Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

3 COLLANA DI GEOTECNICA E INGEGNERIA GEOTECNICA

Maurizio Tanzini

L'INDAGINE GEOTECNICA

CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLE TERRE E DELLE ROCCE ATTRAVERSO PROVE IN SITO E DI LABORATORIO

Programmazione secondo l'EC7 e le nuove NTC

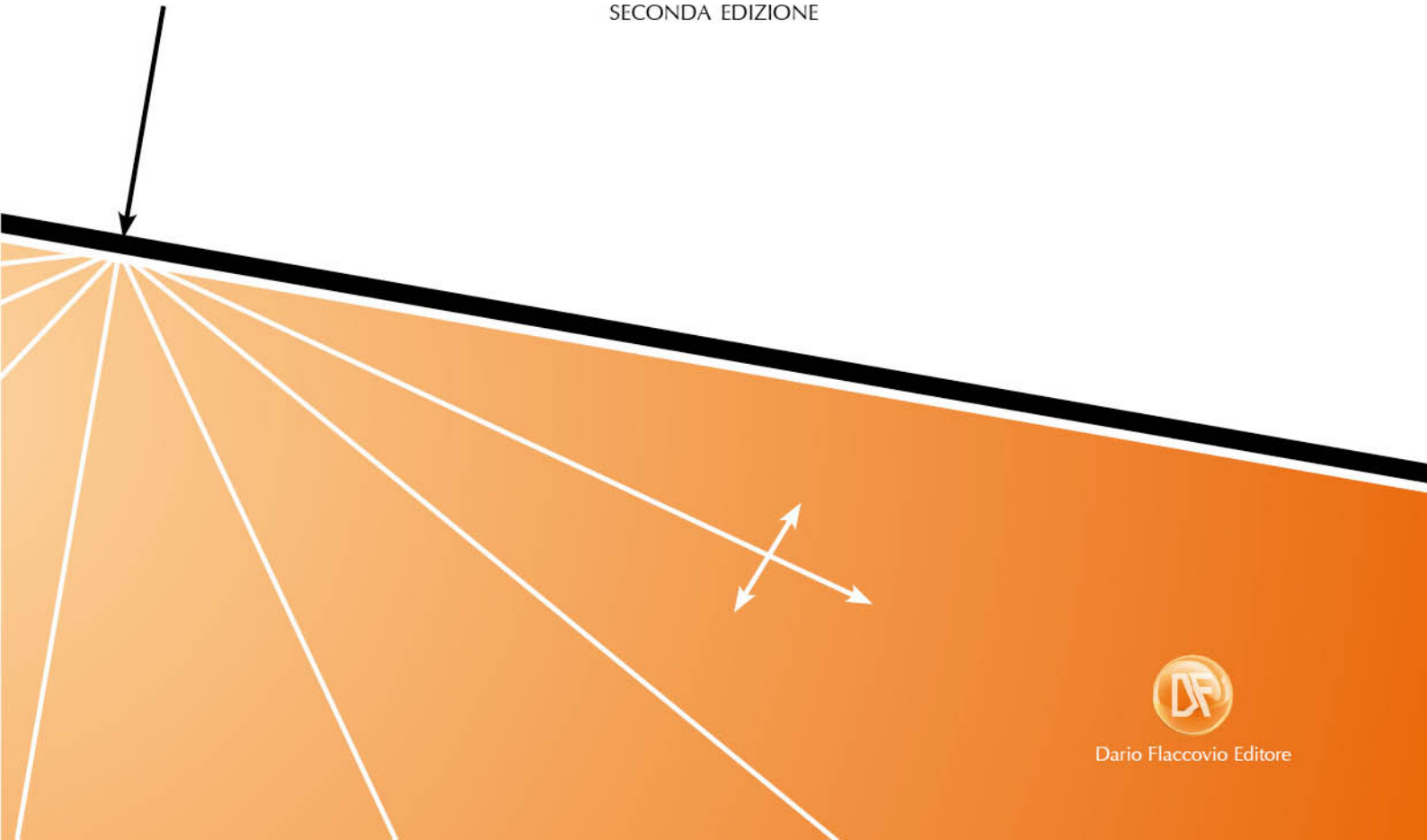
Prove geofisiche e sondaggi geotecnici

Prove in sito e geomeccaniche

Prove di laboratorio sui terreni e sulle rocce

Monitoraggio in corso d'opera

SECONDA EDIZIONE



Dario Flaccovio Editore

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

MAURIZIO TANZINI

L'INDAGINE GEOTECNICA

Caratterizzazione geotecnica delle terre e delle rocce attraverso prove in sito e di laboratorio

Dario Flaccovio Editore

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

A mio padre Walter che m'insegnò
la passione per lo studio della Geotecnica
e l'importanza del rigore morale e professionale

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Maurizio Tanzini
L'INDAGINE GEOTECNICA
ISBN 978-88-7758-0075-9

Seconda edizione marzo 2011

© 2002 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738
www.darioflaccovio.it e-mail info@darioflaccovio.it

Tanzini, Maurizio <1955>
L'indagine geotecnica : caratterizzazione geotecnica delle terre e delle rocce attraverso prove in sito e di laboratorio / Maurizio Tanzini. – 2. ed. Palermo : D. Flaccovio, 2011.
ISBN 978-88-579-0075-9.
1. Geotecnica.
624.151 CDD-22 SBN Pal0232646
CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.
L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.
La fotocopiatura dei libri è un reato.
Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o possibilità di inserire il proprio commento al libro.

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

INDICE

Premessa

CAPITOLO 1 – CENNI INTRODUTTIVI

1.1. Importanza dell'indagine geotecnica ... PAG. 17
1.1.1. Considerazioni preliminari ... » 18
1.1.2. Rischi da materiali naturali e artificiali ... » 20
1.1.3. Rischi geotecnici ... » 22
1.1.4. Gestione del rischio geotecnico ... » 27
1.1.4.1. Un approccio sistematico alla gestione del rischio ... » 28
1.1.4.2. Perché le condizioni del terreno sono un rischio ... » 29
1.1.4.3. Problemi con il corrente approccio ... » 31
1.1.4.4. Eliminare le incertezzze: nuovi metodi di lavoro ... » 33
1.1.4.4.1. Rendere l'indagine geotecnica più efficace ... » 34
1.1.4.4.2. Implementazione di un sistema per la valutazione del rischio geotecnico ... » 35
1.1.4.4.3. Registro dei rischi ... » 35
1.2. L'indagine geotecnica e le nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008) ... » 36
Riferimenti bibliografici ... » 40

CAPITOLO 2 – FINALITÀ E PROGRAMMAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE

2.1. Introduzione ... » 41
2.2. Indagini geotecniche per la progettazione ... » 41
2.2.1. Indagini per il progetto preliminare ... » 41
2.2.2. Indagini per il progetto definitivo ... » 42
2.2.3. Indagini per il progetto esecutivo ... » 43
2.2.4. Indagini durante la costruzione ... » 43
2.2.5. Indagini durante l'esercizio ... » 43
2.3. Volume significativo di sottosuolo da indagare ... » 44
2.4. Programmazione delle indagini geotecniche ... » 45
2.4.1. Opere in sito urbano ... » 50
2.4.2. Infrastrutture ... » 51
2.4.3. Interventi di difesa del territorio, quali il consolidamento di pendii e la stabilizzazione di frane ... » 52
2.4.4. Opere marittime ... » 52
2.4.5. Impianti industriali e centrali termiche ... » 53

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

2.5. Il piano di indagine e prescrizioni generali per l'esecuzione di una indagine geotecnica ..... » 54
2.6. Il rapporto finale ..... » 55
2.7. Interpretazione dei risultati sperimentali, caratterizzazione geotecnica e rapporto geotecnico » 56

CAPITOLO 3 – SCAVI E PERFORAZIONI DI SONDAGGIO

3.1. Scavi ..... » 59
3.2. Perforazioni di sondaggio ..... » 65
3.2.1. Perforazione a percussione ..... » 65
3.2.2. Perforazione a rotazione ..... » 67
3.2.3. Perforazione a rotazione con carotiere a fune (wire line) ..... » 74
3.2.4. Perforazione con trivelle ..... » 75
3.2.5. Perforazione a distruzione ..... » 75
3.2.6. Perforazione in roccia ..... » 75
3.2.7. Stabilizzazione dei fori ..... » 78
3.3. Diagrafia automatica ..... » 79
3.4. Scelta del metodo di perforazione ..... » 81
3.5. Risultati dei sondaggi ..... » 81
Riferimenti bibliografici ..... » 82

CAPITOLO 4 – PROVE IN SITO NEI SONDAGGI

4.1. Prove scissometriche ..... » 95
4.1.1. Descrizione dell'apparecchio, modalità di prova, interpretazione delle misure ..... » 95
4.1.2. Fattori che influenzano il risultato ..... » 99
4.1.3. Esempio di specifica tecnica ..... » 103
4.2. Prove pressiometriche ..... » 104
4.2.1. Introduzione ..... » 104
4.2.2. Pressiometro Menard ..... » 105
4.2.3. Pressiometro autoperforante (SBPMT) ..... » 110
4.2.4. Correlazioni con i risultati delle prove pressiometriche ..... » 111
4.3. Prove con il dilatometro piatto ..... » 113
Riferimenti bibliografici ..... » 118

CAPITOLO 5 – CAMPIONAMENTO

5.1. Prelievo di campioni da scavi ..... » 121
5.2. Prelievo di campioni da fori di sondaggio ..... » 122
5.2.1. Meccanica dei campionamenti ..... » 122
5.2.2. Caratteristiche dei campionatori ..... » 123
5.2.3. Campionatori ..... » 125
5.2.3.1. Campionatori aperti ..... » 125
5.2.3.2. Campionatori a pistone ..... » 125
5.2.3.3. Altri tipi di campionatori ..... » 126
5.3. Esempio di specifica per il campionamento nei sondaggi ..... » 127
Riferimenti bibliografici ..... » 129

CAPITOLO 6 – MISURA DELLE PRESSIONI NEUTRE

6.1. Considerazioni generali ..... » 131
6.2. Misura della pressione neutra in terreni permeabili ..... » 132

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

6.3. Misura delle pressioni neutre in terreni poco permeabili ... » 133
6.4. Linee guida per la scelta del tipo di piezometro ... » 138
Riferimenti bibliografici ... » 139

CAPITOLO 7 – PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO

7.1. Considerazioni generali ... » 141
7.2. Prova di emungimento ... » 143
7.3. Prova di permeabilità in fori di sondaggio ... » 146
7.3.1. Prova a carico variabile mediante immissione d'acqua ... » 146
7.3.1.1. Esecuzione della prova ... » 146
7.3.1.2. Interpretazione della prova ... » 149
7.3.1.3. Esempi di interpretazione della prova ... » 150
7.3.2. Prove a carico variabile mediante emungimento dell'acqua ... » 152
7.3.3. Prova a carico costante ... » 152
7.3.4. Esempio di specifica per l'esecuzione di una prova di permeabilità (Lefranc) ... » 153
7.4. Prove di permeabilità Lugeon ... » 154
7.5. Prove di permeabilità in sito per la determinazione del coefficiente di permeabilità di materiali granulari compattati ... » 169
7.5.1. Diga di Condoroma ... » 169
7.5.2. Diga del Menta ... » 174
7.6. Prove in pozzetti superficiali ... » 177
Riferimenti bibliografici ... » 178

CAPITOLO 8 – PROVE DI INIEZIONE

8.1. Introduzione ... » 179
8.2. Trattamento sperimentale per il consolidamento di un banco sabbioso ... » 181
8.3. Prove d'iniezione per l'esecuzione dello schermo d'impermeabilizzazione di una diga ... » 182
8.3.1. Generalità ... » 182
8.3.2. Schema esecutivo dello schermo sperimentale d'iniezioni ... » 183
8.3.3. Perforazioni ... » 184
8.3.4. Prove di permeabilità ... » 184
8.3.5. Prove di iniezione ... » 185
8.3.6. Prove pressiometriche ... » 187
8.3.7. Risultati ... » 187
Riferimenti bibliografici ... » 190

CAPITOLO 9 – PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

9.1. Prova S.P.T. (Standard Penetration Test) ... » 191
9.1.1. Descrizione dell'attrezzatura e della prova ... » 191
9.1.2. Influenza della procedura di esecuzione sui risultati della prova ... » 192
9.1.2.1. Tecniche di perforazione ... » 193
9.1.2.2. Attrezzatura utilizzata per l'esecuzione della prova S.P.T. ... » 195
9.1.3. Influenza delle condizioni del terreno sulla resistenza alla penetrazione ... » 198
9.2. Determinazione dei parametri geotecnici ... » 202
9.2.1. Valutazione dei parametri geotecnici nei terreni a grana grossa ... » 203
9.2.1.1. Densità relativa ... » 203
9.2.1.2. Angolo di resistenza al taglio ... » 205

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

9.2.1.3. Parametri di deformabilità ... » 208
9.2.1.4. Valutazione del potenziale di liquefazione di un deposito sabbioso ... » 211
9.2.2. Valutazione dei parametri geotecnici nei terreni a grana fine ... » 212
9.2.2.1. Resistenza al taglio non drenata ... » 212
9.2.2.2. Deformabilità ... » 213
9.3. Prova penetrometrica dinamica continua (DP) ... » 214
9.3.1. Introduzione ... » 214
9.3.2. Descrizione dell'attrezzatura della prova e delle modalità di prova ... » 214
9.3.3. Interpretazione delle prove ... » 216
9.4. Esempi di specifiche tecniche ... » 220
9.4.1. Prova penetrometrica S.P.T. ... » 220
9.4.2. Esempio di specifica tecnica di prova penetrometrica dinamica continua ... » 222
Riferimenti bibliografici ... » 223

CAPITOLO 10 – PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT) E PIEZOCONO (CPTU)

10.1. Introduzione ... » 227
10.2. Descrizione dell'attrezzatura ... » 229
10.3. Controlli, correzioni e presentazione dei risultati ... » 232
10.4. Cono sismico ... » 241
10.5. Esempio di specifica tecnica ... » 242
10.5.1. Prove penetrometriche statiche di tipo meccanico ... » 242
10.5.2. Prove penetrometriche statiche di tipo elettrico ... » 243
10.5.3. Prova con piezocono ... » 245
10.5.4. Prova con piezocono sismico ... » 246
10.6. Interpretazione delle prove ... » 247
10.6.1. Stratigrafia dei terreni ... » 247
10.6.2. Classificazione dei terreni ... » 249
10.6.3. Interpretazione dei terreni a grana fine ... » 252
10.6.3.1. Parametri di stato ... » 252
10.6.3.2. Resistenza al taglio ... » 257
10.6.3.3. Parametri di deformabilità ... » 260
10.6.3.4. Caratteristiche di permeabilità e di consolidazione ... » 262
10.6.4. Interpretazione dei terreni a grana grossa ... » 266
10.6.4.1. Densità relativa ... » 267
10.6.4.2. Parametri di resistenza al taglio ... » 268
10.6.4.3. Parametri di deformabilità ... » 270
10.7. Analisi statistica dei dati ... » 272
10.7.1. Sorgenti di incertezze e variabilità delle proprietà dei terreni ... » 274
10.7.2. Trattamento statistico ... » 274
10.7.2.1. Stima semplificata (stima *short-cut*) ... » 274
10.7.2.2. Media, varianza, istogramma e funzione densità di probabilità ... » 275
10.8. Correlazioni fra i risultati delle prove CPT e SPT ... » 278
10.9. Sensori speciali che possono essere incorporati nelle prove penetrometriche ... » 282
10.9.1. Misura della tensione laterale ... » 282
10.9.2. Il pressio-cono ... » 285
Riferimenti bibliografici ... » 288

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 11 – PROVE DI CARICO SU PIASTRA

11.1. Generalità ... » 293
11.2. Esecuzione della prova e presentazione dei risultati ... » 295
11.3. Interpretazione dei risultati ... » 298
11.3.1. Modulo di deformabilità ... » 298
11.3.2. Coefficiente di Winkler ... » 301
11.3.3. Valutazione della capacità portante ... » 302
11.4. Esempi di specifica tecnica ... » 304
Riferimenti bibliografici ... » 305

CAPITOLO 12 – PROVE GEOFISICHE

12.1. Introduzione ... » 308
12.2. Prove sismiche a rifrazione ... » 310
12.3. Prove sismiche a riflessione ... » 315
12.4. Le prove cross hole ... » 316
12.5. Le prove down hole e up hole ... » 320
12.6. Rilievi di carotaggio sonico in perforazioni ... » 323
12.7. Tomografia sonica/sismica ... » 324
12.8. La prova SASW ... » 326
12.9. Determinazione della resistività elettrica ... » 328
12.9.1. Sondaggi elettrici verticali ... » 328
12.9.2. Diagrafie elettriche nei pozzi ... » 330
Riferimenti bibliografici ... » 330

CAPITOLO 13 – RILIEVI GEOSTRUTTURALI

13.1. Premessa ... » 333
13.2. Orientazione ... » 333
13.3. Spaziatura ... » 338
13.4. Persistenza e descrizione degli estremi d'ogni frattura ... » 339
13.5. Scabrezza del giunto ... » 340
13.6. Resistenza della parete del giunto ... » 341
13.7. Apertura del giunto e materiale di riempimento ... » 341
13.8. Volume roccioso unitario ... » 343
13.9. Esempio di specifica tecnica per l'esecuzione di un rilievo geostrutturale ... » 345
13.10. Esempio di specifica tecnica per un rilievo geostrutturale con sonda televisiva ... » 346
Riferimenti bibliografici ... » 346

CAPITOLO 14 – PROVE GEOMECCANICHE

14.1. Prove di martinetto piatto ... » 347
14.2. Prove dilatometriche ... » 353
14.3. Prove di carico su piastra ... » 357
14.4. Misura dello stato di sollecitazione ... » 362
14.5. Determinazione delle caratteristiche di resistenza al taglio di un ammasso roccioso in sito ... » 364
Riferimenti bibliografici ... » 368

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 15 – PROVE DI LABORATORIO

15.1. Prove di laboratorio sui terreni ... » 369
15.1.1. Prove di classificazione ... » 370
15.1.2. Prove di permeabilità ... » 371
15.1.3. Prove di compressibilità e deformabilità ... » 372
15.1.3.1. Edometro ... » 372
15.1.3.2. Apparecchio triassiale ... » 378
15.1.4. Prove di resistenza al taglio ... » 381
15.1.4.1. Prove di taglio diretto ... » 381
15.1.4.2. Prove triassiali ... » 385
15.1.5. Metodi disponibili per la valutazione del grado di disturbo del provino ... » 388
15.2. Prove di laboratorio sulle rocce ... » 388
15.2.1. Generalità ... » 388
15.2.2. Analisi petrografiche ... » 389
15.2.3. Determinazione delle caratteristiche fisiche ... » 391
15.2.4. Determinazione delle caratteristiche meccaniche ... » 392
15.2.4.1. Prove per la determinazione della resistenza a compressione monoassiale e la deformabilità dei materiali rocciosi ... » 392
15.2.4.2. Prove per la determinazione della resistenza a compressione triassiale dei materiali rocciosi ... » 395
15.2.4.3. Prove di trazione ... » 400
15.2.4.4. Prove di taglio ... » 401
15.2.4.4.1. Prove di taglio diretto in sito ... » 402
15.2.4.4.2. Prove di taglio diretto in laboratorio ... » 407
15.2.4.5. Prova per la misura della resistenza al punzonamento ... » 409
15.2.4.6. Prove per la determinazione della pressione di rigonfiamento e del comportamento rigonfiante di un terreno espansivo ... » 416
15.2.4.6.1. Generalità ... » 416
15.2.4.6.2. Campionamento, conservazione, preparazione dei provini da sottoporre a prova ... » 416
15.2.4.6.3. Determinazione della tensione assiale massima di rigonfiamento ... » 417
15.2.4.6.4. Determinazione della deformazione assiale e radiale in rigonfiamento libero ... » 419
15.2.4.6.5. Determinazione della tensione assiale di rigonfiamento in funzione della deformazione assiale di rigonfiamento ... » 421
15.2.4.6.6. Prova edometrica Huder-Amberg ... » 423
15.2.4.6.7. Prove triassiali di rigonfiamento ... » 425
15.2.4.7. Prove per la determinazione della durezza e dell'abrasività ... » 426
15.2.4.7.1. Abrasione e abrasività ... » 426
15.2.4.7.2. Durezza ... » 427
15.2.4.7.3. Prova Los Angeles ... » 428
15.2.4.7.4. Determinazione della durezza Schmidt a rimbalzo ... » 430
15.2.4.7.5. Determinazione della durezza con lo scleroscopio di Shore ... » 431
Riferimenti bibliografici ... » 432

CAPITOLO 16 – PROVE IN GRANDE SCALA

16.1. Introduzione ... » 433
16.2. Progettazione costruttiva e monitoraggio in corso d'opera di rilevati ferroviari per la tratta ad Alta Velocità Roma - Napoli ... » 433

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

16.2.1. Introduzione ... » 433
16.2.2. Sezione tipo e caratteristiche dei materiali da costruzione ... » 434
16.2.3. Stratigrafia e caratteristiche geotecniche ... » 434
16.2.3.1. Stratigrafia e natura dei terreni ... » 434
16.2.3.2. Criteri di valutazione dei parametri ... » 436
16.2.3.3. Stratigrafia di calcolo ... » 437
16.2.4. Analisi dei cedimenti ... » 438
16.2.5. Sezioni strumentate ... » 438
16.2.6. Costruzione e risultati delle misure ... » 439
16.2.6.1. Assestimetri a piastra, livellometri e capisaldi ... » 439
16.2.6.2. Assestimetri profondi tipo BRS ... » 440
16.2.6.3. Inclinometri ... » 440
16.2.6.4. Piezometri elettrici ... » 441
16.2.7. Interpretazione dei risultati ... » 441
Riferimenti bilbiografici ... » 441

CAPITOLO 17 – MONITORAGGIO GEOTECNICO

17.1. Introduzione ... » 443
17.2. Impieghi della strumentazione geotecnica ... » 445
17.3. Metodi di misurazione degli spostamenti superficiali e profondi ... » 447
17.3.1. Spostamenti superficiali ... » 447
17.3.1.1. Sistemi topografici ... » 447
17.3.1.2. Sistemi di posizionamento satellitare ... » 447
17.3.1.3. Estensimetri superficiali ... » 448
17.4. Spostamenti profondi ... » 449
17.4.1. Estensimetri profondi multibase ... » 450
17.4.2. Inclinometri ... » 451
17.4.3. Sonde estensimetriche ed estenso-inclinometriche multibase ... » 452
17.4.4. Pendoli rovesci ... » 453
17.4.5. Profilatori ... » 455
17.5. Livelli di falda e pressioni neutre ... » 455
17.5.1. Tubi piezometrici ... » 455
17.5.2. Piezometri idraulici ... » 456
17.5.3. Piezometri pneumatici ... » 456
17.5.4. Piezometri a corda vibrante ed elettrici ... » 457
17.5.5. Piezometri multipli ... » 457
17.6. Pressioni totali e carichi ... » 458
17.6.1. Celle di pressione ... » 459
17.6.2. Celle di carico ... » 460
Riferimenti bibliografici ... » 461

CAPITOLO 18 – L'INDAGINE GEOTECNICA ALLA LUCE DELL'EUROCODICE 7

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Premessa

Dopo quasi un quarto di secolo, nel dicembre del 2004, la nuova normativa geotecnica europea, denominata *Eurocodice 7* (*Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*), è stata definitivamente approvata con il derivato obbligo, per tutti i paesi europei, di adottarla entro il 2010.
Conseguentemente, dal 2009 sono entrate in vigore in Italia le Nuove norme tecniche per le costruzioni, approvate con decreto ministeriale del 14 gennaio 2008, pubblicato nella G.U. del 4 febbraio 2008, n. 29, che hanno pienamente recepito l'approccio e le indicazioni della normativa europea (Eurocodice 7).
In primis, va sicuramente notato che l'introduzione dell'Eurocodice 7 e delle conseguenti Nuove norme tecniche per le costruzioni rappresenta senza dubbio un radicale cambiamento di tutti gli aspetti connessi alla progettazione geotecnica.
In modo particolare, l'adozione, anche per la progettazione geotecnica, delle verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi – che implicano l'impiego di coefficienti parziali sulle azioni o sugli effetti delle azioni, sui parametri geotecnici e sulle resistenze secondo diversi approcci progettuali contemplati dalla normativa – rende ancora più importante e delicata l'esecuzione dell'indagine geotecnica. Essa deve, infatti, essere in grado di definire gli appropriati valori caratteristici dei parametri geotecnici, ai quali applicare, successivamente, alcuni coefficienti parziali al fine di ricavare i valori di progetto necessari per le diverse verifiche allo stato limite ultimo in funzione dell'approccio progettuale adottato.
Alla luce di tale cambiamento, nel panorama delle normative europee e nazionali si è ritenuto doveroso aggiornare il testo. La presente edizione è stata pertanto integrata anche al fine di fornire un utile strumento di lavoro per l'impostazione dell'indagine geotecnica che sia conforme alle nuove direttive.
In modo particolare, si è ampliato il primo capitolo ponendo l'accento su come l'indagine geotecnica debba essere pianificata, in funzione dell'importanza dell'opera, per limitare il più possibile i rischi connessi alle problematiche geotecniche che possono emergere durante la costruzione dell'opera, e su come, a sua volta, debba essere condotta un'apposita indagine durante la costruzione, con la messa in opera anche di un'opportuna strumentazione di monitoraggio, al fine di valutare la correttezza delle assunzioni progettuali.
Il testo inoltre è stato corredato di due nuovi capitoli, l'uno relativo al monitoraggio (capitolo 17) e l'altro alle indicazioni della nuova normativa europea e nazionale in merito all'esecuzione dell'indagine geotecnica (capitolo 18).
Il presente manuale espone pertanto i criteri necessari alla corretta programmazione di un'indagine geotecnica, in funzione del tipo di opera che deve essere progettata, e riporta lo stato dell'arte sui metodi e le tecniche d'indagine, per la caratterizzazione geotecnica dei terreni, delle rocce e degli ammassi rocciosi, quali perforazioni di sondaggio e trincee esplorative, prove di permeabilità e di iniettabilità, prove di carico su piastra, prove penetrometriche dinamiche e statiche, prove geofisiche, rilievi geostrutturali, prove geomeccaniche e prove di laboratorio.

L'autore

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 1
CENNI INTRODUTTIVI

1.1. IMPORTANZA DELL'INDAGINE GEOTECNICA

Nell'ambito della progettazione e costruzione di un'opera civile, le indagini geotecniche assumono un ruolo di fondamentale importanza per l'accertamento della natura del sottosuolo interessato dalle opere di fondazione. Infatti, l'acquisizione delle informazioni sulla natura e sulle caratteristiche dei terreni e delle rocce costituisce uno dei primi e più importanti passi da intraprendere per la progettazione di tutte le opere d'ingegneria che interagiscono con il territorio.
Inoltre, la conoscenza dei terreni e delle rocce interessati dalle opere incide, profondamente sulle diverse fasi del progetto e della costruzione, dalla fase della concezione dell'opera stessa fino al controllo del suo comportamento una volta costruita.
Gli sviluppi conseguiti nell'ambito dell'ingegneria geotecnica hanno arricchito la progettazione geotecnica di contenuti metodologici e tecnologici molto avanzati, anche rispetto allo stato dell'arte delle altre discipline dell'ingegneria civile.
Con il crescere della complessità dei metodi e dei modelli d'analisi, si sono parallelamente potenziati i mezzi d'indagine per la determinazione di tutti i parametri necessari e, in definitiva, per ottenere, con nuovi e più precisi strumenti, una descrizione del comportamento meccanico dei terreni e delle rocce che fosse adeguata ai numerosi modelli disponibili.
La crescita delle responsabilità che le più recenti disposizioni di legge attribuiscono al progettista impone la necessità di approfondire con rigore e precisione tutti quegli aspetti che riguardano le interazioni delle opere con il terreno.
Dunque è evidente come il progettista debba operare con tutti i mezzi, per ridurre al minimo le incertezze progettuali e il rischio di proposte di variante, nella fase esecutiva, che potrebbero essere facilmente interpretate come una grave mancanza della stessa progettazione. In questo senso, le indagini devono essere indirizzate non solo alla definizione del modello geotecnico di riferimento per le analisi e il dimensionamento delle opere, ma anche all'individuazione dei più importanti problemi costruttivi, al fine di accertare se le soluzioni progettuali potranno essere in pratica realizzate. L'attuale ampio corredo delle nozioni di geotecnica, consentendo un'indagine su basi scientifiche dei problemi di stabilità del terreno, costituisce non solo una garanzia per la migliore previsione del comportamento dell'opera ma anche il mezzo per raggiungere questa garanzia con la minima spesa. A quest'ultimo riguardo, il costo dell'indagine geotecnica è largamente compensato dal fatto che consente uno studio d'ottimizzazione del progetto della fondazione riducendo il rischio d'insuccesso. Nulla è, infatti, più costoso delle economie nella fase degli accertamenti geotecnici.
Gli aspetti sopra menzionati assumono un'ulteriore importanza nel caso delle opere in sotterraneo, perché non esistono costruzioni che, come quelle in sotterraneo, impegnino le conoscenze del geotecnico. Le previsioni geologiche e geotecniche per un'opera in sotterraneo costituiscono uno dei compiti più difficili e complessi nell'ambito della progettazione geotecnica e, perfino con una cospicua indagine geotecnica, non sarà, di fatto, mai possibile raggiungere il 100% dell'accuratezza di previsione, come mostrato in figura 1.1.
Il rischio può essere minimizzato incrementando l'indagine geotecnica, ma la previsione richiede giudizio ed esperienza in aggiunta ai dati sperimentali ottenuti dalla stessa indagine geotecnica. La figura 1.2 mostra un grafico che correla, nell'andamento, lo sviluppo del progetto con i rischi e i costi.
Inoltre, la riduzione del rischio costituisce un aspetto particolarmente critico per la riduzione delle possibili riserve da parte dell'impresa. I dati geotecnici allegati ai documenti d'appalto di un'opera devono identificare tutte le caratteristiche pertinenti, allo scopo di precludere il più possibile l'eventualità del cosiddetto imprevisto geologico.
Tuttora, nella pratica usuale, alcune informazioni geologiche e geotecniche di fondamentale importanza sono acquisite durante la costruzione e quindi dopo che, in corso d'opera, si sono manifestati problemi imprevisti, piuttosto che durante le diverse fasi progettuali a conferma di come spesso l'indagine geotecnica sia carente e insufficiente.

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

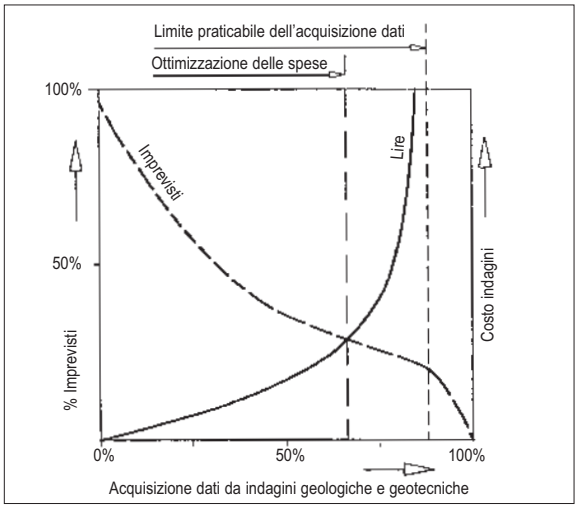


Figura 1.1. Indagini geologiche e geotecniche: imprevisti-costo

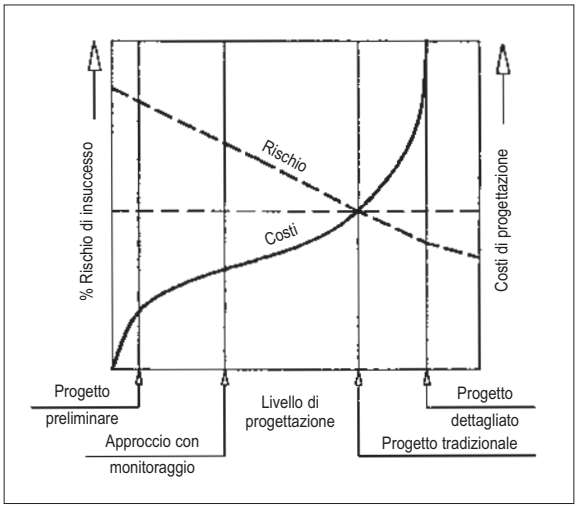


Figura 1.2. Livello di progettazione-rischio-costo

Tale problema si riscontra frequentemente non solamente nel caso delle opere in sotterraneo ma anche in genere per tutte le opere di fondazione. Per le opere in sotterraneo è interessante quanto mostrato in figura 1.3, relativamente all'incremento di costo avutosi in corso d'opera in funzione delle perforazioni di sondaggio eseguite durante il progetto. Come si può notare, se ne ricava, come suggerimento, di non scendere mai al di sotto di 1.5÷2 m di sondaggio per metro lineare di galleria, almeno per profondità delle gallerie non superiori a 250 m (Leonard, 1986).

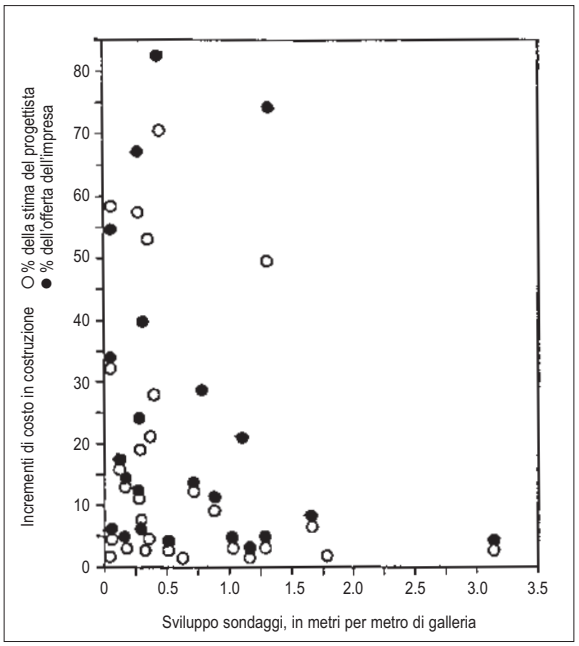


Figura 1.3. Sviluppo sondaggi eseguiti per la progettazione e incrementi di costo durante la costruzione

In conclusione, l'incidenza sulla spesa complessiva di un'indagine geotecnica accurata sarà in ogni modo minima se rapportata ai vantaggi che ne potranno derivare, evitando una progettazione troppo cautelativa o i più ben costosi interventi per dissesti derivati da caratterizzazioni geotecniche insufficienti e/o da erronee ipotesi di calcolo. Infine occorre evidenziare, nell'ambito di un'indagine geotecnica, l'importanza della qualità delle prove eseguite e, a questo riguardo, ancora oggi è spesso invalsa la prassi di assegnare l'indagine geotecnica unicamente all'impresa che offre il minore prezzo.
Troppo spesso si presta infatti poca attenzione alla qualifica dell'impresa e del laboratorio, alle attrezzature delle quali dispone e alla perizia del personale. Di conseguenza vi è quindi uno scarso incentivo a migliorare la qualità delle prestazioni, ma solo lo stimolo a sviluppare tecniche atte ad accelerare i tempi, spesso incompatibilmente con le esigenze di un buon lavoro.

1.1.1. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Poiché la costruzione di opere di ingegneria civile implica necessariamente di sottoporre i terreni a percorsi di sollecitazione di carico e/o scarico tensionale, la risposta del terreno a tali percorsi di sollecitazione deve essere prevista con un ragionevole grado di confidenza e accuratezza. Questa necessità rappresenta per l'ingegnere un'impegnativa sfida. Infatti, avendo a che fare con materiali

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

naturali, non è facile riuscire a definire il comportamento del sottosuolo influenzato, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto.
Allo scopo di pianificare una campagna di indagini geotecniche che sia in grado di descrivere con sufficiente attendibilità il comportamento dei terreni in presenza della costruzione dell'opera, senza però incidere con un eccessivo costo, è importante già nelle prime fasi della progettazione identificare tutti i potenziali rischi che possono essere progressivamente investigati nelle successive fasi progettuali.
In maniera del tutto generale è possibile suddividere i rischi connessi con la natura dei terreni in 5 gruppi:

– il terreno presenta caratteristiche di resistenza e deformabilità molto diverse rispetto agli usuali materiali da costruzione come, ad esempio, il calcestruzzo o l'acciaio;
– le proprietà dei terreni cambiano nel tempo (per esempio a causa dell'alterazione) cosicché le condizioni del terreno peggiorano durante l'esercizio e la vita utile della struttura o durante eventi che possono manifestarsi anche a breve termine come, ad esempio, un terremoto o un'alluvione;
– il terreno è spesso così variabile, sia verticalmente sia orizzontalmente, che non si può mai conoscere completamente l'effettivo andamento delle sue proprietà nel sito analizzato;
– il terreno può contenere delle sostanze dannose per la salute umana o che possono causare il deterioramento dei materiali da costruzione;
– il terreno è un sistema multifase, costituito da uno scheletro di particelle solide, che comprende alcuni vuoti riempiti di acqua e anche di gas. Nel caso di terreno saturo, l'acqua può ridurre la resistenza al taglio, che dipende dalla tensione efficace, e applicare elevati carichi alle strutture di contenimento o di fondazione.

I dati raccolti durante i sopralluoghi effettuati in sito e lo sviluppo dello studio preliminare permettono di acquisire tutte le informazioni fondamentali per l'identificazione dei potenziali rischi. Spesso è la combinazione di diversi fattori che può indicare l'esistenza di un determinato rischio, come per esempio:

– la combinazione della presenza di terreni argillosi (da carte geologiche o da studi geologici e geotecnici precedenti) con degli alberi (da mappe topografiche, foto aeree o sopralluoghi nella zona del progetto) può presentare il rischio di rigonfiamento se gli alberi sono rimossi. Questo può essere particolarmente rilevante nel caso di edifici di modesta altezza;
– la combinazione di terreni argillosi (da carte geologiche o da studi geologici e geotecnici precedenti) con un piano campagna inclinato (da mappe topografiche, tipicamente con pendenze superiori a 5°) può indicare la presenza di terreni instabili. Il rischio diventa più grave se vi sono evidenze di fenomeni d'instabilità in pendii similari e nelle medesime condizioni geologiche o se si rilevano altri segnali come, ad esempio, la presenza di accumuli di acqua o di reticoli di drenaggio scomposti che possono indicare una morfologia in evoluzione;
– la presenza di gessi o rocce carbonatiche (segnalati da carte geologiche o da studi geologici e geotecnici precedenti), con ricoprimenti superficiali di sabbia o argilla, che indicano la possibile esistenza di fenomeni di dissoluzione con la formazione di cavità nascoste (spesso riferite come *sinkholes*). Il rischio diventa particolarmente acuto se si notano in superficie delle depressioni a forma circolare;
– una cava che è riportata su mappe storiche, ma non si ritrova su mappe e carte topografiche più recenti, foto aeree o sopralluoghi effettuati in sito, può costituire un'indicazione della presenza di materiale di riporto con la conseguente possibilità che si tratti di terreno contaminato;
– combinazione di terreni incoerenti a grana grossa (segnalati da carte e relazioni geologiche) con una zona attiva dal punto di vista sismico (da mappe o studi di rischio sismico) può indicare il rischio della liquefazione dei terreni durante eventi sismici.

Negli esempi di cui sopra le combinazioni descritte non comportano necessariamente che si sia in presenza di un particolare rischio: in molti casi, sono necessari ulteriori indagini e approfondimenti per verificare l'effettiva esistenza di un rischio ma l'utilizzo di tali combinazioni costituisce un modo per identificare i potenziali rischi. Un altro approccio per identificare i rischi si basa sul fatto

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

di considerare sistematicamente tutti i possibili tipi di problemi geotecnici, valutando per ciascuno di essi la possibilità che si possa effettivamente verificare nel sito in oggetto. Per tale approccio, occorre predisporre una sorta di apposito catalogo basato su esperienze precedenti, come verrà più avanti illustrato.

1.1.2. RISCHI DA MATERIALI NATURALI E ARTIFICIALI

I materiali naturali e artificiali, per la loro stessa natura, possono rappresentare un rischio per la costruzione di opere civili, per due fondamentali ragioni:

– possono reagire con i materiali da costruzione, riducendone le loro caratteristiche fino a causare il collasso dell'opera;
– possono presentare un rischio per la salute e la sicurezza, sia durante la costruzione sia durante l'esercizio dell'opera.

REAZIONI CON I MATERIALE DA COSTRUZIONE

I più comuni rischi che possono verificarsi sono legati alla presenza di terreni acidi, di acque sotterranee, di solfati in grado di attaccare le fondazioni in calcestruzzo o alla possibilità che avvengano delle reazioni con gli aggregati del calcestruzzo. Di seguito si esaminerà ciascuno di tali aspetti.

Terreni acidi e acque sotterranee

Il terreno e le acque sotterranee esistono nelle loro condizioni naturali con diversi livelli di acidità. Per esempio, terreni torbosi e sabbiosi tendono a essere acidi, mentre i calcari tendono a essere leggermente alcalini. Pertanto, un attento esame della geologia del sito e dell'area circostante dovrebbe essere in grado di fornire buone indicazioni sulla possibilità di tale rischio.

In quasi tutti i casi, una seria minaccia alla costruzione può provenire da un terreno con presenza di acqua acida, che può compromettere la durabilità del calcestruzzo utilizzato nelle fondazioni. Il cemento è un materiale carbonatico e inoltre è comune utilizzare aggregati provenienti dai calcari, che possono anch'essi essere dissolti dalle acque acide nel calcestruzzo. Il rischio causato dalla presenza di terreni acidi dovrebbe essere valutato non solamente sulla base dei valori del pH, ma anche sulla base della profondità della fondazione e della falda acquifera, sulla probabilità di una circolazione idrica, sullo spessore del calcestruzzo e sui valori della pressione dell'acqua interstiziale presente in sito.

Esempi di rischi, rispettivamente, bassi e alti sono i seguenti:

– basso rischio: pH della falda acquifera 5.5-7, argille dure non fessurate con linea piezometrica al di sotto della quota di imposta delle fondazioni;
– rischio elevato: pH della falda acquifera < 3.5, terreno permeabile con linea piezometrica al di sopra della quota di imposta della fondazione e con rischio di acqua sotterranea in movimento.

Per inciso, si ricorda che il pH è una scala di misura dell'acidità di una soluzione acquosa e solitamente assume valori compresi tra 0 (acido forte) e 14 (base forte). Al valore intermedio di 7 corrisponde la condizione di neutralità, tipica dell'acqua pura a 25 °C.

Attacco dei solfati al calcestruzzo

In molte parti dell'Italia e del mondo, i solfati sono largamente diffusi nei depositi geologici superficiali. Soluzioni acquose di solfati attaccano il cemento indurito nel calcestruzzo, portando a variazioni chimiche e alla creazione di nuovi componenti che comportano un elevato incremento del volume.

Questo aumento di volume causa fratture e sollevamenti. Se dall'esterno si ha la presenza di solfati, che possono raggiungere il calcestruzzo e penetrare all'interno delle fratture, il deterioramento del calcestruzzo può risultare accelerato. Se i solfati non possono arrivare a diretto contatto con il calcestruzzo, la reazione nel calcestruzzo gradualmente si arresta. La possibilità che i solfati possano effettivamente attaccare e danneggiare i calcestruzzi è funzione delle seguenti proprietà:

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

– tipo di solfato;
– concentrazione dei solfati;
– entità dei movimenti della falda acquifera intorno al calcestruzzo;
– tipo di cemento;
– forma della struttura.

Aggregati reattivi nel calcestruzzo-formulazione del problema

Gli aggregati, nella forma di sabbia, ghiaia o roccia frantumata, costituiscono una parte essenziale del calcestruzzo e dei materiali utilizzati per la costruzione delle strade. Spesso ci si trova nella condizione di disporre di aggregati di minore qualità, rispetto a quelli considerati ottimali, con il conseguente rischio che possano reagire in maniera indesiderabile con il cemento Portland.
Tipicamente, tali reazioni causano l'espansione dell'aggregato e la conseguente diffusione di fratture nel calcestruzzo, indebolendolo e lasciandolo (incluse le barre di armatura se armato) esposto a ulteriore danneggiamento per infiltrazioni di acqua. Un aggregato di scarsa qualità può anche presentare delle macchie del colore del ferro, rendendolo esteticamente inaccettabile o alterandosi rapidamente.
Aggregati che possono presentare reazioni indesiderabili includono:

– minerali argillosi;
– miche;
– feldspati;
– opale;
– selce;
– pirite e marcasite.

Le alterazioni del calcestruzzo possono essere dovute dalle inclusioni di argilla o roccia frantumata poco resistente o dalla reazione alcali-aggregati che può causare l'estesa diffusione di fratture. Inclusioni di piccole quantità di pirite e marcasite possono portare alla formazione antiestetica di macchie rosse dovute alla presenza di minerali ferrosi.

RISCHI PER LA SALUTE

Un significativo numero di rischi per la salute e la sicurezza sono associati sia con i materiali naturali sia con quelli artificiali. Ogni nuova costruzione o infrastruttura può comportare agenti cancerogeni a contatto con gli esseri umani. Gas tossici ed esplosivi si possono muovere dal terreno per raggiungere edifici, gallerie, acquedotti, scavi provvisionali e altri spazi confinati, causando il rischio di esplosione, una maggiore possibilità di contrarre il cancro o anche il rischio di morte immediata come risultato di asfissia.
Cause comuni di rischio per la salute sono le seguenti:

– particelle di asbesto;
– gas radon;
– metano, monossido di carbonio e biossido di carbonio;
– idrogeno solforato.

Asbesto

L'*asbesto* è largamente utilizzato come termine per indicare minerali fibrosi, generalmente ottenuti da rocce metamorfiche e utilizzati per applicazioni nelle quali occorre avere un'elevata resistenza al calore.
Lo studio dei minerali asbestiformi ha subito un forte impulso a partire dagli anni '60, epoca in cui i primi studi farmacologici ne hanno messo in evidenza le caratteristiche cancerogene. La normativa italiana riconosce e regolamenta come asbestiformi minerali appartenenti sia al gruppo degli anfiboli sia al gruppo del serpentino. I principali minerali asbestiformi riconosciuti, appartenenti al gruppo degli anfiboli sono: la crocidolite, l'amosite (amianto bruno), l'antofillite, l'actinolite e la tremolite. Per il gruppo del serpentino invece l'unica varietà considerata cancerogena dalla legislazione è il crisotilo (amianto bianco).

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Radon
Il radon è un gas presente in natura che è radioattivo, riconosciuto come gas pericoloso solamente di recente. Il gas radon (radon-222) è un isotopo radioattivo prodotto dal decadimento dell'uranio-238. Le miloniti, che sono rocce metamorfiche che si producono tipicamente nelle zone di faglia, dove le rocce sono state sottoposte a movimenti relativi che hanno causato un'intensa fratturazione nell'ammasso, sono conosciute come zone che presentano un'importante presenza di radon. Tuttavia l'uranio arricchito si trova nei graniti, gneiss, schisti, argilliti, in alcune arenarie e in alcuni depositi glaciali e in elevate concentrazioni negli scisti neri e nei depositi di fosfati. Il rischio di uranio è usualmente associato con il livello di contenuto di uranio nella roccia sottostante. Tuttavia, i terreni residuali lasciati dalla dissoluzione dei calcari e delle dolomie possono avere un'elevata concentrazione di uranio persino al di sotto del substrato roccioso ma senza presentare un rischio.

Metano, monossido di carbonio e biossido di carbonio, idrogeno solforato
Gas tossici possono manifestarsi naturalmente o essere prodotti dall'attività umana come, ad esempio, per le discariche di rifiuti solidi urbani. Il metano, il monossido e biossido di carbonio sono causati dal decadimento del materiale organico. Molti materiali geologici si sono formati in questo modo (carbone, lignite, torba) cosicché c'è sempre la possibilità che, durante degli scavi in sotterraneo (di qualsiasi dimensione), si possano incontrare, raggiungendo un'elevata concentrazione nel caso di assenza di un'adeguata ventilazione. Questi tre gas, tradizionalmente indicati dai minatori con il termine di *grisù*, sono estremamente temuti in quanto possono causare la morte a causa del fuoco, dell'esplosione o del soffocamento. Tali gas sono incolori e il metano è infiammabile; un'eccessiva concentrazione di monossido o biossido di carbonio può portare al soffocamento. In particolare, il monossido di carbonio è particolarmente insidioso, in quanto essendo invisibile e senza odore, non permette all'organismo di accorgersi della mancanza di ossigeno portando alla morte per soffocamento.
L'idrogeno solforato può formarsi in corrispondenza di depositi di oli minerali ed è più letale del cianuro: è un gas incolore, molto velenoso, infiammabile, con un caratteristico odore di uova marce; molte persone sono state uccise istantaneamente durante interventi di manutenzione e pulizia di serbatoi contenenti oli minerali o altre sostanze.

1.1.3. RISCHI GEOTECNICI

I rischi geotecnici sono molti e di diversa natura; i principali sono dovuti a:
- presenza della falda;
- instabilità dei pendii;
- subsidenza;
- compressibilità dei terreni;
- rigonfiamento dei terreni;
- terreni scadenti;
- alterazione dei terreni e delle rocce durante la vita utile delle costruzione.

PRESENZA DELLA FALDA

Quasi tutti i rischi geotecnici sono associati in qualche modo con l'acqua. L'acqua nei terreni e nelle rocce, causando la riduzione delle tensioni efficaci, provoca una riduzione della resistenza che può comportare, ad esempio nel caso di pendii, l'insorgere di fenomeni di instabilità. La variazione della quota delle superficie piezometrica può causare il collasso dello scheletro di particelle solide con conseguenti fenomeni di subsidenza. Variazioni del contenuto naturale d'acqua possono, in terreni argillosi, causare fenomeni di rigonfiamento o di essicazione, che possono portare a danni strutturali nelle fondazioni di edifici che interessano tali tipi di terreno. La circolazione idrica attraverso certi tipi di rocce e di terreni può provocare l'insorgere di fenomeni di alterazione che possono avere come effetto alcune variazioni delle proprietà meccaniche durante la vita utile di strutture con le fon-

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

dazioni impostate su tali tipi di rocce e terreni. Per il problema dell'acidità delle acque di falda si rimanda al precedente paragrafo.

INSTABILITÀ DEI PENDII

Con il termine *instabilità dei pendii* si indica genericamente movimenti dei terreni o delle rocce per effetto della forza di gravità. Termini come frane, deformazioni gravitative profonde di versante, fenomeni di soliflusso, colate di fango, crolli di roccia sono comunemente impiegati per descrivere differenti tipi d'instabilità dei pendii, che in generale si possono suddividere nelle seguenti tre principali classi, sulla base del movimento che si può manifestare:

– scorrimenti nei quali il materiale in movimento rimane per la gran parte in contatto con il sottostante terreno o substrato di terra o roccia durante il movimento, che si manifesta lungo una ben precisa superficie detta *di scorrimento* o *di scivolamento*;
– flussi nei quali il materiale in movimento diventa disaggregato e può muoversi senza che si abbia una concentrazione dello spostamento lungo una determinata superficie di taglio;
– crolli che sono caratterizzati dall'immediata separazione del materiale in movimento dal materiale circostante, con infrequenti o intermittenti contatti con il materiale circostante non in movimento finché il materiale si arresta dopo l'impatto con rimbalzi e/o rotolamenti.

FRANE PER SCORRIMENTO

Gli scorrimenti sono generalmente di tipo traslazionale. In roccia, lo scorrimento generalmente interessa dei movimenti traslazionali di blocchi rocciosi separati dai giunti presenti nell'ammasso roccioso. L'orientamento delle discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, con riferimento all'orientamento (immersione e inclinazione) del fronte del pendio (naturale o artificiale), determina se sono possibili dei cinematismi dei blocchi delimitati dalle superfici di discontinuità e dal fronte della scarpata. La presenza della pressione dell'acqua all'interno dei giunti che delimitano il potenziale blocco instabile può costituire una forza destabilizzante causando il movimento di un blocco roccioso anche se il piano di scorrimento presenta un modesto angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale. In un ammasso roccioso molto fratturato e in un terreno relativamente omogeneo, la superficie di potenziale scorrimento tenderà ad assumere una forma curvilinea risultando in uno scorrimento di tipo rotazionale.
Il terreno o la roccia tendono a muoversi come un unico blocco con la maggiore carica distruttiva che si manifesta al piede della frana. In presenza di differenti litologie all'interno di un deposito stratificato dei distacchi segue la stratificazione e conseguentemente si può avere una relativamente estesa e piatta superficie di scorrimento di notevole estensione. Il principale tipo di movimento è di tipo traslazionale. La parte retrostante di tali distacchi è soggetta a rotazione e causa un'elevata distorsione interna della massa in movimento, che può essere riflessa da rotture in superficie.
In termini di morfologia, movimenti come le colate di fango, le frane per colamento e le colate detritiche torrentizie (*debris flows*) possono classificarsi come *frane per colamento*. In termini di meccanismo di rottura, le colate di fango sono più vicine a uno scorrimento piuttosto che a un flusso, mentre le frane per colamento e le colate detritiche torrentizie probabilmente manifestano diversi gradi di scorrimento e di flusso. Le colate di fango sono ben sviluppate specialmente in pendii che contengono argille dure fessurate. I terreni disturbati sono molto suscettibili all'infiltrazione dell'acqua. Elementi rovesciati o delle fosse tettoniche (*graben*) possono permettere la formazione di accumuli di acqua intercettando la circolazione idrica sotterranea. Lo scarico di questi accumuli di acqua può causare la formazione di colate di fango, che si possono anche formare a causa di una carenza nel sistema di scarico dell'acqua lungo il versante.
Le frane per colamento si manifestano in materiali sciolti incoerenti, leggermente cementati, in limi a elevata porosità e in rocce tenere con elevato grado di porosità. Le colate detritiche torrentizie sono potenzialmente altamente distruttive e coinvolgono il rapido colamento di materiale detritico saturo. Esse sono generalmente associate ad aree montagnose: dopo l'improvviso accumulo di acqua, usualmente a causa di precipitazioni intense o per l'effetto dell'improvviso scioglimento

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

delle neve, si possono mettere in movimento delle coperture detritiche superficiali dei versanti confluendo in una colata detritica.
La *soliflussione*, anche nota come *flussione del suolo*, è un tipo di fenomeno franoso dove i sedimenti superficiali saturi d'acqua si muovono lentamente sul pendio, al di sopra di rocce impermeabili. Ciò accade negli ambienti periglaciali, dove la fusione durante la stagione calda conduce l'acqua alla saturazione nel materiale superficiale disgelato (strato attivo), causando una forma di possibile colata (*flow*) dal pendio.

FRANE PER COLAMENTO

Una colata è una forma di movimento della massa che coinvolge maggiori deformazioni interne rispetto a una frana. Tipicamente, il contenuto naturale d'acqua in una colata è talmente elevato che essa si comporta come un fluido. Questo è il caso dei terreni argillosi quando il contenuto naturale d'acqua è superiore al limite liquido. Un caso classico è quello relativo alle argille sensitive norvegesi: si tratta di argille relativamente recenti, formatesi in ambiente marino, che hanno in generale una struttura flocculata di particelle o aggregati di particelle, con elevata porosità. Quando tale struttura è distrutta dal rimaneggiamento, ad esempio causato da uno scavo, la tendenza a ridurre il volume comporta un aumento della pressione dei pori, con conseguente caduta della resistenza al taglio. Il risultato è che il materiale fluisce come un liquido. Un'estesa distruzione delle proprietà causa l'inizio di un movimento di colamento.

CROLLI DI ROCCIA

I crolli di roccia coinvolgono dei rapidi movimenti di blocchi rocciosi delimitati da famiglie di giunti che si distaccano da ripide pareti rocciose. Tali tipi di frane si riscontrano in zone montagnose e possono essere innescate da cicli di caldo e gelo, da terremoti e da attività di costruzione. I crolli di roccia costituiscono un elevato pericolo per il traffico sulle strade e per lo sviluppo di nuove opere civili.

IDENTIFICAZIONE DELLE FRANE

Gli studi, i rilievi e le osservazioni in sito forniscono una grande quantità di utili informazioni per identificare e valutare il grado di stabilità dei pendii. L'utilità delle foto aeree non deve essere sopravvalutata, in quanto quelle scattate in differenti periodi dell'anno e a differenti orari del giorno possono indicare dei movimenti del versante che possono risultare non del tutto ovvi all'osservatore in sito.
Durante una campagna di rilievi e osservazioni in sito dovrebbero ricercarsi le seguenti caratteristiche:

- presenza di fratture/fessure verticali (giunto di trazione o *tension cracks*);
- presenza di accumuli al piede dei pendii;
- presenza di creste o innalzamenti laterali;
- piano campagna irregolare;
- segni morfologici relativi alla possibile presenza di una fossa tettonica (*graben*);
- presenza di blocchi isolati rovesciati;
- presenza di terreno paludoso;
- presenza di ruscelli o corsi d'acqua;
- presenza di sorgenti e pozze d'acqua;
- presenza di fratture e fessure lungo la carreggiata delle strade;
- presenza di alberi inclinati;
- presenza di rotture e fratture nei muri;
- presenza di recinzioni deformate;
- reticolo di drenaggio sia naturale che artificiale.

Alcune di queste caratteristiche sono indicate nella *figura 1.4a*; le fratture verticali e la presenza d'acqua nelle scarpate di una zona in frana sono mostrate nella *figura 1.4b*. I sopralluoghi e i rilievi in sito, effettuati durante e immediatamente dopo precipitazioni intense, possono essere utili per

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

indicare condizioni di drenaggio critiche che altrimenti, in condizioni normali, potrebbero non essere percepite. I fori di drenaggio nelle opere di sostegno dovrebbero essere accuratamente studiati per verificare se sono funzionali o se rischiano di intasarsi come spesso succede. Prima che si manifesti un collasso, possono essere notati alcune fratture verticali e degli ingrossamenti in corrispondenza del piede del versante. Dopo la rottura, la parte retrostante della scarpata in frana degraderà

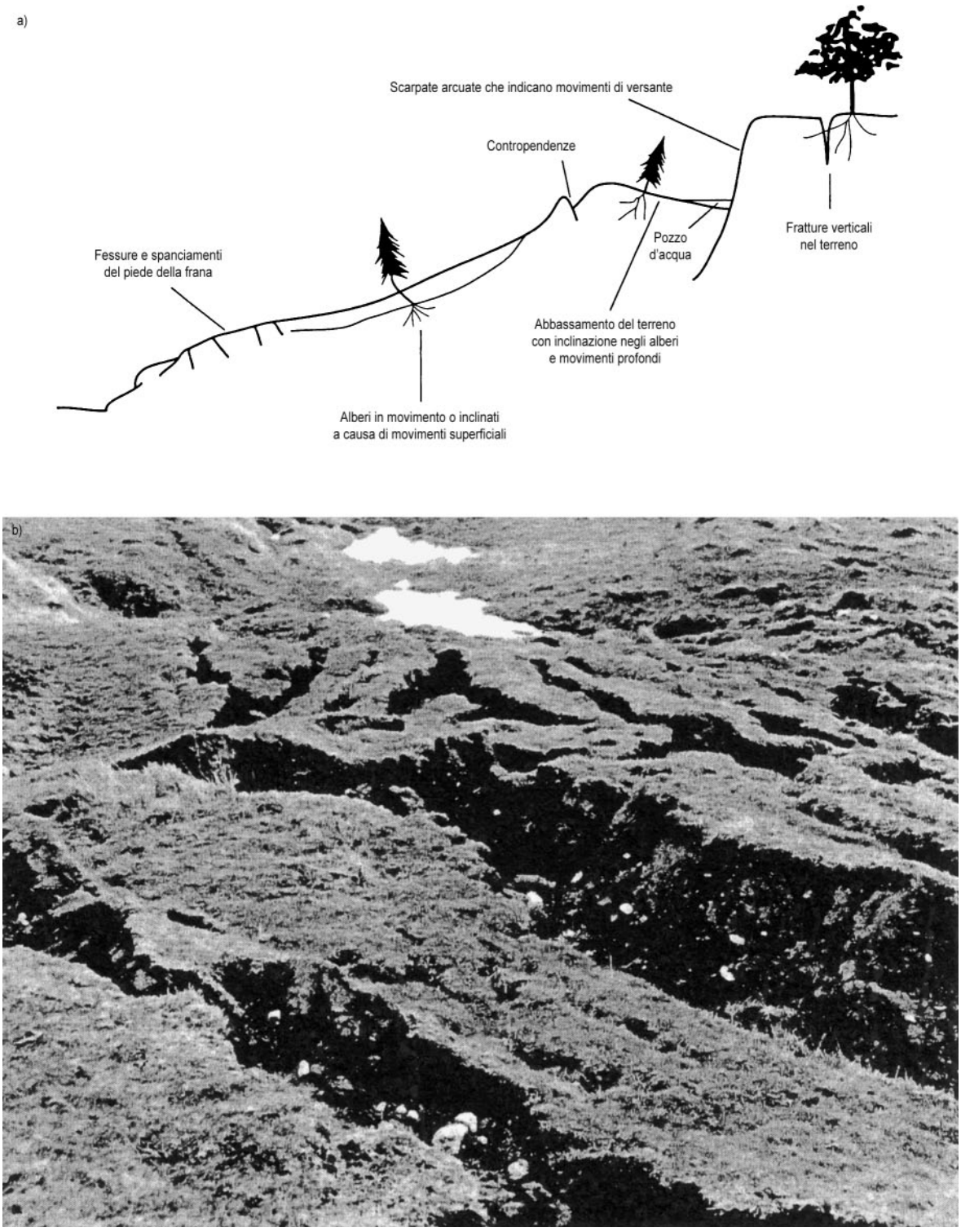


Figura 1.4. a) indicazioni superficiali di instabilità del pendio (Bromhead, 1979), b) ristagno di acqua in una scarpata interessata da un movimento franoso

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

e le colate di fango potranno trasportare materiali a grana fine lungo i lati della frana accumulandosi al piede. Il terreno in questo caso diventa molto umido e acquitrinoso.
Rotture in un pendio possono essere innescate da:

- variazioni nell'angolo di inclinazione del pendio (per eventuali riprofilature durante la costruzione);
- scavi o erosioni al piede del pendio;
- carichi applicati nella parte sommitale del pendio (ad esempio per la costruzione di nuovi edifici);
- innalzamento del livello della falda (per precipitazioni intense o scarico di acque dai tetti, strade, dreni, ecc.);
- vibrazioni causate da un terremoto.

MOVIMENTI DEL TERRENO

Edifici, ponti o altre opere di ingegneria civile possono essere danneggiati da una serie di possibili meccanismi di seguito descritti:

- forze di taglio trasmesse da terremoti che possono danneggiare le strutture o indurre cedimenti nelle fondazioni;
- assestamenti nel terreno dovuti ad altre cause (ad esempio instabilità del pendio) possono interessare le fondazioni causando delle fessure nella struttura in elevazione;
- carichi strutturali possono causare sufficienti cedimenti delle fondazioni in grado di danneggiare la struttura in elevazione;
- carichi strutturali possono condurre al collasso del terreno; cedimenti elevati che si manifestano durante il collasso di una fondazione causano sicuramente il danno della struttura in elevazione.

In generale, i movimenti che si manifestano al di sotto delle fondazioni possono essere classificati nella seguente maniera:

- cedimenti: abbassamenti della fondazione causati dai carichi applicati dalla struttura in elevazione;
- sollevamenti: innalzamenti della fondazione causati da scarichi tensionali ai quali è stato sottoposto il terreno (ad esempio per effetto di uno scavo) o da terreni rigonfianti;
- subsidenza: abbassamenti della fondazione causati da fattori esterni come scavi in sotterraneo, fenomeni chimici di dissoluzione, essiccamento di terreni argillosi (a causa, ad esempio, della presenza delle radici degli alberi) o per effetto dell'abbassamento della falda.

Va sottolineato che cedimenti uniformi non dovrebbero causare grandi problemi alle strutture, mentre ne potrebbero risentire i sottoservizi (tubazioni del gas, dell'acqua, delle fogne, cavi telefonici, televisivi, ecc.). D'altro canto, anche piccoli cedimenti differenziali possono risultare particolarmente critici per certi tipi di strutture. Sfortunatamente, è difficile che le strutture subiscano dei cedimenti uniformi, persino quando il carico e le condizioni del terreno appaiono uniformi: infatti, tipicamente, i cedimenti differenziali superano il 50% del massimo cedimento totale.
Se le fondazioni sono costruite su argille tenere molto compressibili, torbe o materiali di riporto non compattati, allora il cedimento totale risulterà molto elevato e il conseguente cedimento differenziale potrà causare un danno alla struttura; è normale evitare tali problemi ricorrendo a fondazioni profonde su pali.
I terreni rigonfianti sono anche conosciuti come *terreni espansivi*. Quando manifestano le loro proprietà, si espandono al di sotto degli edifici, causando dei sollevamenti differenziali degli edifici con conseguenti danni strutturali. Causano questo tipo di problema comunemente quattro tipi di terreno:

- argille di elevata plasticità (potenzialmente espansive o suscettibili di ritiro);
- solfati di calcio (anidrite e gesso);
- scisti neri (che tipicamente contengono solfuro di ferro) o altri scisti;
- riempimenti costituiti da materiali industriali (certi tipi di scorie).

Un'argilla espansiva è una argilla non satura con un elevato valore del limite liquido; quando il terreno viene saturato con l'acqua, l'argilla si espande. Argille precedentemente essiccate (per esem-

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

pio a causa di un clima secco o per effetto della vegetazione a causa dell'azione delle radici) possono applicare pressioni fino a 1000 kPa sulle strutture, arrivando a sollevare fondazioni e muri. Situazioni tipiche nelle quali si manifestano dei sollevamenti sono le seguenti:

– l'argilla è saturata con acqua a causa di perdite da tubazioni, per innaffiatura di giardini, ecc.;
– il terreno è ricoperto (specialmente nel caso di clima secco) cosicché l'evaporazione è ridotta o prevenuta del tutto;
– gli alberi maturi sono tagliati con una conseguente ridotta necessità di acqua.

1.1.4. GESTIONE DEL RISCHIO GEOTECNICO

Per quanto riguarda la gestione del rischio geotecnico, essendo un argomento di fondamentale importanza si riportano le considerazioni di Clayton (1998). Clayton afferma che la maggior parte degli ingegneri accetta l'idea che la standardizzazione nel modo di operare costituisca un essenziale compromesso per assicurare al cliente un prodotto di qualità a basso prezzo. Tuttavia c'è da chiedersi quanto questo punto di vista possa essere realistico se applicato all'ingegneria geotecnica.
Una larga parte dei rischi finanziari relativi alla costruzione di un'opera di ingegneria civile, come ad esempio un edificio, è associata ai rischi di tipo geotecnico. Gestire questi rischi con l'esecuzione di appropriate indagini geotecniche, con una accurata progettazione e affrontando le inevitabili sorprese causate da condizioni impreviste dei terreni durante la costruzione, può permettere di garantire la possibilità di realizzare nuove infrastrutture nel rispetto sia dei tempi sia dei costi. Si sottolinea che per essere maggiormente competitivi nel mercato globale delle costruzioni, tuttavia, è necessario che i costi siano significativamente ridotti.
Fondamentalmente è possibile adottare due approcci per raggiungere la riduzione dei costi associati agli aspetti geotecnici della costruzione. La prima implica una standardizzazione dei prodotti, incrementando la gestione (*management*) del processo per abbattere i costi mediante la competizione. Il secondo approccio richiede un radicale ripensamento di quanto finora fatto, l'abbandono di molte procedure e approcci finora comunemente accettati, la ricerca di soluzioni innovative, grazie anche ai progressi dell'ingegneria geotecnica, per le sfide sempre più impegnative che attendono in futuro lo sviluppo delle infrastrutture, soprattutto laddove si presentano condizioni difficili per le scadenti proprietà geotecniche dei terreni.
La standardizzazione e l'introduzione di sistemi di qualità hanno portato molti benefici; essi sono preziosi nel fornire un immediato riferimento per la fase dell'offerta e possono aiutare concretamente la trasmissione delle informazioni tra il sempre maggiore numero di persone coinvolte nello sviluppo di un progetto.
Nell'ingegneria geotecnica si è registrata una fiera competizione e una considerevole standardizzazione per intere decadi, accompagnata dalla generale convinzione che troppo spesso la qualità (per esempio per l'esecuzione di un'indagine geotecnica) sia stata compromessa da prezzi troppo bassi, con la logica conseguenza che molti rischi geotecnici non sono stati propriamente analizzati durante la progettazione e che lo stesso progresso tecnico e tecnologico ne è stato penalizzato.
Forse alcuni dei problemi relativi alla qualità e alla completezza dell'indagine geotecnica sono dovuti al fatto che molti clienti realizzano l'indagine geotecnica principalmente perché i tecnici che sono coinvolti nel progetto temono che si possano avere in corso d'opera dei contenziosi con l'impresa esecutrice qualora le indagini geotecniche fossero omesse.
Occorrerebbe auspicare che la preparazione di tutti i tecnici coinvolti nella progettazione fosse tale da guardare all'indagine geotecnica e all'ingegneria geotecnica come un mezzo mediante il quale si sia in grado di ottimizzare l'utilizzo dei sito, trovando soluzioni efficaci a basso costo per la costruzione delle opere che interessano i terreni.
Se questo accadesse, ogni parte del processo geotecnico necessiterebbe di essere ripensato, con un occhio di riguardo nel perseguire una riduzione dei costi e del tempo richiesto per la progettazione e costruzione, aumentando nel contempo la qualità e l'affidabilità del prodotto-progetto.
Tuttavia va evidenziato che poiché il terreno è variabile, esso presenterà sempre delle sorprese.

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

Pertanto, l'ingegneria geotecnica non può mai essere trattata come un'attività di routine, ma deve trovarsi il modo affinché gli aspetti di progettazione, nel limite del possibile, siano standardizzati, lasciando i responsabili dell'indagine geotecnica liberi di orientare le loro capacità ed esperienza al fine di identificare i rischi ed evitarli dove possibile, contribuendo allo sviluppo di progetti semplici ed economici.

1.1.4.1. Un approccio sistematico alla gestione del rischio

Tutti i tecnici interessati dalla progettazione di una costruzione dovrebbero essere coinvolti nelle problematiche di gestione del rischio, in quanto i rischi, con le conseguenti potenziali possibilità di danno, sono ineliminabili in ogni progetto e costruzione. Il successo o l'insuccesso di un progetto e le stesse entità e modalità di esecuzione delle indagini geotecniche dipendono dall'approccio al rischio. Va specificato che la gestione del rischio non costituisce un nuovo approccio, ma tradizionalmente è stata applicata istintivamente, valutando i rischi in maniera implicita e gestendoli, in corso d'opera, con giudizio ed esperienza. L'approccio sistematico implica che i rischi siano chiaramente esplicitati, identificandoli in dettaglio per renderne più facile la loro gestione. In altre parole, la gestione sistematica del rischio costituisce uno strumento che, per permettere di ottenere i migliori risultati, richiede esperienza pratica e una sufficiente formazione all'utilizzo delle tecniche di gestione. Una volta acquisite le tecniche relative alla gestione del rischio, l'utente è efficacemente supportato nelle decisioni da prendere ed è garantito nella formazione di un giudizio competente su ogni specifica problematica progettuale e costruttiva.
In sintesi, la gestione sistematica del rischio permette di:

- identificare, valutare e classificare i rischi rendendoli espliciti;
- focalizzare i maggiori rischi del progetto;
- prendere decisioni informate e consapevoli sui provvedimenti da adottare in caso di avversità, come ad esempio per quanto concerne le misure di mitigazione;
- minimizzare il potenziale danno che si possa manifestare nelle peggiori ipotesi;
- controllare gli aspetti di incertezza del progetto e della relativa realizzazione;
- chiarire e formalizzare i ruoli del personale coinvolto nel processo di gestione del rischio;
- identificare le opportunità per migliorare le prestazioni del progetto (specialmente le prestazioni finanziarie).

Sebbene non sia possibile rimuovere tutte le incertezze, la gestione sistematica del rischio migliora le opportunità del progetto di essere completato nei tempi previsti, con i costi preventivati, con la qualità richiesta e con adeguati provvedimenti per garantire la sicurezza e il rispetto dell'ambiente.
Molti autori hanno tentato di fornire una definizione definitiva per quanto concerne il significato di *rischio*, tuttavia, è in corso ancora un notevole dibattito sulla definizione da adottare. CIRIA (2001) definisce il rischio come la probabilità che si verifichi un evento incerto non desiderato con le relative conseguenze negative per quanto concerne gli obiettivi progettuali.
La probabilità di un evento avverso è usualmente espressa come numero di eventi avversi attesi che si manifestano durante un definito periodo di tempo. Per esempio, per un progetto che duri un anno se l'evento è atteso una volta ogni 10 anni, esso avrà una probabilità di occorrenza dello 0.1 (il tempo non è la sola misura della probabilità, ad esempio la probabilità di difetti nella produzione di barre in acciaio potrebbe essere misurata per chilometro di barre prodotte).
Le conseguenze di un evento avverso, spesso chiamato *danno*, possono essere espresse in termini monetari. Tuttavia è più appropriato, nel caso di fatalità o di seri ritardi, utilizzare altre modalità di valutazione dell'andamento della costruzione. Il tasso di rischio, come combinazione della probabilità e della conseguenza (probabilità · conseguenza), è usualmente espresso in euro per anno in un bilancio annuale. Il metodo è ugualmente efficiente adottando altre unità di misura (come ad esempio gli euro per attività o progetto), purché esse siano applicate in maniera consistente attraverso tutto il processo.
Occorre considerare con attenzione degli eventi che, sebbene improbabili, sono potenzialmente catastrofici. Anche se il rischio può apparire insignificante, tuttavia può accadere un disastro. Se le

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

conseguenze sono inaccettabili, allora il rischio deve essere evitato o almeno mitigato, ad esempio mediante un'assicurazione nei confronti di un incendio o di un'alluvione. Non si dovrebbe perdere di vista il fatto che il rischio può essere misurato in termini di impatto positivo spesso riferito come *opportunità*.
Quando si investe del denaro in un progetto, i rischi sono accettati allo scopo di raggiungere attraverso il progetto stesso il beneficio desiderato e, inizialmente, le incertezze nella previsione del costo e dei benefici generano un campo di probabili conseguenze, come mostrato nella *figura 1.5*.
La gestione del rischio permette di contenere tale campo di variazione. Il caso di base (*figura 1.5*) rappresenta la migliore previsione che può essere fatta nelle prime fasi della definizione di un progetto. Infatti, i rischi di costruzione possono aumentare il costo, ritardare il completamento dell'opera e, conseguentemente, ritardare i pagamenti e ridurre i benefici previsti. La valutazione rigorosa dei rischi e della loro gestione ha il suo maggiore impatto durante il periodo iniziale di sviluppo del progetto, prima dell'approvazione dello progetto stesso. Tuttavia, la gestione del rischio è un processo iterativo e, quando viene applicato all'intero ciclo di vita del progetto, offre il maggiore beneficio complessivo. Per questa ragione è importante incoraggiare l'adozione di tale approccio, coinvolgendo, fin dall'inizio, il cliente, il progettista, il costruttore e le imprese subappaltatrici nelle problematiche connesse alla gestione dei rischi.

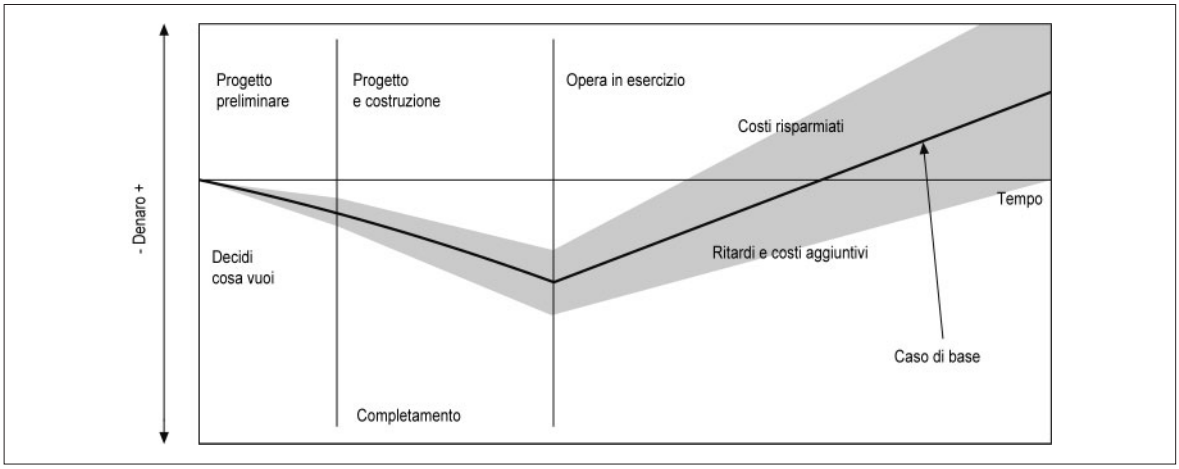


Figura 1.5. Diagramma dell'andamento dei costi che mostrano l'incremento dei costi dovuti ai rischi durante la vita del progetto (fonte: CIRIA, 2001)

1.1.4.2. Perché le condizioni del terreno sono un rischio

Come evidenziato da Clayton (2001), la costruzione di un'opera è un business rischioso: nessun progetto relativo a una costruzione è esente da rischi. Il rischio può essere gestito, minimizzato, diviso, trasferito o accettato ma non può essere ignorato (Latham, 1994).
Progetti che interessano il sottosuolo presentano un enorme rischio per gli attori principali del progetto che sono il committente e l'impresa. Realisticamente, non tutti i rischi per le condizioni del sottosuolo possono essere interamente evitati o eliminati (Hatem, 1998).
Gli sviluppi della meccanica dei terreni e delle rocce e il loro insegnamento nei corsi d'ingegneria civile hanno permesso di comprendere l'importanza dell'ingegneria geotecnica nell'ambito della progettazione delle opere di ingegneria civile.
Tuttavia, nonostante i progressi registrati nella tecnica delle fondazioni, la progettazione geotecnica non sarà mai paragonabile alla progettazione strutturale, per i motivi di seguito elencati:

– le proprietà geotecniche, la situazione stratigrafica e l'andamento della falda nel terreno interessato dal progetto sono difficilmente prevedibili nella loro totalità. In ogni sforzo di comprensione delle effettive condizioni geotecniche del sito, ci sono motivi di preoccupazione (ad esempio l'instabilità dei pendii) che dipendono dallo stato delle variabili (come ad esempio i parametri di

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

resistenza al taglio, l'angolo di inclinazione del pendio, le condizioni della falda). Il cerchio di influenza (Haimes, 1998) mostrato nella *figura 1.6* contiene tutti quegli aspetti e particolari che possono creare problemi geotecnici (in questo esempio l'angolo di inclinazione del versante e le condizioni della falda). In geotecnica, osserva Haimes (1998), il cerchio di influenza non copre tutte le variabili che possono essere effettivamente identificate e, conseguentemente, il progettista deve adattarsi a convivere con aspetti geotecnici (ad esempio le proprietà dei terreni) che vanno al di là del suo effettivo possibile controllo;

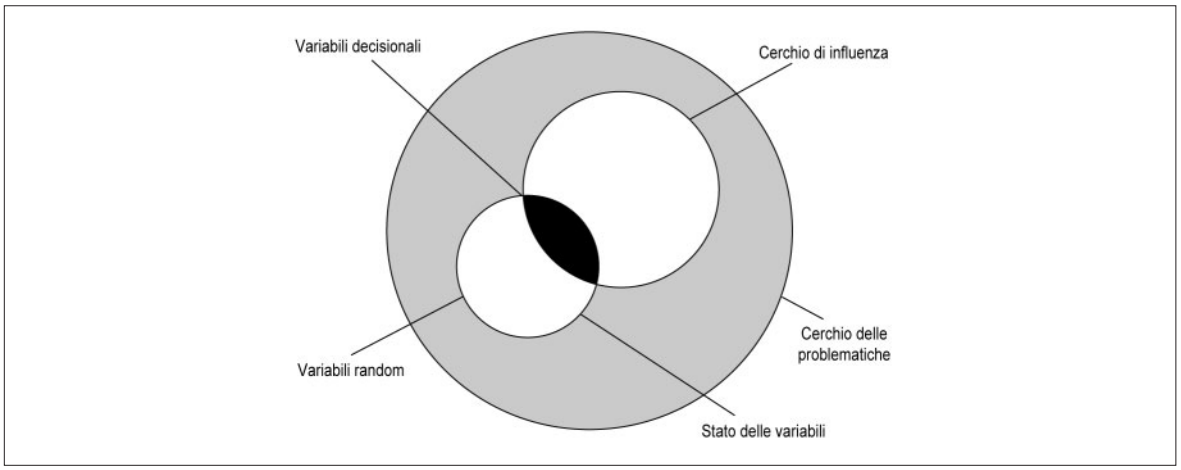


Figura 1.6. Variabili di stato e variabili decisionali (fonte: Haimes, 1998)

– le condizioni del terreno e della falda possono essere entrambe notevolmente variabili in base al luogo e all'aumentare della profondità (*figura 1.7*). Per esempio, la rigidezza e la resistenza può variare di 6 ordini di grandezza e la permeabilità di 13: ciò è in forte contrasto con altri materiali da costruzione, come l'acciaio e il calcestruzzo che, essendo materiali artificiali, realizzati con predefinite specifiche, possono essere facilmente caratterizzabili dal punto di vista della resistenza media, con una tipica deviazione standard di meno del 10%;

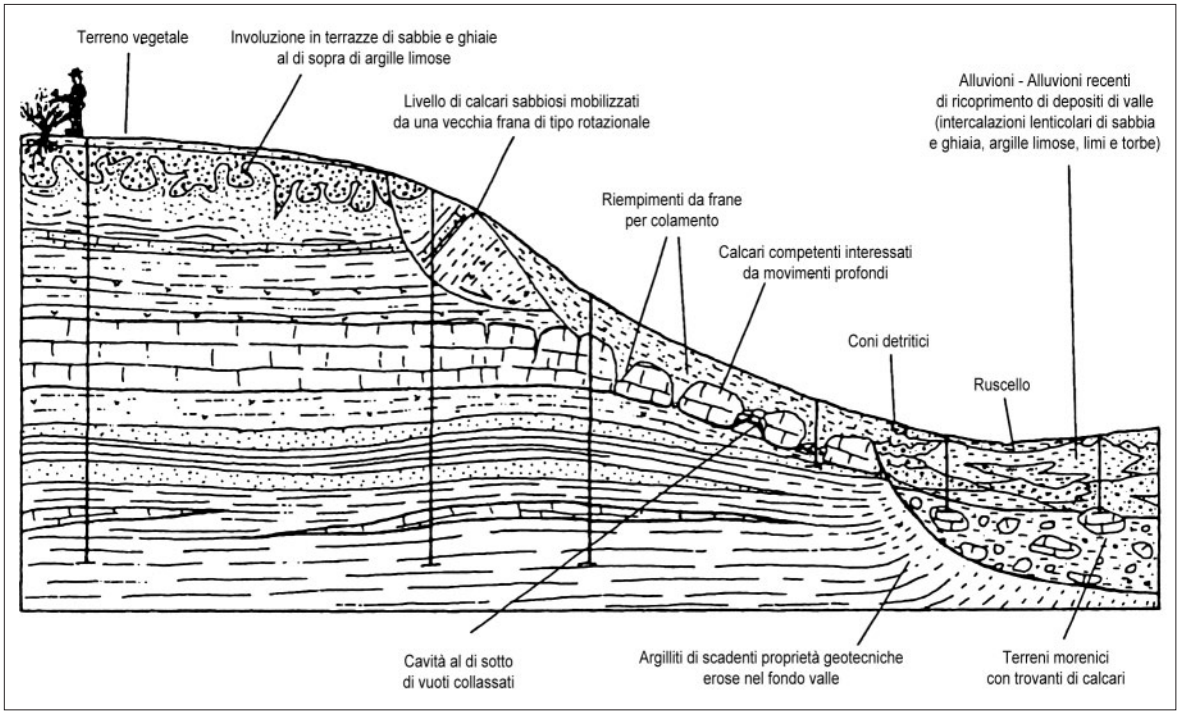


Figura 1.7. Esempio di variabilità del terreno (fonte: Fookes, 1997)

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

– le lavorazioni geotecniche sono normalmente effettuate all'inizio dei lavori di costruzione dell'opera e, conseguentemente, ogni ritardo in tale fase influenza le successive fasi progettuali.

I costi addizionali causati da condizioni del terreno impreviste possono essere molto elevati. Nell'analisi di dieci progetti autostradali, è stato rilevato un incremento dei costi del 35% rispetto al costo originario (Tyrell et al., 1983) e oltre la metà di questi costi furono attribuiti ai problemi geotecnici e il 49% furono attribuiti all'interpretazione e alla programmazione delle indagini.

1.1.4.3. Problemi con il corrente approccio

L'approccio tradizionale è basato su un metodo scientifico messo a punto in un quadro deterministico (Clayton, 2001). Nella migliore pratica professionale, gli ingegneri utilizzano uno studio condotto a tavolino per ipotizzare le probabili condizioni dei terreni di fondazione, individuare i possibili problemi geotecnici e tutte le opzioni per le diverse modalità costruttive, relative ai terreni di fondazione. Viene quindi pianificata una indagine geotecnica in grado di determinare le effettive condizioni dei terreni, allo scopo di essere in grado di effettuare una progettazione completa dell'opera. Il processo è quasi coincidente con quanto indicato a suo tempo da Terzaghi (1936):

– esecuzione di sondaggi nel terreno;
– invio di campioni di terreno prelevati dai sondaggi a un laboratorio dotato di attrezzature adeguate a effettuare delle prove di laboratorio;
– raccolta dei dati e loro interpretazione;
– introduzione di tali dati nelle equazioni risolutive del problema;
– valutazione dei risultati.

Tuttavia vanno evidenziati alcuni problemi inerenti l'approccio corrente. Innanzitutto, poiché le condizioni geotecniche presenti nei terreni interessati dalla costruzione di un'opera non sono modificabili, devono identificarsi appropriate soluzioni progettuali e metodi costruttivi in grado di garantire la realizzazione dei lavori in condizioni di sicurezza, di economicità e di rispetto dell'ambiente. È opportuno sottolineare che i rischi connessi alla costruzione devono comprendere non solamente i rischi dovuti alle condizioni geologiche e geotecniche, ma anche le modalità di costruzione scelte dal progettista.

Secondariamente, la scelta può essere antieconomica, tuttavia molta esperienza, tempo e denaro devono impiegarsi per ottenere un quadro completo delle condizioni dei terreni in sito, vale a dire per una dettagliata individuazione delle variabilità geotecniche presenti in sito.

Bisogna tener comunque presente che le indagini geotecniche non sono mai in grado di investigare se non una piccola percentuale del terreno, probabilmente inferiore all'ordine di grandezza di una parte del terreno su un milione che sarà interessato dalla costruzione. In aggiunta, il tempo tra la concezione del progetto e la progettazione finale di dettaglio di tutti i suoi elementi può risultare molto lungo.

Si osserva che ultimamente sempre più spesso la progettazione (specialmente quella geotecnica) dei maggiori componenti come i pali o le opere di sostegno viene subappaltata al costruttore o agli specialisti dei subappaltatori. Invece, poiché il progetto finale è sottoposto a continue modifiche, non è possibile pianificare un'efficace campagna di indagini geotecniche.

Persino dove è possibile ottenere un quadro completo delle condizioni del terreno (cioè in un sito dove le condizioni geotecniche sono molto uniformi), le previsioni del comportamento delle opere geotecniche condotte durante la progettazione possono presentare delle notevoli approssimazioni. Nonostante i progressi della meccanica dei terreni e delle rocce, l'accuratezza di molti approcci di calcolo di routine per il dimensionamento delle opere geotecniche rimane molto approssimata e, a questo riguardo, ci sono molti esempi in letteratura.

La *figura 1.8* mostra i risultati di una recente previsione sul comportamento di pali di fondazione (Wheeler, 1999). La *figura 1.9* mostra un esempio di come possa essere poco accurata la previsione dei cedimenti di una fondazione, basata sui risultati di prove penetrometriche dinamiche, condotte utilizzando persino i migliori metodi disponibili (Clayton et al., 1988).

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

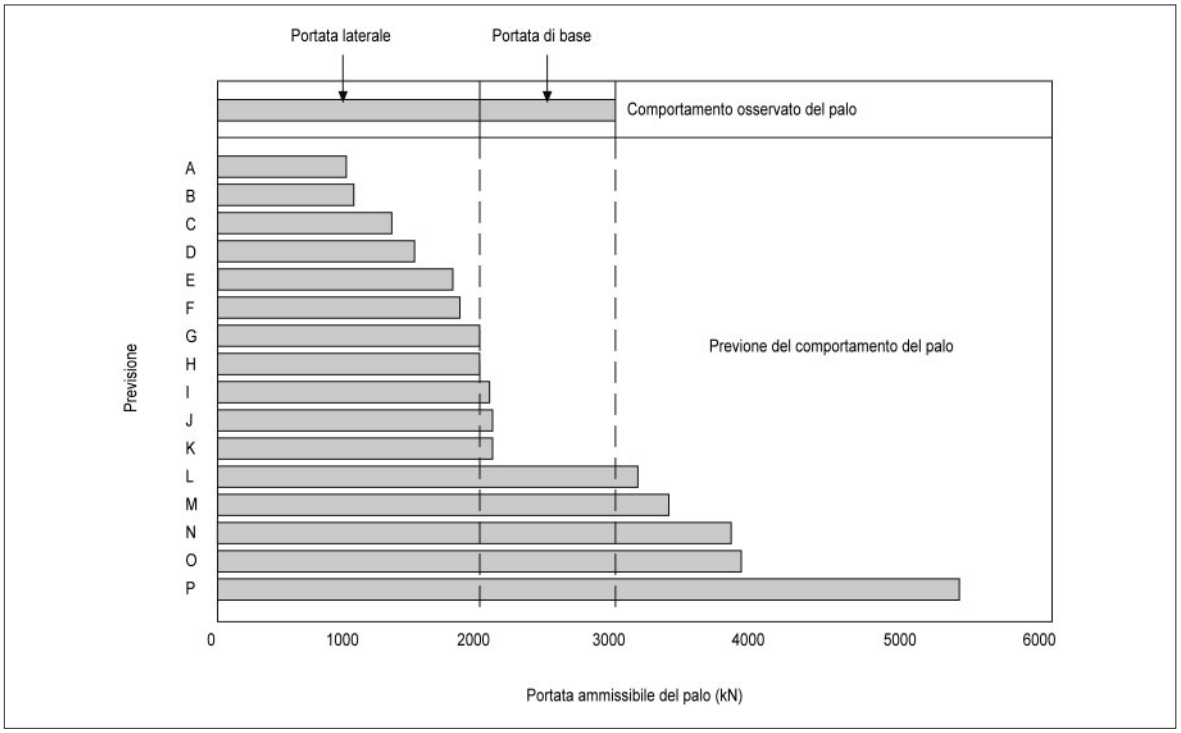


Figura 1.8. Confronto dei valori di capacità portante di una fondazione su pali previsti e osservati (fonte: Wheeler, 1999)

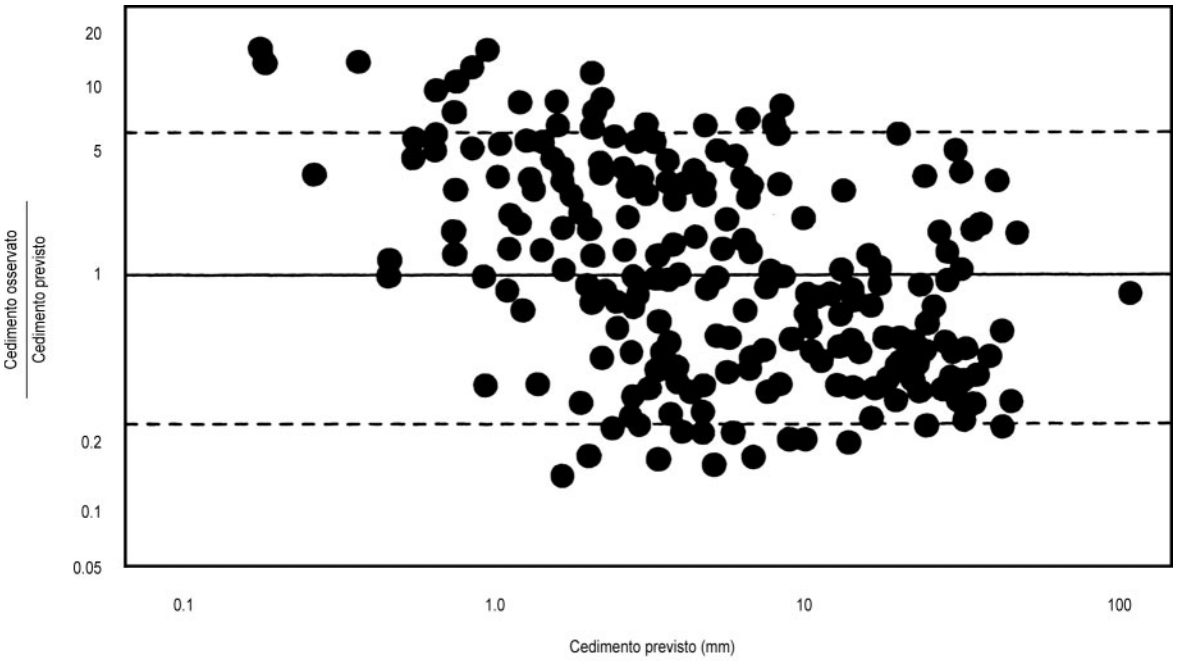


Figura 1.9. Valori del cedimento previsto e osservato relativo a fondazioni su sabbia (fonte: Clayton et al., 1988)

Esistono numerosi modi coi quali il terreno può causare problemi durante la costruzione, per esempio a causa di attacco chimico, sollevamento, subsidenza, flusso d'acqua, collasso nel pendio, cedimenti eccessivi della fondazione e così via.

A causa della considerevole gamma di rischi che il terreno può presentare, è relativamente facile, per un progettista senza esperienza o non specialista, non essere in grado di riconoscere il meccanismo critico di danneggiamento o di rottura che può minacciare la fattibilità finanziaria del'opera o

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

la bontà e la sicurezza del progetto, se impiega delle procedure di progettazione di routine. Se non è previsto un determinato meccanismo di rottura (stato limite ultimo), esso non può essere tenuto in conto durante la progettazione e per questa ragione si possono poi manifestare, in corso d'opera, problemi causati dai terreni di fondazione. Tali eventuali problemi possono causare un effetto del tutto sproporzionato sul costo e sul tempo di completamento di una costruzione, in quanto, manifestandosi all'inizio della costruzione, possono comportare non solamente costi addizionali ma anche dei ritardi difficilmente recuperabili.
L'evidenza mostra che persino quando l'appalto è condotto in maniera tradizionale con un'attenta selezione dei consulenti e delle imprese appaltatrici, l'incremento dei costi potrebbe essere elevato per certi tipi di progetti (*figura 1.10*). Da notare che con i tradizionali livelli di spesa sulle indagini geotecniche (tipicamente meno dell'1%), sulla base di dati pubblicati da Simons et al. (2002), 13 incrementi dei costi in progetti autostradali sono risultati superiori al 100%, mentre per spese sulle indagini geotecniche, pari al 6% del costo di costruzione, è stato possibile limitare l'incremento di costo durante la costruzione a valori inferiori al 10%. Con altri progetti, tuttavia, è stato possibile non avere praticamente costi addizionali con un minimo approfondimento geotecnico.
Brierley (1998) fornisce le seguenti interessanti considerazioni: "a essere franchi, la maggior parte delle condizioni del terreno non sono poi così complesse, la maggior parte dei progetti non comprende una grande entità di lavori in sotterraneo in confronto alla complessità delle opere che devono essere costruite e la maggior parte delle imprese sono sufficientemente familiarizzate con le condizioni del terreno, nella loro area di attività, per evitare grandi disastri". Da quanto affermato da Brierley emerge che, conseguentemente, la maggior parte degli addetti alla costruzione è in grado di ottenere quello che si vuole dal processo costruttivo senza avere troppe preoccupazioni agli aspetti esecutivi legati alle condizioni del terreno.

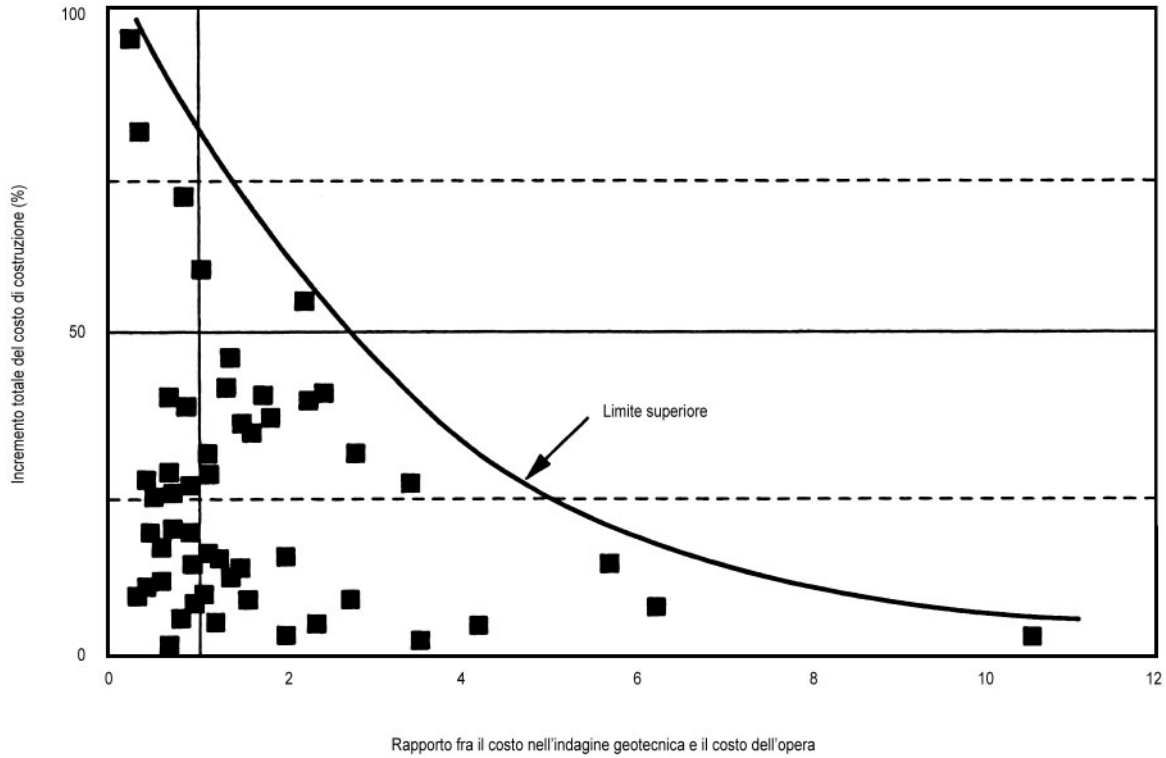


Figura 1.10. Incremento dei costi di costruzione in funzione del costo dell'indagine in sito (fonte: Simons et al., 2002)

1.1.4.4. Eliminare le incertezze: nuovi metodi di lavoro

Come notato da Clayton (2001), l'evidenza ottenuta da recenti studi mostra la presenza delle seguenti circostanze:

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

– non c'è mai sufficiente tempo o denaro disponibile per investigare con sufficiente completezza tutte le proprietà dei terreni che sono interessati da una costruzione;
– l'esatta definizione della costruzione, con particolare riferimento all'interazione con il terreno, è improbabile che sia conosciuta nella sua interezza nel momento nel quale viene effettuata l'indagine geotecnica.

Conseguentemente, è necessario adottare una differente strategia e cioè tutti gli attori coinvolti nella costruzione dovrebbero:

– accettare che le condizioni del terreno siano sempre, con un maggiore o minore livello di conoscenza, incerte;
– introdurre dei fattori geotecnici nei sistemi di gestione del rischio;
– identificare i rischi geotecnici nelle prime fasi della pianificazione del progetto;
– decidere se un approccio geotecnico di routine o sofisticato è più adatto per il progetto;
– consentire e pianificare lo sviluppo di una indagine geotecnica suddivisa in diverse fasi in funzione dello sviluppo del progetto.

Una progettazione geotecnica efficace è essenziale per la gestione del rischio (Clayton, 2001). Nella prima metà del ventesimo secolo, quando le tecniche analitiche erano ancora poco sviluppate, gli ingegneri avevano pochi strumenti su cui contare, a parte la conoscenza dei principi di base e l'impiego di metodi di calcolo empirici o semi empirici. Quando l'analisi è diventata più sofisticata e sono comparsi dei testi e dei manuali geotecnici che hanno reso le conoscenze più accessibili alla pratica ingegneristica, si è sempre più enfatizzato sull'importanza delle analisi con soluzioni analitiche o con modelli numerici e una, conseguente, progressiva diminuzione dell'attenzione ai principi di base della progettazione geotecnica. In questa sede non è privo di importanza notare che i corsi universitari dovrebbero rispondere a questo cambiamento con un migliore insegnamento della progettazione geotecnica, contribuendo a sviluppare lo spirito critico e la capacità di comprendere tutte le criticità connesse con la progettazione geotecnica.

1.1.4.4.1. Rendere l'indagine geotecnica più efficace

Le Nuove norme tecniche per le costruzioni del 2008 evidenziano l'importanza che l'indagine geotecnica sia articolata secondo le seguenti fasi:

– studio geologico in grado di fornire un inquadramento geologico della zona sufficiente per definire il piano delle indagini specifiche sui terreni e sulle rocce nel sito di interesse;
– dettagliata indagine geotecnica per la progettazione;
– soprattutto nel caso di opere di notevole mole e importanza dal punto di vista della sicurezza o che interessino terreni con caratteristiche meccaniche scadenti, controllo del comportamento dell'opera durante e dopo la costruzione, predisponendo un programma di osservazioni e misure di ampiezza commisurata all'importanza dell'opera e alla complessità della situazione geotecnica.

Tuttavia, nel contesto della gestione del rischio, altri aspetti devono essere considerati quali ad esempio i seguenti:

– per un'efficace identificazione del rischio effettivo, occorre che sia condotta una ricerca di tutte le informazioni esistenti sul sito nelle fasi della progettazione preliminare, se possibile prima che lo stesso cliente prenda una decisione finale sull'opera da realizzare e sull'investimento da effettuare. L'interpretazione di questi dati richiede abilità e giustizio, con la conseguente opportunità che siano coinvolti uno o più esperti geotecnici per la definizione del parere finale in merito all'investimento ovverosia alla costruzione dell'opera;
– è di fondamentale importanza che l'indagine geotecnica venga suddivisa nelle diverse fasi progettuali in modo tale da approfondire progressivamente le conoscenze geotecniche in funzione dello sviluppo del progetto;
– la tempestività con la quale vengono assegnate ed effettuate le indagini geotecniche (dall'appalto, all'esecuzione e alla restituzione dei dati) per progettazioni di routine è di fondamentale importanza per rendere efficiente l'assegnazione delle indagini a società specializzate. Questo

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

può favorire le indagini in sito (prove penetrometriche statiche e dinamiche, indagini geofisiche, ecc.) e le prove di laboratorio veloci (prove triassiali non drenate, ecc.). L'ubicazione e il tipo di indagine dovrebbero essere attentamente pianificate allo scopo di fornire dati utili per la progettazione e per verificare ogni ipotesi desunta dai dati geologici e geotecnici esistenti;
- le condizioni del terreno dovrebbero essere osservate e registrate durante la costruzione, quando, per effetto degli scavi e delle lavorazioni geotecniche, si rende possibile osservare le effettive condizioni dei terreni. Durante la costruzione si dovrebbe confrontare quanto si osserva durante gli scavi e le lavorazioni con quanto era previsto nella fase dell'identificazione del rischio. Inoltre, il progetto dovrebbe essere sufficientemente flessibile per consentire ogni eventuale necessaria modifica in corso d'opera;
- nei pochi casi dove i costi/benefici possono essere facilmente identificati, l'impiego di indagini estensive, di sofisticati campionamenti e di prove in sito e di laboratorio è giustificato persino nel caso nel quale le indagini e la relativa interpretazione possano comportare un significativo ritardo nello sviluppo del progetto. Recenti esperienze suggeriscono che le dighe, le gallerie e le fondazioni di edifici e/o grattacieli importanti sono alcune delle opere che possono trarre un enorme beneficio da un più sofisticato approccio di tipo geotecnico. È dubbio se l'approccio tradizionale e deterministico possa essere di grande utilità per la progettazione di infrastrutture ferroviarie o stradali;
- in futuro, è poco probabile che molti clienti saranno disposti ad accettare responsabilità per quanto concerne le *condizioni del terreno non previste*. I progetti dovrebbero essere sufficientemente dettagliati per accettare il più vasto campo di variazione delle condizioni del terreno attese. Questo potrebbe significare che è necessario il monitoraggio o l'adozione del metodo osservazionale.

1.1.4.4.2. Implementazione di un sistema per la valutazione del rischio geotecnico

Clayton (2001) ha proposto la seguente procedura per un'appropriata analisi del rischio geotecnico:
- creazione di un team di esperti geotecnici (per la semplice costruzione di un edificio si potrebbe fare riferimento a un unico ingegnere geotecnico, mentre invece per grandi progetti sarebbe indispensabile un minimo di tre esperti geotecnici/geologi);
- raccolta di dati pubblicati o comunque disponibili sulle condizioni geotecniche dei terreni del sito in oggetto;
- identificazione delle possibili modalità costruttive per la realizzazione dell'opera;
- identificazione dei rischi relativi alle diverse possibili modalità costruttive sulle base delle informazioni esistenti;
- utilizzo dell'esperienza del gruppo per classificare i rischi in funzione dell'impatto sull'ambiente;
- definizione di un registro del rischio, come più avanti descritto;
- associazione dei vari rischi alle differenti fasi del progetto;
- stima dei costi e delle probabilità di possibili scostamenti (basata sull'esperienza del gruppo).

Infine, si aggiunga che perché un'analisi di rischio sia efficace è importante che:
- sia effettuata una ricerca approfondita e una revisione delle informazioni relative ai terreni di fondazione;
- si abbia una sufficiente esperienza, sia geotecnica sia geologica, per l'identificazione dei pericoli, dei rischi e delle relative conseguenze.

1.1.4.4.3. Registro dei rischi

Come evidenziato da Hall et al. (2001), la gestione sistematica del rischio ha lo scopo di aggiungere un valore aggiunto al processo costruttivo con le seguenti finalità:
- incoraggiare l'ingegnosa identificazione dei rischi e delle opportunità;
- utilizzare la stima dei rischi come base per prendere delle decisioni;
- controllare le incertezze;

Abstract tratto da www.darioflaccovio.it - Tutti i diritti riservati

– minimizzare i danni potenziali che potrebbero manifestarsi nelle ipotesi peggiori;
– comunicare i rischi tra i partecipanti al progetto;
– stabilire chiaramente la paternità dei rischi e delle azioni di mitigazione.

Numerose iniziative hanno cercato di formalizzare il processo di gestione del rischio e, sebbene i punti di vista sul processo di gestione dei rischio talvolta differiscano, i principali passi sono ora largamente riconosciuti (figura 1.11).
Va notato che il processo di gestione del rischio è simile al processo per una corretta gestione del progetto (*project management*) e la figura 1.11 illustra dettagliatamente tutte le informazioni necessarie per il processo della gestione del rischio. Tali informazioni comprendono:

– la registrazione di tutti i rischi che sono stati identificati;
– la definizione di tutte le persone e figure professionali coinvolte nella progettazione e del loro ruolo in funzione dei differenti tipi di rischio e delle relative responsabilità per la gestione del rischio;
– monitoraggio della definizione e dello sviluppo delle azioni necessarie per la gestione dei rischi.

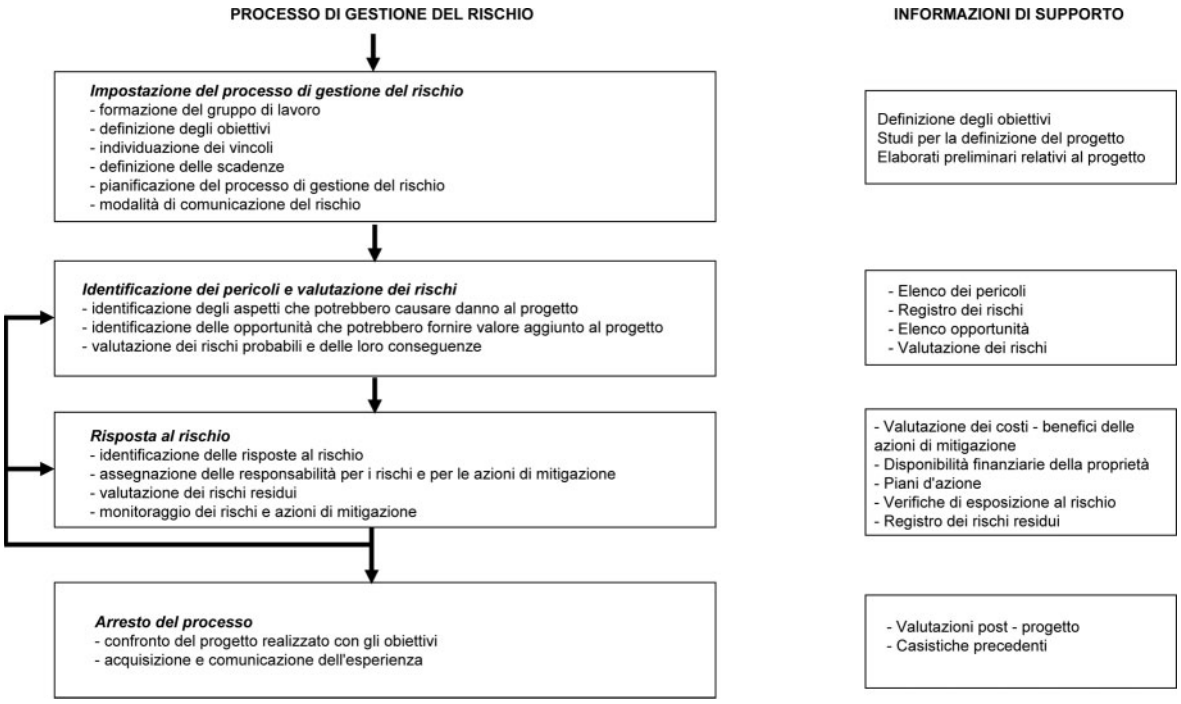


Figura 1.11. Fasi nel processo di gestione del rischio, insieme con le informazioni di supporto (Hall et al., 2001)

1.2. L'INDAGINE GEOTECNICA E LE NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (NTC 2008)

Le Nuove norme tecniche per le costruzioni del 2008 forniscono le seguenti considerazioni e indicazioni per quanto concerne l'indagine geotecnica.
Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento e devono riguardare il volume significativo, inteso come la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso e devono permettere la definizione dei modelli geotecnici di sottosuolo necessari alla progettazione.
I valori caratteristici delle grandezze fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere ottenuti mediante specifiche prove di laboratorio su campioni indisturbati di terreno e attraverso l'interpretazione dei risultati di prove e misure in sito.