

Maurizio Tanzini

LA RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

Caratterizzazione dei terreni e delle rocce
per la realizzazione di opere civili e infrastrutture

[Scheda sul sito >](#)



GEOLOGIA E RISCHIO SISMICO | GEOMORFOLOGIA E RISCHIO
IDROGEOLOGICO | MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO
DI RIFERIMENTO | CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E
GEOTECNICA | EUROCODICE 7 E NTC | NORMATIVA SULLE
TERRE E ROCCE DA SCAVO | METODO OSSERVAZIONALE

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

Maurizio Tanzini

La relazione geologica e geotecnica

**CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI E DELLE ROCCE
PER LA REALIZZAZIONE DI OPERE CIVILI E INFRASTRUTTURE**



Dario Flaccovio Editore

Maurizio Tanzini

LA RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

ISBN 9788857902944

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: luglio 2014

Tanzini, Maurizio <1955->

La relazione geologica e geotecnica : caratterizzazione dei terreni e delle rocce per la realizzazione di opere civili e infrastrutture / Maurizio Tanzini. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0294-4

1. Geotecnica.

624.151 CDD-22

SBN PAL0269284

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, luglio 2014



È possibile scaricare due esempi di relazioni geotecniche su darioflaccovio.it dalla pagina relativa al libro. Le relazioni riguardano rispettivamente la costruzione di una centrale idroelettrica e il consolidamento statico delle fondazioni di una vecchia chiesa.

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.

2.1. Considerazioni preliminari.....	»	35
2.2. Descrizione dell'incertezza.....	»	38
2.2.1. Istogrammi e distribuzioni di frequenza.....	»	38
2.2.2. Introduzione alla teoria delle probabilità	»	40

2.2.3. Coefficiente di correlazione	»	48
2.3. Tecniche di campionamento.....	»	49
2.4. Analisi probabilistiche agli elementi finiti.....	»	53
2.5. Metodo grafico di correlazione	»	57
2.6. Riferimenti bibliografici	»	61

3. Rischio sismico

3.1. Elementi di sismologia e dati sismici fondamentali.....	»	63
3.1.1. Origine dei terremoti	»	63
3.1.2. Tettonica delle placche continentali	»	64
3.1.3. Modelli del terremoto.....	»	66
3.1.4. Meccanismo del terremoto	»	68
3.1.5. Rischio sismico	»	72
3.1.6. Spettro di risposta.....	»	80
3.2. Analisi della risposta sismica locale	»	81
3.2.1. Generalità	»	81
3.2.2. Amplificazione locale del moto sismico	»	82
3.2.3. Metodi di analisi monodimensionale	»	88
3.2.4. Metodi di analisi bidimensionale	»	89
3.2.5. Soluzioni analitiche approssimate per il calcolo del moto sismico in superficie.....	»	93
3.2.6. Il programma SHAKE ed esempi applicativi.....	»	93
3.3. Definizione dell'azione sismica	»	100
3.3.1. Esempio di valutazione automatica dell'azione sismica di progetto..	»	103
3.4. Riferimenti bibliografici	»	110

4. Proprietà ingegneristiche dei terreni e delle rocce

4.1. Proprietà caratteristiche dei terreni	»	111
4.1.1. Principali tipi di terre.....	»	111
4.1.2. Composizione granulometrica.....	»	112

4.1.3.	Caratteristiche volumetriche dei terreni	» 114
4.1.4.	Densità relativa per i terreni a grana grossa	» 120
4.1.5.	Limiti di consistenza	» 121
4.1.6.	Sistemi di classificazione	» 127
4.1.7.	Effetti del contenuto d'acqua sul valore della densità e del peso dell'unità di volume	» 128
4.2.	Resistenza al taglio e deformabilità dei terreni	» 134
4.2.1.	Resistenza al taglio dei terreni non coesivi	» 134
4.2.2.	Resistenza al taglio dei terreni coesivi	» 135
4.2.3.	Deformabilità	» 141
4.2.4.	Condizioni di equilibrio limite	» 146
4.3.	Parametri geotecnici tipici dei terreni	» 150
4.3.1.	Peso specifico e densità	» 150
4.3.2.	Permeabilità	» 151
4.3.3.	Caratteristiche di resistenza al taglio	» 152
4.3.4.	Parametri di deformabilità	» 159
4.4.	Classificazione e descrizione delle rocce	» 160
4.5.	Resistenza al taglio e deformabilità delle rocce	» 164
4.6.	Parametri geomeccanici tipici	» 175

5. Idrogeologia applicata all'ingegneria

5.1.	Inquadramento idrogeologico e geomeccanico	» 183
5.1.1.	Premessa	» 183
5.1.2.	Permeabilità dell'ammasso roccioso	» 188
5.1.3.	Proprietà idrauliche delle fratture	» 191
5.1.4.	Approccio metodologico all'analisi del flusso idraulico in mezzi rocciosi fratturati	» 207
5.1.5.	Caratteristiche di permeabilità degli ammassi rocciosi	» 214
5.1.5.1.	Prove Lugeon	» 215
5.1.5.2.	Prove nei piezometri	» 232
5.1.5.3.	Misure a grande scala	» 232

5.1.5.4. Analisi del profilo della falda	» 234
5.1.5.5. Metodi indiretti	» 235
5.1.5.6. Classificazione di Ewert	» 235
5.1.6. Approccio proposto da Barton	» 239

6. Geomorfologia applicata all'ingegneria

6.1. Geomorfologia e ingegneria.....	» 253
6.2. Riferimenti bibliografici	» 261

7. Geologia e materiali da costruzione

7.1. Peso specifico reale e apparente.....	» 263
7.2. Porosità, compattezza, imbibizione	» 264
7.3. Durezza, perforabilità, logoramento	» 265
7.4. Divisibilità, spaccabilità.....	» 270
7.4.1. Spaziatura delle discontinuità	» 270
7.5. Resistenza alla compressione, trazione, flessione.....	» 278
7.6. Colore.....	» 281
7.7. Durevolezza, proprietà termiche	» 282
7.8. Riferimenti bibliografici	» 282

8. Il metodo osservazionale alla luce dell'EC7 e delle NTC

8.1. Il ruolo del monitoraggio nelle opere geotecniche.....	» 285
8.2. Il metodo osservazionale secondo Peck e l'Eurocodice 7	» 290
8.3. Il metodo osservazionale secondo le norme tecniche per le costruzioni	» 296
8.4. Esempio di applicazione del metodo osservazionale	» 296
8.5. Riferimenti bibliografici	» 303

9. Caratterizzazione ed interpretazione idrogeochimica delle acque

9.1. Generalità.....	» 305
----------------------	-------

9.2. Campionamento delle acque	» 306
9.3. Caratterizzazione ed interpretazione idrogeochimica	» 307
9.4. Degrado del calcestruzzo in presenza di acque circolanti.....	» 308
9.5. Riferimenti bibliografici	» 310

10. Terre e rocce da scavo

10.1. Introduzione.....	» 311
10.2. Quadro di riferimento normativo	» 312
10.2.1. Articoli 183 e 183-bis del Decreto Legislativo n. 152/2006 e s.m.i.	» 312
10.2.2. Articolo 49 del Decreto Legge n. 1 del 24 gennaio 2012	» 313
10.2.3. Decreto Ministeriale n. 161 del 10 agosto 2012	» 313
10.2.4. Modifiche nel D.L. Fare in vigore dal 21 agosto 2013	» 315
10.3. Caratterizzazione ambientale dei materiali di scavo secondo il D.M. n. 161	» 316
10.4. Procedure di campionamento in fase di progettazione secondo il D.M. n. 161	» 317
10.5. Normale pratica industriale secondo il D.M. n. 161	» 319
10.6. Procedure di caratterizzazione chimico-fisiche e accertamento delle qualità ambientali secondo il D.M. n. 161	» 319
10.7. Il Piano di utilizzo secondo il D.M. n. 161.....	» 325
10.8. Utilizzo dei materiali di scavo per scopi produttivi	» 327
10.9. Riferimenti bibliografici.....	» 328

Parte Seconda - La relazione geologica

11. Principi fondamentali della geologia applicata all'ingegneria

11.1. Generalità	» 329
11.2. L'impiego delle checklist.....	» 330
11.2.1. Considerazioni ingegneristiche	» 331
11.2.1.1. Geomeccanica	» 331
11.2.1.2. Elementi idrogeologici.....	» 333
11.2.1.3. Geochimica e geotermica.....	» 335

11.2.2. Considerazioni sul rischio geologico	»	335
11.2.3. Considerazioni ambientali.....	»	336

12. La geologia nel processo progettuale

12.1. Considerazioni geologiche e geotecniche generali	»	337
12.2. Importanza della stretta collaborazione fra geologo e ingegnere.....	»	337
12.3. L'indagine geologica a grande scala.....	»	338
12.4. Importanza di un approccio interdisciplinare condotto da un affiatato gruppo di specialisti.....	»	338
12.5. Esempio di processo progettuale geologico-geotecnico con riferimento all'interazione tra galleria o opera in sotterraneo e i versanti	»	342
12.5.1. Caratterizzazione geotecnica.....	»	344
12.5.2. Esempio di progettazione di una galleria situata all'interno di un versante	»	346
12.5.2.1. Condizioni geotecniche e valutazione del grado di stabilità dei versanti in assenza della galleria	»	346
12.5.2.2. Stato tensio-deformativo indotto dallo scavo della galleria nei versanti	»	352
12.5.2.3. Definizione delle modalità di scavo e dei rivestimenti di prima fase e definitivi	»	362
12.5.2.4. Monitoraggio e fase costruttiva	»	362
12.5.2.5. Conclusioni	»	364
12.6. Riferimenti bibliografici.....	»	366

13. Raccolta e interpretazione dei dati geologici

13.1. Premessa.....	»	369
13.2. Orientazione	»	369
13.3. Spaziatura	»	374
13.4. Persistenza e descrizione degli estremi d'ogni frattura	»	376
13.5. Scabrezza del giunto.....	»	376

13.6. Resistenza della parete del giunto	» 378
13.7. Apertura del giunto e materiale di riempimento	» 379
13.8. Volume roccioso unitario.....	» 383
13.9. Esempio di specifica tecnica per l'esecuzione di un rilievo geostrutturale....	» 385
13.10. Esempio di specifica tecnica per un rilievo geostrutturale con sonda televisiva	» 386
13.11. Sistemi di classificazione	» 386
13.11.1. Classificazione di Terzaghi	» 387
13.11.2. Classificazione secondo l'indice RQD	» 387
13.11.3. Classificazione di Rabcewicz.....	» 390
13.11.4. Sistema di classificazione RSR.....	» 392
13.11.5. Sistema di classificazione RMR.....	» 394
13.11.6. Sistema di classificazione Q	» 398
13.11.7. Sistema di classificazione mediante GSI	» 401
13.11.8. Classificazione di Deere e Miller per la roccia intatta	» 404
13.11.9. Correlazioni tra gli indici di classificazione.....	» 406
13.12. Riferimenti bibliografici.....	» 407
 14. Il modello geologico di riferimento	
14.1. Finalità della raccomandazione e delle definizioni	» 409
14.2. Norme e raccomandazioni esistenti.....	» 410
14.3. Processo di quantificazione dell'affidabilità	» 410
14.4. Raccolta e organizzazione dei dati	» 411
14.5. Analisi dei dati.....	» 411
14.6. Modello geologico di riferimento (MGR).....	» 412
14.6.1. Fasi del modello geologico di riferimento	» 412
14.6.2. Piano di indagini	» 413
14.7. Quantificazione dell'affidabilità.....	» 414
14.7.1. Metodi esistenti in letteratura.....	» 414
14.7.2. Raccomandazioni generali	» 415
14.7.3. Elaborati finali.....	» 416
14.8. Imprevisto geologico.....	» 417

La relazione geologica e geotecnica

14.9. Ripartizione del rischio geologico in fase contrattuale	»	417
14.10. Nota e bibliografia	»	418
14.10.1. Nota	»	418
14.11. Riferimenti bibliografici	»	418

15. La relazione geologica

15.1. Considerazioni generali	»	421
15.1.1. Argomenti di una relazione geologica	»	421
15.2. Esempio di specifica tecnica generale per studi geologici, geomorfologici ed idrogeologici	»	428
15.2.1. Relazione geologica	»	428
15.2.2. Planimetria di ubicazione delle indagini	»	429
15.2.3. Planimetria, profili e sezioni geologiche	»	430
15.2.4. Carta geomorfologica e relazione geomorfologica	»	431
15.2.5. Carta idrogeologica e relazione idrogeologica	»	432

16. Valutazione e revisione di una relazione geologica

16.1. L'importanza della revisione tecnica (technical auditing) di un progetto	»	435
16.2. Schede per la valutazione della caratterizzazione geologica e dell'indagine geognostica	»	439
16.3. Riferimenti bibliografici	»	444

Parte Terza - La relazione geotecnica

17. Informazioni necessarie per la relazione geotecnica	»	445
--	----------	------------

18. Caratterizzazione geotecnica e geomeccanica

18.1. Caratterizzazione geotecnica	»	449
18.1.1. Natura dei terreni	»	449
18.1.2. Struttura dei terreni	»	451

18.1.3. Caratterizzazione fisica del terreno	» 453
18.1.3.1. Relazione fra le fasi	» 453
18.1.3.2. Analisi granulometrica.....	» 456
18.1.3.3. Limiti di Atterberg	» 457
18.1.3.4. Sistemi di classificazione	» 458
18.1.4. Analisi in sforzi efficaci o totali.....	» 459
18.1.5. Stati tensionali e percorsi di sollecitazione	» 461
18.1.6. Relazioni sforzi-deformazioni.....	» 463
18.1.7. Influenza della velocità di applicazione del carico	» 464
18.1.8. Principi di comportamento meccanico dei terreni	» 465
18.1.8.1. Terreni non coesivi saturi.....	» 465
18.1.8.2. Argille normalconsolidate o leggermente sovracconsolidate e limi argillosi	» 469
18.1.8.3. Argille sovracconsolidate	» 475
18.1.8.4. Argille sensitive	» 479
18.1.9. Prove di laboratorio.....	» 480
18.1.9.1. Prova edometrica	» 480
18.1.9.2. Prova di taglio diretto	» 483
18.1.9.3. Prova triassiale.....	» 484
18.1.10. Prove in sito	» 487
18.1.10.1. Prove penetrometriche statiche.....	» 487
18.1.10.1.1. Identificazione dei terreni	» 487
18.1.10.1.2. Terreni coesivi.....	» 492
18.1.10.1.3. Terreni non coesivi.....	» 500
18.1.10.2. Prove penetrometriche dinamiche.....	» 503
18.1.10.2.1. Terreni coesivi.....	» 503
18.1.10.2.2. Terreni non coesivi.....	» 503
18.1.10.3. Correlazione fra prove penetrometriche dinamiche SPT e statiche.....	» 507
18.2. Caratterizzazione geomeccanica.....	» 507
18.2.1. Generalità.....	» 507
18.2.2. Classificazione e descrizione delle rocce.....	» 512

18.2.3. Resistenza al taglio e deformabilità delle rocce.....	»	518
18.2.4. Caratteristiche di resistenza delle discontinuità.....	»	534
18.2.4.1. Giunti senza materiale di riempimento.....	»	534
18.2.4.2. Misura della scabrezza dei giunti.....	»	541
18.2.4.3. Giunti con materiale di riempimento.....	»	542
18.2.4.3.1. Fratture che hanno subito movimenti recenti	»	544
18.2.4.3.2. Fratture che non hanno subito spostamenti...	»	545
18.2.5. Caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso.....	»	546
18.2.5.1. Classificazione secondo l'indice RQD.....	»	546
18.2.5.2. Impiego delle classifiche tecniche.....	»	548
18.2.5.3. Caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso	»	568
18.2.6. Caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso.....	»	591
18.2.7. Stato di sforzo in sito	»	600
18.3. Riferimenti bibliografici.....	»	602

19. La relazione geotecnica

19.1. Considerazioni generali.....	»	609
19.2. Esempio di specifica per studi geotecnici, caratterizzazione geotecnica e predisposizione della relazione geotecnica.....	»	614
19.2.1. Caratterizzazione geotecnica dei terreni	»	615
19.2.1.1. Tipologie dei terreni e delle opere di interesse	»	615
19.2.1.2. Indicazioni di carattere generale	»	615
19.2.1.3. Caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana grossa ..	»	616
19.2.1.3.1. Caratteristiche fisiche dei terreni	»	616
19.2.1.3.2. Stato iniziale dei materiali.....	»	617
19.2.1.3.3. Resistenza al taglio in condizioni drenate..	»	617
19.2.1.3.4. Resistenza al taglio in condizioni non drenate	»	618
19.2.1.3.5. Caratteristiche di deformabilità.....	»	618
19.2.1.4. Caratterizzazione geotecnica per terreni a grana fine.....	»	620
19.2.1.4.1. Caratteristiche fisiche e iniziali dei terreni.	»	620
19.2.1.4.2. Stato iniziale dei materiali.....	»	621

19.2.1.4.3.	Resistenza al taglio in condizioni drenate..	»	621
19.2.1.4.4.	Resistenza al taglio in condizioni non drenate	»	622
19.2.1.4.5.	Caratteristiche di deformabilità.....	»	623
19.2.1.5.	Ammassi rocciosi.....	»	624
19.2.2.	Determinazione delle azioni sismiche di progetto	»	626
19.2.2.1.	Azioni sismiche per la progettazione delle opere definitive	»	626
19.2.2.2.	Progettazione delle opere provvisionali.....	»	626
19.2.3.	Coefficienti di sicurezza e spostamenti ammissibili	»	626
19.2.3.1.	Coefficienti di sicurezza	»	626
19.2.3.2.	Spostamenti ammissibili	»	627
19.2.4.	Specifiche per la redazione delle relazioni geotecniche generali.....	»	628
19.2.4.1.	Sezioni costituenti le relazioni geotecniche generali.....	»	628
19.2.4.2.	Contenuti delle sezioni delle relazioni geotecniche generali	»	628
19.3.	Riferimenti bibliografici	»	632

Premessa

La presente pubblicazione si occupa degli argomenti, contenuti e problematiche, relativi alla preparazione della relazione geologica e geotecnica, alla luce della nuova normativa geotecnica e sismica europea (Eurocodice 7 ed Eurocodice 8) e nazionale (NTC 2008) che ha avuto, come noto, un lunghissimo iter che, di fatto, solo recentemente si è concluso con il parere favorevole espresso dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, per quanto concerne l'adozione degli *Annessi Tecnici Nazionali agli Eurocodici*, altrimenti detti *Appendici Nazionali*. L'avvenuta approvazione da parte del Consiglio Superiore ha costituito, infatti, la necessaria tappa tecnica propedeutica alla loro adozione formale. Con l'approvazione delle *Appendici Nazionali*, i contenuti degli Eurocodici hanno piena operatività nel settore della progettazione strutturale e geotecnica, in coerenza con il quadro delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* di cui al D.M. 14.01.2008. In conseguenza del definitivo recepimento delle normative europee occorre, da parte degli addetti ai lavori, adeguare il complesso iter progettuale geologico e geotecnico e, a questo riguardo, la relazione geologica e geotecnica costituiscono i due fondamentali documenti progettuali nei quali devono riscontrarsi, oltre all'usuale e consolidata prassi progettuale, anche le nuove indicazioni sia degli Eurocodici sia della normativa italiana.

Il libro è stato suddiviso in tre parti. Nella prima parte sono trattati in dettaglio tutti gli aspetti principali la cui profonda conoscenza è di fondamentale importanza per i contenuti e le finalità della relazione geologica e geotecnica. A questo riguardo nei dieci capitoli nei quali è suddivisa la prima parte del testo si percorre lo stato dell'arte per quanto concerne gli aspetti fondamentali che sono alla base di una relazione geologica e geotecnica finalizzata alla progettazione e costruzione di un manufatto, con particolare riferimento ai seguenti punti: (1) importanza che sia il geologo sia il geotecnico evidenzino nei confronti del progettista dell'opera tutte le criticità di tipo geologico e geotecnico consentendo una chiara comprensione degli effettivi rischi connessi con la realizzazione dell'opera; (2) importanza che in un paese come l'Italia ad elevata sismicità sia evidenziato e quantificato il rischio sismico non solamente sulla base delle indicazioni delle NTC 2008 ma anche delle specifiche condizioni locali (microzonazione sismica) e del comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico; (3) importanza, in modo particolare nelle prime fasi della progettazione (progetto preliminare e definitivo), di un'approfondita valutazione degli aspetti non solamente geologici ma anche geomorfologici ed idrogeologici spesso sottovalutati anche nell'ambito di grandi progetti ed infrastrutture; (4) esposizione dei principi del metodo osservazionale sul quale tuttora si registra una scarsa comprensione delle sue effettive finalità e spesso viene citato

a sproposito per giustificare carenti informazioni o indagini geotecniche mentre il metodo osservazionale, per la sua corretta applicazione, presuppone esattamente il contrario, ovvero una dettagliata ed esaustiva indagine e caratterizzazione geotecnica; (5) importanza del contributo fondamentale del geologo e del geotecnico sulla problematica delle terre e rocce da scavo che deve essere analizzata fin dalle prime fasi progettuali e che, anche a causa di una normativa in continua evoluzione, se non correttamente analizzata rischia di portare, come spesso si riscontra, a situazioni estremamente critiche durante l'esecuzione dei lavori.

Nella seconda parte viene analizzato l'iter degli studi geologici che, a partire dalle indagini, porta a definire il modello geologico di riferimento per il sito interessato dal progetto dell'opera civile e a predisporre la relativa relazione geologica, che costituisce un documento di fondamentale importanza per il successivo studio geotecnico e per tutti gli ingegneri e tecnici coinvolti nella progettazione dell'opera.

Nella terza ed ultima parte, vengono esaminati gli aspetti fondamentali relativi agli studi geotecnici; a partire dalle indagini geotecniche in sito ed in laboratorio, alla caratterizzazione geotecnica e alla stesura della relazione geotecnica, che deve contenere non solo le soluzioni progettuali proposte, con i relativi calcoli e verifiche, ma anche le raccomandazioni e le specifiche tecniche per la corretta esecuzione delle lavorazioni geotecniche, evidenziando come il successo di ogni soluzione geotecnica proposta sia strettamente legata alla corretta esecuzione dei lavori oltre che all'identificazione di adeguate tecnologie e attrezzature, da parte dell'impresa specializzata esecutrice dei lavori.

Infine è possibile scaricare due esempi di relazioni geotecniche su darioflaccovio.it dalla pagina relativa al libro. Le relazioni riguardano rispettivamente la costruzione di una centrale idroelettrica e il consolidamento statico delle fondazioni di una vecchia chiesa.

1. Normativa nazionale ed europea

1.1. Evoluzione della normativa geotecnica

1.1.1. Le Nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008)

Con il decreto ministeriale del 14 gennaio 2008, pubblicato nella G.U. del 4 febbraio 2008, n. 29, sono state approvate le *Nuove norme tecniche per le costruzioni*, testo normativo che raccoglie in forma unitaria le norme che disciplinano la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle costruzioni al fine di garantire, per stabiliti livelli sicurezza, la pubblica incolumità. Tali norme rappresentano la più avanzata espressione normativa a tutela della pubblica incolumità nel settore delle costruzioni, secondo un'impostazione coerente con gli eurocodici e con contenuti all'avanguardia, riguardo alla puntuale valutazione della pericolosità sismica del territorio nazionale e quindi alle esigenze di una moderna progettazione sismoresistente delle opere di ingegneria civile da realizzare o ristrutturare in Italia; impostazione condivisa dal mondo accademico, professionale e produttivo-imprenditoriale.

Con riferimento alle NTC 2008, la progettazione geotecnica è trattata nel capitolo 6 che comprende i seguenti 12 paragrafi: paragrafo 6.1 sulle disposizioni generali; paragrafo 6.2 sull'articolazione del progetto; paragrafo 6.3 sulla stabilità dei pendii naturali; paragrafo 6.4 sulle opere di fondazione; paragrafo 6.5 sulle opere di sostegno; paragrafo 6.6 sui tiranti di ancoraggio; paragrafo 6.7 sulle opere in sotterraneo; paragrafo 6.8 sulle opere di materiali sciolti e fronti di scavo; paragrafo 6.9 sul miglioramento e rinforzo dei terreni e delle rocce; paragrafo 6.10 sul consolidamento geotecnico di opere esistenti; paragrafo 6.11 sulle discariche controllate di rifiuti e depositi di inerti e il paragrafo 6.12 sulla fattibilità di opere su grandi aree. Inoltre, relativamente alla progettazione per azioni sismiche, trattata nel capitolo 7 delle NTC, il paragrafo 7.11 è relativo alle opere e sistemi geotecnici esaminando in particolare per le condizioni sismiche: i requisiti nei confronti degli stati limite, la caratterizzazione geotecnica ai fini sismici, la risposta sismica e stabilità del sito, i fronti di scavo e i rilevati, le fondazioni e le opere di sostegno.

Successivamente, in considerazione del carattere innovativo di dette norme, è stato ritenuto opportuno emanare, nel febbraio del 2009, una circolare esplicativa (Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 – *Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14 gennaio 2008) che ha cercato di privilegiare, con una trattazione maggiormente diffusa, gli argomenti più innovativi e per certi versi più complessi trattati dalle nuove norme tecniche. Il testo, pur essendo articolato e corposo, non travalica i compiti e i limiti propri di una circolare, e quindi non modifica gli argomenti trattati dalle *Nuove norme tecni-*

che, né aggiunge nuovi argomenti, se non per informazioni, chiarimenti ed istruzioni applicative. Con tali istruzioni si è inteso fornire agli operatori indicazioni, elementi informativi ed integrazioni, per una più agevole ed univoca applicazione delle *Nuove norme tecniche per le costruzioni*. La progettazione geotecnica viene trattata, in tale circolare, al paragrafo C6 (progettazione geotecnica) e ricalca nei sotto paragrafi esattamente tutti gli argomenti trattati nel capitolo 6 delle NTC.

Come noto, la novità più importante delle NTC, per quanto concerne la progettazione geotecnica, consiste nell'adozione del metodo degli stati limite e nell'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza, in accordo alle indicazioni dell'Eurocodice geotecnico n. 7 (EC7). Nel metodo degli stati limite, ultimi e di esercizio, i coefficienti parziali sono applicati alle azioni, agli effetti delle azioni, alle caratteristiche dei materiali e alle resistenze. I coefficienti parziali possono essere diversamente raggruppati e combinati tra loro in funzione del tipo e delle finalità delle verifiche, nei diversi stati limite considerati.

Occorre ricordare che nel testo del capitolo 6 delle NTC, relativo alla progettazione geotecnica, sono riportati tutti i coefficienti parziali che sono stati scelti per le verifiche agli stati limite delle diverse opere geotecniche. I valori dei coefficienti parziali, riportati nelle NTC, sono in molti casi assai differenti da quelli indicati nell'appendice A (coefficienti parziali e fattori di correlazione per gli stati limite ultimi e valori raccomandati) della prima parte dell'Eurocodice 7 (norma europea EN 1997-1) in quanto, nello stesso EC7, è specificato che ogni paese avrebbe dovuto definire tali valori in maniera autonoma, riportandoli in un apposito *Appendice nazionale*. Le norme nazionali che implementano gli Eurocodici contengono il testo completo dell'Eurocodice (comprese tutte le appendici), così come pubblicato dal CEN (*Comité Européen de Normalisation*), il quale può essere preceduto da una copertina nazionale e da una premessa nazionale e può essere seguito da un *Appendice nazionale*. In Italia sia la parte prima dell'EC7 sulle regole generali, documento UNI-EN-1997-1, sia la parte seconda dell'EC7 su indagini e prove nel sottosuolo, documento UNI-EN-1997-2, sono state pubblicate dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione).

L'*Appendice nazionale* può contenere solo informazioni su quei parametri, noti come *parametri determinati a livello nazionale*, che in ogni Eurocodice sono lasciati aperti ad una scelta a livello nazionale, da impiegarsi nella progettazione degli edifici e delle opere di ingegneria civile da realizzarsi nella singola nazione, cioè:

- valori e/o classi per i quali nell'Eurocodice sono fornite alternative;
- valori da impiegare, per i quali nell'Eurocodice è fornito solo un simbolo;
- dati specifici della singola nazione (geografici, climatici, ecc.), per esempio, la mappa della neve;
- la procedura da impiegare quando nell'Eurocodice ne sono proposte diverse in alternativa.

Essa può anche contenere:

- decisioni riguardanti l'applicazione delle appendici informative;
- riferimenti ad informazioni complementari non contraddittorie che aiutino l'utente ad applicare l'Eurocodice.

La prima parte dell'Eurocodice 7 (norma europea EN 1997-1) fornisce procedure alternative e valori raccomandati con note che indicano dove si possono effettuare scelte a livello nazio-

nale. Pertanto nell'Eurocodice 7 viene raccomandato che la norma nazionale che recepisce la EN 1997-1 comprenda un'appendice nazionale che fornisca tutti i *parametri a determinazione nazionale*, da utilizzare per la progettazione di edifici ed opere di ingegneria civile da realizzare nel paese pertinente.

Nella prima parte dell'EC7 (documento EN 1997-1) le scelte a livello nazionale sono consentite nei seguenti punti:

2.1(8)P, 2.4.6.1(4)P, 2.4.6.2(2)P, 2.4.7.1(2)P, 2.4.7.1(3), 2.4.7.1(4), 2.4.7.1(5), 2.4.7.1(6), 2.4.7.2(2)P, 2.4.7.3.2(3)P, 2.4.7.3.3(2)P, 2.4.7.3.4.1(1)P, 2.4.7.4(3)P, 2.4.7.5(2)P, 2.4.8(2), 2.4.9(1)P, 2.5(1), 7.6.2.2(8)P, 7.6.2.2(14)P, 7.6.2.3(4)P, 7.6.2.3(5)P, 7.6.2.3(8), 7.6.2.4(4)P, 7.6.3.2(2)P, 7.6.3.2(5)P, 7.6.3.3(3)P, 7.6.3.3(4)P, 7.6.3.3(6), 8.5.2(2)P, 8.5.2(3), 8.6(4), 10.2(3), 11.5.1(1)P.

E nei seguenti punti nell'appendice A:

- A.2;
- A.3.1, A.3.2, A.3.3.1, A.3.3.2, A.3.3.3, A.3.3.4, A.3.3.5, A.3.3.6;
- A.4;
- A.5.

Sulla base di quanto sopra, nel mese di marzo 2013, si è, di fatto, concluso il lungo iter di recepimento dell'Eurocodice 7 nella normativa italiana, pubblicando in Gazzetta Ufficiale n. 73 del 27.03.2013 il decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 31 luglio 2012, che reca l'approvazione delle appendici nazionali recanti i parametri tecnici per l'applicazione degli Eurocodici, ad integrazione di quanto già indicato nelle NTC 2008.

Relativamente a tale *Appendice nazionale* si riporta, per la parte relativa alla progettazione geotecnica, quanto pubblicato, nel 2012, sul sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

1.1.2. Eurocodici – Annessi tecnici nazionali (appendici nazionali)

L'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha espresso parere favorevole all'adozione degli *Annessi tecnici nazionali* agli Eurocodici, altrimenti detti *Appendici nazionali*. L'avvenuta approvazione da parte del Consiglio Superiore ne ha costituito la necessaria tappa tecnica propedeutica alla loro adozione formale. Con i 59 annessi (o appendici), i contenuti degli Eurocodici hanno piena operatività nel settore della progettazione strutturale e geotecnica, in coerenza con il quadro delle *Norme tecniche per le costruzioni* di cui al D.M. 14.01.2008. Il testo degli *Annessi* può essere scaricato dal sito internet del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e corrisponde a quello che è stato riportato nel decreto del ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 31 luglio 2012, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 73 del 27.03.2013. Vengono di seguito riportate le *Appendici nazionali* dell'Eurocodice 7, introducendo, dove necessario, qualche breve commento.

1.1.3. Standard europei UNI EN ISO per le indagini geotecniche

Di seguito si riporta l'elenco degli standard europei UNI EN ISO per le indagini geotecniche:

- UNI EN ISO 14688-1:2003 *Indagini e prove geotecniche – Identificazione e classificazione dei terreni – parte 1*;
- UNI EN ISO 14688-2:2004 *Indagini e prove geotecniche – Identificazione e classificazione dei terreni – parte 2*;
- UNI EN ISO 14688-3:2004 *Indagini e prove geotecniche – Identificazione e classificazione dei terreni – parte 3*;
- UNI EN ISO 14689-1:2004 *Indagini e prove geotecniche – Identificazione e classificazione delle rocce – parte 1*;
- UNI EN ISO 14689-2:2004 *Indagini e prove geotecniche – Identificazione e classificazione delle rocce – parte 2*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-1:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 1: determinazione del contenuto in acqua*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-2:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 2: determinazione della massa volumica dei terreni a grana fine*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-3:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 3: determinazione della massa volumica dei granuli solidi – Metodo del picnometro*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-4:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 4: determinazione della distribuzione granulometrica*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-5:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 5: prova edometrica ad incrementi di carico*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-6:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – Parte 6: Prova con la punta conica*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-7:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 7: prova di compressione non confinata su terreni a grana fine*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-8:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – Parte 8: Prova triassiale non consolidata non drenata*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-9:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 9: prove di compressione triassiale, consolidate, su terreni saturi*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-10:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 10: prove di taglio diretto*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-11:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 11: determinazione della permeabilità con prove a carico costante o a carico variabile*;
- UNI CEN ISO/TS 17892-12:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove di laboratorio sui terreni – parte 12: determinazione dei limiti di Atterberg*;
- UNI EN ISO 22476-1:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove in sito – parte 1*;
- UNI EN ISO 22476-2:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove in sito – parte 2*;
- UNI EN ISO 22476-3:2005 *Indagini e prove geotecniche – Prove in sito – parte 3*;
- UNI EN ISO 22475-1:2007 *Indagini e prove geotecniche – Metodi di campionamento e misurazioni sull'acqua del sottosuolo – parte 1: principi tecnici per l'esecuzione*;
- UNI CEN ISO/TS 22475-2:2007 *Indagini e prove geotecniche – Metodi di campionamento e misurazioni sull'acqua del sottosuolo – parte 2: criteri di qualificazione per le imprese e il personale*;

- UNI CEN ISO/TS 22475-3:2007 *Indagini e prove geotecniche – Metodi di campionamento e misurazioni sull'acqua del sottosuolo – parte 3: valutazione di conformità delle imprese e del personale da una terza parte*;
- UNI EN ISO 22477 (suddivisa in sette parti);
- UNI ISO 22282 (suddivisa in sei parti).

1.1.4. Normative UNI sull'esecuzione dei lavori geotecnici speciali

Di seguito si riporta un elenco delle normative UNI relative sia all'esecuzione dei lavori geotecnici speciali che costituiscono un indispensabile corredo all'EC 7 e alle NTC 2008:

- UNI EN 14490:2010 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Chiodature del terreno (soil nailing)*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 14490 (edizione giugno 2010). La norma stabilisce i principi generali per l'esecuzione, le prove, la supervisione e il monitoraggio delle chiodature del terreno (*soil nailing*);
- UNI EN 1538:2010 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Diaframmi*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 1538 (edizione settembre 2010). La norma specifica l'esecuzione di diaframmi e gli aspetti pratici che devono essere tenuti in considerazione nella produzione dei disegni costruttivi. I diaframmi possono essere strutture permanenti o temporanee;
- UNI EN 12063:2002 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Palancolate*;
- UNI EN 1537:2002 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Tiranti di ancoraggio*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 1537 (edizione dicembre 1999). La norma stabilisce e definisce i principi relativi alla tecnologia degli ancoraggi. Si applica all'installazione, al collaudo ed al controllo dei tiranti di ancoraggio permanenti e temporanei dove la capacità di carico è sottoposta a prova. Il termine *terreno* è inteso comprendere sia il suolo sia la roccia;
- UNI EN 1536:2010 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Pali trivellati*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 1536 (edizione settembre 2010). La norma stabilisce i principi generali per la costruzione di pali che sono formati nel terreno per scavo e che contengono un elemento strutturale per trasferire i carichi o limitare le deformazioni. La norma tratta i pali a sezione circolare o a sezione rettangolare purché eseguite in un'unica operazione. La norma si applica a pali singoli, a gruppi di pali e a paratie formate da pali;
- UNI EN 12699 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Pali eseguiti con spostamento del terreno*;
- UNI EN 14199:2005 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Micropali*;
- UNI EN 14679:2005 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Miscelazione profonda*, che riprende un esaustivo documento internazionale di stato dell'arte sulla stabilizzazione profonda dei terreni torbosi (*EuroSoilStab*, 2002);
- UNI EN 14731:2006 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Trattamento del terreno mediante vibrazione profonda*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese

della norma europea EN 14731 (edizione settembre 2005). La norma riguarda la pianificazione, l'esecuzione, le prove e il monitoraggio del trattamento del terreno mediante vibrazione profonda ottenuto mediante l'utilizzo di sonde per la vibrazione profonda e di sonde per la compattazione profonda. Sono considerati i seguenti metodi:

- i metodi in cui le sonde per la vibrazione profonda, contenenti masse oscillanti che causano vibrazioni orizzontali, sono inserite nel terreno;
- i metodi in cui le sonde per la compattazione profonda sono inserite nel terreno utilizzando un vibratore che rimane a livello della superficie del terreno e che solitamente oscilla in modo verticale.
- UNI EN 15237:2008 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Drenaggio verticale*;
- UNI EN 12716:2003 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Getti per iniezione (jet grouting)*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12716 (edizione maggio 2001). La norma riguarda l'esecuzione, il controllo e il monitoraggio degli interventi di *jet grouting*;
- UNI EN 12715:2003 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Iniezioni*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 12715 (edizione luglio 2000). La norma si applica all'esecuzione, alla prova e al monitoraggio di lavori di iniezione geotecnici. Essa tratta i seguenti principi e metodi di iniezione geotecnica:
 - iniezione con spostamento (iniezione di compattazione, fratturazione idraulica);
 - iniezione senza spostamento del materiale ospite (permeazione, iniezione di fessure, riempimento di cavità).

La norma non tratta attività di iniezione speciali, generalmente associate con lavori strutturali e/o d'emergenza;

- UNI EN 14475:2006 *Esecuzione di lavori geotecnici speciali – Terra rinforzata*. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 14475 (edizione gennaio 2006). La norma stabilisce i principi generali per la costruzione della terra rinforzata e riguarda terreni che sono rinforzati mediante inclusione di elementi di rinforzo orizzontali o suborizzontali, posti tra strati di terreno durante la costruzione.

1.1.5. La relazione geologica e geotecnica secondo le NTC 2008

1.1.5.1. La relazione geologica

Relativamente alla relazione geologica, nel capitolo 6 delle NTC 2008, si fa riferimento nei soli paragrafi 6.1.2 e 6.2.1 di cui si riporta il testo. Nella circolare esplicativa delle NTC, n. 617 del 2 febbraio 2009, si fa invece menzione della relazione geologica nel paragrafo C6.2.1 anch'esso di seguito riportato.

6.1.2. PRESCRIZIONI GENERALI

Le scelte progettuali devono tener conto delle prestazioni attese delle opere, dei caratteri geologici del sito e delle condizioni ambientali.

I risultati dello studio rivolto alla caratterizzazione e modellazione geologica, di cui al paragrafo 6.2.1 devono essere esposti in una specifica relazione geologica.

Le analisi di progetto devono essere basate su modelli geotecnici dedotti da specifiche

indagini e prove che il progettista deve definire in base alle scelte tipologiche dell'opera o dell'intervento e alle previste modalità esecutive.

Le scelte progettuali, il programma e i risultati delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica, di cui al paragrafo 6.2.2, unitamente ai calcoli per il dimensionamento geotecnico delle opere e alla descrizione delle fasi e modalità costruttive, devono essere illustrati in una specifica relazione geotecnica.

6.2.1. CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO

La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

In funzione del tipo di opera o di intervento e della complessità del contesto geologico, specifiche indagini saranno finalizzate alla documentata ricostruzione del modello geologico. Esso deve essere sviluppato in modo da costituire utile elemento di riferimento per il progettista per inquadrare i problemi geotecnici e per definire il programma delle indagini geotecniche.

Metodi e risultati delle indagini devono essere esaurientemente esposti e commentati in una relazione geologica.

C6.2.1. CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO

Lo studio geologico deve essere esteso ad una zona significativamente estesa, in relazione al tipo di opera e al contesto geologico in cui questa si colloca.

I metodi e le tecniche di studio, l'approfondimento e il dettaglio delle analisi e delle indagini devono essere commisurati alla complessità geologica del sito, alle finalità progettuali e alle peculiarità dello scenario territoriale ed ambientale in cui si opera.

Lo studio geologico deve definire, con preciso riferimento al progetto, i lineamenti geomorfologici della zona nonché gli eventuali processi morfologici ed i dissesti in atto o potenziali e la loro tendenza evolutiva, la successione litostratigrafica locale, con la descrizione della natura e della distribuzione spaziale dei litotipi, del loro stato di alterazione e fratturazione e della loro degradabilità; inoltre, deve illustrare i caratteri geostutturali generali, la geometria e le caratteristiche delle superfici di discontinuità e fornire lo schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea.

Il piano delle indagini specifiche sui terreni e sulle rocce nel sito di interesse deve essere definito ed attuato sulla base dell'inquadramento geologico della zona e in funzione dei dati che è necessario acquisire per pervenire ad una ricostruzione geologica di dettaglio che possa risultare adeguata ed utile per la caratterizzazione e la modellazione geotecnica del sottosuolo.

Nella descrizione dei caratteri geologici del sito devono essere definite le caratteristiche intrinseche delle singole unità litologiche (terreni o rocce) con particolare riguardo ad eventuali disomogeneità, discontinuità, stati di alterazione e fattori che possano indurre anisotropia delle proprietà fisiche dei materiali. Nelle unità litologiche costituite da alternanze di materiali diversi devono essere descritte le caratteristiche dei singoli litotipi e quantificati gli spessori e la successione delle alternanze.

Alla scala dell'ammasso roccioso, che in molti casi è costituito dall'insieme di più unità litologiche, devono essere evidenziate le differenze di caratteristiche fra le diverse unità e devono essere descritte in dettaglio le discontinuità, quali contatti stratigrafici e/o tettonici, piani di stratificazione, fratture, faglie con relativa fascia di frizione, cavità per dissoluzione.

La relazione geologica sarà corredata da elaborati grafici (carte e sezioni geologiche, planimetrie e profili per rappresentare in dettaglio aspetti significativi o specifici tematismi, ecc.) in scala adeguata al dettaglio degli studi eseguiti e dalla documentazione delle indagini appositamente effettuate e di quelle derivate dalla letteratura tecnico-scientifica o da precedenti lavori.

I risultati delle indagini e degli studi effettuati devono essere esposti in modo esteso ed esauriente e commentati con riferimento al quadro geologico generale della zona presa in considerazione, sottolineando eventuali incertezze nella ricostruzione geologica che possano risultare significative ai fini dello sviluppo del progetto.

1.1.5.2. La relazione geotecnica

Per quanto riguarda la relazione geotecnica nel capitolo 6 delle NTC ne viene fatta menzione, insieme alla relazione geologica, nel già citato paragrafo 6.1.2. Nella Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 è invece dedicato un apposito paragrafo (C6.2.2.5) di seguito riportato.

C6.2.2.5. RELAZIONE GEOTECNICA

La relazione geotecnica contiene i principali risultati ottenuti dalle indagini e prove geotecniche, descrive la caratterizzazione e la modellazione geotecnica dei terreni interagenti con l'opera, e riassume i risultati delle analisi svolte per la verifica delle condizioni di sicurezza e la valutazione delle prestazioni nelle condizioni d'esercizio del sistema costruzione-terreno.

A titolo esemplificativo, si indicano di seguito i tipici contenuti della relazione geotecnica:

- descrizione delle opere e degli interventi;
- problemi geotecnici e scelte tipologiche;
- descrizione del programma delle indagini e delle prove geotecniche;
- caratterizzazione fisica e meccanica dei terreni e delle rocce e definizione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici;
- verifiche della sicurezza e delle prestazioni: identificazione dei relativi stati limite;
- approcci progettuali e valori di progetto dei parametri geotecnici;
- modelli geotecnici di sottosuolo e metodi di analisi;
- risultati delle analisi e loro commento.

La relazione deve essere inoltre corredata da una planimetria con l'ubicazione delle indagini, sia quelle appositamente effettuate, sia quelle di carattere storico e di esperienza locale eventualmente disponibili, dalla documentazione sulle indagini in sito e in laboratorio, da un numero adeguato di sezioni stratigrafiche con indicazione dei profili delle grandezze misurate (resistenza alla punta di prove penetrometriche, altezze piezometriche, valori di propagazione delle onde di taglio, ecc.).

Nei casi in cui sia necessario il ricorso al metodo osservazionale, di cui al paragrafo 6.2.4 delle NTC, o per opere e sistemi geotecnici di particolare complessità, la relazione geotecnica deve comprendere anche l'illustrazione del piano di monitoraggio, con l'individuazione della strumentazione di controllo e la definizione delle procedure di acquisizione, archiviazione ed elaborazione delle misure.

Nel caso di impiego del metodo osservazionale, inoltre, la relazione geotecnica deve comprendere anche la descrizioni delle possibili soluzioni alternative, con le relative verifiche, e la specificazione delle grandezze geometriche, fisiche e meccaniche da tenere sotto controllo per l'adozione di una delle soluzioni alternative previste e dei relativi limiti di accettabilità.

1.1.5.3. La relazione geologica e geotecnica nella precedente normativa

Le nuove *Norme tecniche per le costruzioni* del 2008 hanno superato le seguente precedente normativa geologica-geotecnica:

- D.M. Ministero dei Lavori Pubblici 11/3/1988 – *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*;
- Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 24/9/1988, n. 30483 – *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione*;
- Circolare Ministero dei Lavori Pubblici del 9 Gennaio 1996 n. 218/24/3 – *Istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica*.

Per quanto riguarda il D.M. dell'11 marzo 1988 si fa menzione agli elaborati geologici e geotecnici nel paragrafo A.3 mentre nel paragrafo B.5 si forniscono le indicazioni relative alla relazione sulle indagini (non citata nelle NTC 2008) mentre nel paragrafo E.5 si descrivono i contenuti della relazione relativamente ai manufatti di materiali sciolti. Di seguito si riportano tali paragrafi.

A.3. ELABORATI GEOTECNICI E GEOLOGICI

I risultati delle indagini, degli studi e dei calcoli geotecnici devono essere esposti in una relazione geotecnica, parte integrante degli atti progettuali. Nei casi in cui le presenti norme prescrivano uno studio geologico, deve essere redatta anche una relazione geologica che farà parte integrante degli atti progettuali.

B.5. RELAZIONI SULLE INDAGINI

I risultati delle indagini devono essere oggetto di apposite relazioni, parte integrante del progetto.

Queste devono comprendere ed illustrare tutti i dati obiettivi e sviluppare le elaborazioni ed i calcoli necessari al fine di giungere alle scelte progettuali ed alle verifiche prescritte al punto A.2 e nelle sezioni seguenti.

La relazione geologica è prescritta per le opere a cui fanno riferimento le sezioni E, F, G, H, I, L, M e O, della presente normativa e per le aree dichiarate sismiche o soggette a vincoli particolari. Essa deve comprendere ed illustrare la situazione litostratigrafica locale, con definizione dell'origine e natura dei litotipi, del loro stato di alterazione e fratturazione e della loro degradabilità, i lineamenti geomorfologici della zona, nonché gli eventuali processi morfologici ed i dissesti in atto o potenziali; deve precisare inoltre i caratteri geostrutturali generali, la geometria e le caratteristiche delle superfici di discontinuità e fornire lo schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea.

La relazione geotecnica sulle indagini è prescritta per tutte le opere oggetto delle presenti norme. Essa deve comprendere ed illustrare la localizzazione della area interessata, i criteri di programmazione ed i risultati delle indagini in sito e di laboratorio e le tecniche adottate, nonché la scelta dei parametri geotecnici di progetto, riferiti alle caratteristiche della costruenda opera, ed il programma di eventuali ulteriori indagini, che si raccomandano per la successiva fase esecutiva.

Le relazioni devono essere corredate degli elaborati grafici e della documentazione delle indagini in sito ed in laboratorio necessari per la chiara comprensione dei risultati.

La caratterizzazione geotecnica e la ricostruzione geologica devono essere reciprocamente coerenti.

A tale riguardo la relazione geotecnica deve fare esplicito riferimento alla relazione geologica e viceversa.

E.5. RELAZIONE

La relazione geotecnica deve comprendere la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni di fondazione e dei materiali da costruzione, la descrizione delle modalità di coltivazione delle cave di prestito e delle modalità di posa in opera dei materiali, le verifiche di stabilità della fondazione e del corpo del manufatto, la previsione dei cedimenti e del loro andamento nel tempo, le verifiche del manufatto nei riguardi degli eventuali moti di filtrazione e la giustificazione degli eventuali accorgimenti costruttivi che da esse scaturiscono.

In particolare, per i drenaggi ed i filtri deve essere motivata, la scelta dei materiali naturali o artificiali, tenendo conto dei requisiti di funzionalità e delle caratteristiche granulometriche e di permeabilità del terreno con il quale essi si trovano a contatto.

Nella circolare n. 30483 del 24/9/1988 del Ministero dei Lavori Pubblici contenente le istruzioni per l'applicazione del D.M. dell'11 marzo 1988 vengono fornite le seguenti istruzioni per quanto concerne il punto A.3 del D.M. relativo agli elaborati geotecnici e geologici.

A.3. ELABORATI GEOTECNICI E GEOLOGICI

La relazione geotecnica conterrà:

a) illustrazione del programma di indagini con motivato giudizio sull'affidabilità dei risultati ottenuti; caratterizzazione geotecnica del sottosuolo in relazione alle finalità da raggiungere con il progetto effettuato sulla base dei dati raccolti con le indagini eseguite. La relazione deve essere corredata da una planimetria con le ubicazioni delle indagini sia quelle appositamente effettuate, che quelle di carattere storico e di esperienza locale, dalla documentazione sulle indagini in sito ed in laboratorio, dal profilo litologico e stratigrafico del sottosuolo con la localizzazione delle falde idriche;

b) scelta e dimensionamento del manufatto o dell'intervento; risultati dei calcoli geotecnici, conclusioni tecniche; procedimenti costruttivi e controlli. La relazione deve essere completa in tutti gli elaborati grafici ed analitici necessari per la precisa comprensione del progetto.

La relazione geologica definirà con preciso riferimento al progetto i lineamenti geomorfologici della zona, nonché gli eventuali processi morfogenici e i dissesti in atto o potenziali e la loro tendenza evolutiva, la successione litostratigrafica locale con definizione della genesi e distribuzione spaziale dei litotipi, del loro stato di alterazione e fessurazione e della loro degradabilità; preciserà inoltre i caratteri geostrutturali generali, la geometria e le caratteristiche delle superfici di discontinuità in genere e degli ammassi rocciosi in particolare, e fornirà lo schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea.

La relazione sarà corredata dagli elaborati grafici, carte e sezioni geologiche, ecc. e dalla documentazione delle indagini in sito ed in laboratorio, sia quelle appositamente effettuate, che quelle di carattere storico e di esperienza locale.

La caratterizzazione geotecnica del sottosuolo e la ricostruzione geologica debbono essere reciprocamente coerenti.

A tale riguardo la relazione geotecnica deve fare esplicito riferimento alla relazione geologica e viceversa.

Infine, successivamente al D.M. dell'1 marzo 1988 e alla relativa circolare con le istruzioni per l'applicazione del D.M., venne emanata la circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 218/24/3 del 9 gennaio 1996 contenente apposite istruzioni applicative per la redazione della relazione geologica e della relazione geotecnica. Se ne riporta di seguito il testo.

Con decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 11-3-1988 sono state approvate le *Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*.

L'applicazione di tali norme ha suscitato frequenti dubbi interpretativi circa le modalità di redazione delle relazioni geologica e geotecnica, anche in riferimento alle competenze professionali fra geologi e ingegneri, per cui vari quesiti sono stati formulati da amministrazioni pubbliche incaricate di approvare progetti, da ordini professionali e da associazioni di categoria.

La rilevanza e la delicatezza delle questioni sopracitate, con particolare riguardo alla sicurezza delle costruzioni ed alla tutela della pubblica incolumità, pongono l'obbligo a questa amministrazione di fornire i seguenti chiarimenti e precisazioni, nel rispetto dei pareri emessi recentemente, sullo specifico argomento, rispettivamente, dall'assemblea generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, nell'adunanza del 17-12-1993, e dal Consiglio di Stato, nell'adunanza generale del 2-6-1994.

Anzitutto, si rammenta che sia la relazione geologica, sia la relazione geotecnica, sono prescritte dal decreto in parola, per la realizzazione delle opere ivi indicate alle lettere E (manufatti di materiali sciolti), F (gallerie e manufatti sotterranei), G (stabilità dei pendii naturali e dei fronti di scavo), H (fattibilità geotecnica di opere su grandi aree, I (discariche e colmate), L (emungimenti da falde idriche), M (consolidamento di terreni) ed O (ancoraggi). Per la realizzazione degli interventi di cui alle lettere C (opere di fondazione), D (opere di sostegno) ed N (drenaggi e filtri) è invece richiesta soltanto la relazione geotecnica, salvo che gli interventi stessi ricadano in zone classificate sismiche o soggette a vincoli particolari; in tal caso sono richieste entrambe le relazioni.

Riguardo alla finalità ed ai contenuti delle relazioni in parola si precisa che la relazione geologica comprende, fondamentalmente, lo studio dell'inquadramento geologico dei luoghi sulla base delle conoscenze della geologia regionale, l'identificazione delle formazioni presenti nel sito; lo studio dei tipi litologici e della struttura e dei caratteri fisici del sottosuolo. Per effettuare tale studio e per fornire tali informazioni occorrono specifiche indagini geologiche, sul campo ed in laboratorio.

La relazione geologica, pertanto, prende in esame ed interpreta tutte le operazioni conoscitive riguardanti i caratteri naturali e fisici dei terreni e delle rocce riferite ad una fase che precede la definizione dei parametri tecnici di progetto; definizione, quest'ultima, che compete alla relazione geotecnica.

Ai fini della sottoscrizione dei relativi atti il geologo ha la competenza a redigere la relazione geologica con le relative caratterizzazioni oltre che a programmare ed interpretare le indagini geologiche necessarie.

Riguardo alle finalità ed ai contenuti della relazione geotecnica, questa ha lo scopo di definire il comportamento meccanico del volume di terreno che è influenzato, direttamente od indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che, a sua volta, influenza il comportamento del manufatto stesso (volume significativo).

Anche con riferimento al paragrafo B.5 del decreto ministeriale 11-3-1988 il contenuto della relazione geotecnica si riconduce ai seguenti punti essenziali:

- relazione sui criteri per l'impostazione delle indagini in sito ed in laboratorio, esposizione dei risultati ed interpretazione critica degli stessi; è bene precisare, in proposito, che le indagini geotecniche si differenziano da quelle geologiche e corredano la relazione geotecnica;
- caratterizzazione geotecnica del terreno interessato dall'opera, correlata con la relazione geologica. La caratterizzazione geotecnica consiste nella modellazione del terreno, da parte del progettista, con riguardo sia al tipo di terreno, sia al tipo di problema e alle caratteristiche dell'opera da realizzare; tale fase comporta anche la definizione numerica dei parametri caratteristici del modello adottato;

- calcolo degli sforzi e delle deformazioni, verifiche di stabilità del complesso terreno-struttura, studio delle modalità esecutive e relative prescrizioni, piano dei controlli in corso d'opera e in esercizio.

Le suddette tematiche rappresentano aspetti tra loro strettamente connessi od inscindibili dal contesto progettuale dell'intervento, di cui solo il progettista ha piena ed esclusiva responsabilità e pertanto la redazione della relazione geotecnica rientra nell'ambito della esclusiva competenza dello stesso progettista.

Il progettista potrà avvalersi, per lo specifico studio geotecnico, come per altri aspetti, della collaborazione di altri professionisti qualificati negli specifici settori, i quali potranno sottoscrivere la predetta relazione, unitamente al progettista medesimo.

1.2. I rapporti geotecnici secondo l'Eurocodice 7

1.2.1. La relazione sulle indagini

L'Eurocodice 7 ha introdotto una pleora di abbreviazioni nel lessico geotecnico come, ad esempio, per l'identificazione dei cinque stati limite ultimi che nelle NTC hanno mantenuto la stessa denominazione abbreviata dell'Eurocodice 7:

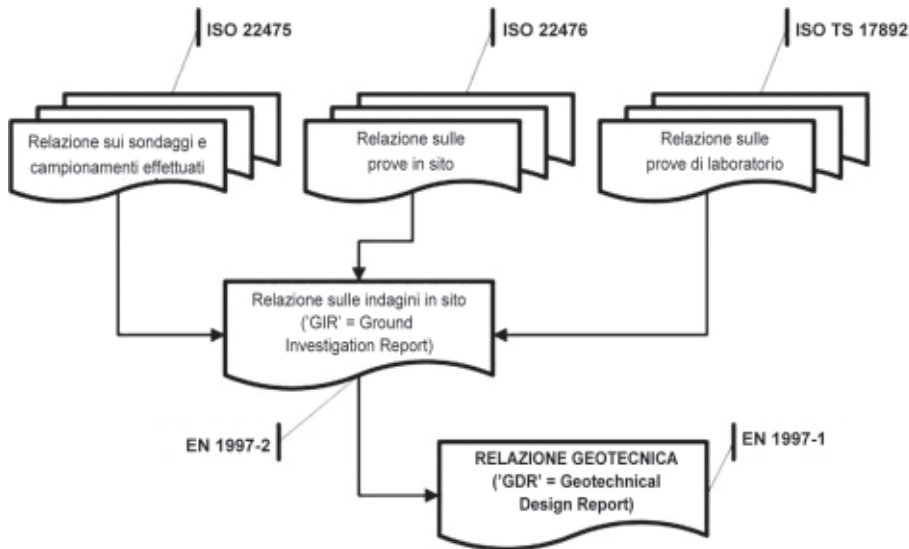
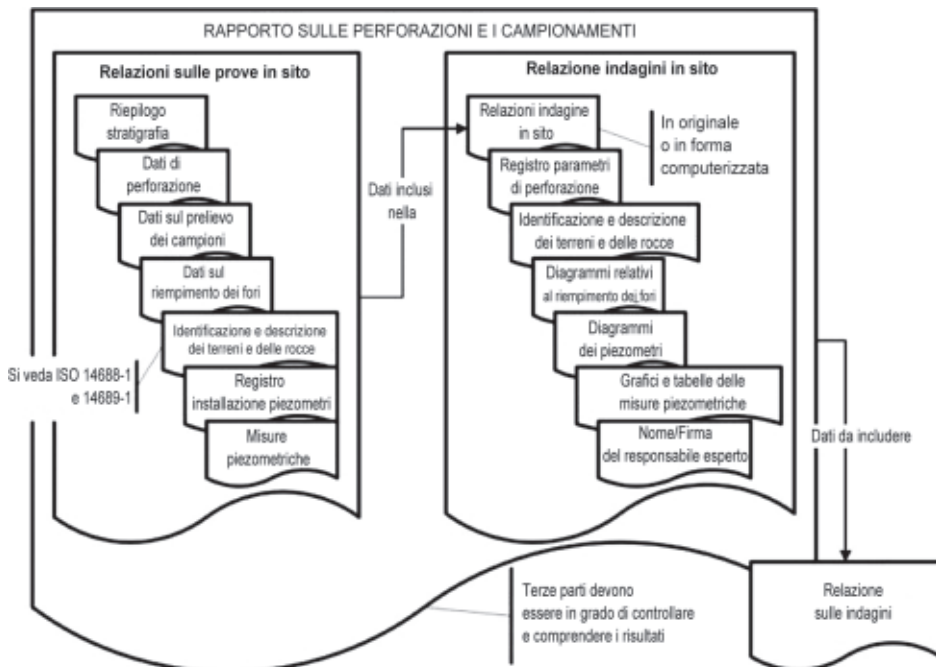
- EQU: perdita di equilibrio della struttura, del terreno o dell'insieme terreno-struttura, considerati come corpi rigidi;
- STR: raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali, compresi gli elementi di fondazione;
- GEO: raggiungimento della resistenza del terreno interagente con la struttura con sviluppo di meccanismi di collasso dell'insieme terreno-struttura;
- UPL: perdita di equilibrio della struttura o del terreno, dovuta alla sottospinta dell'acqua (galleggiamento);
- HYD: erosione e sifonamento del terreno dovuta a gradienti idraulici).

In questo paragrafo vengono introdotte altre due abbreviazioni:

- GIR (*Ground Investigation Report*): relazione sulle indagini;
- GDR (*Geotechnical Design Report*): relazione geotecnica di progetto.

Il legame fra tutte le diverse relazioni contemplate dall'Eurocodice 7 è illustrata nella figura 1.1. I metodi di campionamento e i rilievi piezometrici sono coperti dalla norma UNI EN ISO 22475. La norma UNI EN ISO 22475-1 fornisce indicazioni su come riportare i risultati dei sondaggi geognostici, su come effettuare i campionamenti e le misure dei livelli piezometrici. La figura 1.2 riepiloga i principali contenuti di questi rapporti.

A partire dall'inizio del 2008, sono stati pubblicati gli standard internazionali (ISO) per le prove geotecniche in sito relativamente alle prove penetrometriche standard effettuate nei sondaggi (*Standard penetration test*, STP) e alle prove penetrometriche dinamiche (norme EN ISO 22476-2 e EN ISO 22476-3). Altri standard sono stati predisposti per quanto concerne le prove penetrometriche statiche con la punta meccanica, elettrica e con piezocono, le prove pressiometriche, le prove dilatometriche, le prove scissometriche, le prove di permeabilità (Lefranc) nei terreni, le prove di permeabilità (Lugeon) in roccia, le prove di pompaggio.

Figura 1.1. Riepilogo delle diverse relazioni previste dall'Eurocodice 7 (fonte: Bond *et. al.*, 2008)Figura 1.2. Contenuti del rapporto sulle perforazioni geotecniche e sui campionamenti effettuati (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Le varie parti della norma UNI EN ISO 22476 indicano i requisiti delle relazioni che devono essere prodotte durante e dopo le prove in sito. La figura 1.3 riepiloga i contenuti del rapporto sulle indagini geotecniche in sito.

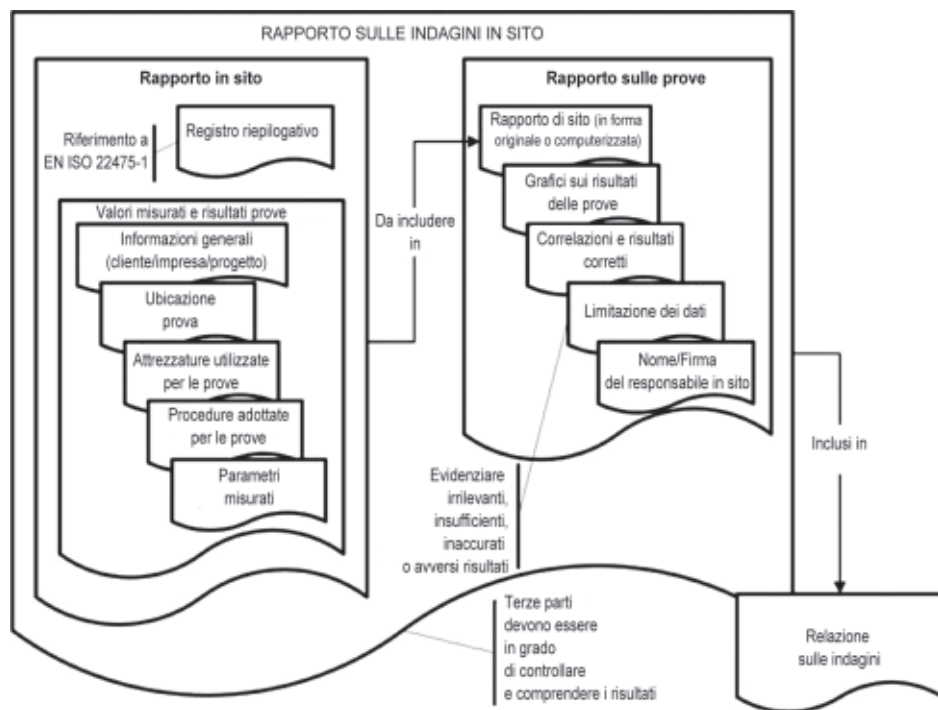


Figura 1.3. Contenuti del rapporto sull'indagine in sito (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Il rapporto sull'indagine in sito deve fornire un riepilogo delle condizioni stratigrafiche e delle condizioni geotecniche incontrate e un riepilogo di tutti i valori misurati e dei risultati ottenuti dalle prove effettuate, in modo tale che il lettore possa comprenderne e controllarne i risultati. Informazioni generali devono includere i nomi del cliente e dell'impresa; il nome del progetto, l'ubicazione e il numero; il nome e la firma della persona che ha eseguito le prove. Informazioni sulle prove devono includere il numero dei sondaggi, uno stralcio planimetrico del sito e le esatte coordinate relative alla posizione nota di ciascuna prova in sito. Il metodo di perforazione e il modello e le caratteristiche fisiche dell'attrezzatura utilizzata devono essere inclusi nel rapporto relativo alle indagini in sito, insieme con i dettagli sulle procedure adottate (data della prova, ragioni per un'eventuale interruzione della prova, riempimento del foro di perforazione, ecc.). Infine, le misure ottenute e registrate devono essere riportate in un apposito formato idoneo per controllarle. Il rapporto della prova include il rapporto in sito, ciascuno nel suo formato originale o elettronico, insieme con i grafici (non corretti) che mostrano i risultati della prova e, se necessario, i risultati corretti. Informazioni circa correzioni apportate e limitazioni dei dati (irrilevante, insufficiente, inaccurato, o risultati

negativi) devono essere anch'essi registrati. Il rapporto deve essere firmato dal responsabile delle prove in sito.

Le specifiche tecniche internazionali per quanto riguarda le prove di laboratorio sui terreni (UNI ISO TS 17892) sono state pubblicate nel 2003 e riviste recentemente per ulteriori tre anni. Esse forniscono indicazioni sulla determinazione del contenuto naturale d'acqua, dei limiti di Atterberg, della densità dei terreni a grana fine, della densità delle particelle utilizzando il picnometro, e su come effettuare l'analisi granulometrica e le prove di permeabilità. Inoltre vengono fornite indicazioni per effettuare la prova di infissione del cono (*fall cone test*), la prova di compressione non confinata dei terreni a grana fine e le prove triassiali non consolidate-non drenate (sinteticamente indicate come prove UU), consolidate-non drenate (indicate come prove CU) e consolidate-drenate (indicate come prove CD).

Le varie parti della norma ISO 17892 stabiliscono i requisiti per i rapporti che devono essere prodotti durante e dopo le prove di laboratorio. La figura 1.4 riepiloga le caratteristiche comuni di questi rapporti.

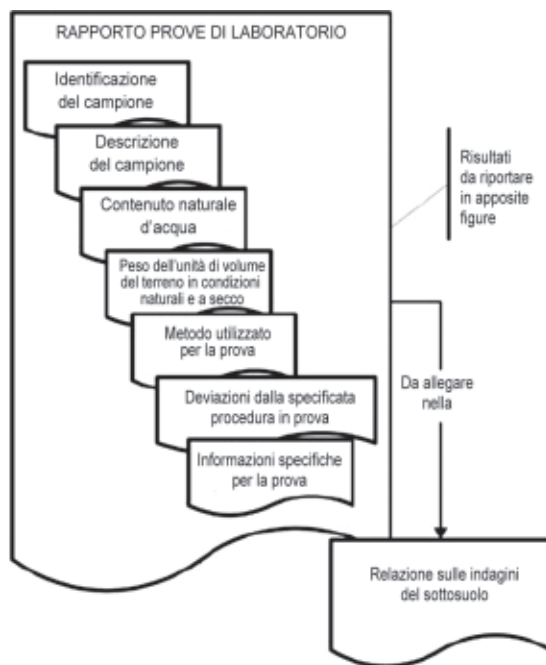


Figura 1.4. Contenuti del rapporto relativo alle prove di laboratorio (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

3.4. RELAZIONE SULLE INDAGINI DEL SOTTOSUOLO

3.4.1. REQUISITI

- (1)P I risultati dell'indagine geotecnica devono essere esposti in una relazione sulle indagini, che deve essere parte della relazione geotecnica di progetto descritta al punto 2.8.
- (2)P Si deve fare riferimento alla EN 1997-2 per informazioni sull'impiego delle prove di laboratorio e in sito per la determinazione dei parametri geotecnici.

(3) Si raccomanda che la relazione sulle indagini contenga generalmente le seguenti informazioni:

- presentazione di tutte le informazioni geotecniche disponibili, comprese quelle sugli aspetti geologici ed i dati pertinenti;
- valutazione dei dati da un punto di vista geotecnico con indicazione delle ipotesi formulate nell'interpretazione dei risultati delle prove.

Le informazioni possono essere presentate in un'unica relazione o come parti distinte.

3.4.2. PRESENTAZIONE DELLE INFORMAZIONI GEOTECNICHE

(1)P La presentazione delle informazioni geotecniche deve comprendere:

- un rapporto dettagliato sui lavori svolti in sito ed in laboratorio;
- documentazione dei metodi utilizzati per lo svolgimento delle indagini in sito e delle prove di laboratorio. La documentazione deve essere basata sui rapporti di prova descritti nella EN 1997-2.

(2) Si raccomanda inoltre che, il rapporto dettagliato comprenda le seguenti informazioni, quando pertinenti:

nominativi di tutti i consulenti ed subappaltatori;

- finalità ed estensione dell'indagine geotecnica;
- date di inizio e fine delle attività in sito e di laboratorio;
- ricognizione di campagna dell'area in cui ricade l'opera in progetto, con particolare attenzione a:
 - presenza di acqua del sottosuolo;
 - comportamento di strutture limitrofe;
 - affioramenti in cave e aree di prestito;
 - aree di instabilità;
 - difficoltà durante gli scavi;
 - storia del sito;
 - geologia del sito, compresa la presenza di faglie;
 - dati relativi ai rilievi topografici;
 - conoscenze acquisite da foto aeree disponibili;
 - esperienza locale sull'area di progetto;
 - conoscenze sul grado di sismicità dell'area;
 - procedure utilizzate per il campionamento, il trasporto e la conservazione dei campioni;
 - tipologia delle attrezzature di campagna utilizzate;
 - tabulati di dati relativi alle attività in sito e di laboratorio, e illustrazione delle osservazioni effettuate durante le indagini in sito da parte del personale addetto alla supervisione;
 - dati sull'oscillazione nel tempo della superficie freatica nei fori di sondaggio durante l'esecuzione delle attività di campagna e nei piezometri al termine dell'indagine;
 - compilazione delle colonne stratigrafiche, con la fotografia delle carote, la descrizione delle formazioni presenti nel sottosuolo basate sulle annotazioni di campagna e sui risultati delle prove di laboratorio;
 - la presenza, o la possibile presenza, di radon;
 - dati relativi alla suscettibilità al gelo dei terreni;
 - presentazione strutturata dei risultati delle prove in sito e di laboratorio in appendici.

3.4.3. VALUTAZIONE DELLE CONOSCENZE GEOTECNICHE

(1)P La valutazione delle conoscenze geotecniche deve comprendere, a seconda dei casi:

- una revisione delle attività in sito e di laboratorio. Eventuali limitazioni relative ai dati (per esempio, dati difettosi, irrilevanti, insufficienti o imprecisi) devono essere dichiarate e commentate. Nell'interpretazione dei risultati delle prove si devono considerare le procedure di campionamento, trasporto e conservazione dei campioni.

- Qualsiasi risultato delle prove particolarmente sfavorevole deve essere valutato con attenzione allo scopo di determinare se sia fuorviante o se rappresenti un fenomeno reale di cui si deve tenere conto nel progetto;
- una rassegna dei valori derivati per i parametri geotecnici;
 - eventuali proposte per ulteriori attività necessarie in sito e di laboratorio, con commenti che giustificano l'esigenza di tale lavoro aggiuntivo. Tali proposte devono essere avanzate con un programma dettagliato delle indagini integrative, con indicazione dei quesiti specifici a cui dare risposta.
- (2) Si raccomanda inoltre che, la valutazione dei dati geotecnici comprenda, se pertinente:
- tabulati e presentazione grafica dei risultati delle attività in sito e di laboratorio, in relazione ai requisiti progettuali e, se ritenuto necessario,;
 - istogrammi che illustrino il campo dei valori per i dati più significativi e la loro distribuzione;
 - profondità della superficie freatica e sue oscillazioni stagionali;
 - profili stratigrafici che evidenzino le diverse formazioni, presenti;
 - descrizioni dettagliate di tutte le formazioni comprese le rispettive proprietà fisiche e le caratteristiche di compressibilità e resistenza;
 - commenti sulle disomogeneità quali sacche e cavità;
 - il campo ed i gruppi di valori derivati dei dati geotecnici per ogni strato.

Nella figura 1.5 sono riepilogati i contenuti della relazione sulle indagini del sottosuolo; fisicamente il GIR può essere costituito da un singolo volume o da numerosi volumi in funzione delle dimensioni e natura dell'indagine.

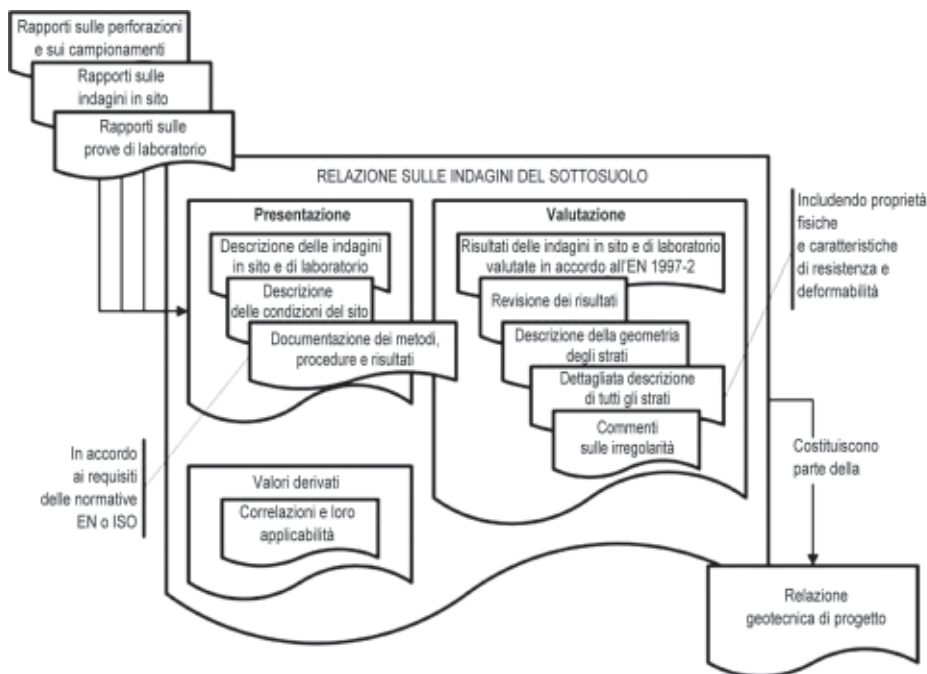


Figura 1.5. Contenuti della relazione sulle indagini del sottosuolo (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Il GIR deve fornire un dettagliato rendiconto di tutte le indagini in sito ed in laboratorio realizzate in accordo con gli standard EN ed ISO utilizzati. La relazione deve documentare i metodi e le procedure utilizzate e i risultati ottenuti dagli studi di letteratura, dai campionamenti effettuati, dalle prove in sito, dalle misure piezometriche e dalle prove di laboratorio. Il dettagliato rendiconto dovrebbe includere una descrizione del sito e della sua topografia e in particolare: evidenza della presenza di acquiferi, di aree di instabilità, difficoltà durante lo scavo, esperienza locale nell'area e altri otto punti riportati, come checklist, nell'EN 1997-2 paragrafo 6.2(2). I risultati delle indagini in sito e di laboratorio devono essere inclusi nel GIR nell'appropriato standard europeo (EN) o internazionale (ISO) utilizzato per l'effettuazione delle indagini.

Per quanto concerne la valutazione dell'informazione geotecnica essa è definita in due principi e sei regole applicative nel paragrafo 6.3 dell'EN 1997-2. Il *primo principio* richiede che il GIR debba provvedere a una valutazione e revisione critica dei risultati delle prove in sito e in laboratorio; una dettagliata descrizione di tutti gli strati, inclusa la loro geometria, le proprietà fisiche, e le caratteristiche di resistenza e deformabilità; e commenti sulla possibile presenza di irregolarità quali cavità e discontinuità. Il *secondo principio* garantisce che i risultati delle prove in sito e in laboratorio siano interpretate tenendo conto di diversi fattori quali: la presenza di falda; il tipo di terreno, il campionamento, il confezionamento, il trasporto, e la preparazione dei provini in laboratorio. Inoltre, esso richiede che il modello del terreno sia rivisitato alla luce dei risultati delle prove. Le sei *regole applicative* forniscono una guida per la presentazione dei dati, per ricavare i parametri geotecnici, la valutazione delle anomalie, il raggruppamento di strati simili e l'individuazione dei limiti fra le varie unità geologiche attraverso il sito.

È importante sottolineare che l'EN 1997-2 richiede che siano riportate nel GIR le appurate limitazioni dei risultati (EN 1997-2 paragrafo 6.1(5)P). A questo riguardo, i tecnici (geologi e ingegneri geotecnici) possono essere riluttanti a evidenziare limitazioni nei dati e nei risultati ottenuti, temendo che possano essere interpretate come una mancanza relativamente alla piena ottemperanza agli obblighi contrattuali del loro contratto di consulenza o, peggio ancora, che possa essere messa in discussione la loro competenza. Tuttavia, affinché i dati possano essere utilizzati correttamente in futuro, è di fondamentale importanza che siano accuratamente registrate tutte le difficoltà incontrate. Per esempio, quando delle prove penetrometriche dinamiche STP vengono effettuate sotto falda, è importante registrare se il livello dell'acqua nel sondaggio è mantenuto al di sopra del livello presente nel terreno circostante. Se questo non è il caso, allora si potrebbero ottenere dei valori del numero dei colpi N_{SPT} artificialmente bassi a causa dello squilibrio della pressione dell'acqua che causa un allentamento del terreno alla base del foro. Ogni correlazione che è stata utilizzata per ricavare i parametri geotecnici deve essere documentata nel GIR. Tipicamente questo può includere le tipiche correlazioni fra il numero di colpi della prova SPT e il modulo di Young, fra l'indice di consistenza e la resistenza al taglio in condizioni non drenate o fra il limite plastico e l'indice CBR (*California Bearing Ratio*).

1.2.2. La relazione geotecnica di progetto

I contenuti della relazione geotecnica di progetto (come principi) sono indicati nel paragrafo 2.8 dell'EN 1997-1; a questo riguardo, nel sottoparagrafo 2.8(1)P si afferma che le ipotesi, i

dati, i metodi di calcolo e i risultati delle verifiche di sicurezza e di funzionalità, devono essere annotati nella relazione geotecnica di progetto. I contenuti del GDR (*Geotechnical Design Report*) sono illustrati nella figura 1.6.

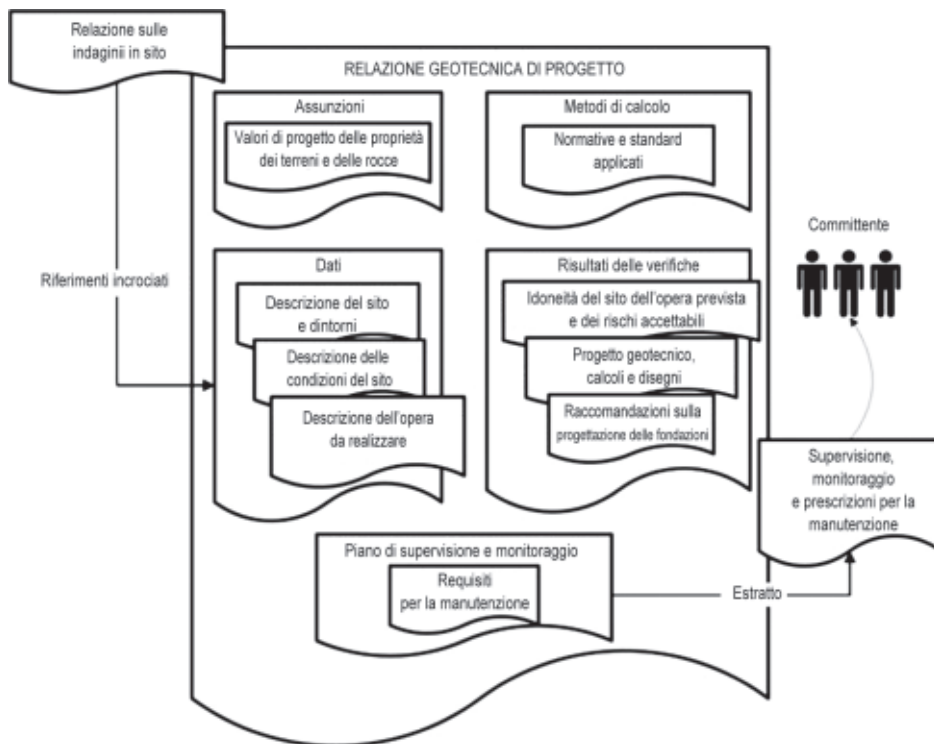


Figura 1.6. Contenuti della relazione geotecnica di progetto (GDR) (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Argomenti che dovrebbero normalmente essere contenuti nel GDR comprendono i valori di progetto delle proprietà dei terreni e delle rocce, con la necessaria giustificazione (assunzioni); la descrizione del sito e delle zone circostanti; le condizioni dei terreni; le opere geotecniche proposte incluse le azioni che saranno applicate dalle opere ai terreni; i codici e gli standard che sono stati adottati (metodo di calcolo); le considerazioni circa l'idoneità del sito con riferimento all'opera proposta e ai rischi accettabili; i calcoli geotecnici di progetto e gli elaborati grafici, le raccomandazioni per la progettazione delle fondazioni (risultati delle verifiche). Il GDR dovrebbe riferirsi alla relazione sulle indagini del sottosuolo, dove appropriato.

La supervisione, il monitoraggio e i requisiti per la manutenzione dell'opera devono essere inclusi nel GDR e un estratto dei requisiti deve essere dato al committente; questo è simile a ciò che si aspetta quando ad esempio si compra una macchina da un venditore attendibile: viene fornito un manuale per il proprietario che specifica la cura e l'attenzione che deve essere data alla nuova macchina acquistata al fine di ottenere le attese prestazioni del modello acquistato (EN 1997-1 paragrafo 2.8(4)P e EN 1997-1 paragrafo 2.8(6)P).

1.3. L'indagine geotecnica e l'Eurocodice 7

L'affidabilità di ogni progettazione geotecnica dipende dalla qualità dell'indagine geotecnica e dalla corretta interpretazione dei dati ottenuti. Conseguentemente, la sezione 3 dell'Eurocodice 7 (parte 1) sulla progettazione delle strutture geotecniche (EN 1997-1), che fornisce le generali indicazioni per pianificare le indagini geotecniche e valutare i parametri geotecnici, spiega in modo esaustivo come debba sempre essere effettuata un'attenta raccolta, registrazione e interpretazione delle informazioni geotecniche.

Le specifiche indicazioni per le prove in sito e di laboratorio e per l'interpretazione delle prove e la determinazione dei parametri geotecnici sono fornite dalla parte 2 dell'Eurocodice 7 (Eurocode 7 – *Geotechnical design – part 2: ground investigation and testing*). Questa parte (EN 1997-2) definisce la seguente gerarchia delle indagini geotecniche:

- indagini geotecniche costituite da indagini su terreni simili o da altre informazioni relative a sito del progetto;
- indagini sui terreni, che sono indagini in sito, o prove di laboratorio e ricerche di letteratura finalizzate ad ottenere informazioni geologiche e geotecniche;
- indagini in sito, che sono indagini dirette (sondaggi, campionamenti, pozzetti esplorativi) e indagini indirette (prove in sito, come ad esempio le prove penetrometriche statiche (CPT)).

Come affermato nella clausola 3.2.1(1)P, l'indagine geotecnica deve fornire sufficienti dati per quanto concerne le condizioni dei terreni e le condizioni idrogeologiche in corrispondenza del sito e nelle sue immediate vicinanze allo scopo di ottenere un'appropriata descrizione delle proprietà essenziali dei terreni e una valutazione attendibile dei valori caratteristici dei parametri geotecnici da utilizzare nei calcoli e verifiche progettuali. Perciò, l'Eurocodice 7 – Parte 2 afferma che gli obiettivi dell'indagine geotecnica devono fornire una piena descrizione di tutte le condizioni dei terreni rilevanti per quanto concerne i lavori previsti e per stabilire i parametri geotecnici rilevanti. Il tipo e l'estensione dell'indagine geotecnica dipende dalla complessità delle condizioni del terreno. L'Eurocodice 7 (EN 1997-1) considera tre differenti fasi dell'indagine geotecnica:

- indagini preliminari
- indagini di progetto
- indagini di controllo.

Per quanto concerne le indagini preliminari (si vedano le clausole 3.2.2.(1)P e 3.2.3(1)P di EN 1997-1) sono indagini condotte durante la fase di prefattibilità o di fattibilità con la finalità di: valutare la generale idoneità del sito; effettuare una comparazione fra diversi siti, se rilevante; pianificare la progettazione e le indagini di controllo e indicare le cave di prestito, se pertinenti. Le indagini preliminari comprendono:

- studi a tavolino sulla base delle informazioni geotecniche e geologiche relative alle condizioni dei terreni includendo l'esame di eventuali rapporti geotecnici relativi a precedenti indagini geotecniche condotte nelle vicinanze;
- sopralluoghi in sito;
- considerazioni sull'esperienza costruttiva maturata nelle vicinanze dell'area del progetto.

Per quanto riguarda le indagini di progetto (clausola 3.2.3(6) P di EN 1997-1), esse costituiscono le principali indagini effettuate al fine di ottenere i dati geotecnici necessari per un'adeguata progettazione sia delle opere provvisoriale sia di quelle definitive. Le indagini per la progettazione sono effettuate anche per fornire le informazioni necessarie per la costruzione e per identificare ogni difficoltà che può sorgere durante la costruzione. L'indagine per il progetto normalmente include prove in sito, prelievo di campioni dai terreni per le prove di laboratorio. Le indagini di progetto dovrebbero essere effettuate almeno attraverso tutte le formazioni che sono considerate rilevanti per il progetto, come si vedrà più avanti nella parte seconda dell'Eurocodice 7 (EN 1997-2) sono fornite delle indicazioni sul numero, distanza e profondità delle indagini da effettuare.

Infine le indagini di controllo (clausole 4.2.2.(1)P e 4.2.3(1)P di EN 1997-1) costituiscono una vera e propria ispezione durante la fase di costruzione del progetto per controllare e confrontare le effettive condizioni dei terreni incontrate durante la realizzazione dei lavori con quelle previste in fase di progetto. Le clausole dell'EN 1997-1 nella sezione 3 che si occupa delle indagini geotecniche si riferiscono solamente alle indagini preliminari e a quelle per il progetto; mentre non ci sono particolari indicazioni per le indagini di controllo in corso d'opera. Le richieste generali per le ispezioni e controlli durante la costruzione sono presentate nella sezione 4 dell'EN 197-1 che si occupa di supervisione durante la costruzione, monitoraggio e manutenzione e includono la necessità di ispezionare costantemente le condizioni del terreno e di registrare i risultati di tali ispezioni di controllo. Nelle indagini di controllo, prove aggiuntive possono essere necessarie per verificare che le reali condizioni dei terreni incontrati, ad esempio, durante gli scavi, la qualità dei materiali da costruzione utilizzati e le modalità dei lavori corrispondano a quanto assunto in fase di progettazione. La bontà del progetto deve pertanto essere valutata costantemente sulla base dei risultati delle ispezioni e delle prove effettuate. Le indagini di controllo sono di primaria importanza nel caso si adotti il metodo osservazionale.

Tornando alla parte 2 dell'Eurocodice che si occupa delle indagini geotecniche e delle prove geotecniche, essa è divisa in 6 sezioni e in 24 annessi, come illustrato nella figura 1.7.

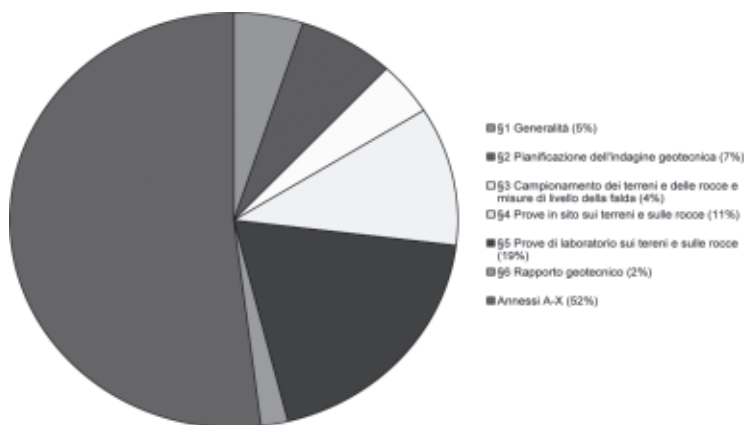


Figura 1.7. Contenuti dell'Eurocodice 7 – Parte 2 (EN 1997-2)

EN 1997-2 fornisce dettagliate regole per le indagini geotecniche, specifiche per l'esecuzione delle prove, indicazioni per l'interpretazione delle prove e per la definizione del modello geotecnico del terreno ed esempi di metodi di calcolo basati sulle prove in sito e di laboratorio. Inoltre, EN 1997-2 ha numerosi riferimenti a dei nuovi e corposi standard internazionali ed europei preparati congiuntamente da ISO (*International Standard Organization*) e da CEN (*European Committee for Standardization*) e riepilogati nella figura 1.8.

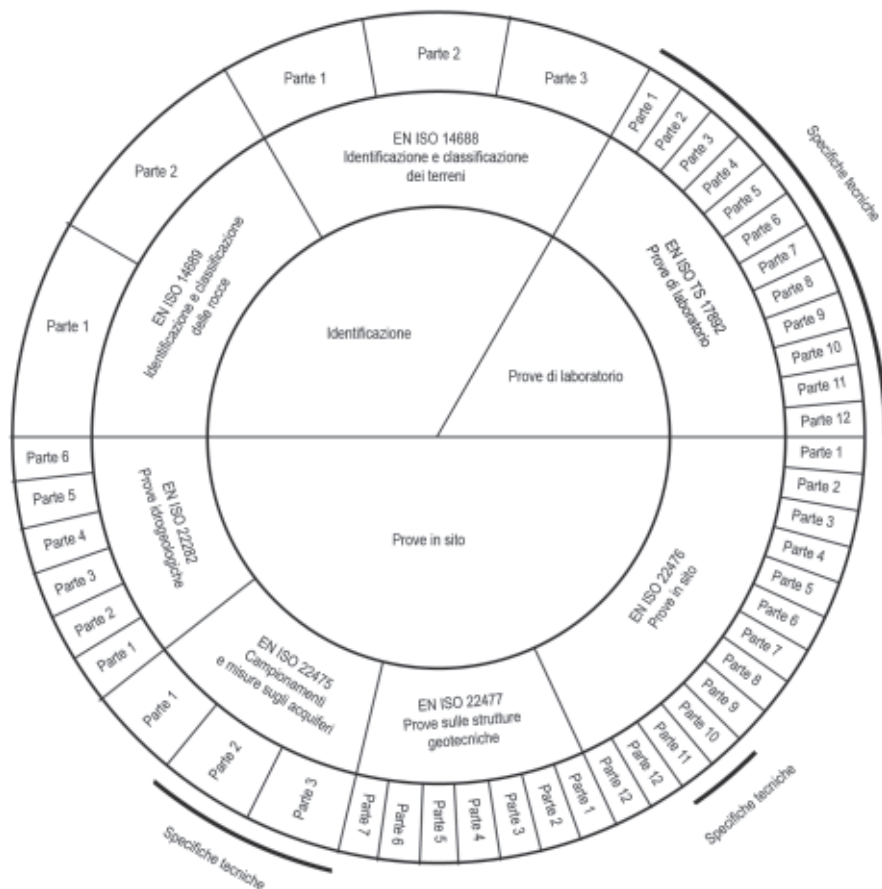


Figura 1.8. Standard per le indagini geotecniche e le prove in sito e di laboratorio (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Con riferimento alla figura 1.8, due gruppi di standard (EN ISO 14688 e 14689) si riferiscono all'identificazione e alla classificazione dei terreni e delle rocce. Quattro gruppi di standard (EN ISO 22282, 22475, 22476 e 22477) si occupano delle prove in sito. Infine, un gruppo di standard (EN ISO TS 17892) si occupa delle prove di laboratorio. Ciascuno standard entro ciascun gruppo è diviso in un certo numero di parti, come mostrato nel cerchio più esterno

di figura 1.2. Complessivamente si hanno pertanto circa cinquanta standard o specifiche. La relazione fra l'EN 1997-2 e questi standard complementari è mostrata nella figura 1.9. Il diagramma mostra il riferimento fra le diverse sezioni dell'EN 1997-2 e gli standard EN ISO.

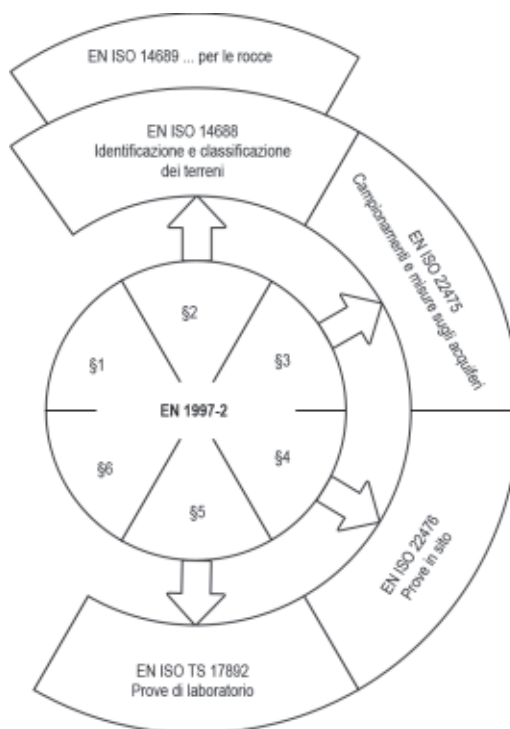


Figura 1.9. Collegamento tra EN 1997-2 e gli standard complementari (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

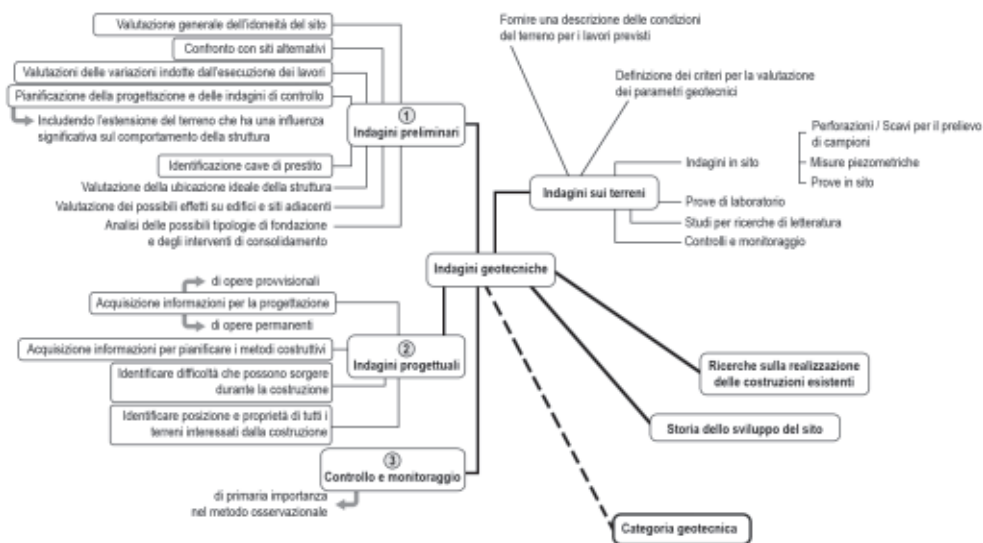
Lo scopo dell'indagine geotecnica è quello di stabilire le condizioni dei terreni, delle rocce e della falda; determinare le proprietà dei terreni e delle rocce e raccogliere rilevanti aggiuntive conoscenze sul sito. Nell'Eurocodice 7 – parte 1 si afferma che:

l'indagine geotecnica dovrà provvedere dati sufficienti relativamente al terreno e alle condizioni della falda [...] per un'appropriata descrizione delle proprietà essenziali del terreno ed una realistica valutazione dei parametri caratteristici del terreno da utilizzare nei calcoli e nelle verifiche progettuali.¹

Con riferimento a quanto sopra illustrato, lo scopo dell'indagine geotecnica è illustrato nella figura 1.10. L'entità dell'indagine è relazionata alle categorie geotecniche alle quali il progetto è stato assegnato che di seguito si descrivono.

¹ EN 1997-1 paragrafo 3.2.1(1)P.

La relazione geologica e geotecnica

Figura 1.10. Scopo dell'indagine geotecnica (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Nell'Eurocodice 7, tre *categorie geotecniche*, indicate come Categorie 1, 2 e 3, sono state introdotte per tenere conto dei differenti livelli di complessità della progettazione geotecnica e per stabilire dei requisiti minimi per l'estensione e i contenuti dell'indagine geotecnica, dei calcoli, delle verifiche e dei controlli durante la costruzione per raggiungere la necessaria credibilità e affidabilità dello stesso progetto. I fattori che influenzano la complessità della progettazione geotecnica includono:

- la natura e le dimensioni della struttura;
- le condizioni con riferimento ai manufatti presenti nelle immediate circostanze, per esempio strutture in prossimità del progetto, presenza di sottoservizi o infrastrutture, ecc.;
- condizioni geotecniche dei terreni;
- presenza della falda;
- sismicità regionale;
- influenza dell'ambiente come ad esempio idrologia, superficie piezometrica, subsidenza, variazioni stagionali del contenuto naturale d'acqua.

L'impiego delle categorie geotecniche non è una richiesta della norma europea (EC7) in quanto è presentato come una regola applicativa, piuttosto che come un principio; è quindi un'indicazione opzionale piuttosto che obbligatoria. Il vantaggio delle categorie geotecniche è che esse forniscono un inquadramento per classificare i differenti livelli di rischio nella progettazione geotecnica e per selezionare appropriati livelli di affidabilità per tenere conto dei differenti livelli di rischio.

Il rischio geotecnico è una funzione di due fattori: i pericoli geotecnici e la vulnerabilità delle persone e delle strutture a specifici pericoli. Con riferimento ai punti di complessità progettuale sopra elencati, i punti 1 e 2 (struttura e quanto presente nelle immediate vicinanze) si

riferiscono alla vulnerabilità mentre i punti 3-6 (condizioni del terreno, falda, sismicità e ambiente) si riferiscono a dei pericoli geotecnici. I vari livelli di complessità di questi fattori, in relazione alle differenti categorie geotecniche e agli associati rischi geotecnici, sono mostrati nella tabella 1.1 (Orr e Farrell, 1999).

È responsabilità del progettista geotecnico garantire, applicando appropriatamente le indicazioni dell'Eurocodice 7 e con l'adozione di idonee misure di gestione, che le strutture abbiano la richiesta affidabilità ovvero che si abbia sufficiente margine di sicurezza nei confronti del collasso come risultato di ogni potenziale pericolo.

Nella progettazione geotecnica nell'ambito dell'Eurocodice 7, la distinzione fra le categorie geotecniche è legata al grado di esperienza richiesto, alla natura ed estensione dell'indagine geotecnica e al tipo di calcoli e analisi che devono essere effettuate, come mostrato nella tabella 1.2, ripresa da Orr e Farrell (1999).

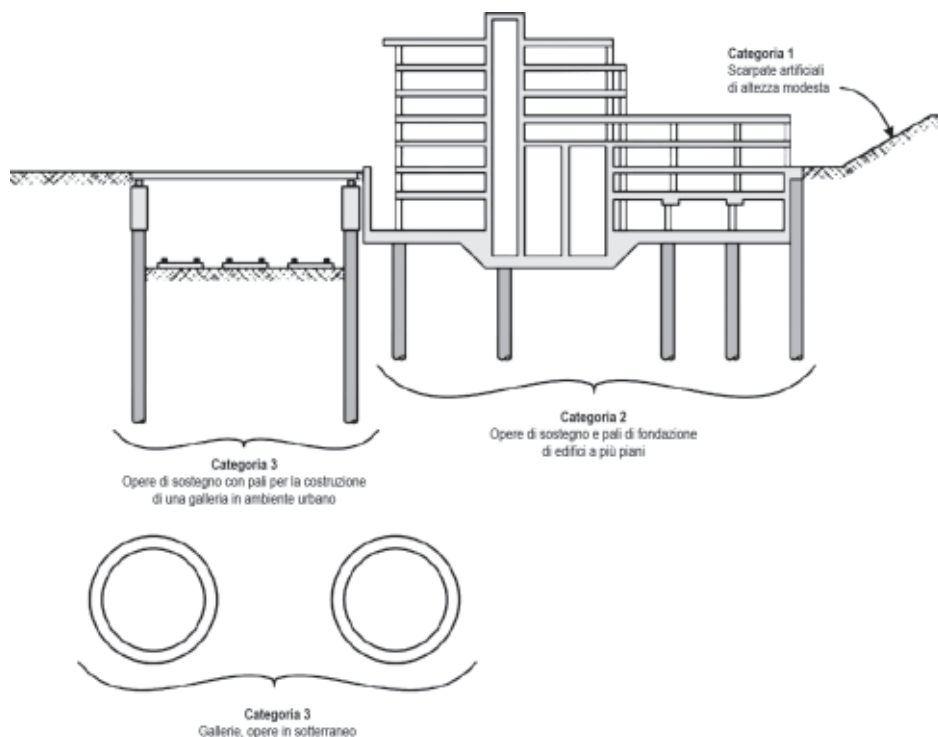
Tabella 1.1. Categorie geotecniche relativamente ai rischi geotecnici e ai livelli di vulnerabilità

Fattori da considerare	Categorie geotecniche		
	CG1	CG2	CG3
Pericoli geotecnici	Bassi	Moderati	Alti
Condizioni del terreno	Note da esperienza comparabile e facili non interessando terreni teneri, sciolti o compressibili o su pendii	Condizioni del terreno e proprietà che possono essere determinate da indagini e prove di routine	Condizioni del terreno inusuali o eccezionalmente difficili che richiedono indagini e prove non di routine
Situazione della falda	Nessuno scavo al di sotto della falda, eccetto dove l'esperienza indica che non vi sono problemi	Nessun rischio di danni senza precedenti segnali di criticità a causa di abbassamento della falda o di drenaggio	Elevate pressioni dell'acqua ed eccezionali condizioni della falda freatica, ovvero presenza di strati con diversi valori di permeabilità
Sismicità regionale	Aree senza o con un rischio sismico molto basso	Rischio sismico moderato con la possibilità di applicare il codice sismico (EC8)	Aree di elevato rischio sismico
Influenza dell'ambiente	Rischio trascurabile dei problemi dovuto alla presenza della falda, alla possibile subsidenza, presenza di sostanze chimiche, ecc.	Fattori ambientali coperti da metodi progettuali di routine	Fattori ambientali complessi o difficili che richiedono metodi progettuali speciali
Vulnerabilità	Bassa	Moderata	Elevata
Natura e dimensioni della struttura e suoi elementi	Piccole e relativamente semplici strutture o costruzioni. Strutture non sensibili nei confronti di eventi sismici in aree sismiche	Tipi di strutture convenzionali con nessun rischio anormale	Strutture molto larghe o inusuali e strutture che implicano rischi anormali. Strutture molto sensibili in aree sismiche
Presenza di manufatti in prossimità dell'opera da progettare	Rischio trascurabile di danno da o in corrispondenza delle strutture più prossime all'opera o sottoservizi e rischi trascurabili per la vita utile dell'opera	Possibile rischio di danno alle strutture o sottoservizi in prossimità della struttura da realizzare, per esempio, a causa degli scavi o dell'esecuzione di pali	Strutture molto larghe o inusuali e strutture che implicano rischi anormali. Strutture molto sensibili in aree sismiche. Elevati rischi di danno a strutture e sottoservizi in prossimità dell'opera da costruire
Rischi geotecnici	Bassi	Moderati	Elevati

Non è necessario classificare tutte le parti di un progetto in una categoria geotecnica. Infatti, molti progetti possono comprendere un misto di opere di categoria geotecnica 1 e 2 (e in alcuni casi 3), come illustrato nella figura 1.11.

Tabella 1.2. Indagini, progetto e tipologie strutturali relativamente alle categorie geotecniche

	Categoria geotecnica		
	1	2	3
Esperienza richiesta	Persone con appropriata e comparabile esperienza	Persone di esperienza qualificata	Specialisti geotecnici di comprovata esperienza
Indagini geotecniche	Indagini qualitative comprendenti dei pozzi esplorativi	Indagini di routine comprendenti sondaggi e prove in sito e di laboratorio	Indagini aggiuntive più sofisticate e prove di laboratorio
Procedure progettuali	Prescrizioni progettuali, procedure di progettazione semplificate basate sull'esperienza o su valori di capacità portante pubblicati. Calcoli di stabilità o di cedimento possono non essere necessari	Calcoli di routine per la stabilità ed i cedimenti basati sulle procedure di progettazione indicate dall'EC7	Analisi più sofisticate
Esempi di strutture	- strutture semplici ad 1 o 2 piani, edifici ad uso agricolo caratterizzati da carichi sui pilastri non superiori a 250 kN e da un massimo carico applicato da muri portanti di 100 kN/m; - muri di sostegno e opere di sostegno di scavi dove la differenza di quota fra monte e valle non è superiore ai 2 m; - piccoli scavi per drenaggio e messa in opera di tubazioni.	- convenzionali; - fondazioni dirette e pali di fondazione; - muri ed altre opere di sostegno; - spalle e fondazioni di ponti; - rilevati e opere in terra; - ancoraggi e altri sostegno di sostegno; - gallerie in rocce dure e poco fratturate.	- edifici molto grandi; - grandi ponti e viadotti; - scavi profondi; - rivelati su terreni teneri; - gallerie in terreni teneri o molto permeabili.

Figura 1.11. Esempio di progetto che implica differenti categorie geotecniche (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

L'Eurocodice 7 fornisce esempi di strutture appartenenti alle tre categorie geotecniche. La categoria geotecnica influenza il livello di supervisione e monitoraggio trattato nella sezione 4 dell'EN 1997-1. Le strutture della categoria geotecnica 1 possono essere progettate e costruite come abitualmente, in quanto non implicano inusuali caratteristiche o circostanze. Gli esempi relativi alla categoria geotecnica 2 costituiscono il lavoro quotidiano di molti uffici geotecnici di progettazione, che richiedono impegno ma non inusuale progettazione e costruzione. La progettazione di strutture appartenenti alla categoria 3 richiede un impegno particolare a causa della loro eccezionale natura; le parole chiave sono “grande ed inusuale”, “anormale o eccezionalmente difficoltoso”, “altamente sismico”, “probabilmente instabile”, ecc. L'impegno e lo scopo dell'indagine geotecnica devono riflettere la categoria geotecnica della struttura, come riepilogato nella tabella 1.3. Poiché le condizioni del terreno possono influenzare la categoria da scegliere per la struttura o per parte di essa dovrebbe essere stabilita nelle prime fasi dell'indagine (o attraverso uno studio preliminare bibliografico o in sito).

Tabella 1.3. Indicazioni per l'indagine geotecnica in funzione della categoria geotecnica

Categoria geotecnica	Rischio	Prescrizioni per l'indagine geotecnica
1	Trascurabile	Normalmente limitata (verifiche spesso basate sull'esperienza locale)
2	Non eccezionale	Indagine sulla base delle indicazioni di EN 1997-2
3	Eccezionale	Indagini almeno della stessa entità di quelle condotte per la Categoria 2. Le circostanze che possono portare ad assegnare un progetto alla Categoria 3 possono rendere necessaria una indagine addizionale e all'effettuazione di prove più sofisticate

Sulla base delle categorie geotecniche sopra indicate e con particolare riferimento alla Categoria 2, l'EN 1997-2 fornisce indicazioni sulle modalità esecutive e sul numero di prove da eseguire. Nell'annesso B.3 dell'EN 1997-2 vengono fornite delle linee guida per la spaziatura dei punti di indagine per le indagini geotecniche, come riassunto nella tabella 1.4.

Tabella 1.4. Indicazioni di EN 1997-2 per le verticali di indagine

Struttura	Spaziatura	Disposizione planimetrica
Elevate e industriali	15-40 m	Griglia
Larghe aree	≤ 60 m	Griglia
Lineari (strade, ferrovie, canali, tubazioni, dighe, gallerie, opere di sostegno)	20-200 m	-
Dighe e sbarramenti	25-75 m	Sezioni verticali
Speciali (ponti, serbatoi, fondazioni di macchine vibranti)	2-6 per fondazione	

Linee guida sulla spaziatura ed entità delle verticali di indagine possono essere trovate anche in altre pubblicazioni; tuttavia, le indicazioni dell'Eurocodice 7 possono essere considerate un punto di partenza per impostare un'indagine geotecnica, fermo restando i necessari adattamenti per tenere conto della specificità di ogni sito. In particolare la spaziatura delle verticali di indagine necessita di riflettere le attese variazioni della geologia sottostante nel sito in oggetto così come il tipo e dimensioni della struttura prevista. Sempre nell'annesso B3 dell'EN 1997-2 vengono fornite delle raccomandazioni sulla minima profondità alla quale si deve spingere

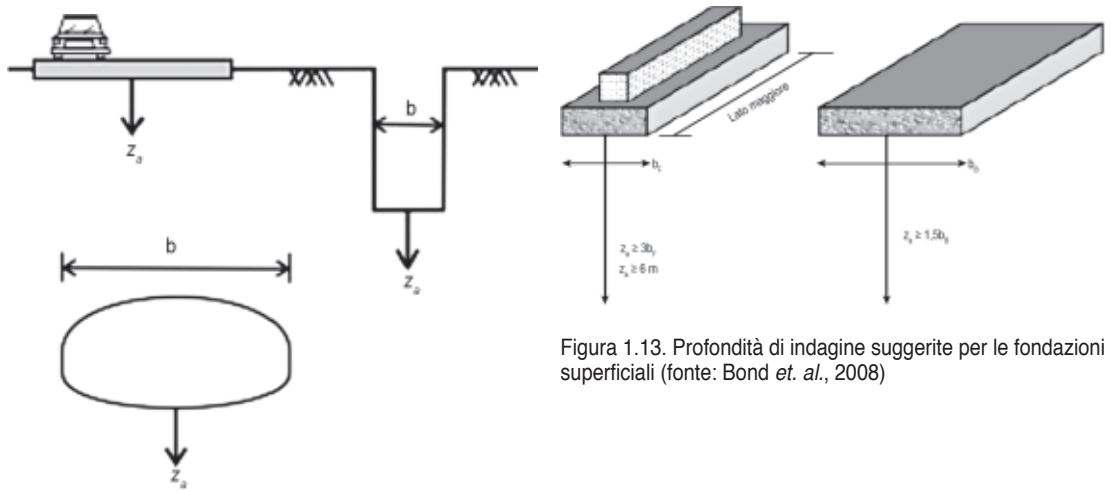


Figura 1.13. Profondità di indagine suggerite per le fondazioni superficiali (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

Figura 1.12. Minima profondità di indagine al di sotto di strade (in alto a sinistra), trincee (in alto a destra) e (in basso) gallerie e caverne (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

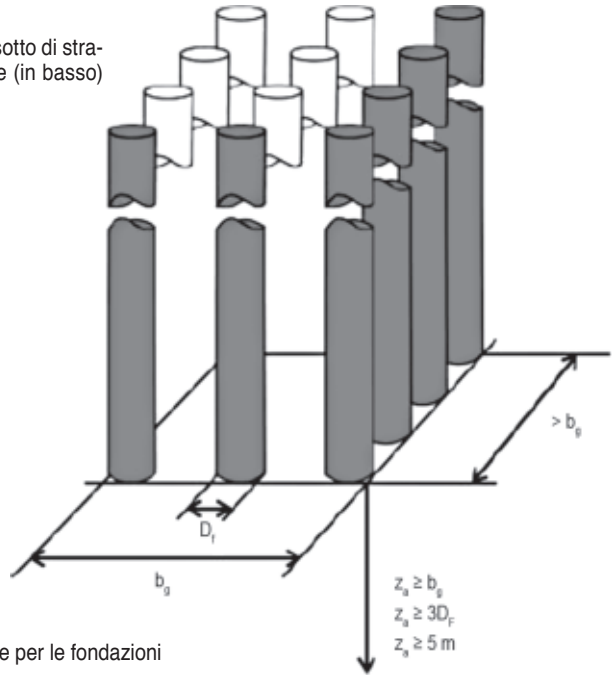


Figura 1.14. Profondità di indagine suggerite per le fondazioni su pali (fonte: Bond *et. al.*, 2008)

l'indagine al di sotto del punto più basso di imposta di una struttura di un'opera civile. La figura 1.12 illustra alcune di queste raccomandazioni. La minima profondità di esplorazione per strade (e aeroporti) è:

$$z_a \geq 2 \text{ m}$$

per trincee (e tubazioni) si ha:

$$z_a \geq 2 \text{ m e } z_a \geq 1.5 b$$

per piccole gallerie e caverne:

$$z_a \geq 2 \text{ m}$$

dove b è la larghezza della struttura come definita nella figura 1.12.

La scelta della profondità dell'indagine necessita di prendere in considerazione altri fattori oltre ai criteri di tipo geometrico, come per la definizione della spaziatura delle verticali di indagine, non è generalmente necessario penetrare negli strati rocciosi per più di 65 m senza che il carico previsto sia eccezionalmente elevato o che la geologia possa suggerire la presenza di strati significativamente scadenti al di sotto del carico di applicazione. Inoltre, è normale limitare l'indagine a profondità in corrispondenza delle quali l'incremento di tensione, dovuto al carico applicato dalla fondazione, è inferiore al 10% della tensione geostatica. Le figure 1.13 e 1.14 riportano, sempre dall'EN 1997-2, le profondità delle indagini suggerite per le fondazioni dirette e le fondazioni su pali.

1.4. L'indagine geotecnica e le nuove norme tecniche per le costruzioni (NTC 2008)

Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento devono riguardare il volume significativo di cui al paragrafo 3.2.2 (per volume significativo di terreno si intende 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.

Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e della caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzato all'analisi quantitativa di uno specifico problema geotecnico. È responsabilità del progettista la definizione del piano delle indagini, la caratterizzazione e la modellazione geotecnica. Le indagini e le prove devono essere eseguite e certificate dai laboratori di cui all'art. 59 del D.P.R. 6.6.2001, n. 380. I laboratori su indicati fanno parte dell'elenco depositato presso il Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture. Nel caso di costruzioni o di interventi di modesta rilevanza, che ricadano in zone ben conosciute dal punto di vista geotecnico, la progettazione può essere basata sull'esperienza e sulle conoscenze disponibili, ferma restando la piena responsabilità del progettista su ipotesi e scelte progettuali. Il piano delle indagini specifiche sui terreni e sulle rocce nel sito di interesse deve essere definito ed attuato sulla base dell'inquadramento geologico della zona e in funzione dei dati che è necessario acquisire per pervenire ad una ricostruzione geologica di dettaglio che possa risultare adeguata ed utile per la caratterizzazione e la modellazione geotecnica del sottosuolo.

Le indagini devono essere sviluppate secondo gradi di approfondimento e di ampiezza commisurati alle diverse fasi attraverso le quali si sviluppa il progetto. Per definire il profilo geotecnico, le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e il regime delle pressioni interstiziali, devono essere eseguite specifiche indagini, in sito e in laboratorio, secondo un programma definito dal progettista in base alle caratteristiche dell'opera in progetto e alle presumibili caratteristiche del sottosuolo. Nel caso di opere di notevole mole e importanza dal punto di vista della sicurezza o che interessino terreni con caratteristiche meccaniche scadenti, è opportuno effettuare il controllo del comportamento dell'opera durante e dopo la costruzione. A tal fine deve essere predisposto un programma di osservazioni e misure di ampiezza commisurata all'importanza dell'opera e alla complessità della situazione geotecnica. Le indagini geotecniche devono permettere un'adeguata caratterizzazione geotecnica del volume significativo di terreno, che è la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione dell'opera e che influenza l'opera stessa. Il volume significativo ha forma ed estensione diverse a seconda del problema in esame e deve essere individuato caso per caso, in base alle caratteristiche dell'opera e alla natura e caratteristiche dei terreni. A titolo indicativo, nella tabella 1.5 (dalla Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"* di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008) si elencano i mezzi di indagine e le prove geotecniche in sito di più frequente uso. Il tipo e la tecnica esecutiva delle perforazioni di sondaggio devono essere scelti in funzione della natura dei terreni e delle operazioni da compiere nel corso del sondaggio (prelievo di campioni indisturbati, installazione di strumenti di misura, esecuzione di prove, ecc.). Di regola, le indagini di tipo geofisico permettono di valutare le caratteristiche di rigidità a bassi livelli di deformazione dei terreni; i risultati ottenuti non possono quindi essere utilizzati direttamente nelle verifiche di sicurezza rispetto agli stati limite che prevedano il raggiungimento della resistenza del terreno. È opportuno che i dati forniti dalle indagini geofisiche siano interpretati alla luce dei risultati ottenuti dalle altre indagini (successione stratigrafica, regime pressioni interstiziali, ecc.). La scelta dei mezzi di indagine deve essere effettuata in fase di progetto dell'indagine e verificata durante lo svolgimento dell'indagine stessa. La posizione dei punti di indagine e la loro quota assoluta devono essere rilevate topograficamente e riportate in planimetria.

I risultati delle indagini e prove geotecniche in sito devono essere documentati con:

- una planimetria della zona con indicate le posizioni delle verticali di indagine;
- indicazioni sui tipi e le caratteristiche delle attrezzature impiegate;
- i profili stratigrafici ottenuti dalle perforazioni di sondaggio e dagli scavi esplorativi;
- i particolari esecutivi delle prove e delle misure eseguite;
- i risultati delle prove e delle misure eseguite;
- le notizie di eventuali eventi particolari verificatisi durante l'esecuzione dei lavori e ogni altro dato utile per la caratterizzazione del sottosuolo.

Le prove geotecniche di laboratorio devono permettere di valutare i valori appropriati delle grandezze fisiche e meccaniche necessarie per tutte le verifiche agli stati limite ultimi e agli stati limite di esercizio. Le prove sui terreni utilizzati come materiali da costruzione devono essere effettuate su campioni rappresentativi dei materiali disponibili e preparati in laboratorio.

rio secondo modalità da stabilire in relazione alle condizioni di posa in opera previste e alla destinazione del manufatto.

I risultati delle prove di laboratorio devono essere accompagnati da chiare indicazioni sulle procedure sperimentali adottate.

Tabella 1.5. Mezzi di indagine e prove geotecniche in sito (fonte: tabella C6.2.I, Circolare 2 febbraio 2009 n. 617 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici)

Proprietà fisiche e meccaniche	Terreni a grana fine	Prove penetrometriche Prove scissometriche Prove dilatometriche Prove pressiometriche Prove di carico su piastra Prove di laboratorio
	Terreni a grana grossa	Prove penetrometriche Prove di carico su piastra Prove di laboratorio
	Rocce	Prove speciali in sito (prove di taglio) Prove di carico su piastra Prove di laboratorio
Misure di pressione interstiziale	Terreni di qualsiasi tipo	Piezometri
Permeabilità	Terreni di grana fine	Misure piezometriche Prove di laboratorio
	Terreni a grana grossa	Prove idrauliche in fori di sondaggio Prove di emungimento da pozzi
Verifica di procedimenti tecnologici	Palificate	Prove di carico su pali singoli Prove di carico su gruppi di pali
	Impermeabilizzazioni	Prove di permeabilità in sito e misura di altezza piezometrica prima e dopo l'intervento
	Consolidamenti	Determinazione delle proprietà meccaniche in sito prima e dopo l'intervento Prove di laboratorio
Indagini di tipo geofisico	In foro con strumentazione in profondità	<i>Cross hole</i> <i>Down hole</i> Con <i>suspension logger</i>
	Senza esecuzioni di fori, con strumentazione in profondità	Penetrometro sismico Dilatometro sismico
	Con strumentazione in superficie	Prove SASW Prove di rifrazione sismica Prove di riflessione sismica

1.5. Riferimenti bibliografici

Bond A., Harris A. (2008), *Decoding Eurocode 7*, Taylor & Francis.

EN 1997, *Eurocode 7 – Geotechnical design: Part 1: general rules*, European Committee for Standardization, Brussels.

EN 1997, *Eurocode 7 – Geotechnical design: Part 2: ground investigation and testing*, European Committee for Standardization, Brussels.

Orr T.L.L., Farrell E.R. (1999), *Geotechnical Design to Eurocode 7*, Springer-Verlag, London.

2. Analisi del rischio in geingegneria

2.1. Considerazioni preliminari

Tutti i progetti sviluppati dagli ingegneri hanno a che fare con delle incertezze. Si tratta prevalentemente di incertezze legate alle proprietà dei materiali, alle condizioni in esercizio, ai modelli ingegneristici adottati e a molti altri aspetti. Tradizionalmente, gli ingegneri geotecnici hanno tenuto conto delle incertezze dimensionando l'opera con una capacità nettamente superiore alla domanda. Il rapporto fra la capacità e la domanda costituisce il coefficiente di sicurezza il cui valore è usualmente definito sulla base dell'esperienza. Questo approccio presenta tuttavia dei difetti. Per esempio, c'è una tendenza ad essere conservativi relativamente ad ogni stima o assunzione necessaria per il progetto. Conseguentemente, il coefficiente di sicurezza globale del progetto resta sconosciuto. La cautela nella stima delle proprietà del terreno e nell'assunzione dei carichi è soggettivo e, dunque, le previsioni sono spesso non ripetibili. Infine, le incertezze variano da situazione a situazione. Un coefficiente di sicurezza prefissato implica una differente probabilità di rottura in ciascuna differente situazione.

Con l'introduzione nella normativa italiana (NTC 2008) delle verifiche geotecniche allo stato limite ultimo contemplate dall'Eurocodice 7, le opere geotecniche non sono più dimensionate sulla base di un coefficiente di sicurezza globale ma adottando coefficienti di sicurezza parziali alle azioni, ai materiali e alle resistenze a secondo del diverso approccio progettuale adottato; tuttavia, resta sempre attuale la problematica relativa alle fonti di incertezza e alla conseguente affidabilità di una previsione progettuale. Una progettazione basata sulla valutazione del rischio può essere adottata per superare alcune delle limitazioni relative all'applicazione dei coefficienti di sicurezza. Il termine "progetto basato sul rischio" ha il semplice significato di tentare di quantificare le incertezze inerenti a un problema ingegneristico e affrontarlo in una maniera prettamente ingegneristica. Nell'ingegneria geotecnica, una progettazione basata sulla valutazione del rischio può essere complementare alle normali analisi dei dati e alla relativa modellazione. Per quanto concerne la fase relativa all'analisi dei dati, sono identificate le incertezze e dei semplici strumenti statistici sono utilizzati per quantificarle. Per quanto concerne la fase relativa alla modellazione, vengono utilizzate delle tecniche matematiche per valutare l'influenza delle incertezze sulla previsione del comportamento dell'opera. Il risultato finale di una progettazione basata sulla valutazione del rischio è quello di riuscire a quantificare il grado di confidenza e attendibilità raggiunto nella progettazione dell'opera. Questa misura, chiamata *indice di affidabilità* descrive l'errore relativo di una previsione progettuale con riferimento al margine di sicurezza con il quale è stata progettata l'opera.

Le principali fonti di incertezza che intervengono nel dimensionamento e nelle verifiche di un'opera geotecnica posso essere distinte come segue (Baecher, 1985):

- incertezze di carattere geologico, legate alla formazione, alla storia e alla geometria del deposito;
- incertezze legate alla modellazione, derivanti cioè dalla scelta delle teorie di comportamento, condizioni iniziali e al contorno;
- incertezze legate alla caratterizzazione geotecnica del deposito;
- incertezze legate ai carichi, esprimibili in termini di differenze che possono sussistere tra i valori assunti in sede di progetto e quelli realmente agenti sul sistema.

Per quanto riguarda le incertezze più propriamente geotecniche, le quattro principali fonti di incertezza relative ai calcoli necessari per valutare la risposta di un deposito di terreno ai carichi di progetto sono le seguenti (figura 2.1):

- variabilità dei terreni;
- rumore della misura (*measurement noise*);
- *bias* (distorsione) della misura dove *bias* è un termine che indica un errore sistematico;
- errore statistico causato da un campione limitato di misure.

Queste sono le incertezze che interessano le previsioni progettuali di calcolo.

La variabilità dei terreni costituisce un aspetto importante in quanto le proprietà geotecniche dei terreni fluttuano e variano, nell'area di progetto, spostandosi da una verticale ad un'altra. Le maggiori variazioni come, ad esempio, la stratificazione sono considerate nei calcoli mentre variazioni localizzate e di minori dimensioni e importanza vengono trascurate. Tuttavia, tali variazioni più modeste possono costituire dal 30 al 50% delle condizioni medie, come si può spesso notare nell'elevata dispersione dei valori ottenuti dalle prove effettuate.

La seconda fonte di incertezze, indicata come rumore della misura, contribuisce anch'essa alla dispersione dei dati. Il rumore della misura è un errore del tutto casuale causato dall'operatore o dalla strumentazione utilizzata o da piccole, ma reali, variazioni nel deposito di terreno (come ad esempio per la presenza di massi o di conchiglie). Appositi metodi statistici sono utilizzati per separare la frazione di dispersione dei dati dovuta ad una effettiva variabilità da quella causata dal rumore della misura.

Le ultime due fonti di incertezza, il *bias* (distorsione) della misura e l'errore statistico, causano un errore del tutto sistematico. La distinzione tra dispersione dei dati ed errore sistematico è mostrata nella figura 2.2. L'errore sistematico provoca una consistente differenza tra il valore effettivo di una certa proprietà e il valore misurato o stimato. Il *bias* (distorsione) di una misura è comune nell'ingegneria geotecnica. Esso è causato da alcuni aspetti come il disturbo del terreno o le differenze tra come una proprietà è misurata e come una struttura applica un carico al terreno. Per esempio, misure della resistenza al taglio non drenata mediante prova scissometrica (*field vane*) introducono una rotazione dei piani principali sulle superfici verticali di rottura e altre condizioni che differiscono da quelle effettivamente esistenti al di sotto di una fondazione o di un rilevato. Conseguentemente, le resistenze calcolate a ritroso sulle base della rottura di rilevati, differiscono sistematicamente da quelle misurate con uno scissometro. L'errore statistico è causato da un limitato numero di misure. Per esempio, i valori medi di due

insiemi di misure possono variare un po' perché le misure stesse variano. Ciascuna media differisce leggermente dal reale valore medio del sito. Tale errore viene detto *statistico*, in quanto deriva da variazioni statistiche tra gli insiemi di misure.

La dispersione dei dati e l'errore sistematico causano incertezze nei calcoli geotecnici. Tuttavia, gli effetti di ciascuno sono differenti. Una progettazione basata sulla valutazione del rischio valuta separatamente le quattro fonti di incertezza e come ciascuna fonte influisce sulla previsione progettuale. Le implicazioni delle incertezze per la cautela della progettazione e per la maniera nella quale vengono considerate al meglio le incertezze dipendono da un mix di considerazioni e contributi relativamente alle quattro fonti di incertezza.

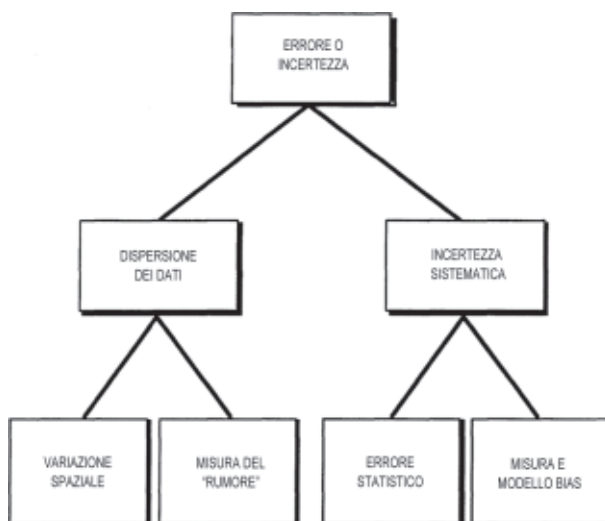


Figura 2.1. Fonti di errore o incertezza nella stima delle proprietà geotecniche di un terreno

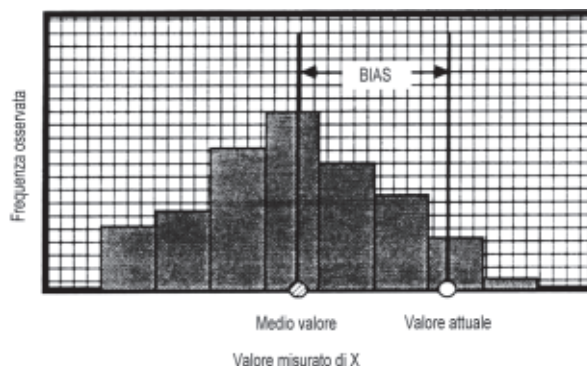


Figura 2.2. Distinzione tra la dispersione dei dati e l'errore di bias (distorsione)