

MAURIZIO GORLA

# **POZZI PER ACQUA**

## **Manuale tecnico di progettazione**



Dario Flaccovio Editore

Maurizio Gorla  
POZZI PER ACQUA  
ISBN 978-88-579-0044-5

© 2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738  
[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: ottobre 2010

Gorla, Maurizio <1966->

Pozzi per acqua : manuale tecnico di progettazione / Maurizio Gorla. -  
Palermo : D. Flaccovio, 2010.  
ISBN 978-88-579-0044-5  
1. Pozzi – Progettazione.  
628.114 CDD-22 SBN Pal0229480

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

#### RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare Gabriele, Cristina e Laura per il loro insostituibile supporto e incoraggiamento nella stesura e nella revisione critica delle bozze di questo libro.

E un pensiero a mio padre, che mi è sempre accanto.

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte. La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.



### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

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

L'indirizzo per accedere ai servizi è: [www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0044](http://www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF0044)



1.1.2.4. Zonizzazione del sottosuolo al di sopra dell'acquifero .... »	47
1.1.2.5. Formazioni idrogeologiche e permeabilità del sistema .... »	50
1.1.2.6. Mezzi porosi e mezzi fessurati .....	63
1.1.2.6.1. Mezzi porosi .....	64
1.1.2.6.2. Mezzi fessurati .....	65
1.1.2.7. Limiti dell'acquifero .....	67
1.1.2.8. Anisotropia ed eterogeneità .....	70
1.1.2.9. Ricostruzione dell'assetto del deflusso idrico sotterraneo .....	72
1.1.2.10. Regimi di flusso: stazionario e transitorio .....	76
1.1.2.11. Fluttuazioni del livello piezometrico degli acquiferi .....	77
1.1.2.11.1. Fluttuazioni del livello idrico sotterraneo in acquiferi a falda libera .....	79
1.1.2.11.2. Fluttuazioni del livello idrico sotterraneo in acquiferi a falda confinata .....	79
1.1.2.11.3. Effetti dovuti alle acque di pioggia .....	80
1.1.2.11.4. Effetti dovuti a variazioni degli sforzi efficaci .....	80
1.1.2.11.4.1. Effetti dovuti alle maree .....	81
1.1.2.11.4.2. Effetti dovuti ai cambiamenti della pressione atmosferica .....	82
1.1.3. Indagini idrogeochimiche: ricostruzione del profilo geochemico dell'acquifero .....	83
1.1.3.1. Costituenti maggiori .....	84
1.1.3.2. Oligoelementi .....	87
1.1.3.3. Processi geochemici .....	92
1.1.3.3.1. Soluzione e precipitazione .....	92
1.1.3.3.2. Idrolisi .....	97
1.1.3.3.3. Adsorbimento e scambio ionico .....	97
1.1.3.3.4. Ossido-riduzione .....	99
1.1.3.3.5. Processi biologici .....	102
1.1.3.3.6. Processi a membrana: il concetto di osmosi .... »	104
1.1.3.3.7. Gas in falda: trasporto, scambio e solubilità .... »	105
1.1.3.3.8. Radionuclidi naturali e traccianti ambientali .. »	108
1.1.3.3.8.1. Datazione delle acque sotterranee recenti .....	110
1.1.3.3.8.2. Datazione delle acque sotterranee antiche .....	112
1.1.3.3.8.3. Modelli di trasporto nei domini insaturo e saturo mediante traccianti ambientali .....	113
1.1.3.4. Processi di trasporto in falda .....	114
1.1.3.4.1. Avvezione .....	115

1.1.3.4.1.1. Mezzi a porosità interstiziale .....	» 115
1.1.3.4.1.2. Mezzi a porosità fissurale .....	» 115
1.1.3.4.2. Diffusione .....	» 117
1.1.3.4.2.1. Mezzi a porosità interstiziale .....	» 117
1.1.3.4.2.2. Mezzi a porosità fissurale .....	» 119
1.1.3.4.2.3. Coefficienti di diffusione in aria e in acqua....	» 119
1.1.3.4.3. Dispersione idrodinamica .....	» 120
1.1.3.4.3.1. Mezzi a porosità interstiziale .....	» 121
1.1.3.4.3.2. Mezzi a porosità fissurale .....	» 123
1.1.4. Vulnerabilità e contaminazione dei sistemi acquiferi.....	» 124
1.1.4.1. Vulnerabilità intrinseca e indotta:	
determinazione del grado di vulnerabilità .....	» 124
1.1.4.1.1. Transfer time method TTM.....	» 125
1.1.4.1.2. Metodo GOD.....	» 127
1.1.4.2. Modalità di contaminazione delle falde.....	» 128
1.1.4.2.1. Infiltrazione .....	» 129
1.1.4.2.2. Ricarica attraverso acque superficiali .....	» 130
1.1.4.2.3. Migrazione diretta .....	» 130
1.1.4.2.4. Interscambio tra acquiferi sovrapposti .....	» 131
1.1.4.3. Modalità di trasporto dei contaminanti .....	» 131
1.1.4.3.1. Differenze di densità e viscosità .....	» 134
1.1.4.3.2. Filtrazione .....	» 134
1.1.4.3.3. Partitioning: scambio ionico e adsorbimento fisico .....	» 135
1.1.4.3.4. Precipitazione .....	» 136
1.1.4.3.5. Reazioni acido-base .....	» 137
1.1.4.3.6. Reazioni di ossido-riduzione .....	» 137
1.1.4.3.7. Trasporto facilitato .....	» 137
1.1.4.3.7.1. Complessazione .....	» 138
1.1.4.3.7.2. Cosolvazione.....	» 138
1.1.4.3.7.3. Fissazione ( <i>colloidal attachment</i> ).....	» 139
1.1.5. Indagini geofisiche .....	» 139
1.1.5.1. Tecniche geofisiche di superficie.....	» 139
1.1.5.1.1. Sondaggi elettrici di resistività .....	» 139
1.1.5.1.2. Rilievi sismici .....	» 151
1.1.5.1.2.1. Sismica a rifrazione .....	» 153
1.1.5.1.2.2. Sismica a riflessione .....	» 156
1.1.5.1.2.3. Tomografia sismica.....	» 157
1.1.5.2. Tecniche geofisiche in foro .....	» 158
1.1.5.2.1. Log elettrici .....	» 162

1.1.5.2.1.1. Log di potenziale spontaneo .....	» 162
1.1.5.2.1.2. Log di resistività .....	» 165
1.1.5.2.2. Log nucleari .....	» 172
1.1.5.2.2.1. <i>Gamma-ray log</i> .....	» 172
1.1.5.2.2.2. <i>Density log</i> .....	» 174
1.1.5.2.2.3. <i>Neutron log</i> .....	» 175
1.1.5.2.3. Log acustici .....	» 177
1.1.5.2.4. Log termometrici e fisico-chimici .....	» 180
1.1.5.2.4.1. Log termometrico .....	» 180
1.1.5.2.4.2. Log di conducibilità elettrica .....	» 182
1.1.5.2.5. Log per la valutazione dell'integrità del pozzo .....	» 184
1.1.5.2.5.1. <i>Caliper log</i> .....	» 184
1.1.5.2.5.2. <i>Casing logging</i> .....	» 186
1.1.5.2.5.3. <i>Annular materials logging</i> .....	» 186
1.1.5.2.5.4. <i>Borehole-deviation logging</i> .....	» 188
1.1.5.2.5.5. Monitoraggio televisivo .....	» 188
1.2. Carotaggi e fori pilota .....	» 190
1.2.1. Carotaggio continuo .....	» 190
1.2.1.1. Apparecchiatura per l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo .....	» 196
1.2.1.1.1. Unità di perforazione .....	» 196
1.2.1.1.2. Attrezzatura di perforazione .....	» 197
1.2.2. Foro pilota.....	» 201
1.3. Lo studio idrogeologico finale .....	» 202
1.3.1. Inquadramento geologico .....	» 203
1.3.2. Inquadramento geomorfologico-strutturale .....	» 203
1.3.3. Assetto idrogeologico: individuazione dei livelli acquiferi .....	» 204
1.3.4. Limiti degli acquiferi .....	» 207
1.3.5. Condizioni del deflusso idrico sotterraneo: carta delle isopieze ..	» 207
1.3.6. Fluttuazioni dei livelli piezometrici nel tempo .....	» 211
1.3.7. Chimismo della falda .....	» 213
1.3.8. Vulnerabilità della falda e fenomeni d'inquinamento riconosciuti e in atto .....	» 216
1.3.9. Rilievi geofisici.....	» 217
1.3.10. Sondaggi geognostici preliminari .....	» 218
1.3.11. Definizione della zona di protezione dell'opera di captazione ....	» 218
1.3.12. Conclusioni .....	» 220
1.4. Sviluppo di una banca dati di riferimento .....	» 220
1.5. Riferimenti bibliografici .....	» 227

2.	IL PROGETTO DEL POZZO	
2.1.	Dal modello concettuale al progetto del pozzo .....	» 234
2.2.	Scelta della tecnica di trivellazione .....	» 235
2.2.1.	Perforazione a percussione .....	» 238
2.2.1.1.	Diametro di perforazione .....	» 240
2.2.1.2.	Profondità di perforazione .....	» 240
2.2.1.3.	Tipologia di terreno .....	» 240
2.2.1.4.	Identificazione degli acquiferi .....	» 240
2.2.1.5.	Vantaggi del metodo .....	» 241
2.2.1.6.	Svantaggi del metodo.....	» 241
2.2.1.7.	Applicazioni ottimali .....	» 241
2.2.2.	Perforazione a rotazione .....	» 241
2.2.2.1.	Circolazione diretta .....	» 242
2.2.2.1.1.	Diametro di perforazione .....	» 244
2.2.2.1.2.	Profondità di perforazione .....	» 244
2.2.2.1.3.	Tipologia di terreno.....	» 244
2.2.2.1.4.	Identificazione degli acquiferi .....	» 244
2.2.2.1.5.	Vantaggi del metodo .....	» 245
2.2.2.1.6.	Svantaggi del metodo .....	» 245
2.2.2.1.7.	Applicazioni ottimali .....	» 246
2.2.2.2.	Circolazione inversa.....	» 246
2.2.2.2.1.	Diametro di perforazione .....	» 248
2.2.2.2.2.	Profondità di perforazione .....	» 248
2.2.2.2.3.	Tipologia di terreno.....	» 248
2.2.2.2.4.	Identificazione degli acquiferi .....	» 248
2.2.2.2.5.	Vantaggi del metodo .....	» 249
2.2.2.2.6.	Svantaggi del metodo .....	» 249
2.2.2.2.7.	Applicazioni ottimali .....	» 249
2.2.3.	Perforazione a roto-percussione con aria compressa .....	» 250
2.2.3.1.	Diametro di perforazione .....	» 253
2.2.3.2.	Profondità di perforazione .....	» 253
2.2.3.3.	Tipologia di terreno .....	» 253
2.2.3.4.	Identificazione degli acquiferi .....	» 253
2.2.3.5.	Vantaggi del metodo .....	» 254
2.2.3.6.	Svantaggi del metodo.....	» 254
2.2.3.7.	Applicazioni ottimali .....	» 254
2.2.4.	Altre tecniche di perforazione .....	» 254
2.2.4.1.	Carotaggio .....	» 254
2.2.4.2.	<i>Bucket</i> (pozzi di accumulo) .....	» 255
2.2.4.3.	Pozzi battuti .....	» 256

2.2.4.4.	<i>Well point</i> (perforazione a iniezione).....	» 258
2.2.4.5.	Elica cava ( <i>Hollow-Stem Auger</i> ) .....	» 258
2.2.4.6.	Pozzi direzionali.....	» 259
2.3.	Definizione dei caratteri geometrici del perforo .....	» 261
2.3.1.	Sviluppo del piano di ricostruzione litostratigrafica e idrogeologica del sottosuolo .....	» 261
2.3.1.1.	Test di strato.....	» 264
2.3.1.2.	Analisi chimico-fisiche .....	» 265
2.3.1.3.	Log geofisici .....	» 266
2.3.2.	Profondità del pozzo.....	» 267
2.3.3.	Diametro del pozzo.....	» 269
2.4.	Definizione delle caratteristiche di completamento del pozzo .....	» 270
2.4.1.	Scelta della tubazione di rivestimento .....	» 272
2.4.1.1.	Definizione del numero di colonne di rivestimento .....	» 272
2.4.1.2.	Determinazione del diametro del casing .....	» 273
2.4.1.3.	Scelta del materiale costituente il casing .....	» 275
2.4.1.3.1.	<i>Casing</i> in acciaio al carbonio ( <i>carbon steel</i> ) .....	» 276
2.4.1.3.2.	<i>Casing</i> in acciaio inossidabile ( <i>stainless steel</i> ) .....	» 276
2.4.1.3.3.	<i>Casing</i> API .....	» 278
2.4.1.3.4.	<i>Casing</i> in PVC .....	» 279
2.4.1.3.5.	<i>Casing</i> in PE.....	» 280
2.4.1.3.6.	<i>Casing</i> in PP.....	» 281
2.4.1.3.7.	<i>Casing</i> in fibra di vetro .....	» 283
2.4.1.4.	Resistenza meccanica e spessore del <i>casing</i> .....	» 283
2.4.2.	Scelta dei filtri .....	» 288
2.4.2.1.	Tipo di materiale dei filtri .....	» 288
2.4.2.1.1.	Qualità dell'acqua .....	» 288
2.4.2.1.2.	Ferro-batteri .....	» 293
2.4.2.1.3.	Resistenza del tubo-filtro .....	» 293
2.4.2.2.	Diametro dei filtri .....	» 294
2.4.2.3.	Lunghezza dei filtri .....	» 295
2.4.2.4.	Luce dei filtri .....	» 298
2.4.2.4.1.	Pozzi con drenaggio naturale .....	» 299
2.4.2.4.2.	Pozzi con drenaggio artificiale .....	» 300
2.4.2.5.	Superficie filtrante .....	» 300
2.4.2.6.	Tipologie di apertura dei filtri .....	» 307
2.4.2.6.1.	Filtri con apertura circolare ( <i>round slot</i> ) .....	» 308
2.4.2.6.2.	Filtri con apertura quadrata ( <i>square slot</i> ) .....	» 308
2.4.2.6.3.	Filtri con apertura rettangolare ( <i>rectangular slot</i> ) .....	» 309

2.4.2.6.4.	Filtri con apertura a deflettore o a persiana ( <i>louvered slot</i> ) .....	» 310
2.4.2.6.5.	Filtri a graniglia (con prefiltro).....	» 311
2.4.2.6.6.	Filtri con apertura a ponte ( <i>bridge slot</i> ) .....	» 311
2.4.2.6.7.	Filtri con apertura a spirale continua ( <i>continuous slot</i> ) .....	» 313
2.4.2.7.	Idraulica dei filtri .....	» 315
2.4.3.	Drenaggio delle zone produttive del pozzo .....	» 316
2.4.3.1.	Dimensionamento del dreno .....	» 317
2.4.3.1.1.	Pozzi con dreno naturale.....	» 324
2.4.3.1.2.	Pozzi con dreno artificiale .....	» 324
2.4.3.2.	Efficienza del dreno .....	» 325
2.4.3.3.	Spessore e lunghezza del dreno .....	» 326
2.4.3.4.	Tipo di dreno e ambiente geologico .....	» 328
2.4.3.4.1.	Rocce fratturate .....	» 330
2.4.3.4.2.	Terreni acquiferi con sabbia .....	» 330
2.4.3.4.3.	Acquiferi fini, uniformi e sabbiosi (alluvionali, fluvioglaciali ed eolici) .....	» 330
2.4.3.4.4.	Acquiferi in arenarie semiconsolidate .....	» 331
2.4.3.4.5.	Acquiferi in formazioni intensamente laminate .....	» 331
2.4.3.5.	Tecniche di drenaggio .....	» 332
2.4.3.5.1.	Inghiaiamento per gravità .....	» 332
2.4.3.5.2.	Inghiaiamento per circolazione inversa .....	» 333
2.4.3.5.3.	Inghiaiamento con <i>liner-hanger</i> .....	» 334
2.4.4.	Cementazione dei tratti non produttivi del pozzo .....	» 336
2.4.4.1.	Materiali per la cementazione .....	» 337
2.4.4.1.1.	Boiaccia di cemento .....	» 337
2.4.4.1.2.	Argilla .....	» 342
2.4.4.1.3.	Calcestruzzo .....	» 343
2.4.4.2.	Tecniche di cementazione .....	» 344
2.4.4.2.1.	Cementazioni selettive .....	» 344
2.4.4.2.2.	Cementazione con scarpa .....	» 348
2.5.	Pianificazione dello sviluppo del pozzo .....	» 353
2.5.1.	Fattori che influenzano lo sviluppo del pozzo .....	» 356
2.5.1.1.	Drenaggio del pozzo .....	» 356
2.5.1.2.	Area filtrante e geometria delle fenestrate .....	» 357
2.5.1.3.	Dimensioni delle fenestrate .....	» 357
2.5.1.4.	Tipo di fluido di perforazione .....	» 358
2.5.1.5.	Spessore del dreno .....	» 358
2.5.1.6.	Tipo di formazione acquifera.....	» 358

2.5.2. Tecniche di sviluppo dei pozzi per acqua .....	» 359
2.5.2.1. Pistone semplice.....	» 359
2.5.2.2. Pistone semplice con lavaggio .....	» 360
2.5.2.3. Pistone con valvola .....	» 360
2.5.2.4. Pistone doppio con lavaggio diretto .....	» 361
2.5.2.5. Pistone doppio con pompaggio .....	» 362
2.5.2.6. Lavaggio con ugelli ( <i>high velocity jetting</i> ) .....	» 363
2.5.2.7. Lavaggio con aria compressa ( <i>air-lift</i> a foro aperto).....	» 364
2.5.2.8. Pistonaggio pneumatico ( <i>air-lift</i> a foro chiuso o con pozzo in pressione) .....	» 367
2.5.2.9. Lavaggio con aria compressa e doppio pistone .....	» 368
2.5.2.10. Pompaggio .....	» 368
2.6. Pianificazione delle prove di collaudo.....	» 369
2.7. Gestione dei residui di perforazione .....	» 370
2.8. Ipotesi di completamento del pozzo .....	» 376
2.9. Un esempio applicativo: la progettazione dei pozzi barriera per il disinquinamento degli acquiferi vulnerati .....	» 378
2.9.1. Basi teoriche del metodo dei pozzi barriera .....	» 378
2.9.2. Fasi di sviluppo di un sistema P&T.....	» 383
2.9.3. Definizione del tempo di sicurezza .....	» 386
2.9.4. Rete di monitoraggio .....	» 390
2.9.5. Vantaggi e svantaggi del P&T .....	» 390
2.10. Riferimenti bibliografici .....	» 392
3. LA REALIZZAZIONE DEL POZZO:	
ATTIVITÀ DI CANTIERE E COMPITI DELLA DIREZIONE LAVORI	
3.1. Consegna dei lavori .....	» 395
3.1.1. Giornale di cantiere .....	» 397
3.1.2. Tempestività dell'assistenza ai lavori .....	» 397
3.2. Fase di trivellazione del pozzo .....	» 398
3.2.1. Gestione dello spazio di cantiere .....	» 398
3.2.2. Problematiche relative al tipo di tecnica di scavo utilizzata .....	» 402
3.2.2.1. Percussione.....	» 402
3.2.2.2. Rotazione a circolazione diretta .....	» 403
3.2.2.2.1. Gestione ottimale dei fanghi di perforazione ....	» 405
3.2.2.2.2. Tipi di fanghi di perforazione .....	» 407
3.2.2.2.2.1. Bentonite .....	» 408
3.2.2.2.2.2. Attapulgite .....	» 409
3.2.2.2.2.3. Polimeri.....	» 410

3.2.2.2.4. Polimeri naturali .....	» 411
3.2.2.2.5. Polimeri modificati .....	» 412
3.2.2.2.6. Polimeri sintetici .....	» 412
3.2.2.2.7. Prodotti chimici .....	» 413
3.2.2.2.3. Parametri dei fluidi di perforazione da monitorare in cantiere .....	» 413
3.2.2.2.3.1. Peso del fango: misura della densità .....	» 415
3.2.2.2.3.2. Viscosità .....	» 417
3.2.2.2.3.3. Filtrato e spessore del pannello .....	» 419
3.2.2.2.3.4. Contenuto in sabbia .....	» 420
3.2.2.2.3.5. Misura del pH .....	» 421
3.2.2.2.3.6. Misura dei cloruri .....	» 421
3.2.2.2.4. Circolazione diretta: la pompa del fango.....	» 422
3.2.2.3. Rotazione a circolazione inversa .....	» 423
3.2.2.4. Roto-percussione ad aria compressa con martello fondo foro.....	» 426
3.2.2.4.1. Vantaggi e svantaggi derivanti dall'uso di aria compressa .....	» 428
3.2.3. Programma di perforazione .....	» 428
3.2.4. Prelievo di campioni, prove di strato e log geofisici .....	» 429
3.2.4.1. Prelievo di campioni .....	» 429
3.2.4.2. Prove di strato .....	» 430
3.2.4.3. Log geofisici .....	» 431
3.2.5. Proposta di completamento definitiva .....	» 431
3.3. Fase di completamento del pozzo .....	» 432
3.3.1. Tubi e filtri .....	» 432
3.3.2. Dreno .....	» 435
3.3.3. Cementazioni .....	» 435
3.4. Fase di sviluppo del pozzo.....	» 437
3.5. Collaudo del pozzo .....	» 438
3.6. Problematiche connesse con la gestione dei residui di perforazione .....	» 440
3.6.1. Fluidi di circolazione .....	» 440
3.6.2. Detriti di perforazione .....	» 441
3.6.3. Acque di spurgo e collaudo .....	» 441
3.7. Norme per la misurazione e la valutazione dei lavori .....	» 441
3.8. Contabilità dei lavori .....	» 442
3.8.1. Giornale dei lavori .....	» 444
3.8.2. Libretto delle misure.....	» 445
3.8.3. Registro di contabilità .....	» 445
3.8.4. Stati di avanzamento lavori .....	» 446

3.8.5. Certificati di pagamento .....	» 447
3.8.6. Conto finale .....	» 447
3.8.7. Certificato di ultimazione lavori .....	» 448
3.8.8. Certificato di regolare esecuzione .....	» 449
3.9. Riferimenti bibliografici .....	» 450
4. IL COLLAUDO DEL POZZO	
4.1. Predisposizione del cantiere ai test di campo .....	» 451
4.1.1. Impianto di sollevamento .....	» 451
4.1.2. Misura dei livelli .....	» 452
4.1.3. Misura delle portate .....	» 455
4.1.4. Determinazione dei parametri fisico-chimici con sonde multiparametriche .....	» 459
4.1.4.1. Misura della pressione (livello dell'acqua) .....	» 460
4.1.4.2. Misura dei parametri fisico-chimici in sito .....	» 460
4.1.4.2.1. Temperatura .....	» 462
4.1.4.2.2. Conducibilità elettrica specifica .....	» 463
4.1.4.2.3. pH .....	» 464
4.1.4.2.4. Eh .....	» 465
4.1.4.2.5. Ione ammonio .....	» 467
4.1.4.2.6. Ione cloruro .....	» 467
4.1.4.2.7. Ione nitrato .....	» 468
4.1.4.2.8. Ossigeno disciolto .....	» 469
4.1.4.2.9. Torbidità .....	» 470
4.1.5. Analisi di laboratorio .....	» 471
4.2. Tipologie di prove idrauliche .....	» 472
4.2.1. Test di pompaggio a gradini di portata SDT .....	» 476
4.2.1.1. Parametri desumibili da una prova SDT .....	» 478
4.2.1.1.1. Curva caratteristica e componenti dell'abbassamento .....	» 478
4.2.1.1.2. Curva abbassamento specifico-portata .....	» 480
4.2.1.1.2.1. Analisi con il metodo di Rorabaugh (1953) ....	» 481
4.2.1.1.2.2. Analisi con il metodo di Bierschenk (1963) ....	» 482
4.2.1.1.2.3. Analisi con il metodo di Castany (1968) ....	» 483
4.2.1.1.2.4. Analisi con il metodo di Sheanan (1971) ....	» 484
4.2.1.1.2.5. Analisi con il metodo di Eden-Hazel (1973) ....	» 486
4.2.1.1.3. Portata specifica .....	» 488
4.2.1.1.4. Portata critica .....	» 490
4.2.1.1.5. Portata ottimale .....	» 491

4.2.1.1.6.	Calcolo dell'efficienza del pozzo .....	» 492
4.2.1.1.6.1.	Variabili che condizionano l'efficienza di un pozzo .....	» 492
4.2.1.1.6.2.	<i>Well efficiency</i> WE .....	» 494
4.2.1.1.6.3.	Coefficiente delle perdite di pozzo <i>C</i> .....	» 494
4.2.1.1.6.4.	<i>Specific loss</i> SL .....	» 495
4.2.1.1.6.5.	Metodo dell'indice di turbolenza TIM .....	» 495
4.2.1.1.6.6.	Regole di base per la determinazione dell'efficienza .....	» 496
4.2.1.2.	Calcolo dei parametri idrogeologici tramite SDT .....	» 497
4.2.1.2.1.	Metodo del coefficiente <i>B</i> .....	» 497
4.2.1.2.2.	Metodo di Cooper-Jacob .....	» 499
4.2.1.2.3.	Metodo di Birsoy-Summers .....	» 500
4.2.2.	Test di pompaggio a portata costante e di lunga durata CRT .....	» 503
4.2.2.1.	Modalità di esecuzione di un CRT .....	» 503
4.2.2.2.	Analisi delle curve sperimentali .....	» 510
4.2.2.2.1.	<i>Processing</i> dei dati di prova .....	» 511
4.2.2.2.1.1.	Conversione dei dati .....	» 511
4.2.2.2.1.2.	Correzione dei dati .....	» 511
4.2.2.2.2.	Analisi delle curve <i>s-logt</i> .....	» 514
4.2.2.2.2.1.	Curve di discesa .....	» 514
4.2.2.2.2.2.	Curve di risalita.....	» 515
4.2.2.2.3.	Analisi delle curve <i>logs-logt</i> .....	» 516
4.2.2.2.3.1.	Acquifero confinato .....	» 516
4.2.2.2.3.2.	Acquifero semiconfinato.....	» 516
4.2.2.2.3.3.	Acquifero a falda libera e semilibera .....	» 517
4.2.2.2.3.4.	Acquifero fratturato.....	» 518
4.2.2.2.4.	Analisi della curva di risalita <i>s-logt/t'</i> .....	» 519
4.2.2.3.	Elaborazione del report di prova .....	» 519
4.2.2.4.	Parametri desumibili da una prova CRT .....	» 519
4.2.2.4.1.	Misura della trasmissività (regime stazionario) ..	» 519
4.2.2.4.2.	Misura della trasmissività e del coefficiente d'immagazzinamento (regime transitorio).....	» 522
4.2.2.5.	Test in discesa (regime stazionario).....	» 524
4.2.2.5.1.	Acquiferi a falda confinata.....	» 524
4.2.2.5.1.1.	Metodo di Thiem .....	» 524
4.2.2.5.1.2.	Metodo di Dupuit .....	» 525
4.2.2.5.1.3.	Metodo semplificato di Thiem-Dupuit .....	» 526
4.2.2.5.1.4.	Metodo di Cassan .....	» 526
4.2.2.5.1.5.	Metodo di Dietz .....	» 528

4.2.2.5.2. Acquiferi a falda semiconfinata .....	»	529
4.2.2.5.2.1. Metodo di De Glee .....	»	529
4.2.2.5.3. Acquiferi a falda libera .....	»	530
4.2.2.5.3.1. Metodo di Dupuit .....	»	531
4.2.2.6. Test in discesa (regime transitorio) .....	»	531
4.2.2.6.1. Acquiferi a falda confinata.....	»	532
4.2.2.6.1.1. Metodo di Theis .....	»	532
4.2.2.6.1.2. Metodo di Cooper-Jacob o <i>Straight Line Method</i> .....	»	533
4.2.2.6.1.3. Metodo di Stallman.....	»	536
4.2.2.6.1.4. Metodo di Papadopulos .....	»	537
4.2.2.6.2. Acquiferi a falda semiconfinata .....	»	538
4.2.2.6.2.1. Metodo di Hantush-Jacob e di Walton (acquitardo incompressibile) .....	»	538
4.2.2.6.2.2. Metodo di Hantush (acquitardo compressibile) .....	»	542
4.2.2.6.2.3. Metodo di Hantush-Jacob (falda semi- confinata sottostante a una falda libera) .....	»	544
4.2.2.6.2.4. Metodo di Vandenberg (acquifero nastriforme) .....	»	544
4.2.2.6.3. Acquiferi a falda libera .....	»	546
4.2.2.6.3.1. Metodo di Boulton-Neuman .....	»	547
4.2.2.6.4. Acquiferi fratturati .....	»	550
4.2.2.6.4.1. Metodo di Streltsova-Adams .....	»	550
4.2.2.6.4.2. Metodo di Moench .....	»	552
4.2.2.6.5. Acquiferi anisotropi .....	»	554
4.2.2.6.5.1. Metodo di Hantush .....	»	554
4.2.2.6.5.2. Metodo di Week .....	»	555
4.2.2.7. Test in risalita .....	»	556
4.2.2.7.1. Metodo di Theis-Jacob (regime stazionario) .....	»	556
4.2.2.7.2. Metodo di Banton-Bangoy (regime transitorio) ....	»	557
4.2.3. Test ad impulso .....	»	559
4.2.3.1. Metodo Lefranc .....	»	559
4.2.3.1.1. Prova a carico costante .....	»	559
4.2.3.1.2. Prova a carico variabile .....	»	559
4.2.3.2. Metodo di Bouwer-Rice.....	»	561
4.2.3.3. Metodo di Hvorslev .....	»	563
4.2.3.4. Metodo Lugeon .....	»	565
4.2.3.5. <i>Dipole Flow Test</i> .....	»	568
4.2.3.6. <i>Auger-hole test</i> .....	»	569

4.2.3.7. <i>Slug-bail test</i> .....	»	571
4.2.4. Misura del raggio d'influenza .....	»	572
4.2.4.1. Formule empiriche .....	»	573
4.2.4.2. Prove di pompaggio .....	»	574
4.2.5. Calcolo della distanza teorica da un limite .....	»	574
4.3. Raccolta e organizzazione dei dati di collaudo .....	»	575
4.4. Rispondenza del pozzo agli standard di progetto – redazione del <i>master log</i> ..	»	578
4.5. Riferimenti bibliografici .....	»	579
5. LA MANUTENZIONE DEI POZZI PER ACQUA:		
CONSERVAZIONE DELLA PRODUTTIVITÀ NEL TEMPO		
5.1. Cause del deterioramento della produttività dei pozzi per acqua .....	»	583
5.1.1. Impropria progettazione e realizzazione del pozzo .....	»	585
5.1.2. Insufficiente sviluppo .....	»	585
5.1.3. Problemi di stabilità del perforo .....	»	585
5.1.4. Incrostazione .....	»	585
5.1.5. <i>Biofouling</i> .....	»	586
5.1.6. Corrosione .....	»	586
5.1.7. Problematiche afferenti al sistema acquifero .....	»	586
5.1.8. Pompaggio eccessivo ( <i>overpumping</i> ) .....	»	588
5.1.9. Sintomatologie di deterioramento dei pozzi .....	»	588
5.2. Predisposizione del piano di manutenzione: analisi tecnico-economica .....	»	593
5.2.1. Prove di pompaggio .....	»	594
5.2.2. Analisi fisico-chimiche: geochimica delle acque sotterranee .....	»	597
5.2.3. Esami microbiologici .....	»	599
5.2.4. Analisi fisiche e visive .....	»	599
5.2.5. Sequenza delle operazioni tipo per un intervento di manutenzione ..	»	600
5.3. Tecniche di manutenzione e ripristino dei pozzi ammalorati .....	»	605
5.3.1. Tecniche meccaniche .....	»	605
5.3.1.1. <i>Overpumping</i> .....	»	606
5.3.1.2. Pistonaggio con <i>air-lift</i> .....	»	606
5.3.1.3. Pistonaggio e pompaggio .....	»	607
5.3.1.4. Spazzolatura .....	»	607
5.3.1.5. Sviluppo con aria .....	»	608
5.3.1.6. <i>Jetting</i> idraulico .....	»	609
5.3.2. Tecniche chimiche .....	»	611
5.3.2.1. Acidi .....	»	612
5.3.2.2. Biocidi .....	»	613
5.3.2.2.1. Cloro .....	»	613

5.3.2.2.2. Ozono .....	» 616
5.3.2.2.3. Permanganato di potassio .....	» 616
5.3.2.2.4. Perossido di idrogeno .....	» 617
5.3.2.2.5. Trattamento termico .....	» 617
5.3.2.3. Processi di segregazione .....	» 617
5.3.2.4. Inibitori di corrosione .....	» 618
5.3.2.5. Tensioattivi .....	» 619
5.3.3. Tecniche ibride .....	» 619
5.3.3.1. Idrogelo <sup>®</sup> /Aqua Freed <sup>®</sup> .....	» 619
5.3.3.2. Hydropuls <sup>®</sup> .....	» 623
5.4. Manutenzione della pompa .....	» 626
5.5. Riscontro degli obiettivi del risanamento .....	» 630
5.6. Interventi di modifica delle caratteristiche costruttive dei pozzi per acqua .....	» 633
5.6.1. Procedura operativa di esclusione delle falde profonde .....	» 634
5.6.2. Procedura operativa di esclusione delle falde intermedie e superficiali .....	» 636
5.6.3. Procedura operativa di carotaggio del vecchio pozzo .....	» 640
5.7. Riferimenti bibliografici .....	» 646
6. LA CEMENTAZIONE DEI POZZI PER ACQUA: SALVAGUARDIA DELLA RISORSA IDRICA SOTTERRANEA	
6.1. Finalità della messa in sicurezza dei pozzi abbandonati .....	» 647
6.2. Tecniche di cementazione dei pozzi in disuso .....	» 650
6.2.1. Preparazione del pozzo .....	» 650
6.2.2. Materiali per la messa in sicurezza del pozzo .....	» 652
6.2.3. Metodi di messa in sicurezza dei pozzi in disuso .....	» 653
6.2.3.1. Riempimento parziale del pozzo .....	» 654
6.2.3.1.1. Cementazione con boiaccia .....	» 656
6.2.3.1.2. Cementazione con argilla bentonitica .....	» 657
6.2.3.2. Chiusura totale del pozzo .....	» 657
6.2.3.3. Chiusura di pozzi con artesianesimo manifesto .....	» 659
6.3. Utilizzo alternativo dei pozzi non più produttivi .....	» 660
6.4. Riferimenti bibliografici .....	» 662

## *Premessa*

Nell'arco di un secolo, l'approccio scientifico e tecnico finalizzato alla realizzazione dei pozzi per acqua ha indubbiamente vissuto, come del resto molte altre attività umane, un importante sviluppo, che pian piano ha trasformato da un lato le imprese di perforazione in vere e proprie società imprenditoriali di settore (agli albori si trattava di buoni artigiani, con ditte a dimensione perlopiù familiare) e dall'altro i tecnici, che si occupavano magari sporadicamente o con approccio titubante alla progettazione dei pozzi, in operatori sempre più specializzati sull'argomento.

Ciò nonostante, ancora oggi, alcuni aspetti della progettazione appaiono completamente trascurati o peggio non conosciuti da chi invece dovrebbe aver appreso in maniera ottimale anche le più piccole "sfumature" dei progetti afferenti ai pozzi per acqua.

Per portare a compimento un'opera di captazione efficiente, occorre innanzitutto pianificare, fin nei minimi dettagli, un approfondito studio idrogeologico, il quale si occupi anche degli elementi idrochimici e più in generale ambientali che sottendono alla trivellazione di un pozzo.

Una volta ultimata la ricostruzione del modello concettuale del sistema acquifero che s'intende sfruttare, si passa alla fase di progetto, la quale deve tenere in debita considerazione tutte le informazioni derivanti dalla precedente analisi idrogeologica, al fine di predisporre un'ipotesi di completamento del pozzo che sia il più possibile esaustiva e ricalcante quanto poi si osserverà effettivamente durante lo scavo del terreno.

La successiva fase di cantiere, fino al collaudo, si rivela altresì un periodo di tempo più o meno breve (a volte, dell'ordine di 15-30 giorni), ma decisivo per le future sorti del pozzo: il geologo, in qualità di direttore dei lavori, deve prestare molta attenzione non solo al modo con cui viene riprodotto il profilo stratigrafico del sottosuolo, ossia alle modalità di raccolta e catalogazione dei *cuttings* o delle carote di terreno e/o roccia, ma anche alle prassi più ingegneristiche di esecuzione dell'opera in sotterraneo (tubaggio, drenaggio, cementazioni ed infine spurgo), poiché anche solo un minimo errore può pregiudicare seriamente l'integrità e la funzionalità future del pozzo.

Il lavoro del geologo "pozzaiolo" non si conclude con tale fase, poiché il pozzo per acqua richiede l'allestimento e la messa in pratica di un corretto piano di manutenzione, allo scopo di prolungare il più possibile nel tempo la sua produttività ottimale.

Il presente volume nasce pertanto dalla volontà di poter disporre di un valido riferimento tecnico per affrontare e risolvere le incognite che si manifestano nella progettazione dei pozzi per acqua. I sei capitoli che lo compongono offrono un'ampia e dettagliata panoramica delle problematiche idrogeologiche correlate alle suddette attività.

Nello specifico, si è tentato di ripercorrere una sorta di ontogenesi dei pozzi per acqua:

- il primo capitolo, di carattere propedeutico, tratta tutti i temi essenziali per la corretta elaborazione di uno studio idrogeologico, quale indispensabile strumento operativo per lo sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero;
- il secondo si occupa del progetto del pozzo;
- il terzo illustra le varie fasi di realizzazione del pozzo e i problemi connessi;
- il quarto approfondisce le questioni inerenti al collaudo delle opere di captazione;
- il quinto esamina tutto ciò che attiene alla loro manutenzione;
- il sesto completa il quadro, occupandosi delle tematiche e delle metodologie relative alla cementazione dei pozzi in disuso o potenzialmente pericolosi.

Il futuro è ancora aperto ad ulteriori progressi, sia mutuati da altri campi operativi (ricerche di idrocarburi *in primis*) sia ideati e costruiti direttamente da persone che lavorano in questo settore, a patto che vi sia un idoneo substrato culturale ed economico, che supporti convenientemente tali attività di ricerca. Si tenga peraltro sempre presente che l'acqua costituisce un elementare e imprescindibile limite allo sviluppo degli ecosistemi. Occorre ben comprendere che ogni nostro intervento, ma anche ciascuna idea progettuale, deve passare prima di tutto al vaglio della compatibilità ambientale, in rapporto alle varie matrici interessate dall'opera.

Una non corretta stima della portata delle nostre azioni può infatti generare conseguenze negative addirittura inimmaginabili.

*Maurizio Gorla*

# 1. LO STUDIO IDROGEOLOGICO: SVILUPPO DEL MODELLO CONCETTUALE DEL SISTEMA ACQUIFERO

La ricostruzione geologica del sistema acquifero, finalizzata al reperimento e successivo sfruttamento, tramite pozzi o bottini di presa, delle risorse idriche ivi contenute, rappresenta l'imprescindibile punto di partenza del lavoro di un idrogeologo. Per fare questo, è necessario sviluppare quello che oggi viene comunemente definito *modello concettuale* (vedere anche ASTM, D-5447-93), ovvero la riproduzione dell'ecosistema sotterraneo, il più possibile rispondente alla realtà e basata sui dati stratigrafico-strutturali, idrogeologici e idrochimici disponibili.

È altresì vero che la rappresentazione di sistemi complessi, come sono sicuramente gli acquiferi, può essere effettuata al meglio solo se si possiedono informazioni certe, attinenti alle proprietà fisiche e chimiche del dominio investigato. Quindi, per poter ricostruire il comportamento di un acquifero, nelle tre dimensioni dello spazio, occorre avere nozione dei suoi caratteri petrofisici (e tra questi, in particolare la permeabilità  $K$  e la porosità efficace  $n_e$ ), anche perché la risposta dei materiali geologici ad impulsi esterni al sistema è determinata in massima parte proprio da questa tipologia di proprietà naturali.

In questo primo capitolo si approfondiranno pertanto i concetti chiave, che è indispensabile conoscere e utilizzare per caratterizzare compiutamente il *reservoir* (serbatoio idrico naturale) sottoposto ad indagine, prima di iniziare a elaborare il conseguente progetto del pozzo, per scopi acquedottistici, industriali, agricoli o altro ancora.

## 1.1. Ricostruzione geologica e idrogeologica del sottosuolo

La ricostruzione geologica, attinente a tutte le caratteristiche naturali osservabili al di sopra del piano campagna, e idrogeologica, vale a dire delle modalità con cui si attua il deflusso idrico sotterraneo, nonché del chimismo delle acque ivi circolanti, rappresenta il primo fondamentale livello di conoscenza, indispensabile per lo sviluppo di un modello concettuale del sistema acquifero investigato e quindi per la successiva ubicazione ragionata del pozzo.

Il modello concettuale di riferimento deriva pertanto dalla raccolta, dall'elaborazione e dall'analisi dei dati relativi a:

- precedenti studi geologici alla scala del sito e/o regionale;
- informazioni riguardanti tutte le perforazioni effettuate nell'ambito della zona d'interesse;

- integrazioni tra le varie tipologie di dati, ovvero rilievi idrogeologici e geofisici mirati all'individuazione di particolari peculiarità dell'area esaminata (presenza di livelli preferenziali di scorrimento idrico, come ad esempio grandi fratture beanti, o di strutture sepolte, cioè paleoalvei, ecc.) o altresì di problematiche che possono limitare la produttività delle future opere di captazione (ad esempio, l'esistenza di geometrie lenticolari, di notevoli spessori di materiali a bassissimo grado di permeabilità, e più in generale di marcate condizioni di anisotropia ed eterogeneità del sistema).

Pertanto, gli obiettivi fondamentali della ricostruzione geologica-idrogeologica del sottosuolo risultano essere i seguenti:

- definire l'assetto geologico del sistema acquifero investigato;
- porre in relazione le proprietà litologiche dei terreni e delle rocce con quelle afferenti alla circolazione idrica sotterranea, nonché alle interazioni fra acqua e matrice solida;
- fornire un punto di riferimento per la comparazione dei nuovi dati rispetto alla precedente previsione della configurazione geologica;
- migliorare la scelta dei siti dove trivellare nuovi pozzi, basandosi su una valutazione essenzialmente iterativa dell'informazione idrogeologica;
- assicurare una corretta e logica organizzazione dei dati, tale da sviluppare anche modelli numerici di flusso e trasporto, rispettivamente per la zona vadosa e per il dominio saturo sottostante.

### 1.1.1. Rilievi geologici di superficie

Il rilevamento geologico della superficie del terreno rappresenta sempre la prima imprescindibile fase di esplorazione del territorio.

Alcune caratteristiche, riconoscibili già grazie a un'attenta osservazione a piano campagna (grado di propagazione delle fratture, estensione nello spazio della litologia delle varie formazioni, grado di eteropia delle medesime, ecc.), possono estendersi anche nel sottosuolo, pertanto questo lavoro appare molto spesso di grande valore per il prosieguo dell'intera campagna d'investigazione idrogeologica.

Di seguito, si forniscono alcune informazioni basilari per la caratterizzazione geologica della superficie del terreno.

Occorre innanzitutto ricordare che, rispetto alla litologia, è possibile classificare le rocce in tre grandi categorie: ignee, sedimentarie e metamorfiche.

#### ROCCE IGNEE

---

Le rocce ignee derivano dalla cristallizzazione di fusi magmatici e possono essere ulteriormente suddivise in:

*1. Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

---

- intrusive: quando il magma si raffredda lentamente nel sottosuolo, all'interno di una camera magmatica, con generazione di rocce a grana medio-grossolana. Il granito è un esempio di roccia ignea intrusiva;
- filoniane: rocce consolidate a profondità minori rispetto alle precedenti e più rapidamente, motivo per cui la loro grana risulta ridotta, dando luogo generalmente a riempimenti di fratture o a lenti, collocate ai bordi dei plutoni. Un esempio di roccia filoniana è dato dal diabase;
- eruttive o effusive: corrispondono alle condizioni di rapido raffreddamento del magma sulla superficie terrestre, che si traduce in una grana finemente cristallina, come quella del basalto, o addirittura in un aspetto vetroso, come quello dell'ossidiana.

#### ROCCE SEDIMENTARIE

Le rocce sedimentarie si formano per degradazione ed erosione di rocce preesistenti (igneo, sedimentarie e metamorfiche) e possono essere distinte in tre gruppi principali:

- detritiche o di origine clastica, derivanti dall'accumulo meccanico di particelle solide, in seguito a processi di trasporto e deposito; appartengono a questa categoria rocce come i conglomerati, le arenarie e le argilliti;
- di origine chimica, generatesi a partire da elementi chimici disciolti all'interno di una soluzione, i quali, raggiunta la sovrassaturazione del liquido, si depositano in forma di cristalli o gel e sedimentano; classici esempi sono rappresentati dalle evaporiti, che si originano dall'evaporazione di specchi d'acqua marina, come lagune o golfi, e dai travertini;
- organogene, che si formano per deposito di materiali organici, come piante o esseri viventi; rientrano in questo gruppo non solo la torba e il carbone, ma anche i calcari organogeni.

#### ROCCE METAMORFICHE

Le rocce metamorfiche derivano dalla trasformazione di rocce preesistenti (igneo – un granito per metamorfismo si tramuta in uno gneiss; sedimentarie – un calcare sottoposto a metamorfismo si trasforma in un marmo; o metamorfiche), a seguito di cambiamenti di pressione e/o temperatura dell'ambiente geologico di partenza.

La degradazione delle rocce può dare origine ai terreni, che si possono differenziare precipuamente in base alle dimensioni dei granuli che li compongono.

Ossia, si possono riconoscere terreni:

- granulari, detti anche non coesivi o incoerenti, formati in prevalenza da frazioni grossolane (sabbie, ghiaie e ciottoli, con dimensioni dei granuli rispetti-

vamente pari o maggiori a 0,0625 mm, 2 mm e 30 mm), in percentuali che variano dal 50% al 65% in funzione del tipo di classificazione adottata (non possiedono plasticità, coesione e resistenza allo stato secco);

- coesivi o coerenti, costituiti da frazioni fini prevalenti, come limi o argille (possiedono plasticità, coesione e resistenza allo stato secco, nonché granulometrie rispettivamente inferiori a 0,0625 mm e 0,0049 mm);
- organici, composti in abbondanza da sostanze organiche (per esempio le torbe).

Le tabelle 1.1, 1.2 e 1.3 consentono di ricavare alcune utili informazioni sui principali e più diffusi tipi di rocce.

Tabella 1.1 – Principali caratteri fisici delle rocce ignee (Cerbini e Gorla, 2009)

Colore		Chiaro		Medio	Scuro	
Principali minerali		Quarzo, feldspati, altri minerali minori	Feldspati	Feldspati, orneblenda	Augite, feldspati	Augite, orneblenda, olivina
Struttura	Grossolana, irregolare, cristallina	Pegmatite	Pegmatite sienitica	Pegmatite dioritica	Pegmatite gabbrica	–
	Cristallina, media e grossolana	Granito	Sienite	Diorite	Gabbro	Peridotite
	Cristallina fine			Dolerite		
	Afanitica	Aplite			Diabase	
	Vetrosa	Felsite			Basalto	
	Porosa	Vetro vulcanico			Ossidiana	
	Frammentata	Pomice		Scoria o basalto vescicolare		
	Tufo (fine), breccia (grossolana) e cenere (variabile)					

L'osservazione delle caratteristiche litologiche, morfologiche e strutturali delle formazioni geologiche affioranti permette di acquisire conoscenze su:

- natura delle rocce;
- giacitura dei corpi rocciosi;
- assetto dei sistemi di drenaggio;
- grado di evoluzione strutturale del territorio.

Si analizzano ora separatamente tali aspetti del rilevamento geologico.

#### 1.1.1.1. Natura delle rocce

La natura litologica dei materiali rocciosi ne determina la forma.

Ciò significa che una roccia tenera e friabile, essendo più facilmente erodibile, crea delle zone depresse, mentre una roccia dura e compatta dà luogo a dei settori di alto morfologico.

1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

Tabella 1.2 – Principali caratteri fisici delle rocce sedimentarie (Cerbini e Gorla, 2009)

Gruppo	Granulometria	Composizione		Denominazione
Clastiche	Granuli grossolani prevalenti	Ciottoli arrotondati in matrice a grana media		Conglomerato
		Frammenti di roccia grossolani e angolari		Breccia
	Più del 50% di granuli medi	Granuli di quarzo medi	Meno del 10% di altri minerali	Arenaria silicea
			Apprezzabile quantità di minerali argillosi	Arenaria argillosa
			Apprezzabile quantità di calcite	Arenaria calcarea
			Più del 25% di feldspati	Arcosa
			Tra il 25% e il 50% di feldspati e minerali melanocrati	Grovacca
	Più del 50% di granuli fini	Granuli di quarzo, da fini a molto fini, con minerali argillosi		Siltite (se laminata argillite)
		Minerali delle argille microscopici	Meno del 10% di altri minerali	Argillite
			Apprezzabile quantità di calcite	Argillite calcarea
			Apprezzabile quantità di materiale carbonioso	Argillite carboniosa
			Apprezzabile quantità di cemento di ossido di ferro	Argillite ferruginosa
Organiche	Variabile	Calcite e fossili		Calcare fossilifero
	Da media a microscopica	Calcite e apprezzabili quantità di dolomite		Calcare dolomitico o dolomia
	Variabile	Materiale carbonioso		Carbone bituminoso
Chimiche	Microscopica	Calcite		Calcare
		Dolomite		Dolomia
		Quarzo		Selce, pietra focaia
		Composti di ferro con quarzo		Formazione di ferro
		Halite		Roccia evaporitica
		Gesso		

Tabella 1.3 – Principali caratteri fisici delle rocce metamorfiche (Cerbini e Gorla, 2009)

Struttura	Tessitura	Denominazione
Cristallina grossolana	Foliata	Metamorfiti massive
Cristallina media	Gneissica	Metaquarziti e gneiss
	Scistosa	Micascisti, anfiboliti, marmi, serpentiniti
Da fine a microscopica	Laminata	Filladi, ardesie, hornfels e carbon fossile

L'evoluzione morfologica di una roccia si manifesta sempre con le medesime modalità, a patto che si mantengano costanti sia i suoi caratteri fisici (litologia, stratificazione, porosità, ecc.) sia le condizioni climatiche (altitudine, latitudine, esposizione agli agenti atmosferici, ecc.).

Sotto questo punto di vista, è possibile classificare le rocce in base al loro grado di coerenza, ovvero della resistenza che esse sono in grado di opporre alla degradazione operata da cause meteoriche, e quindi distinguerle in coerenti, pseudo-coerenti ed incoerenti.

#### 1.1.1.1.1. Rocce coerenti

Le rocce coerenti sono ad esempio le rocce lapidee non fessurate (arenarie, conglomerati, calcari e dolomie), magari facilmente solubili, ma resistenti all'azione meccanica (rocce granitoidi, gneiss, serpentini, ecc.). L'aspetto morfologico dipende dalla natura mineralogica dei componenti, dalla presenza o meno di stratificazione e scistosità, nonché di fratture e zone fessurate. Rocce massicce prive di stratificazione offrono una scarsa possibilità di penetrazione alle acque, contrariamente a quanto accade per i litotipi scistosi o intensamente fratturati.

Si forniscono di seguito le caratteristiche tipiche di alcuni gruppi di rocce coerenti:

- arenarie;
- conglomerati;
- carbonatiche;
- gessi;
- granitoidi e gneissiche;
- basiche e ultrabasiche.

#### ARENARIE

---

Possiedono una notevole resistenza all'erosione (le arenarie a cemento siliceo sono più resistenti di quelle a cemento calcareo o a matrice argillosa), motivo per cui sviluppano aree rilevate con pareti spesso subverticali e dirupate (figura 1.1), oppure con scarpate a gradini, se è presente una definita stratificazione. Possono anche dar luogo a valli profondamente incise, nel caso in cui siano controllate da faglie o fratture importanti.

#### CONGLOMERATI

---

Si manifestano solitamente sotto forma di pareti molto ripide, al limite subverticali, come ad esempio quelle che formano la forra del fiume Adda, scavata all'altezza di Paderno d'Adda nel conglomerato quaternario lombardo, denominato *Ceppo*.

---

*1. Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

---



Figura 1.1  
Paesaggio dell'Appennino tosco-emiliano, caratterizzato dall'affioramento di formazioni arenacee terziarie

#### ROCCE CARBONATICHE (CALCARI E DOLOMIE)

Si riconoscono per il classico profilo d'erosione dentellato e, se alternate a livelli di natura argillosa, risultano sporgenti, poiché meno erodibili di questi ultimi. Morfologie rilevate, aspre e dirupate, spesso associate a valli profondamente incise, sono tipiche di zone con affioramento di calcari (figura 1.2); altre forme specifiche dei litotipi carbonatici sono rappresentate da pinnacoli, guglie e torrioni, come per esempio quelle delle successioni dolomitiche (le dolomie delle Prealpi Lombarde sono così fortemente fratturate che permettono di osservare un paesaggio addirittura calanchivo, più simile a quello di numerose aree appenniniche; si pensi a tale proposito agli affioramenti delle Argille del Santerno). Le forme generate da rocce dolomitiche sono più smussate di quelle calcaree, tanto che si può parlare anche di paesaggio ruiniforme (formazioni dolomitiche del Veneto e del Trentino, figura 1.3). Un'altra morfologia tipica dei calcari è quella carsica (figura 1.4), che si manifesta in corrispondenza di ampi tavolati calcarei, associata a forme peculiari per tale ambiente (doline, inghiottitoi, condotti, ecc.).



Figura 1.2  
L'imponente piattaforma carbonatica della Presolana (Bergamo)



Figura 1.3  
Paesaggio dolomitico: le tre cime di Lavaredo (Belluno)

1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

---



Figura 1.4  
Esempio di morfologia carsica  
(Udine)

### GESSI

Pur se solubili e teneri, si tratta di litotipi molto coerenti e resistenti all'erosione, i quali danno luogo a settori in rilievo, come per esempio accade nel caso delle creste, in netto risalto geomorfologico, afferenti alla cosiddetta *Vena del gesso* (figura 1.13), la quale affiora in maniera più o meno continua tra le province di Bologna e Forlì, oppure alla formazione gessoso-solfifera siciliana.

### ROCCE GRANITOIDI E GNEISSICHE

Sono rocce con morfologie contrastanti, in funzione principalmente della composizione mineralogica e del clima (ad esempio, se è presente biotite, in clima caldo umido, essa tende a gonfiarsi, accelerando la disgregazione del granito; in clima temperato, invece, si assiste a un'alterazione dei plagioclasti per idrolisi, mentre microclino e quarzo sono praticamente imm modificabili). I graniti possono perciò definire forme sia aspre, con pareti dirupate e valli molto incise, tipiche di ambienti a clima temperato e di alta montagna (paesaggi alpini, figura 1.5), sia dolci, dove si hanno aree collinari, in condizioni di clima mediterraneo e caldo umido (graniti della Sila, alterati e con scomposizione in masse globulari, per un fenomeno chiamato *sferiazione*), oppure in zone desertiche, laddove si verifica un contatto tra depositi salini e rocce granitoidi.

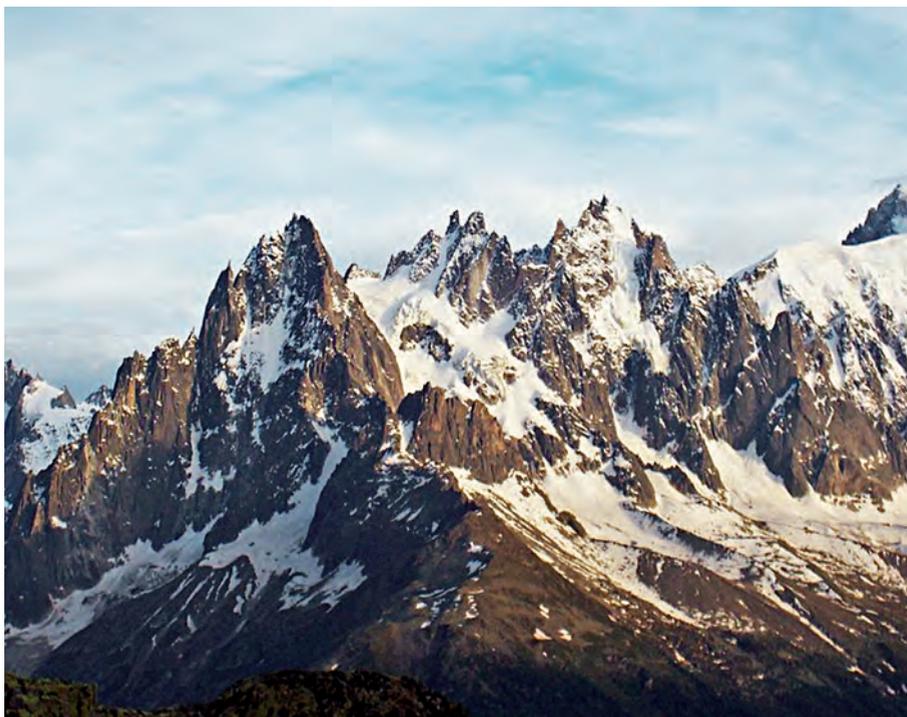


Figura 1.5  
Esempio di paesaggio in rocce granitiche: il protogino del Monte Bianco, Aguilles de Chamonix (Aosta)

#### ROCCE BASICHE ED ULTRABASICHE (IGNEE E METAMORFICHE)

Essendo poco erodibili, si propongono alla vista come zone in netto rilievo morfologico, secondo ampie superfici accidentate, con assenza di vegetazione e discontinua copertura pedologica (limitata a piccole tasche, in cui l'esistenza di acqua stagnante può disgregare la roccia, principalmente per alterazione di plagioclasti e anfiboli, con formazione di un suolo rosso). Altre morfologie caratteristiche delle rocce laviche sono rappresentate da immensi *plateau*, colate con superfici caotiche a blocchi o raggrinzite (lava a corde), fessurazione colonnare, tipica di basalti (come la *Giant Causeway* irlandese, figura 1.6) e trachiti (Colli Euganei).

##### 1.1.1.1.2. Rocce pseudocoerenti

Le rocce pseudocoerenti sono materiali geologici il cui livello di coerenza è legato al contenuto d'acqua: coerenti se asciutti, incoerenti quando si ha un grado di saturazione in acqua più o meno abbondante, che può addirittura portare a una loro completa fluidificazione.

1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*



Figura 1.6  
*Giant Causeway*, la strada selciata dei giganti, dovuta a fessurazione colonnare dei litotipi basaltici (Irlanda)

Si tratta delle argilliti, delle ceneri vulcaniche e soprattutto delle argille.

Questa classe di rocce, che è la più soggetta agli effetti del ruscellamento delle acque meteoriche, sia esso diffuso o concentrato, è riconoscibile in affioramento per la formazione di un versante “spezzato”, avente una porzione superiore a debole inclinazione, in particolar modo se la copertura vegetale è capace di svilupparsi con continuità, e una porzione inferiore a maggior pendenza e priva di vegetazione, principalmente quando si attua uno scalzamento alla base del versante ad opera dei corsi d’acqua.

Il tipico paesaggio delle aree argillose è però quello a calanchi, caratterizzato dall’associazione di piccoli bacini imbriferi, fra loro intimamente connessi, ognuno dei quali è dato da un collettore principale e da canali laterali estremamente ramificati, incisi e stretti, separati da creste acute. Si tratta di una morfologia molto dinamica, che può anche modificarsi da una stagione all’altra, in funzione dell’intensità con cui si manifesta l’erosione accelerata. In presenza di successioni stratificate, tali forme tendono a generarsi sui versanti a reggipoggio, in preferenza esposti a meridione, laddove sono visibili le testate degli strati; vi si accom-

pagnano spesso imponenti fenomeni di frana, sotto forma di colate sui pendii a franapoggio.

Esempi di zone calanchive sono quelle osservabili nei nostri Appennini, così come le famose *bad lands* americane (figura 1.7), i *voçorocas* brasiliani e i *lavakas* del Madagascar.



Figura 1.7  
Il tipico scenario calanchivo delle *bad lands* americane (Grand-Staircase Escalante National Monument, USA)

Nel caso di argille varvate, che rappresentano il riempimento di antichi bacini lacustri alpini, la morfologia risultante è costituita da estesi fondovalle appiattiti, inseriti all'interno di forme più movimentate.

Le argille consentono altresì di ricavare informazioni sulle condizioni esistenti al momento della deposizione e nelle successive fasi (per esempio, compattazione, diagenesi, ecc.).

La tabella 1.4 riporta le informazioni salienti afferenti alle argille, mentre la figura 1.8 evidenzia una relazione tra la percentuale di argilla nel suolo e la quantità annua delle precipitazioni meteoriche.

1. Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero

Tabella 1.4 – Informazioni desumibili in base al tipo di argilla

Tipo di argilla	Ambiente di deposizione	Condizioni di drenaggio	Tipo di clima	Ambiente di ritrovamento	pH	Grado di alterazione	SiO <sub>2</sub> /Cationi bivalenti
Illite	Marino	Scarso	Diagenesi	Argilliti	> 7	Basso	Alto
Clorite	Marino	-	Arido o polare	Rocce metamorfiche di basso grado e sedimentarie clastiche	-	Basso	-
Montmorillonite (smectite)	Lacustre/acqua salmastra (struttura flocculata) o acqua dolce (struttura dispersa o orientata)	Scarso	Temperato o arido	Terreni argillosi per disfacimento di graniti e rocce vulcaniche basiche	> 7	Alto	Alto
Caolinite	Lacustre	Alto/buono	Temperato con elevate precipitazioni o tropicale	Soluzioni idrotermali e alterazione di rocce feldspatiche	< 7	Alto	Basso

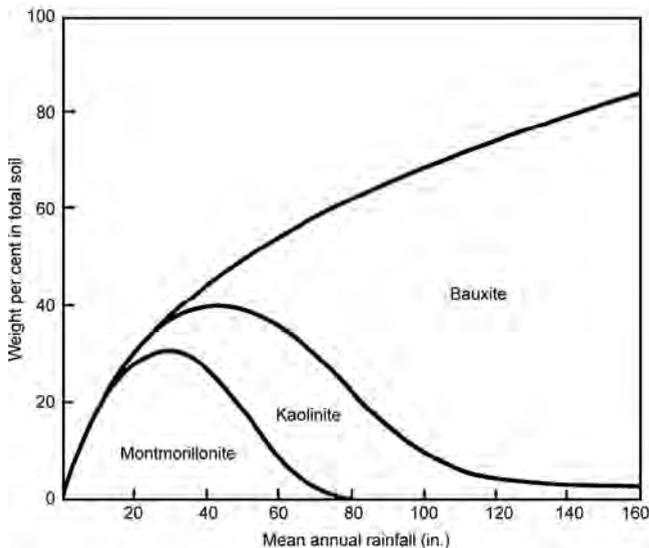


Figura 1.8  
Relazione fra il contenuto percentuale di argilla nel suolo e la media di pioggia annua (Berner, 1971)

### 1.1.1.1.3. Rocce incoerenti

Esempi di rocce incoerenti sono i terreni sciolti (sabbie, ghiaie e loess) e i depositi glaciali (morene, tilliti, ecc.), il cui modellamento è controllato prevalentemente dalle condizioni climatiche, dalla natura dei clasti, nonché dalla porosità degli accumuli (in special modo per le sabbie).

Le sabbie omogenee quarzose, senza legante fra i granuli, sono più mobili e quindi più erodibili di quelle con composizione mineralogica eterogenea (quarzoso-feldspatiche o quarzoso-micacee), poiché il quarzo non è chimicamente alterabile e pertanto può essere solo trascinato via.

Anche il grado di saturazione in acqua si rivela fondamentale, dato che una sabbia leggermente bagnata risulta più resistente di una asciutta; oltre un certo limite, con flusso lineare e sabbia omogenea, si manifesta però uno stato critico, in condizioni di gradiente idraulico critico  $i = i_c$  ( $i_c = \gamma' / \gamma_w$ , in cui  $\gamma'$  è il peso di volume sommerso, ossia la differenza tra  $\gamma$  e  $\gamma_w$ ), che a sua volta può determinare in questa tipologia di deposito:

- una fluidificazione totale (*quick sands* o sabbie mobili);
- una riduzione dell'addensamento e un aumento di volume;
- un ribollimento (*boullance*);
- una repentina crescita della permeabilità  $K$ .



Figura 1.9  
Pirami di terra del Renon (Bolzano)

---

### 1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

Forme tipiche dei materiali sabbiosi sono le spiagge, correlate a un ambiente litorale, il cui sviluppo è principalmente funzione del moto ondoso, e le dune, legate soprattutto all'azione modellante del vento e peculiari sia di ambiente desertico (dune a barcana) che polare (dune nivo-eoliche, costituite da estese pavimentazioni di sabbie grossolane). In situazioni di clima temperato fresco, si hanno morfologie delineate da larghi interfluvi piatti (con estensione dell'ordine anche di una decina di chilometri), bruscamente troncati da versanti pressoché convessi (ad esempio, le lande della Francia occidentale).

I depositi glaciali danno invece luogo a forme dolci, con pendii a debole inclinazione. Caratteristiche in tal senso sono le cosiddette *piramidi di terra* (figura 1.9), ovvero morfologie calanchive, con pinnacoli e torrioni, sulla sommità dei quali sono posizionati dei grossi blocchi, i quali impediscono di fatto il ruscellamento dei materiali sottostanti (un bell'esempio di questo fenomeno naturale si può osservare nell'altopiano del Renon, in Alto Adige).

#### 1.1.1.2. Giacitura dei corpi rocciosi

Le condizioni di giacitura producono sempre delle morfologie distintive. In particolare, si parla di *controllo strutturale* del paesaggio, quando le sue forme sono legate alla giacitura delle rocce che lo compongono.

Si passano in rassegna alcune delle situazioni più tipiche.

##### 1.1.1.2.1. Morfologie connesse a strutture tabulari

Alcune morfologie possono dar luogo ad ampie aree pianeggianti, limitate da scarpate (soprattutto se sono presenti rocce lapidee): è il caso delle strutture tabulari. I versanti sono ripidi, con configurazione a gradini, qualora la successione degli strati sia caratterizzata da un'alternanza di litotipi a diverso grado di erodibilità (ad esempio, banchi calcarei interposti a orizzonti argillosi o marnosi). L'interruzione brusca, a scalino, del livello più competente viene indicata con il termine di *glint*. Quando invece si sviluppano pareti subverticali, prive di gradini, si parla di strutture a *plateau* (come ad esempio sono quelle riscontrabili in Sicilia, nella zona di Ragusa).

Un'altra forma tipica, osservabile con giaciture suborizzontali, è la *mesa*, ossia un tavolato residuo, isolato dall'erosione e formato dalla sovrapposizione di uno strato duro, poco sensibile alla degradazione operata dagli agenti atmosferici, su uno meno resistente (figura 1.10).

##### 1.1.1.2.2. Morfologie connesse a strutture omocliniche (monoclinali)

Nel caso di morfologie connesse a strutture omocliniche si fa riferimento a strutture determinate dalla uniforme e debole immersione degli strati in una certa direzione, con generazione di versanti asimmetrici. Le configurazioni topografi-



Figura 1.10  
Esempio di *mesa* (Mesa Verde National Park, USA)



Figura 1.11  
Esempio di *cuesta*

---

1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

---

che più caratteristiche, nel caso vi sia altresì un'alternanza di litologie con differente erodibilità, sono rappresentate dalla *cueta* (in cui si riconoscono un rovescio, impostato sul dorso dell'unità rocciosa più resistente e collocato alla sommità della struttura, in corrispondenza dei piani di stratificazione, e un fronte, che è dato da una scarpata scoscesa, laddove si hanno condizioni di reggipoggio), al di sotto della quale si evidenzia una depressione o valle ortoclinale, sviluppatasi longitudinalmente alla *cueta* e conformemente alla giacitura degli strati (figura 1.11), e dal *hogback* (vale a dire una cresta dirupata che trae origine da un'unità rocciosa coerente a geometria omoclinale, con versanti pressoché simmetrici, aventi una pendenza elevata, superiore ai 45°, figura 1.12). Esempi italiani di *cueta* e di *hogback* sono forniti rispettivamente dalle valli appenniniche e dalla Vena del gesso (figura 1.13).

#### 1.1.1.2.3. Morfologie connesse a strutture a pieghe

È possibile che si sviluppino strutture a partire da una situazione omoclinale, ma che generalmente evolvono verso morfologie totalmente originali, in relazione a una più o meno accentuata lacerazione della piega.

Si distinguono le forme legate a pieghe anticlinali da quelle correlate a pieghe sinclinali (figura 1.14).



Figura 1.12  
Il Dakota *hogback* (Colorado, USA)



Figura 1.13  
Sviluppo areale  
della Vena del gesso (Bologna),  
esempio di *hogback* italiano

Nel primo caso, se vi è un'alternanza di strati a vario grado di erodibilità (figura 1.15), si possono riconoscere forme associate a strutture anticlinali integre (l'alto strutturale coincide con il rilevato morfologico, il quale dà luogo a un drenaggio delle acque superficiali di tipo radiale centrifugo, figura 1.16), parzialmente intaccate (con cresta attorno a un'area valliva centrale, impostata in corrispondenza degli orizzonti più teneri) ed erose. Queste ultime, a loro volta, possono evolvere o verso una valle anticlinale (tipico esempio di inversione del rilievo, con la parte centrale della struttura nettamente più depressa delle creste circostanti, là dove si ha una valle, cioè un basso morfologico, lungo la cerniera dell'anticlinale, ossia sopra un arco strutturale o una zona tettonicamente sollevata) o al contrario verso una cresta anticlinale (ovverosia, una struttura erosa che si traduce in un rilievo, con cresta morfologica coincidente con quella anticlinale). Per ciò che attiene alle sinclinali (figura 1.17), si osservano forme variabili a seconda che si manifesti un'interposizione di litotipi a diverso grado di erodibilità, che vari la maturità delle strutture, e che esse siano più o meno erose. Quindi,

1. Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero

si possono originare rispettivamente una valle sinclinale (quando la struttura è controllata direttamente dalla topografia e la valle risulta impostata in corrispondenza dell'asse della sinclinale), una sinclinale parzialmente lacerata (con creste concentriche, attorno a una valle sinclinale) e una cresta sinclinale (con smantellamento della struttura molto accentuato, tanto che il nucleo della sinclinale si trova alla sommità del rilievo; anche in tal caso si ha un'inversione del rilievo, con cresta morfologica generatasi su una depressione strutturale, figura 1.18).

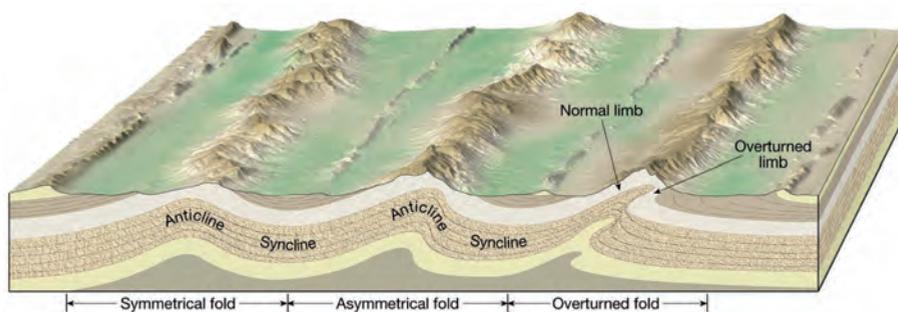


Figura 1.14  
Pieghe anticlinali e sinclinali (Marso, 2008)

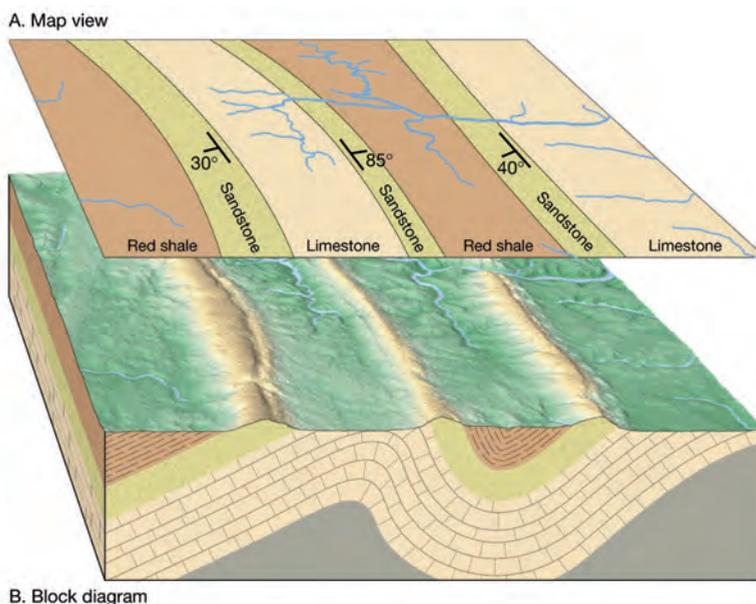


Figura 1.15  
Possibile lacerazione delle strutture a pieghe e loro riconoscimento mediante rilievo geologico di superficie (valori di direzione e immersione degli strati) (Marso, 2008)



Figura 1.16  
Esempio di anticlinale nei monti Zagros (Iran)



Figura 1.17  
Sinclinale del Rainbow Basin (California, USA)

1. Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero



Figura 1.18  
Esempio di cresta sinclinale (Sideling Hill, Virginia, USA)

#### 1.1.1.2.4. Morfologie connesse a faglie

Le faglie sono strutture che causano brusche interruzioni dei corpi rocciosi, con differenti modalità di scorrimento dei blocchi a contatto lungo il piano di faglia (faglie normali, inverse, trascorrenti, ecc., figura 1.19a, b, c), le quali finiscono col tradursi in precise espressioni morfologiche, in quanto possono:

- sollevare, abbassare e spostare orizzontalmente porzioni della crosta terrestre con peculiarità topografiche già acquisite;
- creare zone intensamente frantumate, brecciate, più facilmente erodibili dei settori circostanti (fasce cataclastiche e milonitiche);
- portare a contatto rocce con diverso grado di erodibilità;
- costituire aree preferenziali per la messa in posto di intrusioni e mineralizzazioni, nonché la risalita di fluidi profondi, anche con carattere di spiccato termalismo.

Le faglie possono dar luogo a morfologie facilmente riconoscibili, come ad esempio quella ad *horst e graben* (figura 1.19d), ossia a pilastri e fosse tettoniche, tipica delle aree in distensione, oppure quella a scarpata composta, che deriva dalla riattivazione del piano di faglia, dopo una fase di erosione della superficie del terreno, durante un periodo di immobilità della *fault scarp*.

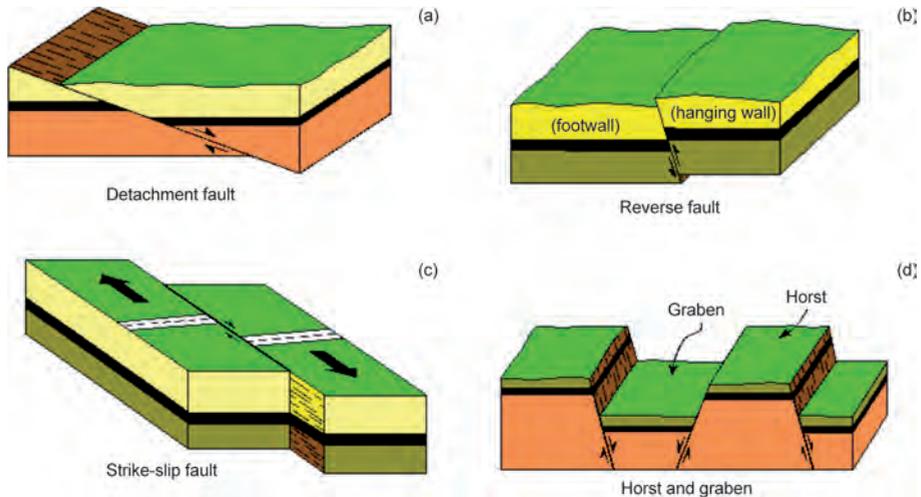


Figura 1.19  
Faglia normale (a), inversa (b), trascorrente (c) e struttura a pilastri e fosse tettoniche (d) (usgs)

L'azione dovuta alla presenza di faglie, o meglio al movimento che si realizza lungo il loro piano di scorrimento, può anche generare dei fenomeni strutturali secondari, come per esempio il cosiddetto *drag folding*, ovvero sia un piegamento degli strati di roccia che ne precede la rottura (piega di trascinamento, figura 1.20).

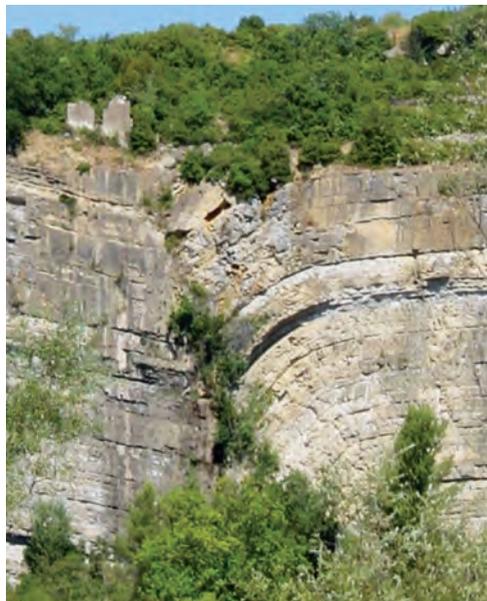


Figura 1.20  
Esempio di faglia inversa, con *drag folding* degli strati a destra del piano di faglia (Bédarieux, Francia)

1. *Lo studio idrogeologico: sviluppo del modello concettuale del sistema acquifero*

---

I fattori che possono indicare l'esistenza di una faglia sono:

- le contropendenze di versante, ossia dei salti improvvisi, con sviluppo longitudinale rispetto al pendio, che ne interrompono la continuità (figura 1.21);
- le valli profondamente incise, a marcato andamento rettilineo, talora non originatesi lungo la linea di massima pendenza;
- le cosiddette *faccette triangolari*, riconoscibili lungo il versante e determinate dai movimenti lungo la scarpata di faglia, in seguito all'erosione e secondo una precisa sequenza;
- lo spostamento orizzontale di tratti di creste montuose allineate (indice di fenomeno recente);
- il brusco abbassamento di tratti di creste montuose allineate, a quote inferiori rispetto a quelle limitrofe;
- gli allineamenti di frane, su versanti contigui, ad inclinazioni opposte e su distanze notevoli;
- le diversioni improvvise dei corsi d'acqua, i quali seguono una direzione preferenziale (come ad esempio accade ai torrenti Staffora e Curone, che in corrispondenza della linea tettonica Villalvernia-Varzi risultano deviati di circa 5-6 km in senso est-ovest);
- la cattura di un corso d'acqua ad opera di un altro corso d'acqua.



Figura 1.21  
Esempio di contropendenza di versante dovuta a faglia (*Ramon fault*, Israele)