carico limite in condizioni drenate 434
  - 8.17.2 Analisi di routine in condizioni non drenate 436

#### Parte quinta

##### Pendii naturali e fronti di scavo

- 8.18 Pendii naturali e fronti di scavo: inquadramento del problema 438**
  - 8.18.1 Alcune definizioni 438
  - 8.18.2 Carattere multidisciplinare dello studio 440
- 8.19 Metodi dell'equilibrio limite globale 442**
  - 8.19.1 Pendio indefinito 442
  - 8.19.2 Metodo dei concii 444
  - 8.19.3 Metodo semplificato di Bishop 445
  - 8.19.4 Metodo semplificato di Janbu 447
- 8.20 Scelta dei parametri di resistenza al taglio 447**  
*Principali riferimenti bibliografici 453*

## CAPITOLO 9

### Le strutture in esercizio: cedimenti e danni strutturali. La crisi per perdita di rigidità: l'instabilità

- 9.1 Descrizione dei movimenti del terreno e delle fondazioni 456**
  - 9.1.1 Evoluzione dei cedimenti nel tempo 456
  - 9.1.2 Terminologia usata per descrivere i movimenti di una struttura 457
- 9.2 Note introduttive al calcolo dei cedimenti 458**
- 9.3 L'impiego della teoria dell'elasticità 459**
- 9.4 Calcolo dei cedimenti: significato e limiti dell'approccio elastico 460**
- 9.5 Il problema di Boussinesq 462**
- 9.6 Soluzioni elastiche relative a carichi ripartiti su superfici di dimensioni finite 464**
  - 9.6.1 Carico uniformemente ripartito su un'area circolare 464
  - 9.6.2 Carico uniformemente ripartito su un'area rettangolare 467
  - 9.6.3 Carico nastriforme 468
  - 9.6.4 Carico nastriforme trapezoidale 470
  - 9.6.5 Compendio delle soluzioni elastiche 470
  - 9.6.6 Strato di spessore finito 471
  - 9.6.7 Fondazione rigida 472
  - 9.6.8 Mezzo stratificato 475
- 9.7 Cedimenti delle fondazioni su argilla 475**
  - 9.7.1 Calcolo del cedimento immediato 476
  - 9.7.2 Calcolo del cedimento di consolidazione 477

- 9.7.3 Affidabilità del metodo edometrico 483  
 9.7.4 Calcolo del cedimento secondario 483
- 9.8 Cedimenti delle fondazioni su terreni sabbiosi 487**  
 9.8.1 Metodo di Burland e Burbidge 487  
 9.8.2 Metodo di Schmertmann 491  
 9.8.3 Influenza della non linearità 494
- 9.9 Danni strutturali e valori di soglia dei cedimenti 496**  
 9.9.1 Cedimenti ammissibili 496  
 9.9.2 Previsione dei cedimenti differenziali 497
- 9.10 Cedimenti indotti da scavi a cielo aperto e da gallerie superficiali 498**  
 9.10.1 Scavi a cielo aperto 498  
 9.10.2 Cedimenti prodotti da gallerie superficiali 500
- 9.11 Stabilità dell'equilibrio delle torri 502**  
 9.11.1 Il pendolo rovescio 503  
 9.11.2 Lo studio in regime elasto-plastico: teoria del doppio modulo di von Kàrmàn e carico critico di Shanley 505  
 9.11.3 Modello del macroelemento 507
- Principali riferimenti bibliografici 510**
- Bibliografia generale 511**  
**Indice analitico 527**