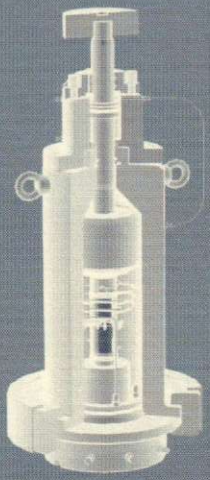
I

Marco Barla

Elementi di Meccanica e Ingegneria delle Rocce



Celid

A
D

Indice

Premessa 11

Capitolo 1
Introduzione alla meccanica e ingegneria delle rocce 13
1.1 Presentazione 13
1.2 Definizioni 13
1.3 Campi di applicazione 14
1.4 La Meccanica delle Rocce nel mondo e in Italia 15
1.5 Biografie essenziali 17

Capitolo 2
Richiami su tensioni, deformazioni e caratteristiche di comportamento dei materiali 21
2.1 Introduzione 21
2.2 Definizioni 21
2.3 Analisi della tensione 22
2.4 Analisi della deformazione 25
2.5 Cerchi di Mohr 27
2.6 Comportamento elastico ed elasto-plastico 29
2.6.1 Modello isotropo lineare ed elastico (ILE) 30
2.6.2 Modello elasto-plastico (ELPLA) 33
2.6.2.1 Criteri di Plasticizzazione 34
2.6.2.2 Criterio di Tresca (1869) e criterio di Von Mises (1913) 35
2.6.2.3 Criterio di Mohr-Coulomb (1773) e criterio di Drucker-Prager (1952) 36
2.6.2.4 Criterio di flusso e legge di incrudimento 38

Capitolo 3
Descrizione qualitativa e quantitativa degli ammassi rocciosi e delle discontinuità 39
3.1 Introduzione 39

3.2 Obiettivi della caratterizzazione geotecnica 40
3.3 Definizioni: ammasso roccioso, roccia intatta e discontinuità 40
3.4 Caratteristiche descrittive delle discontinuità 42
3.4.1 Orientazione 42
3.4.2 Spaziatura 43
3.4.3 Continuità 44
3.4.4 Scabrezza 45
3.4.5 Resistenza di parete e alterazione 49
3.4.6 Apertura 50
3.4.7 Riempimento 52
3.4.8 Presenza d'acqua 52
3.5 Struttura dell'ammasso roccioso 53

Capitolo 4
Metodi di indagine in sito degli ammassi rocciosi 55
4.1 Introduzione 55
4.2 Sondaggi in roccia 56
4.2.1 Recupero percentuale di carotaggio 60
4.2.2 Recupero percentuale modificato (RQD) 60
4.2.3 Recenti sviluppi nelle tecniche di sondaggio 61
4.3 Rilievi lungo stendimento 62
4.3.1 Rappresentazione delle discontinuità mediante proiezione stereografica di Schmidt 65
4.3.2 Analisi dei dati 67
4.3.3 Metodi di rilievo innovativi 71
4.3.3.1 Metodi basati sulle immagini 71
4.3.3.2 Laser scanner 72
4.3.3.3 Il JointMetriX3D 74
4.4 Prove per la determinazione della deformabilità in sito 74
4.4.1 Prove in foro 75
4.4.2 Prova di carico su piastra 76
4.4.2.1 Interpretazione dei risultati di una prova di carico su piastra 78
4.4.3 Prova della camera idraulica in pressione 79
4.4.4 Prove geofisiche 80
4.4.4.1 Prove a rifrazione e riflessione 82
4.4.4.2 Prove con onde di superficie 84
4.4.4.3 Prove in foro 86
4.4.4.4 Applicazioni innovative 88
4.5 Prove per la determinazione dello stato tensionale naturale 90
4.5.1 Metodo della liberazione delle tensioni 92
4.5.2 Metodo del ripristino delle tensioni 94
4.6 Prove per la determinazione delle caratteristiche idrauliche 98
4.7 Ulteriori prove in sito 99

Capitolo 5
Indagini di laboratorio su roccia intatta e discontinuità 103
5.1 Introduzione 103
5.2 Prove di laboratorio su roccia intatta 103
5.2.1 Prove di classificazione 104
5.2.1.1 Analisi mineralogico-petrografica e determinazione delle proprietà fisiche 106
5.2.1.2 Determinazione della velocità sonica 106
5.2.2 Analisi del comportamento rigonfiante 108
5.2.2.1 Determinazione della massima pressione assiale di rigonfiamento 109
5.2.2.2 Determinazione della deformazione assiale e radiale in rigonfiamento libero 109
5.2.2.3 Determinazione dello sforzo assiale di rigonfiamento in funzione della deformazione assiale 110
5.2.3 Prova di punzonamento 111
5.2.4 Prova di trazione brasiliana 115
5.2.5 Prova di compressione monoassiale 117
5.2.6 Prova di compressione triassiale 121
5.2.7 Recenti sviluppi nel campo delle prove sperimentali di compressione 125
5.2.7.1 Controllo delle deformazioni a livello locale 126
5.2.7.2 Misura delle pressioni interstiziali 127
5.2.7.3 Stress path controllato 129
5.2.7.4 Curva sforzo-deformazione completa 129
5.2.7.5 Evoluzione dello stato di fratturazione 130
5.2.7.6 Dipendenza dal tempo 131
5.3 Criteri di resistenza per la roccia intatta 133
5.3.1 Criterio di Mohr-Coulomb (1773) 134
5.3.2 Criterio di Hoek e Brown (1980) 136
5.3.2.1 Linearizzazione del criterio di Hoek e Brown 137
5.4 Prove di laboratorio su discontinuità 138
5.4.1 Prove di taglio diretto 140
5.4.1.1 Prova su superficie artificiale liscia 142
5.4.1.2 Prova su superficie naturale scabra 143
5.5 Recenti sviluppi nella determinazione della resistenza al taglio delle discontinuità 144
5.5.1 Deformabilità delle interfacce 144
5.5.2 Geometria delle superfici di contatto 145
5.5.3 Apertura meccanica e idraulica 145
5.5.4 Condizioni di contorno nella prova di taglio diretto 147
5.5.5 Comportamento a taglio sotto l'azione di sollecitazioni dinamiche 149
5.6 Criteri di resistenza per le discontinuità 150
5.6.1 Criterio di Mohr-Coulomb per le discontinuità 150
5.6.2 Criterio di Barton per le discontinuità 151

Capitolo 6
Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso 155
6.1 Introduzione 155
6.2 Classificazione dell'ammasso roccioso 155
6.2.1 Classificazione mediante RSR 157
6.2.2 Classificazione mediante RMR 158
6.2.3 Classificazione mediante Q 161
6.2.4 Classificazione mediante GSI 165
6.2.5 Correlazioni tra gli indici di classificazione 167
6.3 Determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità per l'ammasso roccioso 168
6.3.1 La scelta del modello geotecnico 168
6.3.2 Modelli continuo e continuo-equivalente 170
6.3.2.1 Elastico lineare, isotropo (ILE) 170
6.3.2.2 Elastico lineare, anisotropo 172
6.3.2.3 Elasto-plastico 172
6.3.3 Criterio di resistenza di Hoek & Brown per l'ammasso roccioso 173
6.3.4 Criterio di Mohr-Coulomb 174
6.3.5 Modello discontinuo 175

Capitolo 7
Dalla caratterizzazione geotecnica all'analisi progettuale 179
7.1 Introduzione 179
7.2 La progettazione geotecnica 180
7.2.1 Il Decreto Ministeriale 11/3/1988 180
7.2.2 Eurocodice 7 180
7.2.3 Norme tecniche per le costruzioni 181
7.3 Metodi di analisi progettuale 183
7.3.1 Metodi empirici 183
7.3.2 Metodo dell'equilibrio limite 184
7.3.3 Metodo delle tensioni 184
7.3.3.1 Il Metodo degli Elementi di Contorno (BEM) 186
7.3.3.2 I Metodi degli Elementi Finiti (FEM) e delle Differenze Finite (FDM) 186
7.3.3.3 Il Metodo degli Elementi Distinti (DEM) 190
7.4 Metodo osservazionale 191
7.4.1 Monitoraggio geotecnico 191
7.4.2 Piano di monitoraggio 192
7.4.3 Misure topografiche 193
7.4.4 Misure innovative: GPS, laser e radar 194
7.4.5 Distometro e fessurimetro 197
7.4.6 Estensimetro 198
7.4.7 Inclinometro 200
7.4.8 Piezometro 202
7.4.9 Celle di carico e celle di pressione 203

Capitolo 8
Gallerie e opere sotterranee 205
8.1 Introduzione 205
8.2 I metodi di scavo 206
8.2.1 Scavo tradizionale 207
8.2.1.1 Avanzamento con calotta e ribasso 208
8.2.1.2 Avanzamento ad attacchi laterali 210
8.2.1.3 Avanzamento con setto centrale 212
8.2.1.4 Avanzamento con cunicolo pilota 213
8.2.1.5 Scavo a piena sezione 214
8.2.1.6 Mezzi di scavo 216
8.2.2 Scavo meccanizzato 220
8.3 Analisi preliminari mediante metodi empirici 225
8.4 Metodo dell'equilibrio limite 229
8.5 Metodo delle tensioni 230
8.5.1 Soluzioni in forma chiusa per galleria circolare profonda 231
8.5.1.1 Soluzione analitica di Lamè per un mezzo ILE $k_o = 1$ 231
8.5.1.2 Soluzione analitica di Kirsch (1898) per un mezzo ILE, $k_o \neq 1$ 234
8.5.1.3 Soluzione analitica di Ribacchi e Riccioni (1977) per un mezzo ELPLA, $k_o = 1$ 236
8.5.1.4 Soluzione di Labiouse e Giraud (1998) 239
8.5.2 Analisi con il metodo della linea caratteristica 241
8.5.3 Metodi numerici 247
8.5.3.1 Il Metodo degli Elementi di Contorno 247
8.5.3.2 I Metodi degli Elementi Finiti, delle Differenze Finite e degli Elementi Distinti 249

Capitolo 9
La stabilità dei versanti e dei fronti di scavo 257
9.1 Introduzione 257
9.2 Metodi di analisi per la stabilità dei versanti e dei fronti di scavo 258
9.2.1 Metodo dell'equilibrio limite 259
9.2.1.1 Scivolamento su superficie piana 261
9.2.1.2 Presenza dell'acqua e altre azioni aggiuntive 262
9.2.1.3 Scivolamento su superficie curva 263
9.2.1.4 Scivolamento tridimensionale 264
9.2.1.5 Ribaltamento 265
9.2.1.6 I codici di calcolo commerciali 267
9.2.2 Metodi numerici 267
9.2.2.1 Il Metodo degli Elementi di Contorno (BEM) 268
9.2.2.2 I Metodi degli Elementi Finiti (FEM) e delle Differenze Finite (FDM) 269
9.2.2.3 Il Metodo degli Elementi Distinti (DEM) 274

9.3 Dal fattore di sicurezza alla probabilità di rottura 275
9.4 Metodi di analisi per la caduta massi 277
9.4.1 Metodi analitici 279
9.4.2 Metodi numerici 281
9.5 Interventi di stabilizzazione 281

Schede 289
1 - Determinazione grafica delle tensioni principali tramite cerchio di Mohr 291
2 - Rappresentazione grafica di un piano di discontinuità 292
3 - Rappresentazione grafica del polo di una discontinuità 293
4 - Determinazione grafica della giacitura della retta di intersezione tra due piani 294
5 - Determinazione grafica dell'angolo compreso tra due rette 295
6 - Determinazione grafica dell'angolo compreso tra due piani (ξ) e dell'angolo compreso tra l'orizzontale e la bisettrice (β) 296
7 - Determinazione delle tracce delle discontinuità su una sezione 297
8 - Proprietà meccaniche delle rocce da prove di laboratorio 298
9 - Deformabilità degli ammassi rocciosi da prove in sito 302
10 - Scelta del sostegno mediante il metodo della linea caratteristica 304

Bibliografia 307

Indice analitico 317