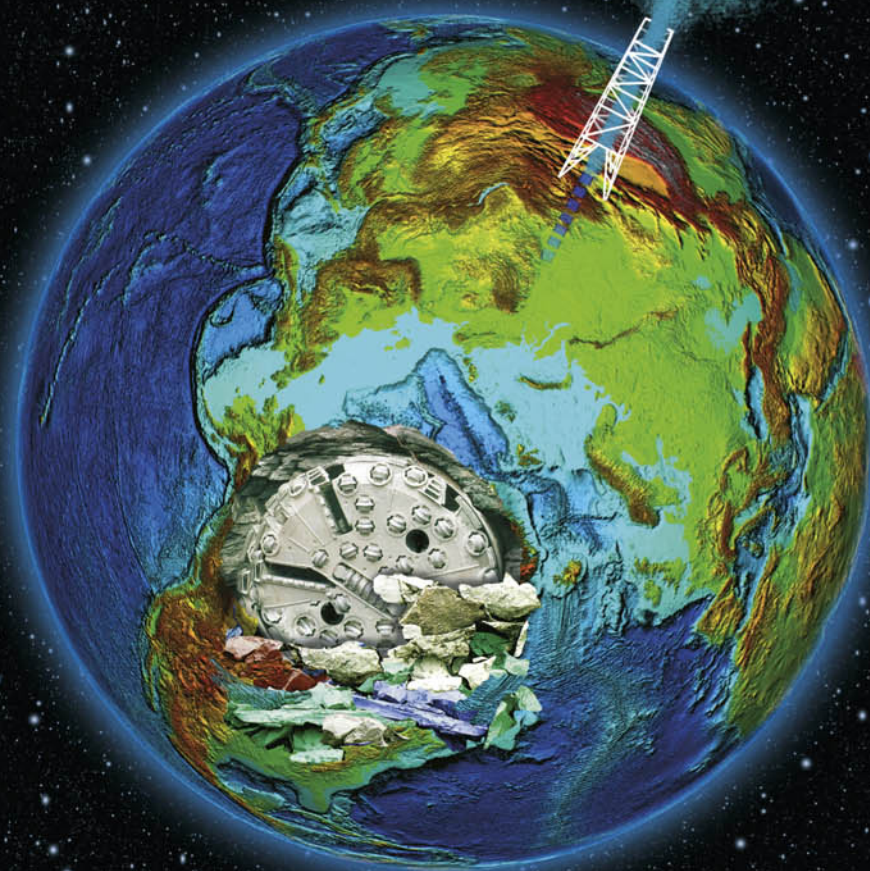


Aurèle Parriaux

FONDAMENTI DI GEOLOGIA PER L'INGEGNERIA

Traduzione di Dario Tosoni

Scheda sul sito >



DARIO FLACCOVIO EDITORE

AURÈLE PARRIAUX

FONDAMENTI DI GEOLOGIA PER L'INGEGNERIA

Traduzione di Dario Tosoni



Dario Flaccovio Editore

In omaggio ai miei genitori André e Alice Parriaux che hanno passato tutta la loro vita a insegnare, e per avermi dato la possibilità di intraprendere gli studi universitari, condizione necessaria (anche se non sufficiente) affinché questo libro possa oggi vedere la luce. Alla mia famiglia e ai miei figli Sibylle, Gabriel, Emmanuel, Nicolas e Jean-Marie che mi hanno dato lo stimolo e la forza per completare questo lavoro.

Aurèle Parriaux

FONDAMENTI DI GEOLOGIA PER L'INGEGNERIA

Traduzione: Dario Tosoni

ISBN 978-88-579-0139-8

© 2013 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione italiana: febbraio 2013

Originally published in French under the title:

Géologie, bases pour l'ingénieur - 2e édition revue et augmentée

© 2009 Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne

All rights reserved

Crediti DVD allegato:

Ideazione: Aurèle Parriaux

Coordinamento edizione italiana: Séverine Boll-Bilgot

Traduzione dei testi: Dario Tosoni

Collaboratori: Ludovic Desruelles, Grégory Grosjean, Diana Marques,
Laurent Tacher

Parriaux, Aurèle

Fondamenti di geologia per l'ingegneria / Aurèle Parriaux ; traduzione a cura di Dario Tosoni.

- Palermo : D. Flaccovio, 2013.

ISBN 978-88-579-0139-8

1. Geologia [e] Ingegneria I. Tosoni, Dario <1971>

553 CDD-22 SBN Pal0247114

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, febbraio 2013

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.

Indice

Introduzione all'edizione italiana

Prefazione

Appendice alla seconda edizione

Premessa

1. Il partenariato geologia-ingegneria

1.1. I campi della geologia applicata all'ingegneria	pag.	1
1.1.1. Progettazione di opere	»	2
1.1.2. Rischi naturali.....	»	3
1.1.3. Risorse minerarie.....	»	3
1.1.4. Inquinamento dell'ambiente.....	»	4
1.2. Storia della geologia	»	6

2. La Terra nello spazio

2.1. Il Sistema Solare	»	13
2.1.1. Rappresentazioni storiche.....	»	13
2.1.2. Struttura generale.....	»	15
2.1.3. Il moto di rivoluzione della Terra.....	»	16
2.2. I pianeti tellurici.....	»	19
2.2.1. Atmosfera e idrosfera	»	20
2.2.2. Geologia e attività geologica	»	21
2.2.2.1. Struttura interna	»	21
2.2.2.2. Attività endogena.....	»	21
2.2.2.3. Attività esogena	»	22
2.3. I pianeti giganti.....	»	26
2.4. Comete	»	28
2.5. Meteoriti	»	28
2.5.1. Meteoriti rocciose (aeroliti).....	»	29
2.5.2. Meteoriti metalliche (sideroliti).....	»	29

3. La terra nel tempo

3.1. La misura del tempo in geologia.....	»	31
3.1.1. Metodi radiometrici	»	31
3.1.2. Metodi stratigrafici	»	33
3.1.3. Metodi paleontologici.....	»	34
3.1.3.1. Fossilizzazione	»	34
3.1.3.2. Specificità degli organismi fossili	»	37
3.1.4. Sintesi sui metodi di datazione.....	»	38
3.2. Origine dell'Universo e della materia.....	»	39
3.2.1. Nucleosintesi iniziale.....	»	40
3.2.2. Fase stellare	»	40
3.2.3. Accrezione dei pianeti	»	42
3.3. Viaggio nel tempo: dal Precambriano al Quaternario.....	»	43
3.3.1. Precambriano.....	»	43
3.3.2. Era primaria (Paleozoico).....	»	47
3.3.3. Era secondaria (Mesozoico)	»	50
3.3.4. Era terziaria (Cenozoico).....	»	52
3.3.5. Era quaternaria (Antropozoico).....	»	55

4. La fisica del globo

4.1. Sismologia	»	63
4.1.1. Il meccanismo di rottura.....	»	65
4.1.2. I differenti tipi di onde sismiche.....	»	66
4.1.2.1. Onde di volume	»	66

4.1.2.2.	Onde di superficie.....	»	67
4.1.2.3.	Velocità di propagazione delle onde.....	»	67
4.1.3.	Leggi di propagazione delle onde.....	»	68
4.1.3.1.	Propagazione in un solo mezzo omogeneo isotropo.....	»	69
4.1.3.2.	Propagazione in due mezzi a velocità differente.....	»	69
4.1.3.3.	Propagazione delle onde sismiche all'interno della Terra.....	»	70
4.1.4.	Cause dei terremoti.....	»	72
4.1.4.1.	Origine tettonica.....	»	72
4.1.4.2.	Origine vulcanica.....	»	72
4.1.4.3.	Esplosioni nucleari sotterranee.....	»	74
4.1.4.4.	Dighe e terremoti.....	»	74
4.1.4.5.	Drenaggio ad opera di opere sotterranee o di pozzi profondi.....	»	74
4.1.4.6.	Collasso di cavità sotterranee.....	»	75
4.1.4.7.	Carsismo e terremoti (<i>a cura di Dario Tosoni</i>).....	»	76
4.1.5.	Analisi dei segnali sismici.....	»	76
4.1.5.1.	Misura.....	»	76
4.1.5.2.	Trattamento del segnale.....	»	76
4.1.5.3.	Scale di misura dei terremoti.....	»	80
4.1.5.4.	Localizzazione dell'epicentro.....	»	87
4.1.6.	Rischio sismico.....	»	90
4.1.6.1.	Frequenza media di accadimento.....	»	91
4.1.6.2.	Predizione degli eventi.....	»	91
4.1.6.3.	Risposta locale alla sismicità.....	»	92
4.1.6.4.	Danni causati dai terremoti.....	»	94
4.1.6.5.	Prevenzione.....	»	100
4.1.7.	Prospezione sismica.....	»	102
4.2.	Gravimetria.....	»	105
4.2.1.	Richiami di meccanica.....	»	105
4.2.2.	Nozione di geoide.....	»	106
4.2.3.	Misura del campo gravitazionale e suo trattamento.....	»	108
4.2.3.1.	Gravimetro.....	»	108
4.2.3.2.	Correzioni e anomalia di Bouguer.....	»	109
4.2.4.	Interpretazione delle anomalie.....	»	111
4.2.5.	I principi dell'isostasia.....	»	115
4.2.5.1.	Primo principio.....	»	116
4.2.5.2.	Secondo principio.....	»	116
4.2.6.	Densità delle rocce sulla Terra.....	»	120
4.3.	Magnetismo.....	»	121
4.3.1.	Cause del campo magnetico terrestre.....	»	121
4.3.2.	Componenti del campo magnetico in un punto della superficie terrestre.....	»	124
4.3.2.1.	Campo magnetico interno.....	»	124
4.3.2.2.	Campo magnetico delle rocce della litosfera.....	»	126
4.3.2.3.	Campo magnetico esterno.....	»	126
4.3.3.	Misura del campo magnetico.....	»	126
4.3.4.	Paleomagnetismo.....	»	127
4.4.	Geotermia.....	»	127
4.4.1.	Trasferimento del calore all'interno della Terra.....	»	127
4.4.1.1.	Meccanismi di trasferimento del calore.....	»	128
4.4.1.2.	Gradiente geotermico.....	»	129
4.4.2.	Utilizzo dell'energia geotermica.....	»	129
4.4.2.1.	Sfruttamento per avvezione.....	»	130
4.4.2.2.	Sfruttamento per convezione.....	»	132
5.	I minerali costituenti delle rocce		
5.1.	Cristallografia.....	»	136
5.1.1.	Struttura interna dei minerali.....	»	136
5.1.1.1.	Principali legami.....	»	136

5.1.1.2. Strutture cristalline	»	138
5.1.1.3. Elementi di simmetria.....	»	140
5.1.1.4. Sistemi di simmetria.....	»	141
5.1.2. Morfologia dei cristalli.....	»	141
5.1.3. Proprietà di coesione	»	145
5.1.3.1. Durezza dei minerali.....	»	145
5.1.3.2. Fratture e clivaggi.....	»	146
5.1.3.3. Elasticità e plasticità	»	147
5.1.3.4. Tenacità.....	»	147
5.1.4. Proprietà ottiche dei minerali	»	147
5.1.4.1. Caratteristiche macroscopiche (visibili a occhio nudo).....	»	147
5.1.4.2. Esame in sezione sottile.....	»	149
5.2. Geochimica.....	»	151
5.2.1. Silicati.....	»	152
5.2.1.1. Quarzo: SiO_2	»	152
5.2.1.2. Famiglia dei feldspati: $(\text{K}, \text{Na})\text{Al Si}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	»	153
5.2.1.3. Silicati ferro-magnesici	»	155
5.2.1.4. Fillosilicati non ferromagnesiaci.....	»	158
5.2.1.5. Gruppo dei granati $(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Mg})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	»	160
5.2.2. Carbonati	»	161
5.2.2.1. Calcite: CaCO_3	»	161
5.2.2.2. Dolomite: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	»	161
5.2.3. Solfati	»	162
5.2.3.1. Gesso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	»	162
5.2.3.2. Anidrite: CaSO_4	»	162
5.2.4. Fosfati	»	163
5.2.5. Alogenuri.....	»	163
5.2.5.1 Halite: NaCl	»	163
5.2.5.2. Fluorite: CaF_2	»	164
5.2.6. Solfuri.....	»	165
5.2.7. Ossidi e idrossidi	»	166
5.2.7.1. Ematite: Fe_2O_3	»	166
5.2.7.2. Magnetite: Fe_3O_4	»	167
5.2.7.3. Goethite: $\text{FeO}(\text{OH})$	»	167
5.3. Determinazione dei minerali sul terreno.....	»	168
6. Il magmatismo e le rocce magmatiche		
6.1. Composizione degli involucri della Terra.....	»	171
6.2. Magmatismo e tettonica delle placche.....	»	173
6.2.1. Storia della tettonica a placche.....	»	173
6.2.2. Ricostruzione paleomagnetica.....	»	176
6.2.3. Relazioni possibili tra le placche.....	»	179
6.2.3.1. Divergenza di due placche oceaniche.....	»	180
6.2.3.2. Divergenza di due placche continentali.....	»	180
6.2.3.3. Convergenza di due placche oceaniche.....	»	180
6.2.3.4. Convergenza di due placche continentali.....	»	180
6.2.3.5. Convergenza di una placca oceanica e di una placca continentale.....	»	180
6.3. Dal magma alle rocce magmatiche.....	»	181
6.3.1. Processo di generazione dei magmi	»	181
6.3.2. Processo di solidificazione dei magmi	»	181
6.3.2.1. Cristallizzazione frazionata	»	182
6.3.2.2. Segregazione magmatica.....	»	185
6.3.2.3. Assimilazione	»	185
6.3.2.4. Mescolamento.....	»	186
6.3.3. Configurazioni magmatiche	»	186
6.3.3.1. Magmatismo di dorsale	»	187
6.3.3.2. Magmatismo orogenico	»	189

6.3.3.3. Magmatismo intraplacca	»	189
6.4. Manifestazioni magmatiche	»	191
6.4.1. Plutonismo e rocce plutoniche	»	191
6.4.2. Vulcanesimo e rocce vulcaniche	»	193
6.4.2.1. Processi, manifestazioni vulcaniche e rocce correlate	»	193
6.4.2.2. Tipologia delle eruzioni	»	196
6.4.2.3. Strutture ed evoluzione dei vulcani	»	199
6.4.2.4. Il vulcanesimo e l'uomo	»	200
6.5. Principali rocce magmatiche	»	203
6.5.1. Classificazione	»	203
6.5.1.1. Criteri per la classificazione	»	204
6.5.1.2. Sistematica	»	204
6.5.2. Determinazione delle rocce sul terreno	»	206
6.5.2.1. Rocce plutoniche	»	206
6.5.2.2. Rocce vulcaniche	»	206
7. Il ciclo dell'acqua		
7.1. Le riserve d'acqua e i loro scambi	»	210
7.2. L'atmosfera	»	211
7.2.1. Il reservoir atmosferico	»	211
7.2.2. L'effetto serra	»	212
7.2.3. Le precipitazioni atmosferiche	»	214
7.2.3.1. Zone climatiche	»	214
7.2.3.2. Fenomeni orografici	»	216
7.2.4. Frazionamento delle precipitazioni al suolo	»	218
7.3. Le acque di superficie	»	220
7.3.1. Fiumi e torrenti	»	221
7.3.1.1. Nozioni di idraulica	»	221
7.3.1.2. Variabilità dei corsi d'acqua nel tempo	»	225
7.3.1.3. Variabilità dei corsi d'acqua nello spazio	»	227
7.3.2. Laghi	»	231
7.3.2.1. Classificazione geologica	»	231
7.3.2.2. Classificazione termica	»	235
7.3.3. Ghiacciai	»	236
7.3.3.1. Classificazione morfologica dei ghiacciai	»	238
7.3.3.2. Bilancio idrologico dei ghiacciai	»	242
7.4. Le acque sotterranee	»	244
7.4.1. Porosità dei terreni naturali	»	244
7.4.1.1. Porosità interstiziale	»	246
7.4.1.2. Porosità per fessurazione	»	246
7.4.1.3. Porosità per carsismo	»	246
7.4.2. Flusso delle acque negli ambienti geologici	»	246
7.4.3. Principi base dell'idrodinamica	»	246
7.4.4. Applicazione del concetto di permeabilità ai terreni	»	249
7.4.5. Esempio di applicazione idrodinamica al flusso verso un pozzo	»	250
7.4.5.1. Teoria di Dupuit	»	251
7.4.5.2. Applicazione numerica	»	253
7.4.6. Bilancio idrologico delle falde sotterranee	»	254
7.4.7. Captazione delle acque sotterranee	»	255
7.4.7.1. Captazione delle sorgenti	»	255
7.4.7.2. Captazione tramite pozzi di pompaggio	»	255
7.4.8. Effetti del drenaggio e dell'irrigazione	»	256
7.4.9. Gestione delle acque sotterranee	»	256
7.4.10. Protezione delle acque sotterranee	»	258

7.4.11. Le acque potabili e le opere di ingegneria civile.....	»	261
7.4.11.1. Problemi generali legati all'acqua sotterranea nella costruzione di opere di ingegneria civile	»	263
7.4.11.2. Impatto idrogeologico delle opere	»	267
7.5. Le acque dei mari e degli oceani	»	282
8. L'ambiente sedimentario continentale		
8.1. Generalità.....	»	288
8.1.1. Erosione continentale	»	288
8.1.1.1. Alterazione <i>in situ</i> e frammentazione meccanica	»	289
8.1.1.2. Prelevamento e trasporto.....	»	289
8.1.2. Sedimentazione continentale.....	»	291
8.2. Ambiente di versante	»	293
8.2.1. Trasporto particellare lungo il versante.....	»	293
8.2.1.1. Formazione del detrito di falda.....	»	293
8.2.1.2. Formazione del colluvium.....	»	294
8.2.2. Trasporto in massa.....	»	296
8.2.2.1. Frane in rocce massive	»	297
8.2.2.2. Frane in rocce tenere	»	298
8.2.2.3. Colate di fango	»	301
8.2.2.4. Sistemi d'informazione geografica e frane.....	»	304
8.3. Ambiente fluviale	»	306
8.3.1. Trasporto solido nei corsi d'acqua.....	»	306
8.3.2. Zone di erosione	»	308
8.3.3. Zone di alluvionamento.....	»	309
8.3.3.1. Piana alluvionale	»	309
8.3.3.2. Coni di deiezione.....	»	312
8.4. Ambiente lacustre	»	313
8.4.1. Delta	»	313
8.4.1.1. Tipi di delta.....	»	314
8.4.1.2. Struttura sedimentaria dei delta.....	»	316
8.4.2. Depositi lacustri profondi.....	»	316
8.5. Ambiente palustre.....	»	318
8.5.1. Palude di bacino chiuso.....	»	318
8.5.2. Palude di sorgente.....	»	319
8.5.3. Bonifica delle paludi.....	»	320
8.5.4. Sfruttamento della torba	»	322
8.6. Ambienti boreale e polare.....	»	322
8.6.1. Regioni coperte da ghiacciai	»	322
8.6.1.1. Formazioni glaciali.....	»	322
8.6.1.2. Formazioni periglaciali s.s.....	»	323
8.6.2. Regioni non coperte da ghiacciai	»	326
8.7. Ambiente desertico	»	329
8.7.1. Erosione eolica e trasporto in prossimità del suolo.....	»	330
8.7.2. Trasporto in sospensione	»	333
8.7.3. L'acqua nei deserti.....	»	333
8.7.4. Misure di protezione.....	»	333
9. L'ambiente sedimentario marino		
9.1. Il margine continentale	»	339
9.1.1. Sedimentazione detritica	»	339
9.1.1.1. Effetto delle onde	»	339
9.1.1.2. Effetto della marea	»	344
9.1.1.3. Zone di foce.....	»	348
9.1.1.4. Scarpata continentale.....	»	350

9.1.2. Sedimentazione biogenica.....	» 351
9.1.3. Sedimentazione idrochimica o evaporitica.....	» 355
9.2. Glacis e piane abissali.....	» 358
9.2.1. Sedimentazione detritica.....	» 358
9.2.2. Sedimentazione biogenica.....	» 359
9.2.3. Sedimentazione idrochimica o evaporitica.....	» 361
10. La diagenesi e le proprietà delle rocce sedimentarie	
10.1. Il processo della diagenesi.....	» 366
10.1.1. Compattazione.....	» 367
10.1.2. Cementazione.....	» 368
10.1.3. Modificazioni mineralogiche leggere.....	» 370
10.2. Le rocce detritiche.....	» 370
10.2.1. Conglomerati.....	» 371
10.2.2. Arenarie.....	» 371
10.2.3. Siltiti.....	» 374
10.2.4. Argilliti.....	» 374
10.3. Le rocce biogeniche.....	» 376
10.3.1. Rocce carbonatiche.....	» 376
10.3.1.1. Calcari.....	» 376
10.3.1.2. Altre rocce carbonatiche.....	» 378
10.3.2. Rocce silicee.....	» 381
10.3.3. Combustibili fossili.....	» 383
10.3.3.1. Petrolio e gas naturale.....	» 383
10.3.3.2. Carbone.....	» 385
10.4. Le rocce idrochimiche o evaporitiche.....	» 386
10.4.1. Dolomia primaria.....	» 386
10.4.2. Gesso e anidrite.....	» 386
10.4.3. Rocce ad halite.....	» 388
10.4.4. Rocce a sali di potassio.....	» 389
10.4.5. Carniole.....	» 389
11. Il metamorfismo	
11.1. Processo di trasformazione.....	» 394
11.1.1. Modificazioni mineralogiche.....	» 394
11.1.2. Trasformazioni chimiche.....	» 396
11.1.3. Trasformazioni meccaniche.....	» 396
11.2. Tipi di metamorfismo.....	» 398
11.2.1. Metamorfismo regionale.....	» 400
11.2.2. Metamorfismo di contatto.....	» 400
11.2.3. Metamorfismo cataclastico.....	» 403
11.3. Principali rocce metamorfiche e loro caratteristiche.....	» 403
11.3.1. Sequenza pelitica (o argilloso-quarzosa).....	» 403
11.3.2. Sequenza quarzoso-feldspatica.....	» 405
11.3.3. Sequenza carbonatica.....	» 407
11.3.4. Sequenza calcareo-pelitica.....	» 409
11.3.5. Sequenza mafica.....	» 409
11.3.6. Sequenza ultramafica.....	» 410
11.4. Determinazione delle rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche.....	» 411
12. La tettonica	
12.1. Sforzi meccanici nel sottosuolo.....	» 417
12.1.1. Definizione fisica.....	» 417
12.1.2. Stato degli sforzi nel mezzo geologico.....	» 419
12.2. Relazione sforzi-deformazioni.....	» 421
12.2.1. Prove di laboratorio.....	» 421
12.2.1.1. Prova di compressione semplice o uniassiale.....	» 421

12.2.1.2.	Prova di compressione triassiale	» 423
12.2.1.3.	Caso delle rocce pre-fratturate.....	» 431
12.2.1.4.	Curve intrinseche tipiche e ordini di grandezza	» 432
12.2.2.	Deformazione della roccia osservata sul terreno.....	» 433
12.3.	Deformazioni fragili	» 434
12.3.1.	Giunti.....	» 434
12.3.2.	Faglie.....	» 435
12.3.2.1.	Faglie normali.....	» 435
12.3.2.2.	Faglie inverse.....	» 436
12.3.2.3.	Sovrascorrimenti o <i>thrust</i>	» 437
12.3.2.4.	Falde di ricoprimento del secondo tipo o <i>thrust nappe</i>	» 437
12.3.2.5.	Faglie trascorrenti.....	» 438
12.3.3.	Caratterizzazione delle discontinuità di un ammasso roccioso	» 438
12.4.	Deformazioni duttili	» 440
12.4.1.	Informazioni generali sulle pieghe	» 440
12.4.2.	Pieghe concentriche.....	» 442
12.4.2.1.	Deformazione per flessione.....	» 444
12.4.2.2.	Deformazione per scivolamento flessurale	» 444
12.4.3.	Pieghe simili	» 444
12.4.4.	Falde di ricoprimento del primo tipo.....	» 446
12.5.	Rappresentazione e trattamento geometrico degli elementi strutturali	» 447
12.5.1.	Cartografia degli elementi strutturali.....	» 447
12.5.2.	Strumenti di trattamento geometrico dei dati	» 448
12.5.3.	Proiezioni stereografiche	» 448
12.5.3.1.	Principi	» 448
12.5.3.2.	Esempio applicativo	» 450
12.6.	Un modello tettonico: le Alpi.....	» 456
12.6.1.	La catena del Giura.....	» 457
12.6.2.	Il plateau molassico	» 458
12.6.3.	Le Prealpi svizzere	» 458
12.6.4.	Le Hautes Alpes calcaires (dominio elvetico).....	» 459
12.6.5.	I Massicci cristallini esterni (dominio elvetico).....	» 459
12.6.6.	Le falde interne.....	» 459
12.6.7.	Il sudalpino (a cura di Dario Tosoni).....	» 460
12.6.8.	Deformazioni attuali.....	» 460
13.	L'alterazione	
13.1.	Processi di trasformazione.....	» 466
13.1.1.	Processi termici	» 466
13.1.1.1.	Variazioni di temperatura	» 466
13.1.1.2.	Gelo	» 467
13.1.2.	Processi fisico-chimici.....	» 471
13.1.2.1.	Dissoluzione.....	» 471
13.1.2.2.	Modificazioni mineralogiche.....	» 475
13.2.	Catalogo dei materiali sensibili all'alterazione	» 479
13.3.	Distribuzione dell'alterazione in profondità.....	» 480
13.4.	Conseguenze per l'ingegnere	» 482
13.4.1.	Effetti sulle proprietà meccaniche.....	» 483
13.4.2.	Effetti sulle proprietà idrogeologiche.....	» 484
13.5.	Riconoscimento dell'alterazione	» 488
14.	La geologia nelle grandi sfide della società	
14.1.	Sviluppo territoriale e risorse naturali	» 491
14.1.1.	Risorse alimentari	» 491
14.1.2.	Risorse energetiche.....	» 493
14.1.3.	Risorse in spazio sotterraneo	» 494
14.1.4.	Risorse minerali.....	» 498

14.1.5.	Risorse in geomateriali.....	»	502
14.1.6.	Risorse dello spazio.....	»	505
14.2.	Protezione dell'ambiente.....	»	506
14.2.1.	Ecosistemi e biodiversità.....	»	506
14.2.2.	Pericoli naturali	»	509
14.2.3.	Cambiamenti climatici.....	»	511
14.2.4.	Stoccaggio geologico dei rifiuti.....	»	517
	14.2.4.1. Rifiuti nucleari e chimici.....	»	517
	14.2.4.2. Biossido di carbonio.....	»	520
14.2.5.	Inquinamento del sottosuolo	»	522
	14.2.5.1. Storia dell'inquinamento	»	522
	14.2.5.2. Classificazione degli inquinanti e loro comportamento nel sottosuolo.....	»	523
	14.2.5.3. Evoluzione degli inquinanti nel sottosuolo	»	529
	14.2.5.4. Strategia di valutazione	»	531
	14.2.5.5. Metodi per la riduzione dell'inquinamento	»	532
	14.2.5.6. Prospettive di evoluzione dell'inquinamento nel sottosuolo.....	»	533
14.3.	Conclusioni.....	»	534
	Bibliografia	»	536
	Indice analitico.....	»	545

Introduzione all'edizione italiana

Fondamenti di geologia per l'ingegneria è l'edizione in lingua italiana di *Géologie, bases pour l'ingénieur 2ème édition revue et augmentée* di Aurèle Parriaux, professore di geologia all'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (Svizzera) fino al 2003, e direttore del *Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement* (GEOLEP).

Il libro di Parriaux, tradotto in lingua inglese con il titolo *Geology, basics for engineers*, è un testo particolare e per certi versi unico nel panorama della didattica delle Scienze della Terra: non è un caso, infatti, che nel 2007 abbia ricevuto il Prix Robertval, un ambito riconoscimento che ogni anno premia l'opera di argomento scientifico che si distingue per la sua efficacia didattica.

Non è facile spiegare in poche righe cosa sia il volume di Parriaux: non è un libro di geologia classica nel senso comune del termine ma non è nemmeno un libro di geologia applicata; si potrebbe definire – mi si passi il giro di parole – come un libro di geologia classica applicata alla geologia che serve all'ingegnere, un testo, cioè, in cui i concetti di base della geologia sono spiegati e illustrati attraverso esempi tratti da opere e interventi sul territorio in cui la geologia e la conoscenza profonda dei suoi concetti di base sono indispensabili. Un testo che vuole offrire un quadro sintetico ma completo delle Scienze della Terra, enfatizzandone gli aspetti che hanno maggior attinenza con il lavoro dell'ingegnere, evidenziando altresì come i limiti e le incertezze dei modelli geologici adottati siano funzione delle indagini geologiche eseguite. Uno stimolo all'approfondimento delle tematiche geologiche, dunque, e ad una proficua collaborazione tra ingegneri e geologi per evitare quegli imprevisti geologici causa di pesanti inconvenienti ambientali (ad esempio il prosciugamento di sorgenti nel caso di gallerie), di enormi ritardi nei lavori di cantiere o, nei casi più gravi, della perdita completa di funzionalità dell'opera in costruzione e della scomparsa di vite umane (un esempio per tutti: il Vajont).

Il paziente lavoro di traduzione e di adattamento al pubblico di lingua italiana ha visto la collaborazione disinteressata di alcuni amici e colleghi che mi hanno aiutato a superare alcuni problemi. Tra questi vorrei ricordare F. Carraro, R. Cella, JB. Pasquier e G. Pillinini. L'elaborazione di alcune immagini presenti solo nell'edizione italiana è stata possibile grazie al lavoro certosino di Alessandro Cecchini a cui esprimo il mio vivo ringraziamento.

Si desidera ringraziare A. Pavanello per i suoi contributi nella traduzione del capitolo 6 e Michela Dini a cui si deve la traduzione iniziale del capitolo 7. Michela è stata fondamentale soprattutto nella fase di revisione: a lei si deve la lettura dell'intero testo da cui sono originati utili suggerimenti per migliorare e affinare la versione finale della traduzione. Un ringraziamento va infine anche a Séverine Boll-Bilgot, determinante nella fase finale di preparazione del DVD, e allo stesso autore, sempre pronto a dipanare le incertezze che via via si presentavano durante il percorso di traduzione e per il suo atteggiamento propositivo ed entusiasta di fronte all'edizione in lingua italiana della sua opera.

Dario Tosoni

Prefazione

Il professor Aurèle Parriaux ha avuto la gentilezza di chiedermi se potevo scrivere una prefazione per il suo libro *Fondamenti di geologia per l'ingegneria*. Innanzitutto mi preme confidargli che il manoscritto iniziale di questo libro mi fu inviato dalle Presses Polytechniques et universitaires romandes nella più totale discrezione, senza rivelarmi il nome dell'autore. Fu come una degustazione al buio per un enologo: riconobbi un vino d'annata.

Questo libro colma una lacuna in lingua francese: sono sicuro che dovrebbe essere tradotto in diverse lingue. Il suo punto di forza è quello di essere completo anche se conciso, aggiornato sui vari temi trattati e particolarmente didattico nella sua impostazione generale. Lo dimostrano gli esercizi proposti nei vari capitoli con le relative soluzioni presenti nel CD-ROM allegato dove si trovano anche delle animazioni (una novità nell'insegnamento di questa materia). Il libro è corredato inoltre da una iconografia molto ampia con molte fotografie originali nello spirito di una scienza osservativa come la geologia. Il testo è sempre molto chiaro e permette una completa comprensione ed assimilazione facilitata dei contenuti. Quest'opera è un eccellente trattato di Geologia che può essere utilizzato quindi anche come testo di riferimento. Già nell'introduzione l'autore espone i motivi per cui è necessaria una competenza geologica all'ingegnere di oggi e per questo, lungo tutto il testo, inserisce frequenti rimandi ad aspetti applicativi. L'originalità del testo di Parriaux sta nel voler illustrare i concetti di base con le applicazioni fondendo entrambe in un "unicum" estremamente efficace dal punto di vista didattico.

Fondamenti di geologia per l'ingegneria è un libro *timely book* che risponde bene alle esigenze di oggi. Tutti conoscono l'importanza della prospezione e dell'estrazione delle risorse minerarie, del petrolio e del gas, dell'acqua e dei materiali non metallici da costruzione e per l'industria. Anche l'importanza della geologia nella realizzazione delle infrastrutture è cosa risaputa. Lo sviluppo delle relazioni internazionali porta all'attraversamento di montagne o di bracci di mare mediante lo scavo di gallerie ciascuna delle quali è un'opera eccezionale. Tra queste, amo ricordare il tunnel del Lötschberg in Svizzera, capolavoro di precisione nella fase di prospezione geologica e di coordinamento durante la costruzione per terminare nei tempi previsti e con il budget preventivato.

Allo stesso modo, la protezione dell'ambiente naturale e la domanda crescente di sicurezza della società comportano una moltiplicazione e una sorta di democratizzazione degli studi geologici. Ad esempio, nei progetti di stoccaggio dei rifiuti i cittadini direttamente interessati si mostrano in genere molto diffidenti a riguardo e richiedono di essere assicurati sull'inquinamento che ne potrebbe derivare. Garanzie simili sono richieste negli interventi di prevenzione e protezione contro i rischi naturali e, più in generale, nell'uso del suolo e nella pianificazione urbana delle nostre città.

Una domanda crescente fa leva sull'approccio alle problematiche tipiche della geologia, una disciplina che si muove disinvoltata attraverso i milioni d'anni e che quindi sembra in grado di fare previsioni a lungo termine e a scala differente: alla scala del milione d'anni per lo stoccaggio sotterraneo dei rifiuti radioattivi come gli attinidi a lunga vita fino ai 300 anni necessari per lo stoccaggio in sicurezza dei rifiuti a bassa o media attività. Una durata di almeno 1 secolo senza grossi interventi di manutenzione è ora richiesta per certe infrastrutture in cemento come il rivestimento del tunnel sotto La Manica, il ponte sul Tago a Lisbona... e per le opere in terra delle linee ferroviarie ad alta velocità. Ma la scala dei tempi dell'uomo è quella della vita umana, per cui diventa una sfida occuparsi di opere che vanno al di là dell'uomo così come di problemi a scala intercontinentale o planetaria come l'evoluzione del clima ed il suo eventuale controllo, tutti magnificamente esposti nel libro.

Per la sua ricerca delle origini del mondo, dell'evoluzione del nostro pianeta la cui geografia è cambiata nel tempo, della apparizione e scomparsa delle specie viventi, per la ricostruzione dell'albero genealogico dell'uomo, la geologia è un potente veicolo di cultura. Bisogna saperlo utilizzare al servizio dei nostri concittadini.

Facendomi portavoce dei lettori di questo libro, ringrazio e mi congratulo con il professor Aurèle Parriaux perché ha attuato senza esitare la sua filosofia altruista mettendo a disposizione il suo sapere per servire la scienza e il progresso.

Termino aggiungendo una parola di ringraziamento per le Presses polytechniques et universitaires romandes per la qualità dell'edizione e la cura nella stampa del testo.

Marcel Arnould

Professore emerito à l'Ecole de Mines e all'Ecole des Ponts et Chaussées a Parigi

Presidente emerito della Associazione Internazionale di Geologia dell'Ingegnere e dell'Ambiente

Appendice alla seconda edizione

Il successo dell'opera di Aurèle Parriaux era atteso in quanto un tale trattato mancava in lingua francese. L'ampiezza di questo successo – la prima edizione è andata esaurita in poco tempo – è dovuta alla sua qualità scientifica e pedagogica. Il libro ha infatti ricevuto nel 2007 il Premio Robertval di Insegnamento Superiore, un ambito riconoscimento che ogni anno premia il libro che maggiormente promuove la diffusione delle conoscenze scientifiche e tecnologiche in lingua francese. Il libro di Parriaux è risultato vincitore al termine di una serrata competizione che ha visto la presenza di più di 350 candidati in tutto lo spettro della conoscenza scientifica.

Concependo la sua opera come un servizio, Aurèle Parriaux non si è accontentato di una semplice ristampa ma ha preparato una seconda edizione che ha comportato significativi miglioramenti del testo e l'inserimento di nuove animazioni ed esercizi. Ha aggiunto anche un capitolo supplementare dedicato alla “Geologia nelle grandi sfide della società”. Mantenendo la visione generalista necessaria per affrontare problemi di grande respiro, l'autore li affronta nell'ottica dell'ingegnere. Ad esempio, le pagine dedicate all'inquinamento ed alle tecniche di disinquinamento rappresentano un vero e proprio vademecum per l'ingegnere.

Ancora congratulazioni e grazie ad Aurèle Parriaux e al suo editore. E a presto la terza edizione...

Marcel Arnould

Premessa

Quest'opera è la seconda edizione aggiornata e ampliata del libro apparso nel 2006. Ricordo che se questo libro ha visto la luce è grazie alla mia missione di insegnante di geologia presso l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Già al momento della nomina a professore, avvenuta nel 1991, mi sono confrontato con l'esigenza di insegnare le basi della geologia agli studenti di ingegneria civile e ingegneria per l'ambiente e il territorio. Una vera e propria sfida poiché le condizioni in cui ci si trova ad insegnare sono particolarmente difficili: stress da primo anno di università, motivazioni eterogenee e numero elevato di studenti. È stato perciò necessario predisporre in tempi rapidi delle dispense che corrispondessero ai bisogni specifici degli ingegneri, senza entrare troppo nel campo della geologia applicata, argomento riservato agli studenti degli anni successivi. Queste dispense sono servite di base per un corso a carattere fortemente partecipativo per gli studenti, contenente un gran numero di esercizi che favoriscono l'apprendimento attraverso la soluzione di problemi reali. Questo documento ad uso interno è stato ben presto notato dai responsabili delle Presses polytechniques universitaires romandes (l'editore dell'EPFL) che mi hanno chiesto se potevo farne un vero e proprio libro destinato ad un pubblico più vasto esterno all'EPFL. Le buone condizioni che mi sono state offerte dalle *Presses polytechniques universitaires romandes* (PPUR), dall'EPFL e dalla facoltà *Environnement, naturel, architectural et construit* (ENAC) hanno vinto le mie iniziali resistenze spingendomi ad accettare la sfida. Ringrazio a questo proposito il collega Manfred Hirt, responsabile del trattato di ingegneria civile, M. Olivier Babel, direttore delle PPUR e il collega Laurent Vuillet, decano della facoltà ENAC.

Per preparare la prima edizione del libro, il contributo dato dal laboratorio di geologia applicata e dell'ambiente (GEOLEP) che io dirigo è stato determinante e si è protratto per più di un anno. Si è trattato in sostanza di modificare il testo originale a supporto del corso per renderlo indipendente dal contesto accademico dell'EPFL, mantenendone però l'impostazione didattica iniziale. Lo scopo è stato raggiunto grazie soprattutto all'opera di Laurie Cortesi, mia collaboratrice principale nella stesura del libro, a cui esprimo la mia più viva gratitudine. Laurie ha partecipato attivamente alla revisione del testo apportandovi il suo contributo personale; in particolare i capitoli sulla mineralogia e il magmatismo sono stati arricchiti dalla sua speciale competenza in materia. Ha anche coordinato la revisione delle foto distribuite lungo tutto il testo, curandone il passaggio da b/n a colore. Il suo ruolo fondamentale è stato però quello di gestire il flusso di dati e informazioni tra noi e l'editore, una funzione che lei ha ricoperto in maniera esemplare, grazie alle sue qualità umane e scientifiche. Il gruppo di lavoro del GEOLEP ha compreso altre tre persone che hanno messo a disposizione le loro competenze geologiche e informatiche per la creazione delle animazioni: Séverine Bilgot, Grégory Grosjean e Laurent Tacher. Tamara Lema ha letto attentamente il manoscritto finale emendandolo da sviste e refusi. Molti studenti collaboratori hanno offerto il loro prezioso contributo, tra questi Lea Herzig, Aude Dessauge e Alexandre Monnin. Tutti meritano la mia più sincera gratitudine, senza dimenticare naturalmente Giuseppe Franciosi che è stato il mio collaboratore principale all'epoca del documento iniziale alla cui redazione ha contribuito molto.

Ringrazio infine i colleghi François Frey e Peter Egger che hanno avuto la cortesia di rileggere alcuni passi del testo finale e le PPUR che hanno dimostrato grande capacità di adattamento di fronte alle particolarità di una scienza così diversificata e ricca come la geologia.

La preparazione della seconda edizione è stata condotta parallelamente alla traduzione del libro in inglese pubblicata da Taylor & Francis. Essa ha costituito una tappa importante nella quale è stato nuovamente coinvolto il mio laboratorio. Un ringraziamento particolare va alla mia assistente Diana Marques che mi ha aiutato in questa redazione con il contributo di Mike Bensimon, Pascal Tuberg, Julien Zigliani, Pascal Blunier, Yuri Gramigna, J.L. Huesser e Clémentine Schurmann.

Questa seconda edizione riprende i tredici capitoli della prima con diverse modifiche e aggiornamenti.

Dopo la definizione della materia e la storia delle scoperte scientifiche che hanno portato alla geologia moderna (cap. 1), si descrive la Terra nel suo duplice contesto spaziale e temporale (cap. 2 e 3). Nel capitolo quarto viene dato ampio spazio alla fisica terrestre a causa dei forti legami esistenti con l'ingegneria. Compiendo un grande salto di scala, si costruiscono le basi conoscitive del materiale geologico con lo studio della mineralogia (cap. 5). A questo punto incomincia il cammino che ci porterà a scoprire le diverse tipologie di roccia e di terreni che costituiscono il pianeta partendo dalla descrizione dei processi da cui derivano. Nel capitolo sesto si inizia con il tema delle rocce magmatiche. Prima di occuparsi delle rocce sedimentarie è fondamentale studiare l'idrosfera (cap. 7), che controlla gran parte dei fenomeni che producono sedimenti sia sui continenti (cap. 8) che nei mari (cap. 9). I processi che portano alla trasformazione dei sedimenti in roccia sono il cuore del capitolo sulla diagenesi, a cui seguono le principali caratteristiche delle rocce sedimentarie e le loro proprietà tecniche (cap. 10). Il metamorfismo ci conduce all'ultima categoria di rocce (cap. 11). A questo punto, terminata l'analisi del substrato geologico in tutta la sua diversità, si passa ai processi deformativi che esso può subire, cioè alla tettonica (cap. 12). Alla degradazione meccanica prodotta dalla tettonica bisogna aggiungere quella derivante dai processi fisico-chimici a cui è spesso associata una componente biologica: l'alterazione delle rocce (cap. 13). Il trattato si conclude con un capitolo totalmente nuovo che descrive l'importante contributo offerto dalla geologia nella risoluzione dei grandi problemi socio-economici attuali e futuri (cap. 14).

Questa materia molto vasta non può essere trattata in modo completo in una sola opera; è per questo che abbiamo introdotto dei "Per saperne di più": piccole icone a forma di libro  poste al margine del testo che rimandano al riferimento bibliografico al fondo del volume a cui il lettore può rivolgersi per eventuali approfondimenti. Si è deciso di non fornire alcun riferimento a siti internet, essendo questi suscettibili di diventare rapidamente obsoleti; il lettore potrà accedere alle informazioni contenute nel web tramite l'utilizzo di un motore di ricerca. I termini geologici importanti sono evidenziati in grassetto corsivo la prima volta che vengono impiegati e sono tutti riportati nell'indice analitico.

Il carattere partecipativo del testo originario ottenuto mediante la risoluzione di problemi pratici è stato mantenuto anche nella seconda edizione. Alla ventina di esercizi presenti nella prima edizione ne sono stati aggiunti altri; per tutti è stata fornita la soluzione completa nel DVD allegato. Quest'ultimo contiene diverse dimostrazioni animate della materia, evidenziate lungo il testo da una icona a forma di disco . In questa edizione sono state aggiunte nuove animazioni; la maggior parte di esse è dovuta all'impegno di Séverine Boll-Bilgot.

Grande merito va alle numerose persone e istituzioni che hanno messo a disposizione la loro documentazione affinché diventasse parte integrante del testo; sono contento che questo libro possa essere vettore del loro contributo. Un grazie infine al mio collega Marcel Arnould, professore emerito all'Ecole des Mines di Parigi, per aver avuto la cortesia di scrivermi la prefazione.

1. Il partenariato geologia-ingegneria

L'ingegnere costruisce delle opere, pianifica e sviluppa il territorio in costante interazione con il suolo e il sottosuolo. Questo libro ha l'obiettivo di fornire agli ingegneri una cultura universitaria in scienze della Terra ed i concetti di base necessari per svolgere una attività ingegneristica ben integrata nel contesto del nostro pianeta. Il testo ambisce a:

- far conoscere e insegnare ad analizzare i processi geologici che portano alla creazione, alla deformazione e all'alterazione delle rocce;
- studiare la natura e le proprietà di terreni e rocce;
- spiegare come le condizioni geologiche influenzano le attività dell'ingegnere 1) facilitandone o complicandone il compito, 2) rendendole più semplici o più complesse, 3) rendendo più semplice o più complesso il suo compito;
- prendere coscienza delle ricchezze del sottosuolo, imparare come gestirle tramite un approccio multidisciplinare nell'ottica dello sviluppo sostenibile.

Questo libro espone dunque le basi scientifiche della geologia applicata semplificando i fondamenti di geologia pura per venire incontro ai bisogni specifici degli ingegneri. Approfondimenti in tal senso potranno essere reperiti nei testi specializzati.

In questo capitolo introduttivo noi vogliamo mostrare quali sono i campi di utilizzo della geologia applicata e illustrare attraverso esempi l'apporto della geologia nella risoluzione dei problemi di ingegneria civile e ambientale. Vedremo in seguito come la nascita di questa scienza si perda nella notte dei tempi, a partire dalle domande suscitate dalle osservazioni di terreno.



[12, 19,
22, 80, 113,
141, 166,
234, 310]

1.1. I campi della geologia applicata all'ingegneria

Partendo da esempi pratici elenchiamo qui di seguito le attività ingegneristiche per le quali la geologia costituisce una delle basi necessarie.

L'Associazione internazionale di geologia applicata all'ingegneria e all'ambiente (AIGI) dà una definizione precisa della **geologia applicata** o **geoingegneria**:

“la scienza che si dedica alla ricerca, allo studio e alla soluzione dei problemi ingegneristici e ambientali derivanti dall'interazione tra la geologia e le attività antropiche; si occupa anche della previsione, prevenzione e riduzione dei rischi geologici. La geologia applicata comprende:

- la definizione di morfologia, struttura, stratigrafia e litologia delle formazioni geologiche nonché delle caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi;
- la caratterizzazione delle proprietà mineralogiche, fisico-meccaniche, chimiche e idrologiche di tutti i materiali della crosta terrestre adoperati nella costruzione di opere, l'estrazione delle risorse naturali disponibili nel sottosuolo e le modificazioni prodotte dall'uomo sull'ambiente;
- la valutazione dei comportamenti meccanici e idrologici di suoli e rocce;
- la determinazione dei parametri da prendere in considerazione per il calcolo di stabilità delle opere civili e dei pendii in roccia o in materiale sciolto;
- il miglioramento e la conservazione dell'ambiente e dei suoli (articolo II dello statuto dell'AIGI)”.

L'importanza della geologia nei campi elencati è illustrata mediante esempi concreti.

La geologia è una delle materie di base per l'ingegnere che vuole occuparsi di:

- ingegneria civile;
- ingegneria ambientale;
- meccanica delle rocce e dei suoli;
- idrologia;
- idrogeologia;
- pedologia.

Oltre agli aspetti scientifici, lo studio delle Scienze della Terra influenza il modo di pensare dell'ingegnere sia a livello professionale che personale spingendolo a sviluppare:

- una maggiore sensibilità al contesto ambientale in cui le sue opere sono inserite (le interazioni opera-ambiente);
- una presa di coscienza culturale delle diverse scale spazio-temporali in cui si trova ad agire;
- una visione più ampia e di tipo qualitativo dei problemi da risolvere accanto alle valutazioni quantitative;
- uno spirito critico nei confronti dei risultati delle misure puntuali e dei modelli di simulazione;
- una maggiore propensione alla multidisciplinarietà;
- un accesso attraverso la geologia alle sfide moderne della nostra società in materia di sottosuolo (ad esempio lo stoccaggio geologico dei rifiuti, i siti contaminati, vedere a questo proposito il capitolo 14).

I campi dove geologia e ingegneria interagiscono sono raggruppati in quattro grandi famiglie descritte nei paragrafi che seguono (dal § 1.1.1 al § 1.1.4).

1.1.1. Progettazione di opere

Il geologo sarà incaricato, in collaborazione con il geotecnico, di determinare se il terreno previsto per la costruzione dell'opera presenta le condizioni di stabilità necessarie. Ecco come queste due professioni si completano in questo tipo di problemi:

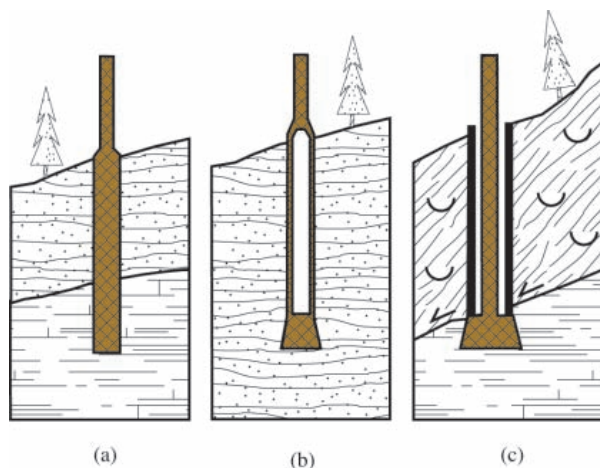


Figura 1.1. Fondazioni delle pile di un ponte: (a) pila semplice in cemento pieno che attraversa un terreno di copertura stabile. Tipologia adatta a substrati con buona capacità portante; (b) pila leggera, cava, a zampa di elefante, per terreni stabili ma con ridotta capacità portante; (c) pila incamicciata per terreni di copertura in scivolamento attivo

- il **geologo** è un tecnico che analizza la struttura del sottosuolo di un cantiere in base alla propria esperienza o mediante rilevamenti diretti sul terreno e sondaggi. Dà infine una previsione sui terreni che saranno incontrati durante lo scavo soffermandosi sulle caratteristiche che possono rivelarsi utili per l'ingegnere;
- il **geotecnico** è un ingegnere civile specializzato nella parametrizzazione delle proprietà meccaniche dei terreni di fondazione; ordina le prove di laboratorio e le interpreta; insieme con il progettista dimensiona le fondazioni dell'opera.



[44, 133,
155, 156,
170, 186,
289]

La suddivisione dei ruoli tra geologo e geotecnico non è sempre netta e può variare da un paese all'altro. In genere, le condizioni geologiche hanno una importanza fondamentale nella scelta del tipo di fondazione delle opere (figura 1.1).

1.1.2. Rischi naturali

I rischi naturali in grado di mettere in pericolo l'uomo, le sue opere e l'ambiente naturale sono molto numerosi; essi possono causare catastrofi molto costose sia sul piano umano che materiale. Solo il rischio relativo al verificarsi di eventi minori è assicurato dalle compagnie mentre per i rischi maggiori come i grandi terremoti non c'è alcuna copertura.

I rischi naturali (figura 1.2) traggono spesso origine dai fenomeni geologici: erosione di versante, sismi, vulcani, ecc.

L'identificazione di questi pericoli, la loro valutazione e loro cartografia, l'adozione di adeguate misure di protezione sono un altro campo dove il geologo e l'ingegnere devono lavorare a stretto contatto.



[49, 130,
150]



Figura 1.2. L'esempio della frana di Chenaulaz (1983) che ha comportato la distruzione della strada che collega Pully a Belmont, a est di Losanna, Svizzera. Foto Geolep, J.H. Gabus

1.1.3. Risorse minerarie

Il sottosuolo contiene risorse fondamentali per la vita dell'essere umano che ne hanno controllato l'esistenza stessa (acqua sotterranea) o il suo sviluppo socio-economico (geomateriali, minerali, energia).

Ad esempio i **geomateriali**, definiti genericamente come materiali geologici incoerenti o lapidei, possono essere utilizzati con o senza trattamento per applicazioni industriali o per la costruzione



[43, 64, 65,
154, 176,
195, 204,
209, 306,
316]

di opere ingegneristiche. Tra i materiali che sono utilizzati senza trattamento abbiamo ad esempio la ghiaia tout venant per le fondazioni; con trattamento il calcare argilloso usato per fabbricare il cemento portland. In collaborazione con l'ingegnere il geologo dovrà cercarne i giacimenti, valutarli, proporre siti ove aprire delle cave per estrarli, studiarne la composizione chimica e mineralogica, la resistenza all'alterazione, la distribuzione nel giacimento, gli eventuali impatti della coltivazione sulle acque e la stabilità dei terreni circostanti i siti di estrazione. Determinerà inoltre la sistemazione finale di questi siti. Il problema 1.1 si occupa proprio di questo tema applicato a una cementeria.

1.1.4. Inquinamento dell'ambiente

Numerosi campi di attività dell'ingegnere riguardano l'ambiente. Tra questi lo stoccaggio geologico dei rifiuti, la gestione dei siti contaminati e lo studio degli impatti sull'ambiente determinati da grandi opere di ingegneria (figura 1.3).



Figura 1.3. Un deposito di rifiuti che influisce direttamente sulle acque superficiali e sotterranee. Foto Geolep, M. Looser



[96, 11,
284, 290,
296, 313]

Ad esempio, la ricerca di siti adatti ad ospitare rifiuti nucleari (uno dei problemi più sentiti dalla società) impiega migliaia di persone. I dati acquisiti da queste ricerche e gli strumenti sviluppati a questo scopo hanno fatto progredire in maniera impressionante le conoscenze geologiche del sottosuolo.

La descrizione dei campi di applicazione della geologia sarà completata nel capitolo 14 dove la geologia è posta a confronto con le grandi sfide che attendono la nostra società ed è mostrato come essa può contribuire a rilevarle.

PROBLEMA 1.1

A nord del paese di Roche (Svizzera) esisteva in passato una cementeria che coltivava due cave. Siete incaricati di studiare l'eventuale riapertura di un nuovo impianto per produrre cemento portland (caso fittizio).

Nelle due cave avete a disposizione calcari e calcari argillosi (figura 1.4).

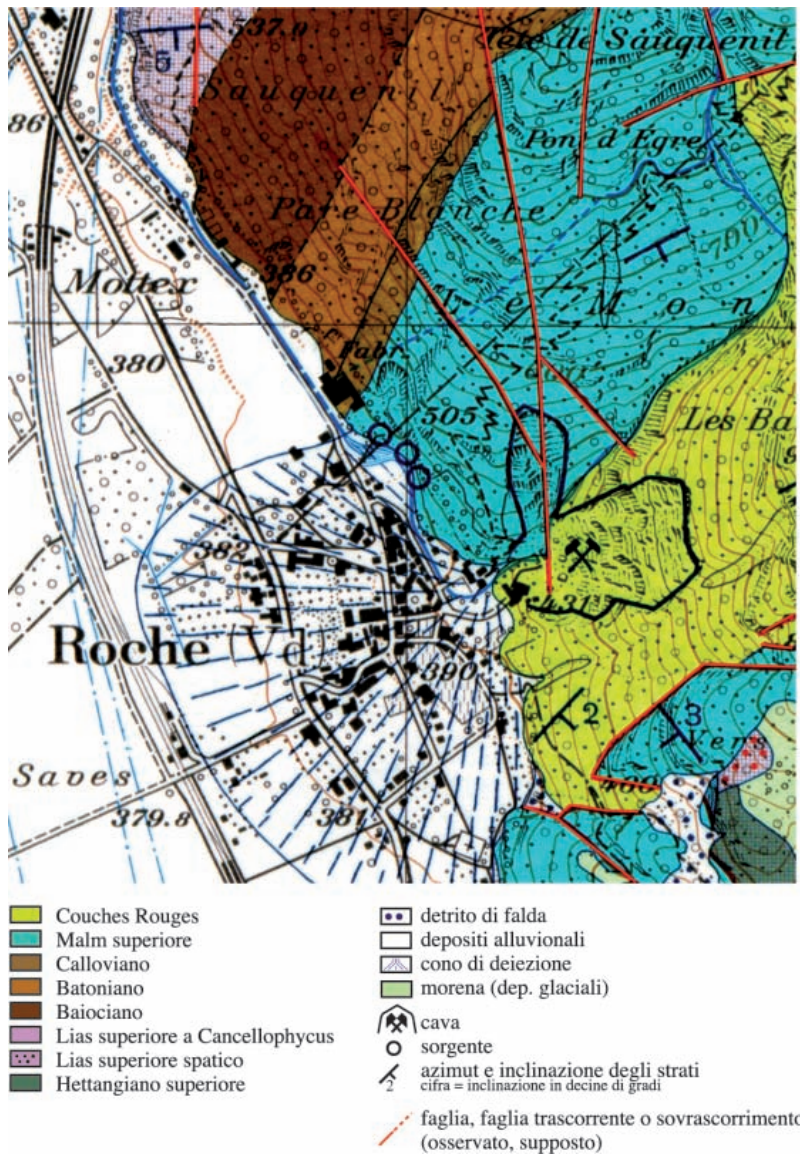


Figura 1.4. Localizzazione della cava di Roche (Cantone di Vaud, Svizzera) con indicati i limiti tra le varie formazioni geologiche. Stralcio del foglio 1264 "Montreux" dell'Atlante Geologico della Svizzera a scala 1: 25.000. Riprodotto con l'autorizzazione dell'Ufficio Federale dell'Acqua e della Geologia (OFEG), 4/11/2005 e di Swisstopo (BA056985)

Composizione richiesta della miscela di rocce calcinate per produrre cemento portland	
CaO	35-42% in peso
Al ₂ O ₃	3-8.5% in peso
Fe ₂ O ₃	0-4% in peso
SiO ₂	15-25% in peso
CaO/SiO ₂	1.25-2.5 [-]
SiO ₂ /(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	2-4 [-]
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	≥ 2 [-]
MgO	Max 5% in peso
SO ₃	Max 3.5% in peso

Analisi geochimica dei due tipi di rocce calcinate (% in peso)		
	Calcare argilloso Couches Rouges	Calcare massivo Malm
SiO ₂	23.10	0.85
Al ₂ O ₃	4.90	0.39
Fe ₂ O ₃	1.40	0.13
CaO	35.60	52.96
MgO	0.51	1.80
SO ₃	0.01	0.06
K ₂ O	0.79	0.3
Na ₂ O	0.24	0.1
P ₂ O ₅	0.09	0.0
Perdite per riscaldamento*	32.70	43.01
Totale	99.34	9.6

* Composti volatilizzati durante la calcinazione

Domande

- Quali sono le miscele possibili delle due rocce che rispondono ai criteri chimici della materia prima necessaria alla fabbricazione del cemento?
- Identificate altri criteri che possono influenzare la scelta di una miscela rispetto a un'altra.



Vedere la soluzione sul DVD.

1.2. Storia della geologia

Già nei primi documenti scritti si racconta di fatti che risvegliavano la curiosità dei viaggiatori dell'epoca, ad esempio l'esistenza di rocce contenenti conchiglie identiche a quelle che si trovavano nel mare (figura 1.5). Le prime conchiglie furono trovate vicino al mare per cui si pensava che avessero raggiunto quella posizione in seguito a qualche diluvio. Successivamente analoghi ritrovamenti si ebbero anche in montagna, lontano dal mare, e ciò rendeva questa spiegazione improponibile. Un paradosso, se si pensa che anche la sommità dell'Everest (figura 1.6) è costituita da rocce sedimentarie marine.



Figura 1.5. Le lumachelle sono rocce costituite da accumuli di conchiglie marine fossili. Foto Geolep, G. Grosjean



Figura 1.6. Il “tetto del mondo” (8848 m) formato da calcari di origine marina. Foto Geolep, G. Grosjean

Della lunga storia della geologia esponiamo qui le tappe fondamentali (brevemente riassunte in tabella 1.1) per mostrare come il pensiero si sia evoluto nel corso dei secoli, rovesciando talvolta dogmi e le più radicate teorie.

Ricordiamo il racconto della creazione del mondo secondo la *Genesi* (testo che, nella forma attuale, data al VI secolo a.C.): “All’inizio Dio creò il cielo e la terra [...]. E Dio disse: che le acque che sono sotto il cielo si riuniscano in un sol luogo e che l’asciutto appaia. E così fu. Dio chiamò l’asciutto terra e le masse d’acqua mare”.

A questa seguì il racconto della creazione dell’uomo e della donna sotto forma di Adamo ed Eva. Questa nozione di una creazione divina, considerata da alcuni credenti come una verità universale e indiscutibile, ha dominato i secoli che seguirono, un dogma contro il quale gli uomini di scienza di ogni epoca hanno dovuto lottare.

La più antica osservazione geologica (risalente al VI secolo a.C. e pervenuta fino a noi grazie al dossografo Sant’Ippolito) è quella del filosofo Xenofane di Colofone, secondo il quale terra e

acqua formavano una miscela che il tempo ha via via separato. Ne sono prova le conchiglie che si trovano nelle zone lontane dal mare e in montagna, le impronte di pesci e foche rinvenute nelle cave di Siracusa, l'impronta di acciuga fossile scoperta a Paro all'interno di una pietra e i resti di foche e altri organismi marini trovati a Malta. Tutto ciò deriva dal fatto che, anticamente, tutto era fango e quando questo fango si è seccato, le impronte si sono conservate. Xenofane interpreta i fossili come resti di antichi organismi marini che testimoniano un'epoca dove tutto era mare.

Tabella 1.1. Tappe significative nella storia delle scienze geologiche

Secolo	Autore	Nozione introdotta
XIII a.C.	Mosè	Creazione divina della terra, dei mari e degli esseri viventi
VI a.C.	Xenofane di Colofone	I fossili sono antichi organismi marini
IV a.C.	Aristotele	Movimenti ciclici delle terre e dei mari
I d.C.	Strabone	Sollevamento della crosta terrestre (inizio della tettonica)
XVI	Leonardo da Vinci	Le montagne sono antiche linee di costa sollevate
XVIII	Buffon	Durata geologica e spessore dei sedimenti
XIX	Cuvier	Trasformazioni biologiche a seguito di catastrofi
XIX	Darwin	Evoluzione lenta per selezione naturale
XX	Wegener	Deriva dei continenti

Due secoli più tardi, Aristotele getta le basi della geodinamica evocando gli sconvolgimenti che ha dovuto subire la Terra nel corso del tempo:

“Non sono sempre le stesse le parti di terra che si trovano al di sotto delle acque, né quelle che stanno all'asciutto. Continenti e mari si scambiano spesso di ruolo l'uno con l'altro; i primi non rimangono sempre terraferma né i secondi sempre mari; là dove c'era terra adesso ci può essere un mare; là dove ora si trova il mare in futuro potrà riapparire la terra. Dobbiamo pensare che queste trasformazioni si producono in un certo ordine e che esse seguono un determinato ciclo”. *Aristotele, Le Meteore*.

Con l'ipotesi di una ciclicità nella creazione delle catene montuose, Aristotele è il precursore della teoria dei cicli di Wilson (capitolo 3).

Strabone, nato in Cappadocia, introdusse nel I secolo a.C. il concetto di trasgressione applicato ai fossili marini, un elemento di geodinamica importante:

“Come può essere che in luoghi che si trovano in piena terraferma, lontani due o tre mila stadi dal mare, si incontrano in molti punti accumuli di conchiglie di ostriche e di cheramydes¹ così come laghi di acqua salata? Bisogna che uno stesso fondo talvolta si sollevi talvolta si abbassi. Il mare allora si innalza e si abbassa al pari del fondo; e quando si solleva inonda le regioni costiere, quando si abbassa rientra nel suo letto”. *Strabone, Geografia*.

Questo geografo stabilisce anche un legame tra la tettonica (risalita di un cuneo di crosta terrestre) e l'invasione dei continenti da parte del mare.

L'avvento del cristianesimo segna l'inizio di un'epoca di stasi scientifica che perdurerà come in astronomia fino al XVI secolo. Il lungo e buio Medioevo sarà illuminato da qualche “bagliore isolato” come Avicenna, che nel XI secolo fece constatazioni interessanti sull'erosione e la formazione delle montagne:

“Le montagne possono formarsi o per sollevamento del suolo così come avviene durante i terremoti, o come effetto dell'acqua corrente e del vento che scavano delle valli nelle rocce tenere e fanno apparire in superficie le rocce dure, processo con cui si spiega la formazione di molte col-

¹ I cheramydes sono frammenti di madreperla costituenti il guscio di vari tipi di gasteropodi e bivalvi.

line. Trasformazioni di questo tipo hanno richiesto molto tempo e può essere che l'altezza delle montagne stia attualmente diminuendo". *Avicenna, Scritti*.

L'immobilismo derivato dalla religione sarà spezzato per la prima volta da Leonardo da Vinci agli inizi del XVI secolo. Lo scienziato scriveva senza peli sulla lingua: "Non si può che compatire la dabbennaggine e la semplicità di chi pensa che queste conchiglie (= fossili) siano state trasportate dal Diluvio universale [...]. Se fosse così esse sarebbero distribuite a caso, confuse tra altri oggetti e tutte alla stessa altezza. In realtà sono state depositate per strati: si possono trovare sia ai piedi della montagna come alla sua sommità [...]. Le montagne dove si trovano le conchiglie erano un tempo linee di costa sferzate dai flutti e poi si sono sollevate alla quota alla quale le troviamo oggi". *Leonardo da Vinci, 1508 (note)*.

Buffon, due secoli più tardi, attraverso le sue osservazioni sulle piane di marea, muove i primi passi nel problema del tempo e dell'età della Terra:

"Supponiamo dunque che ciascun ciclo di marea depositi una quantità di sedimento pari a $1/12^\circ$ di una linea di spessore [...] il deposito aumenterebbe di una linea in sei giorni [...], di conseguenza, di circa 5 pollici in un anno; vale a dire più di 14.000 anni per formare una collina di creta di mille tesa di altezza (circa 2000 m)." *Buffon, Epoche della Natura*.

Sulla base di queste considerazioni, Buffon suppose che la Terra avesse almeno 75.000 anni, un'età molto più antica di quella ritenuta valida fino ad allora (nel XVII secolo si pensava ancora che la Terra avesse da sei a ottomila anni).

I paleontologi del XIX secolo apportarono grandi progressi alla geologia e alla storia della vita. Lamarck, un precursore del trasformismo, nel 1809 scrisse che gli animali discendono l'uno dall'altro secondo un piano definito dal Creatore e che la trasformazione degli esseri viventi deriva dall'adattamento al loro ambiente di vita: "la funzione crea l'organo". Un organo inutile finisce per atrofizzarsi e scomparire.

Charles Lyell, uno dei "padri della geologia", sviluppa questa idea introducendo il principio dell'**attualismo**: "il presente è la chiave del passato". Questo vuol dire che i processi che hanno modificato l'aspetto della Terra nel corso dei tempi geologici sono gli stessi che agiscono attualmente. A una stabilità di tipo fisico si associa una stabilità di tipo biologico: i cambiamenti osservati nella vita sulla Terra attraverso i fossili sono avvenuti gradualmente. Alcune specie scompaiono, altre prendono il loro posto senza che le prime differiscano molto dalle seconde. Studiando i cicli di modificazione delle specie viventi Lyell ipotizzò che l'era primaria potesse essere iniziata circa 240 milioni di anni fa (in realtà oggi noi sappiamo che è di 590 milioni di anni).

Queste idee sono state duramente contestate dagli esponenti del **catastrofismo**. Questi ultimi, tra cui il celebre paleontologo George Cuvier, pensano che sono soprattutto gli eventi catastrofici a modificare la Terra e a produrre sconvolgimenti biologici sulla sua superficie.

Da ultimo, Darwin, studente di Lyell, ha gettato le basi della **teoria dell'evoluzione** della vita sulla Terra per selezione naturale.

Verso la fine del XIX secolo, il fisico Kelvin sollevò pesanti dubbi sull'ipotesi che la Terra fosse molto antica. Basandosi sulla velocità di raffreddamento ricavò che la sua età doveva essere compresa tra 20 e 200 milioni di anni. Bisognerà attendere la scoperta della radioattività da parte di Becquerel nel 1896 per capire dove stava l'errore di Kelvin che nei suoi calcoli considerava solo il calore iniziale. Da quel momento in avanti, numerosi scienziati concentrarono i loro studi sulla radioattività ma è soltanto nel 1955 che Patterson, basandosi sul rapporto degli isotopi del piombo nelle meteoriti, riuscì a definire per la Terra un'età di 4.6 Ma.

Wegener propose nel 1912 la sua celebre teoria sulla deriva dei continenti. Questa ipotesi affascinante incontrò il favore di alcuni geologi ma anche la feroce opposizione dei geofisici che rifiutavano l'esistenza di qualsiasi movimento di una certa importanza nella crosta terrestre. Curiosamente, fu proprio il rilevamento geofisico dei fondi oceanici iniziato nei primi anni '60 a indurre la comunità scientifica a riprendere in considerazione la teoria di Wegener.

Nel complesso il XX secolo è stato caratterizzato da enormi progressi. La geologia quasi pioneristica delle origini si è arricchita e diversificata in numerose materie quali la geofisica, la geochemica, l'idrologia, l'idrogeologia, la geologia applicata all'ingegneria, la geotecnica, tutte appartenenti alla grande famiglia delle Scienze della Terra.

In Svizzera tre grandi studiosi della metà del XX secolo meritano di essere ricordati per l'importanza delle loro scoperte in relazione alla presente opera e perché hanno insegnato nelle università elvetiche:

- Emile Argand, di Neuchâtel, perché per primo ha interpretato le Alpi come una catena montuosa a falde sovrapposte;
- Albert Heim, di Zurigo, per i suoi studi sulle grandi frane (figura 1.7);
- Maurice Lugeon, di Losanna, per la geologia applicata all'ingegneria (specialmente nel campo delle dighe) prima che questa disciplina assumesse il nome che ha attualmente.



[62]

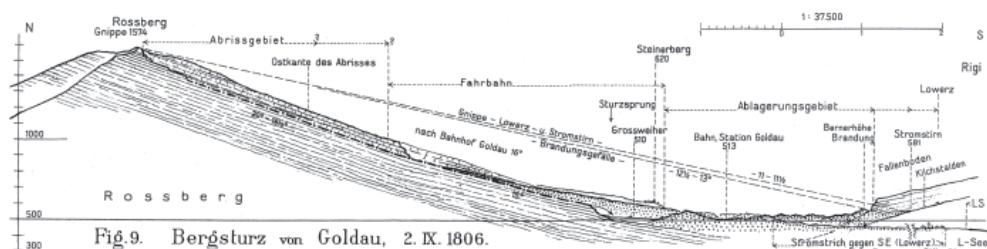


Figura 1.7. Disegno di Albert Heim (1932) della rock avalanche di Aarh-Goldau (Alpi svizzere). Quando una frana interessa un volume molto grande, altri meccanismi intervengono nel processo che porta alla distribuzione del materiale franato a grandi distanze. L'energia cinetica molto elevata dovuta alla collisione tra le particelle (velocità che può raggiungere valori di diverse centinaia di m/s) permette questo trasporto lontano dalla zona di distacco. Il rapporto altezza/lunghezza dello spostamento assume valori estremamente bassi. Albert Heim è stato il primo a riconoscere questo tipo di frana nelle Alpi e a chiamarla con il nome tedesco di Sturzstrom. Il 2 settembre di ogni anno, alle cinque di pomeriggio, le campane della chiesa di Goldau suonano per ricordare l'enorme Sturzstrom del 1806 che distrusse in pochi secondi la valle tra Rigi e Rossberg. Il conglomerato massivo di Rosberg posto alla sommità scivolò su un livello di marne molto regolare inclinato di 20°. La massa franata fu di circa 40 milioni di metri cubi e il detrito coprì un'area di 6.6 km² distruggendo 111 abitazioni, 2 chiese e 220 stalle. 700 persone persero la vita. Heim misurò lungo il suo profilo un angolo compreso tra 11 e 13°, valori tipici di una rock avalanche

[I geologi italiani degni di essere ricordati sono numerosi, impossibile quindi nominarli tutti. Citiamo solo quelli i cui nomi sono legati a tappe importanti nella storia della geologia italiana:

- Giovanni Arduino di Verona, che a metà del Settecento gettò le basi della moderna stratigrafia;
- Giuseppe Mercalli di Milano, illustre sismologo e vulcanologo a cui si deve l'omonima scala di misura dell'intensità dei terremoti;
- Giovanni Cappellini di La Spezia, forse il più noto geologo e paleontologo di fine Ottocento, co-fondatore nel 1881 insieme a Quintino Sella della Società Geologica Italiana con sede a Bologna;
- Secondo Franchi di Castell'Alfero (Asti) geologo rilevatore del Regio Corpo delle Miniere che per primo riconobbe l'età mesozoica dei Calcescisti con Pietre Verdi aprendo la strada alla corretta interpretazione cronologica e paleogeografica delle Alpi;
- Ardito Desio di Palmanova (Udine), geologo dai molteplici interessi con grande esperienza nella geologia applicata alle dighe, il cui nome è però legato alla spedizione italiana che conquistò il K2 nel 1954. NdT].

Non possiamo non terminare questo capitolo senza rendere omaggio a tutti questi pionieri della geologia, al loro coraggio per aver enunciato teorie spesso così rivoluzionarie per la loro epoca.

Bilancio del capitolo

La geologia è una materia molto complessa e diversificata che influenza molte attività dell'ingegnere. La geologia applicata all'ingegneria aiuta quest'ultimo a trovare soluzioni adatte al contesto geologico in cui si trova ad operare. L'ingegnere e il geologo, benché di mentalità e attitudine spesso differenti, devono comprendersi il più possibile se la loro collaborazione vuole essere efficace. Questo necessita uno sforzo da entrambe le parti a cui questo libro vuole contribuire.

2. La Terra nello spazio

Prima di focalizzare la nostra attenzione sulla Terra, è utile esaminare la posizione che il nostro pianeta occupa nell'Universo, in particolare all'interno del Sistema Solare. Questo ci permetterà di comprendere meglio il concetto di scala delle distanze e di collocare correttamente la Terra nel contesto spaziale in cui si trova. La domanda che spesso ci poniamo è questa: la Terra è veramente un pianeta unico?

2.1. Il Sistema Solare

Nel capitolo precedente abbiamo visto l'evoluzione del pensiero scientifico a riguardo dei processi che modificano la superficie terrestre. Un percorso analogo ha prodotto il modello attuale dell'Universo. Siamo sicuri che nel prossimo futuro questo modello potrà subire modifiche rilevanti; il modello del Sistema Solare, invece, non dovrebbe allontanarsi di molto dalle sue linee attuali. Ripercorriamo ora le tappe principali che hanno segnato la storia della scienza.

2.1.1. Rappresentazioni storiche

I popoli antichi credevano che la Terra fosse piatta, come rappresentato, ad esempio, nel Disco di Ecateo (figura 2.1). Non si poteva nemmeno immaginare, quindi, che cosa ci potesse essere al di là di questo disco. Tale modello venne ben presto abbandonato ma perdurò nella mente degli uomini per molti secoli.



Figura 2.1. Disco di Ecateo risalente al V secolo a.C. (tratto da [160])

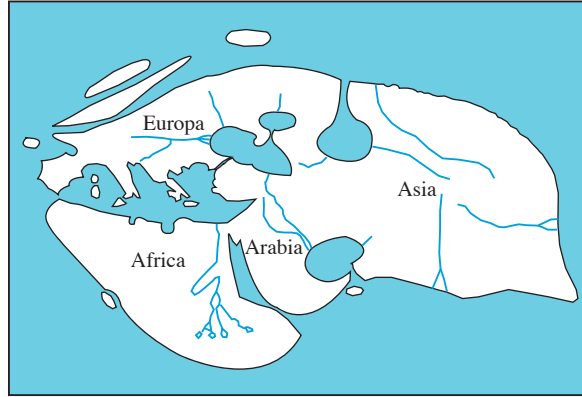


Figura 2.2. Sfera di Eratostene (tratto da [221])

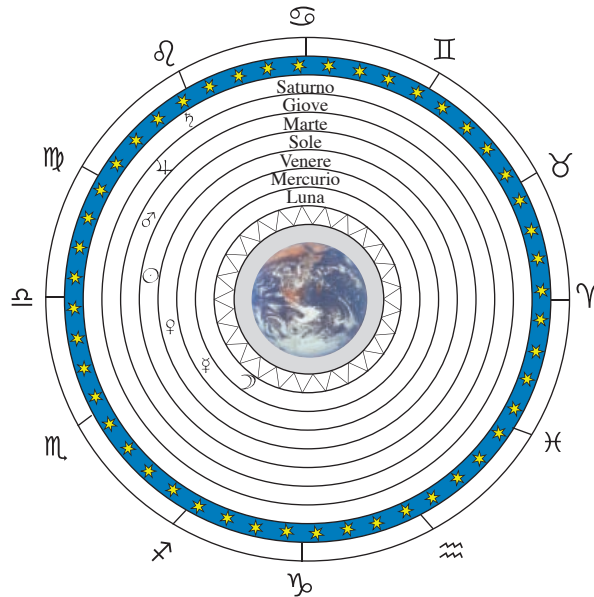


Figura 2.3. Rappresentazione del modello geocentrico

Eratostene fu il primo, nel II secolo a.C., a dimostrare la sfericità della Terra e a calcolarne la circonferenza (figura 2.2). Approfondiremo questo argomento nel problema 2.1.

Le prime rappresentazioni del Sistema Solare sono geocentriche allo stesso modo di come le prime rappresentazioni della Terra erano piatte. Nel secondo secolo d.C. Tolomeo migliorò questo modello correggendone gli errori attraverso calcoli complicati (figura 2.3).

Malgrado nel Medioevo ci sia stato qualche tentativo di mettere in discussione il geocentrismo, solo nel XVI secolo il polacco Niccolò Copernico riuscì a dimostrare i fondamenti del modello attuale (figura 2.4). Le ricerche astronomiche che seguirono mostrarono che il Sistema Solare è uno dei cento miliardi di sistemi presenti nella nostra galassia e che l'Universo dovrebbe contenere almeno un miliardo di galassie.

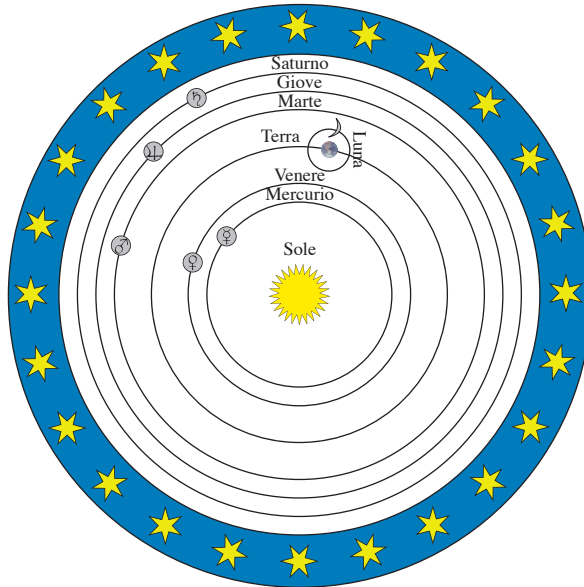


Figura 2.4. Prima rappresentazione del modello eliocentrico fatta da Copernico

2.1.2. Struttura generale

Ritorniamo ora alla nostra stella ed esaminiamo la struttura del nostro Sistema Solare (figura 2.5) per capire meglio qual è la posizione del nostro pianeta nello spazio.

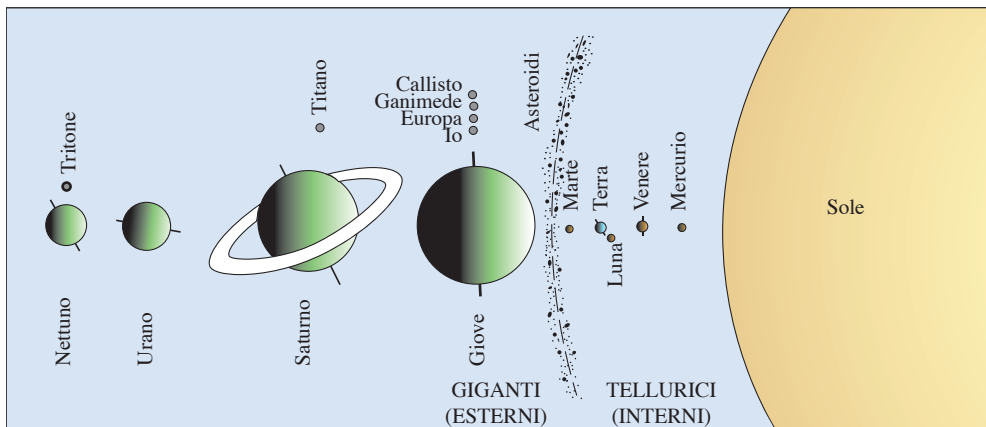


Figura 2.5. Rappresentazione schematica del Sistema Solare. I rapporti dimensionali tra i pianeti sono conservati

Il Sole è circondato da numerosi corpi di varia natura che ruotano seguendo orbite ellittiche. Il Sole occupa uno dei fuochi di queste orbite. Questi corpi sono:

- otto pianeti con i relativi satelliti;

- una moltitudine di asteroidi;
- un gran numero di comete.

Si chiamano tellurici (o interni) i quattro pianeti più vicini al Sole; oltre la fascia degli asteroidi si trovano i pianeti giganti (o esterni). Le orbite dei pianeti sono tutte debolmente eccentriche e grosso modo complanari; soltanto Plutone, considerato un pianeta fino al 2006, si allontana da questo piano di 20° . Il periodo di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole definisce la durata dell'anno; il tempo di rotazione intorno al proprio asse la durata del giorno.

Nel XVII secolo Keplero scrisse le tre equazioni fondamentali che controllano il movimento dei pianeti intorno al Sole (figura 2.6).

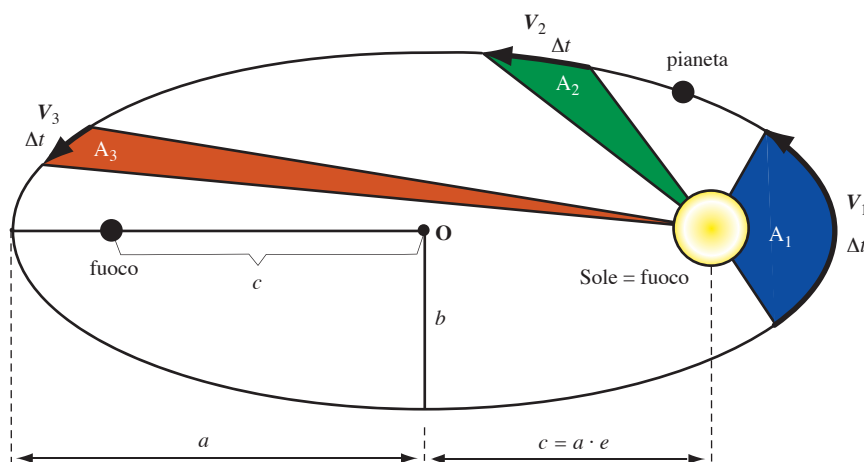


Figura 2.6. Le tre leggi di Keplero. (I) Il Sole occupa uno dei due fuochi dell'ellisse. (II) La linea che collega il Sole a ciascun pianeta percorre aree uguali in tempi uguali ($A_1 = A_2 = A_3$), indipendentemente dalla posizione che il pianeta occupa nella sua traiettoria. Questo vuol dire che il rapporto dA/dt è costante e che la velocità massima si ha quando il pianeta è vicino al Sole. (III) Il periodo T è legato alla dimensione dell'ellisse dalla relazione (T^2/a^3) che è costante. La durata dell'anno, quindi, cresce più velocemente della dimensione dell'ellisse. L'eccentricità è data dalla relazione: $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$. [Le leggi di Keplero valgono anche per i satelliti rispetto ai pianeti NdT] Nota: l'eccentricità sul disegno è fortemente esagerata

2.1.3. Il moto di rivoluzione della Terra

La Terra ruota su se stessa secondo un asse inclinato di circa 23.5° rispetto alla normale al piano dell'eclittica (il piano che contiene l'orbita che il pianeta compie intorno al Sole). È proprio questa obliquità dell'asse terrestre a creare le stagioni. Come illustrato in figura 2.7, durante il moto di rivoluzione intorno al Sole la Terra mantiene costante l'orientazione del proprio asse nello spazio. In realtà questo asse ruota molto lentamente e compie un giro completo in circa 26.000 anni, dando origine a quella che si chiama **precessione degli equinozi**.

Le due posizioni particolari dei solstizi spiegano le stagioni estreme per i due emisferi (figura 2.8), la definizione dei tropici e dei circoli polari.

La rivoluzione annuale dura 365 gg 6 h e 9 min, il che necessita un anno bisestile ogni quattro anni. La lunghezza dell'anno probabilmente non è cambiata in maniera significativa nella storia della Terra. Lo stesso non si può dire per la rotazione della Terra intorno al proprio asse. Attualmente la durata del giorno è di 23 h 56 min e 4 s. Lo studio della crescita dei coralli, dalla loro comparsa nel medio Paleozoico fino ad oggi, mostra che il numero dei cicli giornalieri in un ciclo

stagionale è maggiore nei fossili più antichi (figura 2.9). Questo significa che la velocità di rotazione della Terra intorno al proprio asse è diminuita nel corso dei tempi geologici a causa della continua dissipazione di energia provocata dalle maree, specialmente da quelle originate dalla Luna (capitolo 9).

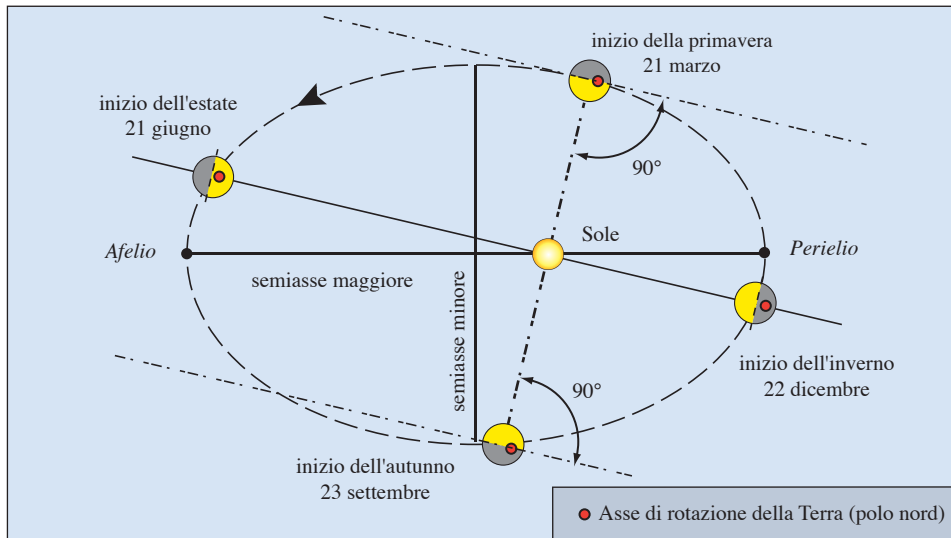


Figura 2.7. Orbita ellittica della Terra intorno al Sole e posizione dei solstizi e degli equinozi

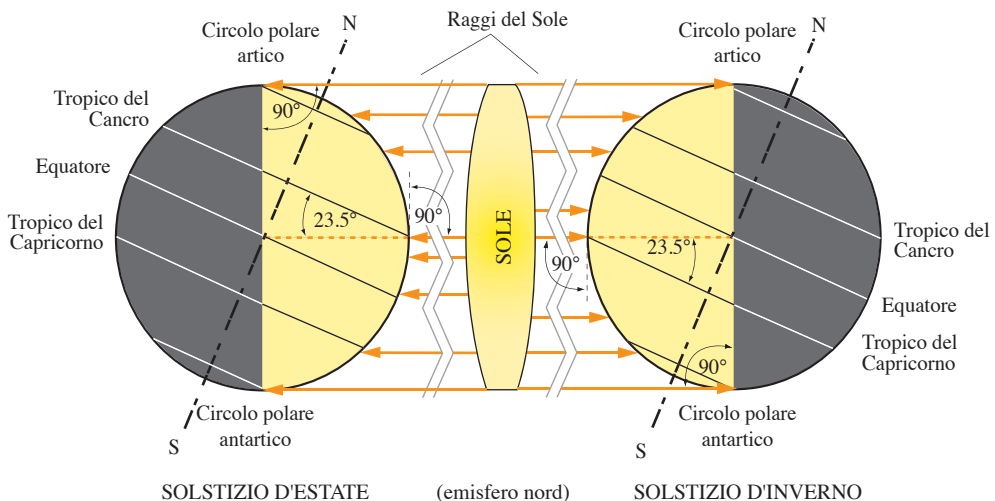


Figura 2.8. Stagioni sulla Terra, definizione dei tropici e dei circoli polari (tratto da [145])

L'astronomia del Sistema Solare è attualmente ben conosciuta; non si può dire lo stesso dei corpi che circondano il Sole. La geologia planetaria è solo agli inizi ma ha già fatto notevoli progressi da quando furono costruite le prime sonde spaziali, alla fine degli anni '50. Lo sbarco dell'uomo sulla Luna è stato un evento fondamentale.