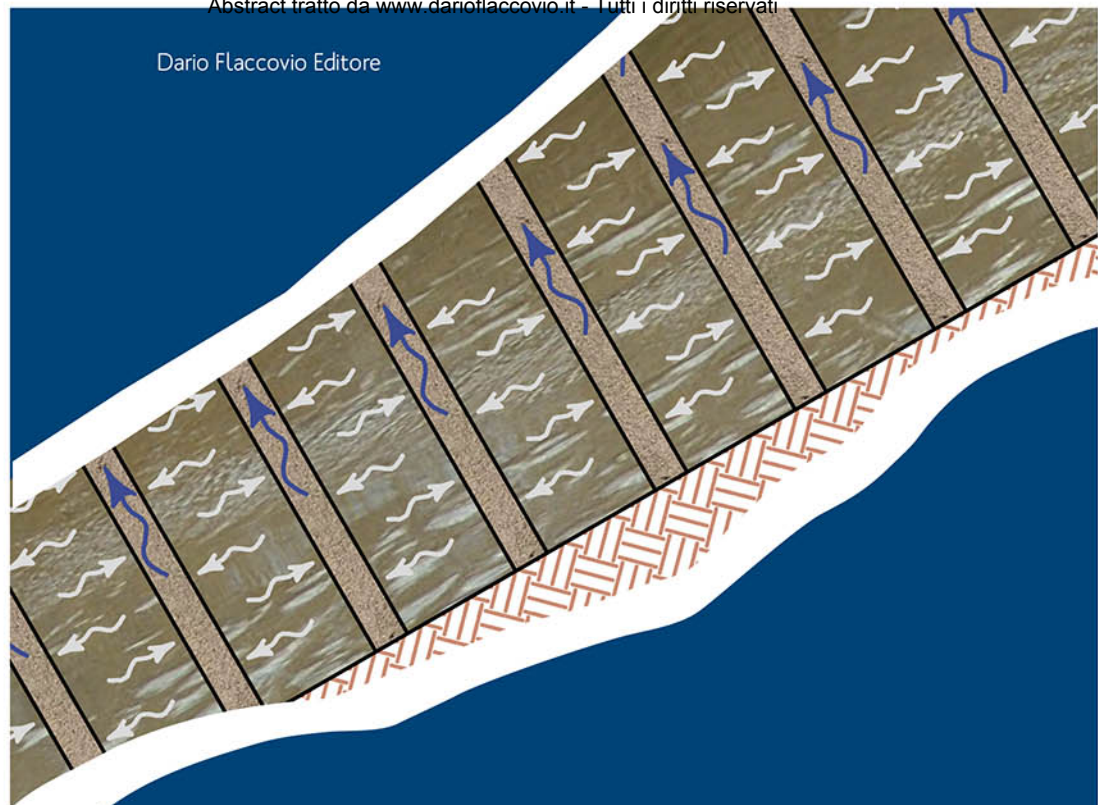


Dario Flaccovio Editore

ROMOLO DI FRANCESCO



GEOTECNICA DEL TERZO MILLENNIO



[Scheda sul sito >](#)

MANUALE AVANZATO DI MECCANICA DELLE TERRE

Parte II: stress-paths,
legame costitutivo sperimentale,
teoria della consolidazione

A Darwin Lupinetti
amico di tutti, scomparso prematuramente nel fiore degli anni

ROMOLO DI FRANCESCO

MANUALE AVANZATO DI MECCANICA DELLE TERRE

**Parte II: stress-paths, legame costitutivo sperimentale,
teoria della consolidazione**



Dario Flaccovio Editore

Romolo Di Francesco

Manuale avanzato di meccanica delle terre

Parte II: stress-paths, legame costitutivo sperimentale, teoria della consolidazione

ISBN 978-88-579-0298-2

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

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: giugno 2014

Di Francesco, Romolo <1965->

Manuale avanzato di meccanica delle terre. Parte 2., Stress paths, legame costitutivo
sperimentale, teoria della consolidazione / Romolo Di Francesco. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.
ISBN 978-88-579-0298-2

1. Meccanica dei terreni.

624.15136 CDD-22 SBN Pal0270529

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana “Alberto Bombace”

Stampa: Tipografia Priulla s.r.l., Palermo, giugno 2014

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 fotocopiatrice 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

1. Presentazione dell'opera

1.1.	Introduzione all'opera.....»	11
1.2.	Volume I: Introduzione al metodo degli elementi finiti»	13
1.3.	Volume II: Introduzione alla Meccanica del Continuo.....»	15
1.4.	Volume III: Introduzione alla Meccanica delle Terre, parte I.....»	17
1.5.	Volume IV: Manuale avanzato di meccanica delle terre, parte II.....»	20
1.6.	Introduzione al comportamento meccanico delle terre.....»	22
1.6.1.	Il ruolo delle diverse figure professionali.....»	24
1.6.2.	Problemi connessi con i legami costitutivi sperimentali»	25
1.6.3.	Conclusioni.....»	28
1.7.	Ringraziamenti»	28
1.8.	Tabella dei simboli»	29
1.9.	Scala dei tempi geologici»	36

2. Il metodo degli stress-paths

2.1.	Introduzione.....»	39
2.1.1.	Lo spazio degli sforzi principali»	41
2.1.2.	Il piano invariante $q-p'$»	43
2.1.3.	Lo stato di sforzo secondo i cerchi di Mohr (piano $\tau-\sigma'$)»	46
2.1.4.	Il piano invariante $t-s'$»	47
2.1.5.	Connessioni matematiche tra i piani $\tau-\sigma'$ e $t-s'$»	48
2.1.6.	Connessioni matematiche tra i piani $\tau-\sigma'$ e $q-p'$»	50
2.1.7.	I concetti di stress-point e stress-path.....»	53
2.1.8.	Approfondimento di un esempio di calcolo del volume II»	59
2.1.9.	Approfondimento dell'esercizio 7.3. del volume II.....»	62
2.1.10.	Ulteriori elementi sulla geometria degli stress-paths»	66
2.2.	Stress-paths del campionamento delle terre»	69
2.2.1.	Un esempio di calcolo»	71
2.2.2.	Effetti della preparazione dei provini in laboratorio»	73
2.2.3.	Un'ultima riflessione»	76
2.3.	Stress-paths delle fondazioni»	78
2.3.1.	Analisi degli effetti dovuti alla consolidazione»	80
2.3.2.	Condizione di criticità delle fondazioni su terreni NC.....»	86
2.3.3.	Condizione di criticità delle fondazioni su terreni OC.....»	90
2.3.4.	Ulteriori effetti dovuti alla consolidazione»	91
2.3.5.	Riflessioni finali»	95
2.4.	Stress-paths dei fondo-scavi.....»	98
2.4.1.	Analisi degli effetti dovuti alla consolidazione»	99

2.4.2.	Condizione di criticità dei fondo-scavi.....»	102
2.4.3.	Approfondimenti dell'argomento.....»	105
2.4.4.	Ulteriori effetti dovuti alla consolidazione.....»	106
2.5.	Stress-paths dei muri di sostegno.....»	107
2.5.1.	Analisi degli effetti dovuti alla consolidazione.....»	109
2.5.2.	Condizioni di criticità dei fronti di scavo.....»	111
2.5.3.	Approfondimenti sulla meccanica dei fronti di scavo.....»	113
2.5.4.	Scavi a steps e confronto con le fondazioni.....»	118
2.5.5.	Il concetto di spinta attiva delle terre.....»	123
2.5.6.	Un'ultima riflessione.....»	132
2.6.	Stress-paths delle paratie.....»	134
2.6.1.	Analisi degli effetti dovuti alla consolidazione.....»	137
2.6.2.	Definizione matematica del concetto di spinta passiva.....»	139
2.6.3.	Definizione delle condizioni di criticità delle paratie.....»	142
2.7.	Sintesi degli stress-paths ed ulteriori applicazioni.....»	145
2.7.1.	Un esempio applicativo: stress-path di un ambiente geologico.....»	148
2.7.2.	Approfondimenti sullo stress-path di un ambiente geologico.....»	153
2.8.	Approfondimenti sui coefficienti di spinta delle terre.....»	154
2.8.1.	Applicazioni nella progettazione delle paratie.....»	157
2.8.2.	Applicazioni nell'analisi degli effetti esercitati dai ghiacciai.....»	163
2.8.3.	Il ruolo della spinta passiva nell'evoluzione delle argille OC.....»	166
2.8.4.	Effetti della spinta attiva e passiva sull'evoluzione dei versanti.....»	168
2.8.5.	Influenza delle spinte sulla morfologia di versanti e frane.....»	170
2.8.6.	Livelli deformativi, condizioni di vincolo e scelta dei parametri geotecnici.....»	178
2.9.	Esercizi.....»	186
2.9.1.	Esercizio 2.1: applicazione di un carico differito nel tempo.....»	187
2.9.2.	Esercizio 2.2: stress-path di un muro di sostegno in presenza di risalita capillare.....»	190
2.9.3.	Esercizio 2.3: stabilità a breve termine dei fronti di scavo.....»	193
2.9.4.	Esercizio 2.4: pressioni attive e passive agenti in un semispazio dotato di coesione.....»	196
2.9.5.	Esercizio 2.5: profondità delle fessure di trazione nella spinta attiva.....»	199
2.9.6.	Esercizio 2.6: altezza critica di un fronte di scavo nel breve termine.....»	201
2.9.7.	Esercizio 2.7: altezza critica di un fronte di scavo nel lungo termine.....»	205
2.9.8.	Esercizio 2.8: deformabilità di un fronte di scavo in argilla.....»	207
2.9.9.	Esercizio 2.9: deformabilità di un fronte di scavo in sabbia.....»	209
2.9.10.	Esercizio 2.10: calcolo della forza di tiro negli ancoraggi.....»	210
2.9.11.	Esercizio 2.11: effetti indotti dall'applicazione di un precario.....»	214

3. Il legame elastoplastico sperimentale: prove di laboratorio

3.1.	Introduzione alla sperimentazione di laboratorio.....»	217
3.1.1.	Un'ultima riflessione.....»	219
3.2.	Prova di compressione con espansione laterale libera (ELL).....»	221
3.2.1.	Equazioni generali della ELL.....»	227
3.2.2.	Esempio di interpretazione di una prova ELL.....»	230
3.3.	Le prove triassiali (TRX): aspetti generali.....»	234
3.4.	Prove triassiali consolidate isotropicamente e drenate (TRX-CID).....»	240

3.4.1.	Determinazione dell'avvenuta saturazione: il parametro B di Skempton	242
3.4.2.	Determinazione della velocità di applicazione del carico di rottura	246
3.4.3.	Equazioni generali che governano le prove TRX-CID	248
3.4.4.	Esempio d'interpretazione di una prova TRX-CID	252
3.4.5.	Introduzione di un nuovo parametro: il volume specifico	254
3.4.6.	Derivazione dei parametri elastoplastici nel piano t-s'	256
3.4.7.	Derivazione dei parametri elastoplastici nel piano q-p'	262
3.4.8.	Limiti delle prove TRX-CID	264
3.4.9.	Effetti indotti dalla velocità di deformazione e sintesi delle prove TRX-CID	265
3.5.	Prove triassiali consolidate isotropicamente e non drenate (TRX-CIU)	267
3.5.1.	Limiti nel valore assunto dai parametri elastici	268
3.5.2.	Correlazioni tra i parametri elastici desunti dalle prove TRX-CIU e TRX-CID	271
3.5.3.	Equazioni generali che governano le prove TRX-CIU	273
3.5.4.	Studio teorico-sperimentale delle sovrappressioni interstiziali: il parametro A di Skempton	278
3.5.5.	Studio teorico-sperimentale delle sovrappressioni interstiziali: l'equazione generale in campo elastico	281
3.5.6.	Relazione tra resistenza non drenata e resistenza drenata	291
3.5.7.	Esempio d'interpretazione di una prova TRX-CIU	296
3.5.8.	Riflessioni finali	303
3.6.	Prove triassiali non consolidate e non drenate (TRX-UU)	308
3.6.1.	Approfondimenti sul campionamento delle terre	312
3.6.2.	Comportamento delle terre nelle prove TRX-UU	315
3.6.3.	Riflessioni sul concetto di coesione non drenata	324
3.6.4.	Primo esempio di interpretazione di una prova TRX-UU	335
3.6.5.	Secondo esempio di interpretazione di una prova TRX-UU	337
3.6.6.	Riflessioni finali	339
3.7.	Relazioni tra le prove TRX-CID/CIU/UU su terreni saturi	341
3.8.	Prove di permeabilità in cella triassiale	342
3.9.	Applicazione dei bender elements alle celle triassiali	344
3.10.	La prova di taglio diretto (TD)	346
3.10.1.	La fase di consolidazione iniziale	347
3.10.2.	Equazioni generali del taglio diretto	350
3.10.3.	La fase di rottura	351
3.10.4.	Limiti delle prove di taglio diretto	354
3.10.5.	Interpretazione delle prove di taglio diretto	355
3.10.6.	Primo esempio di interpretazione di una prova TD	357
3.10.7.	Secondo esempio di interpretazione di una prova TD	359
3.11.	La prova di taglio residuo (TR)	360
3.11.1.	Il concetto di stato critico	363
3.11.2.	Valori tipici della resistenza al taglio residua delle argille	364
3.11.3.	Comportamento delle sabbie in condizioni residue	365
3.11.4.	Applicazione della resistenza residua allo studio delle frane	366
3.12.	La prova di taglio torsionale (TT)	367
3.12.1.	Modalità sperimentali delle prove TT	369
3.12.2.	Interpretazione delle prove TT	369
3.12.3.	Un esempio interpretativo di prova TT	371
3.13.	Esercizi	371

3.13.1. Esercizio 3.1: sovrappressioni interstiziali e stress-paths indotti da un carico	373
3.13.2. Esercizio 3.2: calcolo delle sovrappressioni interstiziali indotte da un carico	376
3.13.3. Esercizio 3.3: calcolo delle sovrappressioni interstiziali indotte da uno scarico.....	378
3.13.4. Esercizio 3.4: definizione dello stato di compattazione dei rilevati	381

4. Il legale elastoplastico sperimentale: prove in sito

4.1. Introduzione.....	383
4.4.1. La cella di calibrazione.....	385
4.2. La prova penetrometrica statica (CPT).....	386
4.2.1. Struttura della punta conica	391
4.2.2. Modalità esecutive.....	393
4.2.3. I penetrometrici statici meccanici.....	395
4.2.4. I penetrometrici statici elettrici.....	400
4.2.5. Il piezocono (CPTU)	401
4.2.6. Ricostruzione della stratigrafia.....	407
4.2.7. Parametri di resistenza delle sabbie.....	412
4.2.8. Parametri di resistenza delle argille.....	418
4.2.9. Parametri di deformabilità.....	425
4.2.10. Permeabilità e consolidazione: le prove di dissipazione	430
4.3. La prova penetrometrica dinamica	434
4.3.1. Modalità esecutive delle prove SPT	437
4.3.2. Modalità esecutive delle prove DP.....	440
4.3.3. Caratteristiche di resistenza delle sabbie.....	443
4.3.4. Caratteristiche di resistenza delle argille.....	448
4.3.5. Parametri di deformabilità.....	449
4.4. Il dilatometro di Marchetti	450
4.5. La prova di carico su piastra.....	455
4.6. Esercizi	458
4.6.1. Esercizio 4.1: stima dello spessore eroso nei terreni OC.....	458
4.6.2. Esercizio 4.2: capacità portante dei pali da prove CPT.....	460
4.6.3. Esercizio 4.3: capacità portante delle fondazioni superficiali su argilla.....	462
4.6.4. Esercizio 4.4: capacità portante di un fronte di scavo	465

5. Soluzioni teorico-sperimentali della teoria della consolidazione

5.1. Introduzione.....	469
5.1.1. Schema costruttivo e funzionale delle celle edometriche.....	473
5.1.2. Equazioni generali che governano le prove edometriche.....	478
5.1.3. Analisi delle isocrone delle sovrappressioni interstiziali.....	480
5.1.4. Analisi del grado di consolidazione.....	484
5.2. Soluzione storica della teoria della consolidazione.....	489
5.2.1. Soluzione generale della consolidazione 1D.....	491
5.2.2. Applicazione della soluzione 1D ed u_e costante	497

5.2.3.	Un esempio di calcolo: applicazione alle celle edometriche	499
5.2.4.	Uso del grafico T_v -U-Z con esempio di calcolo	505
5.2.5.	Applicazione della soluzione 1D ad u_e linearmente variabile	515
5.2.6.	Un esempio di calcolo per u_e variabile linearmente	516
5.2.7.	Effetti dovuti al carico variabile nel tempo	520
5.2.8.	Un esempio di calcolo per carico variabile nel tempo	523
5.2.9.	Soluzione della consolidazione 2D.....	525
5.2.10.	Soluzione della consolidazione 3D.....	529
5.3.	Una nuova soluzione della teoria della consolidazione.....	531
5.3.1.	Derivazione per la condizione monodimensionale.....	532
5.3.2.	Estensione alle consolidazione bi-tridimensionale.....	533
5.3.3.	Connessione con i dati sperimentali	534
5.3.4.	Applicazione alle celle edometriche	537
5.3.5.	Applicazioni pratiche della soluzione 1D.....	539
5.3.6.	Applicazioni pratiche delle soluzioni 2D-3D	542
5.4.	Le prove edometriche (EDO)	545
5.4.1.	Interpretazione dei dati sperimentali	546
5.4.2.	Determinazione della pressione di precompressione	553
5.4.3.	Determinazione dei parametri di compressibilità.....	554
5.4.4.	Effetti del disturbo nei campioni	559
5.4.5.	Calcolo dei cedimenti di consolidazione	563
5.4.6.	Cedimenti dovuti alla consolidazione secondaria	567
5.4.7.	Un esempio di calcolo: cedimenti indotti dalla depressione della falda.....	570
5.5.	Prova di permeabilità in cella edometrica	575
5.6.	Prova di rigonfiamento di Hyder e Hamberg	576
5.7.	Consolidazione radiale e dreni verticali	579
5.7.1.	Equazione generale e caso di studio	582
5.7.2.	Soluzione con deformazioni libere del terreno ed in assenza del disturbo	586
5.7.3.	Soluzione con uguali deformazioni del terreno ed in assenza del disturbo	589
5.7.4.	Soluzione in presenza del disturbo	592
5.7.5.	Soluzione con carico variabile nel tempo.....	596
5.8.	Combinazione della consolidazione verticale e radiale.....	598
5.8.1.	Applicazione ai pali di fondazione	599
5.8.2.	Un esempio di calcolo	601
5.9.	Implementazione in ambiente ad elementi finiti	603
5.9.1.	La teoria accoppiata di Biot.....	604
5.9.2.	L'effetto Mandel-Cryer.....	609
5.9.3.	Formulazioni FEM	611
5.10.	Un caso di studio: l'aeroporto di Kansai	614
5.11.	Un caso di studio: costruzione di rilevati in due tempi	617
5.12.	Esercizi	623
5.12.1.	Esercizio 5.1: cedimenti di consolidazione indotti da un carico lineare.....	623
5.12.2.	Esercizio 5.2: relazione tra il modulo elastico e quello edometrico	625
5.12.3.	Esercizio 5.3: relazione K_0 nelle prove edometriche.....	626
5.12.4.	Esercizio 5.4: stress-paths edometrici per un'argilla OC	627
5.12.5.	Esercizio 5.5: variazione delle Δu con la consolidazione.....	630
5.12.6.	Esercizio 5.6: variazione della resistenza al taglio con la consolidazione	631
5.12.7.	Esercizio 5.7: previsione dell'andamento delle isocrone con la nuova soluzione.....	633

6. Sintesi del comportamento meccanico delle terre

6.1.	Introduzione.....»	635
6.1.1.	Confronto tra prove triassiali e prove edometriche.....»	637
6.1.2.	Fattori comuni.....»	639
6.1.3.	Effetti dovuti all'anisotropia.....»	644
6.2.	Comportamento meccanico delle sabbie.....»	645
6.2.1.	Analisi delle sabbie sciolte nelle celle triassiali.....»	646
6.2.2.	Analisi delle sabbie dense nelle celle triassiali.....»	649
6.2.3.	Fattori comuni delle sabbie nelle celle triassiali.....»	651
6.2.4.	Sintesi del comportamento meccanico delle sabbie.....»	653
6.2.5.	Deformabilità delle sabbie nelle celle edometriche.....»	656
6.3.	Comportamento meccanico delle argille.....»	658
6.3.1.	Comportamento delle argille NC nelle prove TRX-CID.....»	659
6.3.2.	Comportamento delle argille NC nelle prove TRX-CIU.....»	664
6.3.3.	Comportamento delle argille NC nelle prove EDO.....»	672
6.3.4.	Comportamento generale delle argille NC.....»	673
6.3.5.	Comportamento delle argille OC integre nelle prove TRX-CID.....»	679
6.3.6.	Comportamento delle argille OC integre nelle prove TRX-CIU.....»	685
6.3.7.	Comportamento generale delle argille OC integre.....»	687
6.3.8.	Comportamento della argille fessurate nelle prove TRX-CID.....»	697
6.3.9.	Comportamento delle argille fessurate nelle prove TRX-CIU.....»	703
6.3.10.	Comportamento generale delle argille fessurate.....»	706
6.3.11.	Comportamento delle argille fittamente fessurate.....»	708
6.4.	Esercizi.....»	713
6.4.1.	Esercizio 6.1: studio dello stato critico nelle argille NC.....»	714
6.4.2.	Esercizio 6.2: determinazione della superficie di Roscoe.....»	718
6.4.3.	Esercizio 6.3: simulazione di uno stress-path.....»	720
	Bibliografia.....»	723

1. PRESENTAZIONE DELL'OPERA

1.1. Introduzione all'opera

Per una corretta comprensione degli elementi costituenti l'opera ritengo sia fondamentale tenere ben presenti alcuni concetti essenziali legati al significato del termine "Geotecnica", i quali possono essere espressi in due soli punti:

- A) la Geotecnica non è un formulario; cercare l'equazione che possa risolvere il problema del momento o la correlazione più utile per il caso in analisi conduce solo al fallimento;
- B) la Geotecnica non può essere ricondotta alla disperata ricerca dei parametri da inserire, in maniera acritica e senza possederne il necessario bagaglio tecnico, nelle schermate del software in uso.

La Geotecnica in realtà può essere sintetizzata in una semplice frase: *studio dell'interazione terreno-struttura*, anche se nel significato completo dell'accezione dobbiamo includere, ad esempio, lo studio della stabilità dei versanti senza necessariamente dover scomodare concetti propri della Scienza e della Tecnica.

Esiste, però, anche una definizione alternativa che, mutuata dalla terminologia informatica, riesce a racchiudere tutta la moderna essenza di tale materia: un *algoritmo di trasformazione* il quale risulta essere particolarmente sensibile ai dati di input, per quantità e qualità (Di Francesco e Siena, 2007); in altre parole, dovremmo cominciare a pensare alla Geotecnica come ad un meccanismo ad ingranaggi il quale, alimentato dalla matematica necessaria, sia in grado di produrre output all'altezza dei nostri problemi e perfettamente bilanciati rispetto ai costi necessari per produrre i relativi dati di input in termini di modello geologico e modello geotecnico. Anche se è proprio qui che emergono tutte le nostre lacune e le nostre limitazioni, poiché l'inserimento di dati di input non all'altezza della complessità dei modelli di calcolo utilizzati riesce ad inficiare il migliore dei nostri progetti.

Proprio per tali motivi l'opera è stata volutamente improntata secondo una metodologia differente rispetto a quanti l'hanno preceduta considerato che, pur analizzando con sufficiente dettaglio e rigore scientifico tutti gli aspetti propri delle materie coinvolte, ha cercato di annullare il gap esistente tra testi di chiara derivazione ingegneristica o geologica, tentando di colmare le lacune che

separano due mondi complementari mediante la costruzione di un filo conduttore comune.

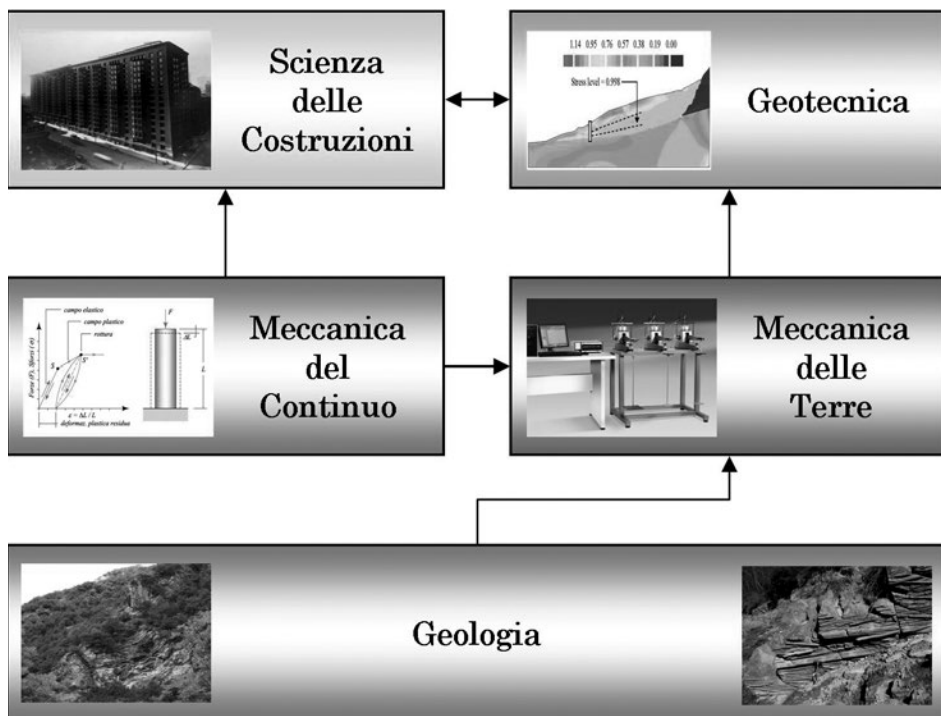


Figura 1.1. Schema di connessione logica tra la Geotecnica e altre branche ingegneristiche e geologiche (fonte: volume I)

Ragionando in tale direzione (secondo lo schema rappresentato figura 1.1, riproposta dalla medesima figura che apre il volume I), gli argomenti sono stati suddivisi in diversi volumi dedicati alla Meccanica del Continuo, alla Meccanica delle Terre in tutte le sue sfaccettature ed agli ambienti geologici in chiave geotecnica con lo scopo di introdurre il lettore alla costruzione, progressiva e sequenziale, di un percorso logico che – partendo da conoscenze matematiche ed ingegneristiche – passa attraverso la “comprensione geotecnica” degli ambienti geologici di formazione dei terreni e di modellazione della superficie terrestre; un percorso la cui costruzione è stata fondata su uno strumento, potente e semplice allo stesso tempo, introdotto da Lambe T.W. (1967) e denominato *stress-path*, capace di riprodurre percorsi tensionali e cinematici anche complessi replicabili in laboratorio mediante il ricorso a prove sperimentali. Un metodo che consentirà di giungere alla definizione di analisi non più limitate ai soli aspetti teorici delle strutture che progettiamo ma di più ampio respiro, tale da consentirci di trattare problemi

anche complessi grazie ai modelli geologici e geotecnici sviluppati intorno ai medesimi fenomeni.

Operando in questo modo saremo in grado, ad esempio, di analizzare l'influenza dei fronti di scavo nei confronti delle opere che progettiamo e di quelle esistenti nel loro raggio di influenza; contestualmente, tenuto conto delle condizioni al contorno che non assumono più aspetti esclusivamente di tipo meccanico e strutturale ma che fanno riferimento anche alla complessa storia geologica, saremo in grado di decidere se progettare opere provvisorie di sostegno o se sfruttare alcuni elementi chiave che sottendono la meccanica dei fronti di scavo (volume I – figura 1.10): elementi che saranno trattati nell'ottica della massima chiarezza e semplicità non solo espositiva ma anche fruitiva, in relazione alla necessità che abbiamo di utilizzare modelli semplici e di facile costruzione successivamente adattabili a modelli numerici anche di elevata complessità.

Per questi motivi tutti gli argomenti sono stati sviluppati secondo una logica di apprendimento delle numerose materie che concorrono nella definizione dei modelli di riferimento, partendo necessariamente da concetti teorici a carattere matematico che, sviluppati in sequenza, conducono infine alla strutturazione di strumenti potenti – e nel contempo di facile utilizzo – capaci di risolvere i numerosi problemi geotecnici che la pratica professionale ci presenta quotidianamente; un approccio che ha richiesto che ogni capitolo fosse corredato da appositi esercizi, o casi di studio, al fine di consentire al lettore di familiarizzare con gli argomenti fino a quel punto sviluppati.

1.2. Volume I: Introduzione al metodo degli elementi finiti

L'obiettivo fondamentale del volume I discende dalla moderna necessità di progettare con metodi matematici molto avanzati come gli elementi finiti: uno strumento, oggi davvero molto diffuso anche nella pratica professionale, alla cui base stanno pochi ma essenziali concetti fisico-matematici come le molle virtuali, l'energia di deformazione ed il principio dei lavori virtuali che aprono, e guidano, i successivi argomenti ad essi necessariamente correlati.

Occorre in tal senso evidenziare che tali concetti guideranno, nei volumi successivi, la comprensione del comportamento meccanico dei solidi continui e la trattazione, e contestuale applicazione, dei legami costitutivi fino a condurre all'evoluzione verso la Meccanica delle Terre ed infine verso l'analisi dell'interazione terreno-struttura in funzione dell'influenza dei possibili ambienti geologici (figura 1.2): un filo conduttore che seguirà l'intera opera e che faciliterà la comprensione dei risultati, offerti dai moderni software di progettazione strutturale e geotecnica, senza dover incorrere nella loro accettazione acritica.

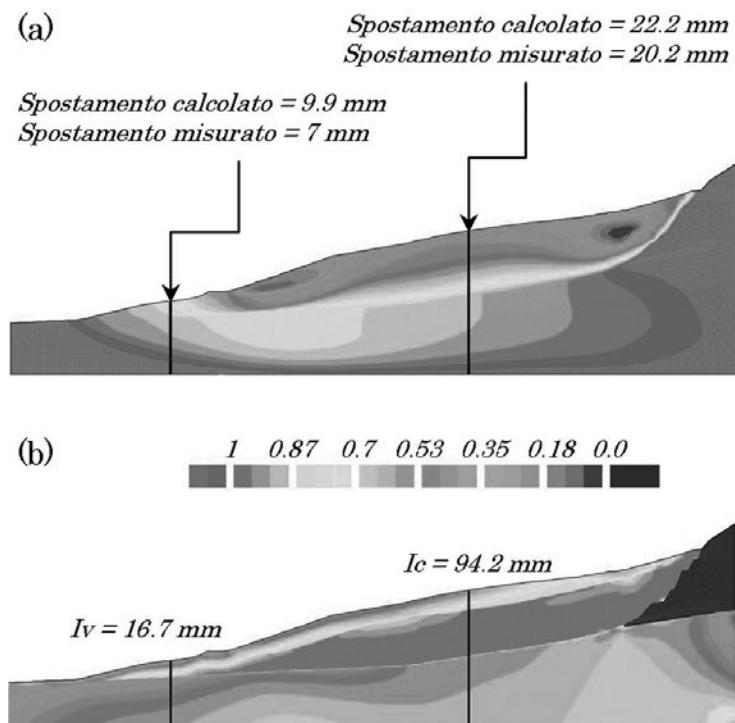


Figura 1.2. Esempio di analisi ad elementi finiti del comportamento di una frana complessa e confronto tra i risultati numerici e sperimentali (fonte: volume I)

Per i motivi sopra esposti il testo è stato suddiviso in pochi, ma essenziali capitoli ai quali è stato affidato il non semplice scopo di introdurre innanzitutto gli elementi finiti di base inquadrati organicamente in funzione della teoria dell'energia potenziale minima di Castigliano; quindi, come primo passaggio, è stata introdotta l'analisi del metodo delle rigidezze dirette grazie al quale è stato possibile verificare, mediante numerosi esempi, il comportamento degli elementi finiti soggetti all'azione delle sole forze assiali i quali, pur apparentemente limitati nelle applicazioni, risultano particolarmente efficaci nell'analisi delle strutture i cui componenti si comportano esclusivamente come tiranti o puntoni.

Il passaggio successivo ha visto l'introduzione delle tecniche fondamentali che possono essere definite il vero e proprio motore del metodo degli elementi finiti le quali, tramite l'applicazione del principio dei lavori virtuali, hanno consentito di simulare il comportamento meccanico degli elementi strutturali – tramite l'analisi delle travi di Bernoulli, di Eulero-Bernoulli e di Timoshenko – nonché di geometrie comunque complesse tramite lo sviluppo degli elementi isoparametrici.

Una volta definiti gli elementi principali, è stato trattato il difficile argomento relativo all'analisi dell'interazione terreno-struttura svolta tramite un modello a macroelementi il quale, ricavato in originale, è stato successivamente applicato all'analisi delle travi di fondazione, dei pali e delle paratie ovvero delle principali strutture geotecniche riscontrabili nella pratica professionale. Non ultimo, il testo è stato chiuso da alcuni esempi applicativi (con vocazione prevalentemente geotecnica) relativi al comportamento termico e termomeccanico dell'insieme terreni-strutture, all'interazione tra fondazioni adiacenti nonché ai fenomeni dipendenti dalla dinamica strutturale.

Infine, considerata la trattazione specificatamente matematica e geotecnica degli elementi, ho ritenuto necessario prevedere anche due apposite appendici: la prima dedicata allo studio delle matrici, dei vettori e dei tensori con lo scopo di fornire un ripasso sintetico di conoscenze già acquisite o di approfondimento delle nozioni necessarie per un corretto e concreto successo del processo di apprendimento logico previsto; la seconda dedicata alla determinazione della rigidità delle molle posta alla base dell'analisi dell'interazione terreno-struttura.

In sintesi

Il volume I ha offerto diverse chiavi di lettura degli argomenti trattati, costituendo:

- un'introduzione agli elementi basilari che sottendo il metodo di calcolo agli elementi finiti applicato alla progettazione strutturale e geotecnica, fornendo gli strumenti necessari per analizzare compiutamente i risultati ottenibili dai software di calcolo;
- la base dell'intera collana, dedicata specificatamente alla Geotecnica, con la trattazione di elementi comuni a tutti i volumi;
- una guida alla validazione dei risultati ottenuti nella progettazione strutturale e geotecnica, così come prescritto dalle nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni (D.M. 14.01.2008, da ora semplificato in NTC);
- uno strumento utile per lo sviluppo di algoritmi di calcolo, implementabili anche in fogli elettronici e da affiancare ai software commerciali in fase di pre-progettazione sia strutturale che geotecnica.

1.3. Volume II: Introduzione alla Meccanica del Continuo

Seguendo il ragionamento didattico introdotto con il metodo degli elementi finiti, al volume II è stato affidato lo scopo di sviluppare il necessario processo formativo utile per affrontare gli argomenti, di carattere più francamente geotecnico, che saranno progressivamente introdotti nei volumi successivi: un

argomento che può essere originariamente ricondotto alla derivazione della Meccanica delle Terre dalla Meccanica del Continuo (figura 1.1), dalla quale mutua l'intera struttura fisico-matematica, salvo poi evolvere ulteriormente (ed autonomamente) nella trattazione dei legami costitutivi applicati ai mezzi multifase come i terreni.

Per tali motivi il volume prende spunto dalle cognizioni proprie della Fisica della Materia Condensata, della Mineralogia e della Scienza dei Materiali che hanno consentito di chiarire le connessioni logiche esistenti tra i diversi modi di rottura dei solidi e la loro composizione chimica e relativa micro/macrostruttura (figura 1.3); allo stesso tempo, facendo leva sullo sviluppo completo ed estremamente dettagliato dei complessi argomenti teorico-sperimentali associati alla natura elastoviscoplastica dei materiali, è stato anche possibile stabilire la connessione corrente tra i diversi solidi naturali ed artificiali ed il comportamento delle molle posto alla base del metodo degli elementi finiti dedicato alla progettazione strutturale e geotecnica.

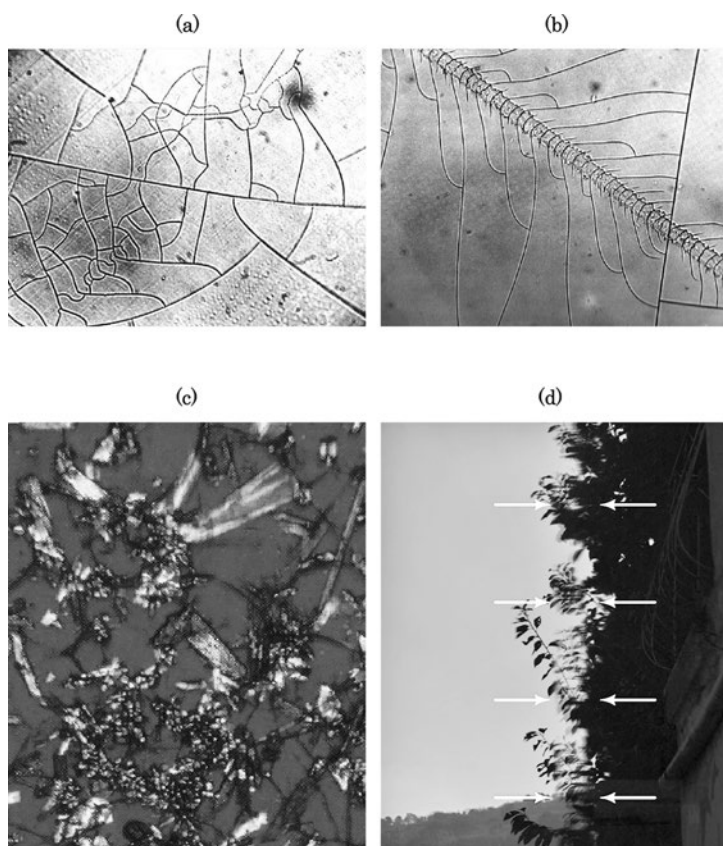


Figura 1.3. Esempio di studio del comportamento dei vetri in funzione della microstruttura e del fenomeno della devetrificazione (fonte: volume II)

In questo modo, utilizzando le modalità di assemblaggio dei cristalli, i concetti di simmetria strutturale, di lavoro virtuale, di stabilità energetica e l'analisi dello stato di sforzo e di deformazione dei punti materiali, è stato possibile trattare in maniera adeguata i legami costitutivi con lo scopo di individuare quello più appropriato in funzione del comportamento meccanico differenziato tra i diversi materiali attualmente disponibili in ambito progettuale.

È altresì importante evidenziare che tutti gli argomenti sono stati introdotti e discussi utilizzando gli invarianti come piattaforma di sviluppo, ovvero basandosi su strumenti matematici davvero molto potenti da un punto di vista sia teorico che sperimentale i quali, a loro volta, sono stati gradualmente introdotti ed approfonditi fino a convergere in appositi esercizi aventi lo scopo di migliorarne l'apprendimento.

Il volume è stato inoltre completato, oltre che da numerosi esercizi svolti, anche dall'analisi del comportamento meccanico di diversi materiali come ad esempio la baritina, il cloruro di sodio, il molibdeno, i vetri, gli acciai, i calcestruzzi, i terreni, le leghe di alluminio e il kevlar®.

In sintesi

Il volume II, al pari del primo, offre diverse chiavi di lettura degli argomenti trattati, costituendo:

- l'anello di congiunzione tra la Scienza delle Costruzioni, condensata nel volume I intorno al metodo degli elementi finiti, e la Meccanica delle Terre che costituirà il corpo dei volumi successivi;
- uno studio sistematico della Meccanica del Continuo, con l'approfondimento degli aspetti fenomenologici evidenziati in numerose prove sperimentali appositamente condotte ed aventi lo scopo di migliorare la comprensione di tutti i passaggi matematici necessari per la costruzione dell'apparato teorico.

Occorre inoltre evidenziare che particolare enfasi è stata posta nella trattazione del campo elastico e di quello plastico dei materiali da costruzione, dimostrando matematicamente e sperimentalmente che entrambi sono influenzati dalla composizione chimica e dalla microstruttura interna, mentre l'ampiezza del campo duttile anche dalle dimensioni dell'elemento strutturale.

Senza dimenticare la trattazione dell'analisi in campo non lineare il quale, come richiesto dalle normative tecniche più evolute, è implementato nella maggior parte dei software di progettazione strutturale e geotecnica.

1.4. Volume III: Introduzione alla Meccanica delle Terre, parte I

Nel volume II, incentrato sostanzialmente sulla Meccanica del Continuo, sono stati introdotti i primi elementi relativi al comportamento meccanico ed

idraulico delle terre le quali possono essere viste (semplificisticamente) come due mezzi continui che lavorano in parallelo spartendosi gli stati tensionali (Nova, 2002).

Partendo da tali concetti, nel volume III l'argomento è stato interamente spostato sulla Meccanica delle Terre grazie alla preliminare introduzione dei primi elementi di connessione della geotecnica con la geologia e la mineralogia delle rocce e dei terreni, gli ambienti di formazione e di evoluzione che a loro volta influenzano la struttura interna dei depositi naturali e – a cascata – il relativo comportamento idraulico e meccanico. Quindi, nei capitoli successivi, sono stati analizzati sia l'idraulica che gli stati di sforzo agenti all'interno dei terreni (figura 1.4) rimandando al volume IV lo studio del comportamento meccanico teorico-sperimentale una volta noti tutti gli elementi concorrenti.

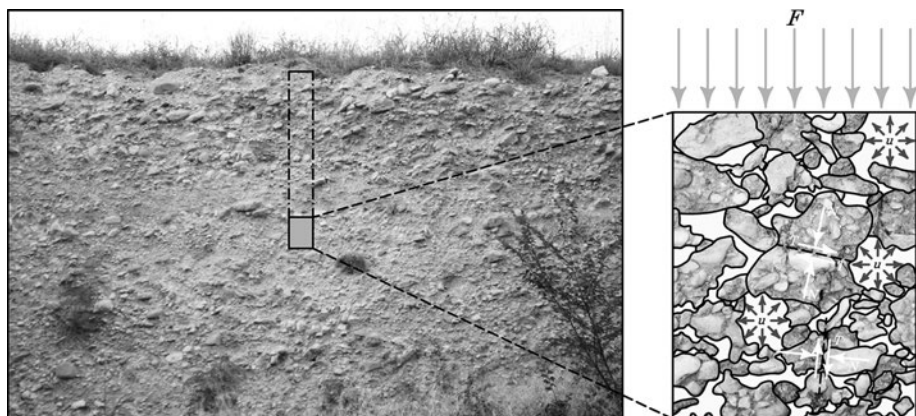


Figura 1.4. Dettaglio di un deposito alluvionale costituito da ghiaie in matrice sabbiosa ed analisi preliminare delle forze interne agenti in risposta all'azione del carico litostatico F essendo: N = forza normale; T = forza tangenziale; u = pressione della fase fluida (fonte: volume III)

Per quanto concerne il comportamento idraulico delle terre occorre considerare che le stesse non sono mezzi continui, nel senso classico visto nel volume II, ma sistemi multifase costituiti da uno scheletro solido con vuoti interparticellari nei quali scorrono fluidi di varia natura in differenti rapporti relativi; di conseguenza, tutti gli elementi introdotti con la Meccanica del Continuo hanno richiesto un necessario adattamento, affinché fossero ancora utilizzabili, a partire dall'analisi del moto dei fluidi – all'interno dello scheletro solido – che assume un ruolo fondamentale nello studio della Meccanica delle Terre in funzione della sua natura idrostatica o idrodinamica. Difatti, se il moto in condizioni idrostatiche corrisponde sempre all'equilibrio tra le fasi solide e fluide, conducendo ad un (all'incirca) banale trasferimento alla Meccanica delle Terre delle cognizioni viste nel volume II, nel caso delle condizioni idrodinamiche sono possibili due alternative corrispondenti a condizioni di

flusso stazionario (ancora di equilibrio) o di flusso transitorio nel qual caso si giunge alla teoria della consolidazione (Terzaghi, 1923; Terzaghi e Fröhlich, 1936) che rappresenta l'ossatura stessa della materia trattata.

A tal proposito occorre considerare che la consolidazione descrive il comportamento tensodeformativo delle terre in risposta alle sollecitazioni esterne, come quelle derivanti dal peso proprio in fase di accumulo nei bacini di sedimentazione o dai carichi trasmessi dalle fondazioni, dai rilevati stradali, dall'abbassamento della falda e da molto altro; quindi, considerato che tali argomenti giustificano da soli la necessità di studiare il comportamento reciproco tra le fasi solide e fluide, l'idraulica delle terre è stata completata dallo studio delle falde idriche che, trattate in appositi paragrafi, hanno costituito il punto di partenza per l'analisi dell'idrodinamica delle acque del sottosuolo.

Una volta definite le nozioni relative all'idraulica delle terre si è giunti all'ultimo capitolo al quale è stato affidato il non facile compito di tradurre in ambito geotecnico lo studio dello stato di sforzo visto nel volume II, il quale rappresenta sempre il primo passo nell'analisi di tutti i problemi di natura strutturale e geotecnica essendo lo stesso direttamente correlato sia allo stato di deformazione che alla definizione dei legami costitutivi; allo stesso tempo occorre evidenziare, come introdotto nel volume II – paragrafo 3.4, che lo studio dello stato di sforzo dei sistemi complessi come i terreni costituisce anche il punto di partenza per tutte le sperimentazioni di laboratorio volte alla definizione del più appropriato criterio di snervamento dal quale, infine, possono essere derivati i parametri fisico-meccanici necessari per la modellazione dei problemi geotecnici.

Ovviamente, al pari dei volumi precedenti, ogni capitolo è stato corredato da un numero congruo di esercizi risolti e/o casi di studio, con lo scopo di facilitare la fase di apprendimento e di familiarizzazione con gli argomenti trattati.

In sintesi

Anche se lo studio del comportamento tensodeformativo dei terreni trae origine dalla struttura teorico-sperimentale della Meccanica del Continuo vista nel volume II, occorre considerare che sua complessità discende dalla necessità che abbiamo di doverli tradurre in un sistema costituito da più mezzi continui – costituiti da uno scheletro solido, dagli spazi interstiziali e dai fluidi che in esso possono circolare – che lavorano in parallelo.

Di conseguenza, quale passaggio indispensabile, nel volume III sono stati introdotti i primi elementi che consentiranno nei successivi di giungere ad una completa trattazione della risposta meccanica delle terre alle sollecitazioni imposte, sia esse derivanti dalle attività antropiche che naturali come ad esempio le frane, quali:

- lo studio della geologia delle terre, potendo in tal modo definirne la natura e la genesi che influenzano a loro volta il comportamento idraulico e meccanico;
- lo studio delle caratteristiche fisiche e delle variabili di stato capaci di tradurre in termini geotecnici i differenti mezzi continui costituenti un generico terreno;
- l'analisi dell'idraulica nei mezzi porosi a partire dallo studio delle falde, passando attraverso la legge di Darcy per giungere alla definizione della legge di continuità tra mezzi continui a contatto a sua volta costituente l'ossatura della Meccanica delle Terre;
- lo studio dello stato di sforzo agente all'interno delle terre, necessario per l'analisi del comportamento fluidomeccanico in laboratorio e per la successiva traduzione in legami costitutivi.

Ovviamente, seguendo la filosofia che collega l'intera collana, ogni argomento è stato completato da numerosi esercizi svolti (con tecniche classiche e con il metodo degli elementi finiti) e da casi di studio, utili non solo per l'approfondimento degli argomenti trattati ma anche per mostrarne al lettore le modalità applicative come – ad esempio – l'analisi della capacità portante dei pali e l'interazione tra le strutture geotecniche e le falde idriche.

1.5. Volume IV: Manuale avanzato di meccanica delle terre, parte II

Se con i volumi I e II può essere considerato praticamente concluso il percorso propedeutico alla Meccanica delle Terre, il volume III ha fornito tutti gli elementi utili e necessari per affrontare, con il presente testo, l'analisi sperimentale del comportamento meccanico delle terre; ma, per affrontare tale delicato aspetto, occorre dapprima fare un passo indietro per riprendere e approfondire le conoscenze introdotte nel volume II con gli invarianti di tensione per poi trasporle allo studio degli stress-paths (capitolo 2).

A tal proposito occorre considerare che il metodo degli stress-paths, pur essendo stato introdotto da Lambe nel 1967 e perfezionato da Lambe e Marr nel 1979, è generalmente trascurato nei testi e nei corsi di geotecnica o comunque poco approfondito; al contrario, dal suo studio sistematico (non solo teorico ma anche applicativo) è possibile cogliere tutti gli aspetti salienti inerenti l'interazione tra i terreni e le strutture geotecniche espressi in funzione sia delle condizioni di esercizio (stati limiti di esercizio) che della ricerca delle condizioni di criticità (stati limiti ultimi).

In sintesi, unendo in un unico metodo di analisi le proprietà geometriche degli invarianti con i possibili percorsi tensionali e cinematici attesi per le diverse strutture geotecniche, si perviene ad un quadro di riferimento che, tramite un

filo conduttore comune, unisce l'interazione terreno-struttura con la sperimentazione di laboratorio alla quale affidare la definizione del più appropriato criterio di snervamento e la derivazione dei parametri meccanici atti a descriverlo; in pratica, noto lo stress-path dell'insieme terreno-struttura, il compito delle differenti figure professionali – geologi, geotecnici e progettisti strutturali – risulta alquanto facilitato poiché sono note a priori sia le condizioni di criticità che le metodologie di laboratorio (o in sito) atte a replicarle.

Completata l'analisi degli stress-paths, estesi anche alle frane e agli ambienti geologici in generale, il passaggio successivo consiste nello studio sistematico del legame elastoplastico sperimentale, attraverso l'analisi delle prove di laboratorio (capitolo 3) e di quelle in sito (capitolo 4) più diffuse in ambito professionale, facendo leva sugli elementi introdotti e descritti nel volume III espressi in termini di caratteristiche fisiche, variabili di stato, comportamento idraulico del terreno e analisi dello stato di sforzo.

Un capitolo a parte (il quinto) è poi dedicato alla teoria della consolidazione (comportamento elastoviscoplastico) la quale, introdotta e sufficientemente approfondita nel volume precedente, viene trattata in termini sperimentali (con lo studio sistematico delle prove edometriche) e teorici in relazione sia alle possibili soluzioni esistenti in letteratura che a nuove soluzioni proposte in originale.

L'ultimo passaggio comporta lo studio del comportamento generale delle sabbie e delle argille (capitolo 6) al fine di poter addivenire, in apertura dell'ultimo volume della collana, ad una corretta definizione dei legami costitutivi teorici.

Ovviamente, come i precedenti, anche il volume IV è corredato da numerosi esercizi svolti e casi di studio con l'evidente scopo di migliorare la percezione degli argomenti trattati.

In sintesi

Dopo l'analisi sistematica degli elementi inerenti la Scienza delle Costruzioni (affidata al volume I tramite il metodo degli elementi finiti), la Meccanica del Continuo (volume II), l'idraulica e lo stato di sforzo agenti nelle terre (volume III), il testo conclude il percorso formativo afferente la formalizzazione del comportamento tensodeformativo delle terre grazie alla confluenza di tutte le informazioni precedenti nello studio dei legami costitutivi sperimentali in laboratorio ed in sito.

Al fine di migliorare la percezione dell'interazione terreno-struttura (trattata nel volume I), particolare enfasi è stata impressa allo studio sistematico degli stress-paths grazie ai quali è possibile stabilire un filo logico che unisce tale spinoso argomento con la sperimentazione di laboratorio e la costruzione del più appropriato modello geotecnico dal quale derivare i successivi modelli numerici.

Un capitolo a parte è dedicato alla teoria della consolidazione, per la quale sono presentate sia le soluzioni storiche che una nuova soluzione alquanto promettente, mentre numerosi esercizi risolti e casi di studio compendiano gli argomenti trattati.

1.6. Introduzione al comportamento meccanico delle terre

Lo studio sperimentale del comportamento meccanico delle terre rappresenta di fatto il primo, e nel contempo anche il più importante e delicato, passo nell'analisi di un qualunque problema geotecnico, ovviamente subordinato ad un'appropriata conoscenza della struttura geologica del sito, dei processi morfogenetici agenti e della stratigrafia locale; in altre parole, facendo leva sulla metodologia di lavoro delineata nel volume I – paragrafo 1.3.1 (*Una metodologia di studio*), soltanto dall'applicazione preventiva di rilievi geologici e geomorfologico/morfometrici – eventualmente coadiuvati dall'esecuzione di appropriate prospezioni geofisiche (figura 1.5) – è possibile giungere alla progettazione e all'esecuzione di una corretta campagna di indagini geognostiche nonché al prelievo dei campioni per il laboratorio, alle profondità più opportune, dalla cui analisi sperimentale dipende – a cascata – la costruzione dei modelli geotecnici e numerici.

Allo stesso modo, trasponendo tali problemi alla sperimentazione di laboratorio, risulta anche che la scelta di una determinata prova piuttosto che di un'altra deve tenere conto di ulteriori fattori tra i quali la natura dei terreni, il percorso di sollecitazione (a sua volta funzione della struttura di progetto), le condizioni di interazione con la fase fluida, il percorso di drenaggio e la risposta deformativa che – riuniti in un unico assioma – conducono inevitabilmente all'introduzione ed allo studio del concetto degli *stress-paths* (Lambe, 1967; Lambe e Marr, 1979); poiché questi ultimi, come sarà approfondito nel capitolo 2, consentono di conoscere a priori l'evoluzione dei percorsi tensionali e cinematici nello spazio e/o nel piano, ecco che con il loro studio si giunge alla definizione di una valida guida nella programmazione delle prove di laboratorio.

Per una migliore comprensione di quanto finora affermato, può risultare utile tornare brevemente al volume II – paragrafo 7.6 (*Esercizi*) nel quale è stato chiarito che la scelta del tipo di prova da eseguire per la caratterizzazione meccanica dei materiali (definiti in senso generale) deve tenere conto della dipendenza del comportamento tensodeformativo rispetto alla storia tensionale e deformativa pregressa (che nei terreni diventa funzione della storia geologica), al livello tensionale corrente (funzione dello sforzo mutualmente scambiato dall'insieme terreno-struttura), alla micro-macrostruttura e all'anisotropia; solo ragionando in questo modo è possibile porre le basi per la scelta della più appropriata prova di laboratorio – capace di caratterizzare in maniera davvero efficace il comportamento meccanico di un determinato materiale – tanto che la

stessa deve necessariamente tenere conto del criterio di snervamento adottato, delle modalità di deformazione nonché del livello deformativo raggiungibile a loro volta funzione dell'interazione terreno-struttura. D'altra parte, analizzando lo stesso problema da un altro punto di vista, solo riunendo in un unico argomento tutti gli elementi dipendenti dalle variabili associate ai terreni e alle strutture (tra le quali si ricorda la rigidezza e le condizioni di carico), risulta possibile procedere con la scelta della più idonea prova di laboratorio, capace di simulare il più appropriato percorso sforzi-deformazioni e dalla quale estrapolare i parametri più funzionali in relazione alle finalità da raggiungere.

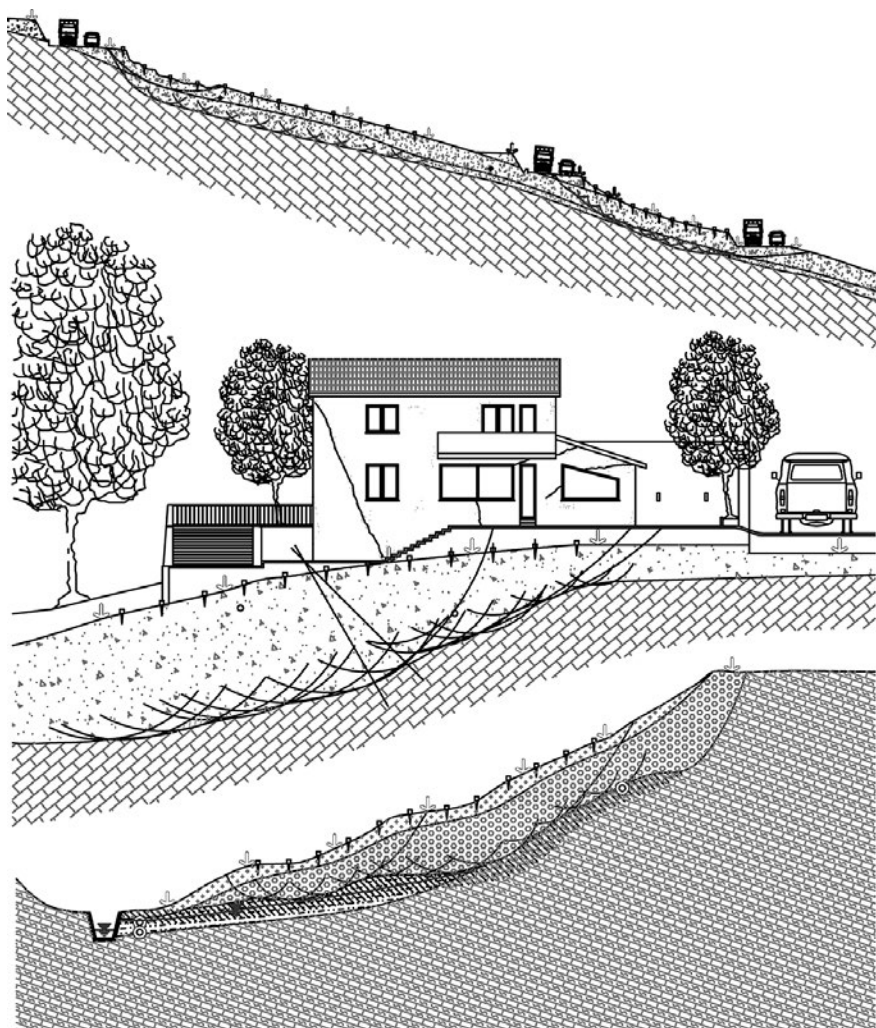


Figura 1.5. Esempi di prospezioni geofisiche, tipo sismica a rifrazione, applicate a problemi geologico-geotecnici (fonte: Di Francesco et al., 2003)

1.6.1. Il ruolo delle diverse figure professionali

Questa breve introduzione, unitamente a tutti gli elementi di Meccanica delle Terre finora trattati, da finalmente corpo ad alcuni passaggi del volume I – paragrafo 1.2 (*L'Ingegneria e la Geologia sensu lato*), al cui interno la Geotecnica è stata descritta come il punto di incontro tra l'ingegneria e la geologia, ovvero tra due mondi solo apparentemente diversi e contrapposti; in realtà, al di là dei tentativi di codifica normativa degli apporti professionali alla soluzione dei problemi geotecnici, risulta evidente che il successo di ogni progetto dipende soprattutto dalle singole capacità di discernimento e cioè dal contributo di tutte le figure coinvolte, le quali devono pertanto essere capaci di dialogare attraverso un linguaggio comune rendendo – in tal modo – assolutamente pleonastico lo sforzo del legislatore.

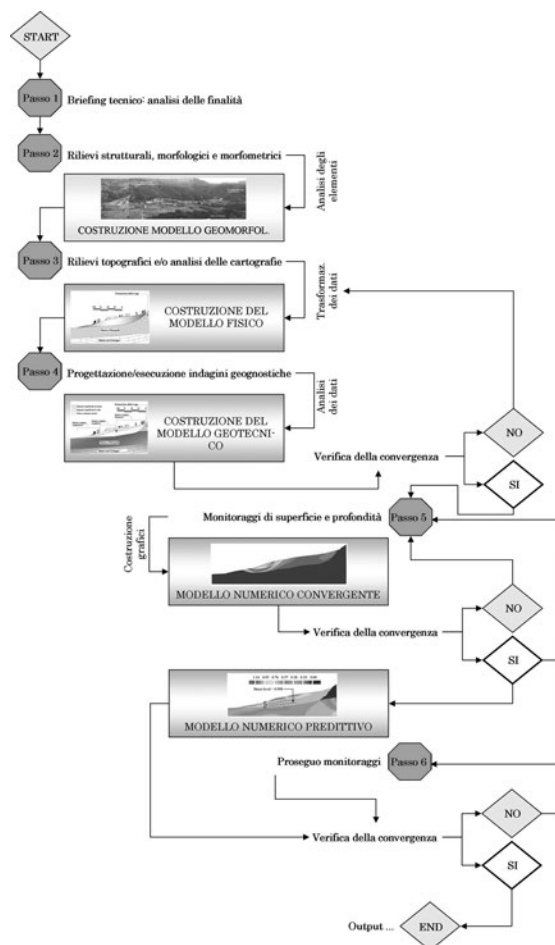


Figura 1.6. Diagramma di flusso della metodologia di lavoro, in ambito geotecnico, per i cui dettagli si rimanda al volume I – paragrafo 1.3.1

Approfondendo brevemente l'argomento, alla luce della figura 1.1 deve finalmente risultare chiaro che la Geotecnica è una materia costruita sulla Meccanica delle Terre la quale a sua volta deriva dalla Meccanica del Continuo mutuandone molte delle proprietà strutturali intese sia in senso fenomenologico che, consequenzialmente, logico-matematico; d'altra parte è anche noto che quest'ultima materia condensa tutti gli elementi conoscitivi necessari per costruire la Scienza delle Costruzioni, tanto da fornire un parallelismo perfetto tra tale materia e la stessa Geotecnica.

In definitiva, occorre stabilire la posizione corretta che deve essere assunta da tutte le figure professionali tenuto conto che la soluzione di un problema geotecnico richiede, al termine del percorso, la determinazione delle condizioni di sollecitazione agenti su una struttura di progetto (genericamente esprimibili in termini di sforzi normali, sforzi di taglio e di momenti flettenti), necessarie per poter – infine – correttamente dimensionare le sezioni reagenti; allo stesso tempo, però, se la stessa finalità impone un percorso che prende origine da un modello geologico (volume I – figura 1.5, riproposta integralmente nella figura 1.6), esiste una fascia di demarcazione tra le due fasi, quasi una vera e propria frontiera libera all'interno della quale viene esplorato il comportamento meccanico dei terreni il quale a sua volta non risulta affatto codificato così come si assiste invece per i materiali da costruzioni come l'acciaio, la muratura ed il calcestruzzo armato.

1.6.2. Problemi connessi con i legami costitutivi sperimentali

Ritornando allo studio sperimentale del comportamento meccanico delle terre può risultare utile, nell'ottica di una migliore comprensione dell'argomento, riferirsi ad alcuni elementi introdotti in altre sezioni della collana ad iniziare dal volume II – paragrafo 7.1.3 (*Comportamento plastico incrudente nel piano σ - ϵ*) all'interno del quale è stata evidenziata la necessità, teorica, di dover ricorrere all'analisi dei percorsi di sollecitazione o di deformazione nello spazio esadimensionale.

In effetti, e ritornando sulla trattazione dello stato tensionale e deformativo valido tanto per i mezzi continui in genere quanto per i terreni in particolare, è stato visto che la dimensione dei rispettivi tensori può essere ridotta a sei componenti in virtù dell'esistenza di evidenti condizioni di simmetria; nel contempo lo sviluppo dei legami costitutivi, a partire dal più semplice quale quello pertinente al comportamento elastico della materia, richiede una connessione logica tra i due tensori mediante l'analisi di sei curve sforzi-deformazioni che a sua volta conduce – però – ad una drastica idealizzazione in relazione all'esistenza di alcuni vincoli decisamente insuperabili per pochi semplici motivi:

- perché lo spazio reale è tridimensionale, tanto da vincolare le dimensioni fisiche che sottendono l'esecuzione delle prove meccaniche a modelli 3D e 2D;
- perché lo studio delle trentasei costanti della matrice di cedevolezza (o di rigidità in relazione all'esecuzione di prove a carico controllato o a deformazione controllata) impone una procedura capace di investigare una sola variabile (σ o ε) alla volta;
- perché in realtà il comportamento dei terreni è decisamente anelastico e marcatamente non lineare, tanto da manifestare una stretta dipendenza dalla storia tensionale e deformativa pregressa nonché dal livello tensionale corrente.

L'ultimo punto, da solo, richiede che la soluzione di un qualsiasi problema geotecnico debba essere affrontata in campo elastoplastico ed in termini differenziali, a partire dal volume II – equazione (7.1) riproposta integralmente nell'equazione (1.1):

$$1.1) \quad d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p$$

secondo la quale la deformazione totale è data dalla somma di una componente elastica ed un'aliquota plastica.

La componente elastica può essere descritta, ad esempio, mediante il volume II – equazione (6.103), riproposta nell'equazione (1.2)

$$1.2) \quad d\varepsilon_{ij}^e = \frac{dI_1}{9K} \delta_{ij} + \frac{1}{2G} ds_{ij}$$

la quale costituisce una forma incrementale del legame costitutivo dato dal volume II – equazione (6.5b) riproposta come segue:

$$1.3) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= C_{ijhk} \sigma_{hk} \\ \varepsilon_{ij} &= D_{ijhk}^{-1} \sigma_{hk} \end{aligned}$$

A sua volta, la deformazione irreversibile può essere espressa allo stesso modo, tenuto conto della teoria del flusso plastico (volume II – paragrafi 7.4.2, 7.4.3 e 7.4.4):

$$1.4) \quad d\varepsilon_{ij}^p = C_{ijhk}^p \cdot d\sigma_{hk}'$$

con C_{ijhk}^p che rappresenta la matrice di cedevolezza in campo plastico mentre il vettore di deformazione plastica può essere calcolato tramite l'equazione (7.115) del volume II avendo assunto una regola di flusso associato:

$$1.5) \quad d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$$

Introducendo sia l'equazione (1.3) che l'equazione (1.4) nella relazione generale (1.1) si ottiene:

$$1.6) \quad d\epsilon_{ij}^{ep} = (C_{ijhk}^e + C_{ijhk}^p) \cdot d\sigma'_{hk} = C_{ijhk}^{ep} \cdot d\sigma'_{hk}$$

L'equazione (1.6) evidenzia, infine, le reali difficoltà incontrabili nella determinazione delle costanti elastoplastiche componenti la matrice di cedevolezza.

Ragionando in questo modo:

- utilizzando come elemento di riferimento l'esercizio 6.1 del volume II (*Prova di trazione su un mezzo isotropo*);
- limitando l'analisi al solo campo elastico,

appare evidente che l'unica strada percorribile nella determinazione delle componenti della matrice di cedevolezza consiste nel riuscire a controllare contemporaneamente tutte le componenti del tensore delle deformazioni, imponendo nel contempo una sola componente alla volta del tensore degli sforzi.

Ovviamente, al di là dell'evidente difficoltà sperimentale di riuscire a costruire un apparato capace di gestire simultaneamente le sei componenti dello stato di deformazione (o di sforzo), il problema si sposta su di un altro livello dipendente dal reale stato fisico dei terreni la cui marcata anisotropia rende impossibile il campionamento di provini che teoricamente dovrebbero essere tutti identici (figura 1.7).



Figura 1.7. Esempi di argille in polvere di diversa composizione contenute in recipienti realizzati con la caolinite (volume III – paragrafo 3.2.1), un'argilla bianca molto usata nella manifattura delle porcellane e della carta; a partire dagli anni '50 del XX secolo, la caolinite fu usata dai plasticisti di Cambridge per la realizzazione di provini di argilla teoricamente tutti identici dalla cui analisi sono nati gli attuali legami costitutivi relativi ai terreni (fonte: Di Francesco, 2008)

1.6.3. Conclusioni

Da questa breve disquisizione appare evidente che l'intera procedura tecnica – basata sull'approccio teorico – risulta essere fallimentare, dal momento che nello studio delle proprietà meccaniche di un terreno occorre tenere conto di una serie di elementi tra i quali, non ultimo, il ruolo fondamentale assunto dalla trattazione matematica del legame costitutivo da adattare alla tipologia di prove di laboratorio disponibili in quanto ampiamente codificate e nel contempo anche di diffusione capillare.

Ciò comporta che alle varie problematiche descritte deve essere aggiunto che all'origine, in relazione alle necessità teoriche di sviluppare modelli costitutivi intorno al comportamento dei vari materiali, sono state introdotte e lentamente perfezionate alcune procedure sperimentali necessarie per dare un senso compiuto alle formulazioni costruite intorno a determinati fenomeni fisici, come nel caso delle prove edometriche sviluppate attorno all'equazione della consolidazione. Oggigiorno, invece, nello sviluppo di nuovi legami costitutivi si assiste alla procedura contraria il che implica, nella maggior parte dei casi, lo studio dei metodi di adattamento di questi ultimi alle prove di laboratorio disponibili, capaci di fornire uno stretto legame con parametri meccanici la cui valenza risulta oramai essere ampiamente convalidata.

D'altronde, pur dovendo necessariamente codificare le prove di laboratorio secondo procedure pratiche di adattamento – ai legami costitutivi, allo spazio fisico reale, al comportamento anisotropo dei terreni, alle condizioni di drenaggio, ai dispositivi offerti dall'evoluzione tecnica – non può essere sottaciuta la necessità di dover comunque sempre relazionare i risultati alle conoscenze teoriche costruite intorno all'analisi degli stati di sforzo e di deformazione; ciò, però, se da una parte conduce alla descrizione delle metodologie sperimentali disponibili in laboratorio, dall'altra parte sposta l'attenzione sulla necessità di dover relazionare i percorsi di sollecitazione (o di deformazione) ai concetti associati all'utilizzo degli invarianti sui quali sono stati costruiti tutti i criteri di snervamento, conducendo infine all'introduzione del metodo degli *stress-paths*.

1.7. Ringraziamenti

Al pari dei precedenti, la stesura del IV volume della collana “*La Geotecnica del III Millennio*” è stata resa possibile grazie alla collaborazione continuativa del dottor Medeo Olivares (Controls srl – www.controlsgroup.net), al quale devo le numerose immagini degli apparati di laboratorio che ho descritto ed utilizzato, e del Prof. Aurelio Gherzi (ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Catania – www.dica.unict.it/users/agherzi) che mi onoro

di affiancare nei corsi post-laurea di geotecnica dedicati prevalentemente al mondo dell'ingegneria e che gettano un occhio anche a quello della geologia.

Un ringraziamento speciale va al Prof. Luca Lussardi, del Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Sacro Cuore di Brescia, il quale ha svolto il non facile compito di verificare tutte le mie teorie e le mie recenti pubblicazioni scientifiche che di fatto hanno reso possibile l'interpretazione in chiave moderna della Geotecnica; a seguire, alla Drill Service di Teramo (www.drillservice.it), alla Dottoressa Maria Martino, responsabile comunicazione e marketing della Masider di Milano (www.masider.it), all'ingegner Marco Benazzi (www.mezzadrinegneria.it) e ai geologi Raffaele Achilli (www.provepenetrometriche.it) e Luca Di Matteo (laboratorio geotecnico GEA, www.gealaboratorio.com).

Un sentito ringraziamento è dedicato al dott. Thomas Zimmermann, presidente della Zace Services Ltd di Losanna (Svizzera), per avermi fornito il software ad elementi finiti ZSoil (ww.zace.com) utilizzato per testare i miei modelli matematici o per simulare fenomeni tipici in Meccanica delle Terre e Geotecnica.

Come nei volumi precedenti, sarei negligente se non ringraziassi tutti i docenti ed i ricercatori universitari di *Ingegneria Civile*, *Ingegneria Geotecnica*, *Ingegneria Meccanica*, *Ingegneria Sismica*, *Geologia*, *Geomorfologia*, *Idrogeologia*, *Geologia Applicata*, *Chimica* e *Scienza dei Materiali* i quali, direttamente o indirettamente, hanno contribuito alla stesura del testo. Direttamente per i numerosi confronti su argomenti specifici; indirettamente per aver messo a disposizione sul web, questo straordinario ma altrettanto pericoloso strumento moderno, gli appunti delle proprie lezioni ed esercitazioni. Infine ritengo che non riuscirò mai a ringraziare a sufficienza la casa editrice Dario Flaccovio di Palermo, e l'intero loro staff, per aver creduto in un'opera ponderosa sia per me che per loro.

Resta beninteso che eventuali errori sono imputabili a me, e a me soltanto.

1.8. Tabella dei simboli

Introduzione

$d\varepsilon_{ij}^{ep}$	tensore incrementale di deformazione elastoplastica
$d\varepsilon_{ij}^e$	tensore incrementale di deformazione elastica
$d\varepsilon_{ij}^p$	tensore incrementale di deformazione plastica
dI_1	invariante lineare del tensore dello sforzo in forma incrementale
ds_{ij}	componente deviatorica incrementale del tensore degli sforzi
K	modulo elastico volumetrico
G	modulo elastico tangenziale
δ_{ij}	delta di Kronecker

ε_{ij}	tensore di deformazione
C_{ijhk}	matrice di cedevolezza
σ_{hk}	tensore dello sforzo
D_{ijhk}	matrice di rigidezza
$d\lambda$	parametro incrementale di deformazione plastica
g	superficie di snervamento
σ_{ij}	tensore dello sforzo

Stress-paths

σ'_{ij}	tensore dello sforzo efficace
σ'_1	tensione principale massima efficace
σ'_2	tensione principale intermedia efficace
σ'_3	tensione principale minima efficace
σ'_a	sforzo assiale efficace
σ'_r	sforzo radiale efficace
I_1	invariante lineare dello sforzo
I_2	invariante quadratico dello sforzo
I_3	invariante cubico dello sforzo
J_2	invariante deviatorico quadratico dello sforzo
σ'_{ott}	tensione ottaedrica normale efficace
τ_{ott}	tensione ottaedrica tangenziale
q, t	invarianti dello sforzo deviatorico
p', s'	invarianti della tensione isotropa efficace
α	pendenza della retta di snervamento nel piano t-s'
a	intercetta con l'asse deviatorico della retta di snervamento nel piano t-s'
M	pendenza della retta di snervamento nel piano q-p'
q_c	intercetta con l'asse deviatorico della retta di snervamento nel piano q-p'
ε_a	deformazione assiale
ε_r	deformazione radiale
ε_v	deformazione volumetrica
ε_s	deformazione deviatorica
GdL	gradi di libertà
s_u, c_u	resistenza al taglio in condizioni non drenate o coesione non drenata
V	volume
β	angolo di inclinazione delle superfici di rottura dei fronti di scavo
t	tempo
c_v	coefficiente di consolidazione lungo l'asse verticale
θ_a	angolo di inclinazione delle superfici di rottura attiva
θ_p	angolo di inclinazione delle superfici di rottura passiva

σ'_{ha}, s_a	pressione attiva sulle opere di sostegno
σ'_{hp}, s_p	pressione passiva sulle opere di sostegno
K_0	coefficiente di spinta a riposo delle terre
K_a	coefficiente di spinta attiva delle terre
K_p	coefficiente di spinta passiva delle terre
S_a	spinta attiva sulle opere di sostegno
S_p	spinta passiva sulle opere di sostegno
M	momento flettente
T	forza di ancoraggio
σ'_p	pressione di preconsolidazione
H	altezza dei fronti di scavo
F_S	fattore di sicurezza
N	fattore adimensionale nelle analisi di stabilità
H_c	altezza critica dei fronti di scavo

Il legame costitutivo sperimentale: prove di laboratorio

D_0	diametro iniziale dei provini
A_0	area iniziale dei provini
V_0	volume iniziale dei provini
A	area istantanea dei provini
H_c	altezza dei provini a fine consolidazione
A_c	area dei provini a fine consolidazione
V	volume istantaneo dei provini
ΔH	variazione dell'altezza dei provini
σ_a	pressione assiale totale
σ_r	pressione radiale totale
σ'_a	sforzo assiale efficace
σ'_r	sforzo radiale efficace
ε_a	deformazione assiale
ε_r	deformazione radiale
ε_v	deformazione volumetrica
ε_s	deformazione deviatorica
q, t	invarianti dello sforzo deviatorico
p, s	invarianti della tensione isotropa totale
p', s'	invarianti della tensione isotropa efficace
s_u	resistenza al taglio in condizioni non drenate o coesione non drenata
I'_1	invariante lineare dello sforzo efficace
K	coefficiente di dilatazione cubica
V_t	volume del terreno o dello scheletro solido
V_w	volume dell'acqua o della fase fluida
C_t	coefficiente di compressibilità del terreno

C_w	coefficiente di compressibilità dell'acqua
n	porosità
e	indice dei vuoti
B	parametro di Skempton di saturazione nelle celle triassiali
A_c	area dei provini a fine fase di consolidazione triassiale
H_c	altezza dei provini a fine fase di consolidazione triassiale
v	volume specifico
E'	modulo elastico longitudinale efficace
E_u	modulo elastico longitudinale non drenato
G'	modulo elastico tangenziale efficace
G_u	modulo elastico tangenziale non drenato
K'	modulo elastico volumetrico efficace
K_u	modulo elastico volumetrico non drenato
ν'	coefficiente di Poisson efficace
ν_u	coefficiente di Poisson non drenato
M	pendenza della retta di snervamento nel piano q-p'
q_c	intercetta con l'asse deviatorico della retta di snervamento nel piano q-p'
I_1	invariante isotropo degli sforzi
s_{ij}	tensore deviatorico degli sforzi
δ_{ij}	delta di Kronecker
ΔV_{ss}	variazione di volume dello scheletro solido
$\bar{A}$	parametro di Skempton per lo studio delle Δu nelle celle triassiali
A	parametro di Skempton misurabile nelle celle triassiali
L	larghezza della scatola di taglio diretto
t_{100}	tempo di esaurimento della consolidazione primaria
t_f	tempo di rottura stimato nel taglio diretto
δ_f	spostamento a rottura stimato nel taglio diretto
v_f	velocità di applicazione del carico di rottura nel taglio diretto
w	contenuto d'acqua
γ_d	peso di volume secco del terreno

Il legame costitutivo sperimentale: prove in sito

A_p	area delle punte coniche nelle prove CPT
A_s	area del manicotto d'attrito nelle prove CPT
F_1	forza iniziale agente sulle punte coniche nelle prove CPT
F_2	forza successiva agente sulle punte coniche nelle prove CPT
q_c	resistenza all'avanzamento della punta nelle prove CPT
f_s	resistenza laterale nelle prove CPT
u_2	pressioni interstiziali misurate con il piezocono
Δu	sovrappressioni interstiziali

F_p	forza assiale alla punta rilevata nelle prove CPTU
F_s	forza assiale al manicotto rilevata nelle prove CPTU
a	fattore correttivo di q_c
A_N	area del cono che agisce sulla cella di carico di u_2
R_f	rapporto d'attrito
F_r	rapporto d'attrito normalizzato
Q_t	resistenza alla punta normalizzata
I_c	indice di classificazione
γ	peso di volume
D_r	densità relativa
p'	invariante isotropo
N_c	fattore di capacità portante
s_u	coesione non drenata
Q_f	carico di rottura esercitato dalla punta conica sulle argille
L_i	lavoro interno dovuta all'avanzamento della punta conica
L_e	lavoro esterno dovuta all'avanzamento della punta conica
E_{ed}	modulo elastico edometrico
E'	modulo elastico efficace
α_{ed}	coefficiente adimensionale per la determinazione di E_{ed}
α_E	coefficiente adimensionale per la determinazione di E'
r	raggio dei pali
L	lunghezza dei pali
s	cedimenti elastico dei pali
s_B	cedimento della base dei pali
s_L	cedimento del fusto dei pali
ν	coefficiente di Poisson
N_B	carico trasmesso dalla base dei pali
N_L	carico trasmesso dal fusto dei pali
t_{50}	tempo di dissipazione standard nelle prove CPTU
T_{50}	parametro adimensionale utilizzato nelle prove di dissipazione
r	raggio della sonda CPTU
c_h	coefficiente di consolidazione orizzontale
K_h	coefficiente di permeabilità orizzontale
N	numero di colpi misurato nelle prove penetrometriche dinamiche
φ'_p	angolo di resistenza al taglio di picco
φ'_u	angolo di resistenza al taglio ultimo o a volume costante
G_0	modulo tangenziale dinamico
p_0	pressione iniziale misurata con il dilatometro di Marchetti
p_1	pressione finale misurata con il dilatometro di Marchetti
I_D	indice di materiale
K_D	indice di spinta orizzontale

$K_{0,DMT}$	coefficiente dilatometrico di spinta a riposto
OCR	grado di sovraconsolidazione
$s_{u,DMT}$	coesione non drenata dilatometrica
E_{DMT}	modulo elastico dilatometrico

Soluzioni teorico-sperimentali della teoria della consolidazione

c_v	coefficiente di consolidazione verticale
e	indice dei vuoti o numero “e”
ε_v	deformazione volumetrica
$\varepsilon_z, \varepsilon_v$	deformazione verticale
σ'_v	sforzo verticale efficace
p	carico applicato
K_0	coefficiente di spinta a riposo delle terre
NCL	Normal Consolidation Line
OCL	Over Consolidation Line
$[C_{ed}]$	matrice di cedevolezza edometrica
$[D_{ed}]$	matrice di rigidità edometrica
$d\sigma'_z$	variazione di sforzo verticale
$d\sigma'_r$	variazione di sforzo radiale
$d\varepsilon_z$	variazione di deformazione verticale
m_v	coefficiente di compressibilità edometrica
E_{ed}	modulo di deformazione edometrica
u_e	pressioni interstiziali in eccesso
U	grado di consolidazione
s	cedimenti
H	lunghezza del percorso di drenaggio
K_z	coefficiente di permeabilità verticale
T_v	fattore tempo adimensionale verticale
t	tempo
T_h	fattore tempo adimensionale orizzontale
c_h	coefficiente di consolidazione orizzontale
k_z	costante di consolidazione
$u_{e,0}$	pressioni interstiziali in eccesso iniziali
c_r	coefficiente di ricomprensione edometrica
c_c	coefficiente di compressione edometrica
c_s	coefficiente di scarico o di rigonfiamento
w_L	limite liquido
IP	indice di plasticità
RR	rapporto di ricomprensione edometrica
RC	rapporto di compressione edometrica
RS	rapporto di rigonfiamento

a_v	indice di compressibilità edometrica
T_r	fattore tempo adimensionale radiale
$c_{h,r}$	coefficiente di consolidazione radiale
r	distanza radiale misurata dal centro dei dreni verticali
r_e	raggio equivalente del terreno interessato dalla consolidazione radiale
d_e	diametro equivalente del cilindro di terreno
d_w	diametro del dreno verticale
$U_{r,med}$	grado medio di consolidazione radiale
F	fattore di spaziatura dei dreni verticali
F_s	fattore di disturbo nei dreni verticali
F_R	resistenza idraulica intorno ai dreni verticali
u, v, w	componenti dello spostamento
h	carico piezometrico
$[k_{ep}]$	matrice di rigidezza elastoplastica dell'elemento isoparametrico
$[dv]$	vettore colonna degli spostamenti nodali derivati rispetto al tempo
$[k_u]$	matrice di accoppiamento dell'elemento isoparametrico
$[du]$	matrice delle pressioni interstiziali derivate rispetto al tempo
$\{F_{est}\}$	vettore colonna delle forze esterne
$[u]$	matrice delle pressioni interstiziali
$[h]$	matrice di flusso dell'elemento isoparametrico
$[q]$	matrice del flusso imposto verso l'esterno per unità di area
t	spessore dell'elemento isoparametrico
$[B]$	matrice delle derivate parziali delle funzioni d'interpolazione
$[D_{ep}]$	matrice di rigidezza elastoplastica
δ_{ij}	delta di Kronecker
$[N]$	funzioni d'interpolazione
$[b]$	matrice delle forze di massa
$[t]$	matrice delle forze esterne
$[K]$	tensore di permeabilità
$[b_w]$	matrice delle forze di massa della fase fluida
$\{n\}$	vettore colonna dei coseni direttori

Sintesi del comportamento meccanico delle terre

$d\lambda$	parametro incrementale della deformazione plastica
q, t	invarianti dello sforzo deviatorico
p', s'	invarianti della tensione isotropa efficace
M	pendenza della retta di snervamento nel piano q-p'
LSC	linea di stato critico
ε_v	deformazione volumetrica
ε_a	deformazione assiale
ψ	angolo di dilatanza

φ'_p	angolo di resistenza al taglio di picco
φ'_u	angolo di resistenza ultimo o critico
D_r	densità relativa
g	funzione di potenziale plastico, intercetta dalla superficie di Hvorslev
f	funzione di snervamento
v	volume specifico
LCI	linea di consolidazione isotropa
λ	pendenza delle rette LCI e LSC
N	volume specifico unitario della LCI
Γ	volume specifico unitario della LSC
s_u	coesione non drenata
e	indice dei vuoti
e_0	indice dei vuoti iniziale
v_0	volume specifico iniziale
w	contenuto d'acqua
w_0	contenuto d'acqua iniziale
G_s	peso specifico delle particelle
p'_e	pressione equivalente di normalizzazione
p'_{max}	pressione di precompressione
R_c	rapporto di carico
LR	linea di rigonfiamento
LCV	linea di consolidazione vergine
k	pendenza della LR
v_f	volume specifico a rottura
w_f	contenuto d'acqua a rottura
v_k	volume specifico unitario della LR
h	pendenza della superficie di Hvorslev
w_L	limite liquido di Atterberg
w_P	limite plastico di Atterberg
IP	indice di plasticità
IC	indice di consistenza
n	porosità

1.9. Scala dei tempi geologici

Seguendo la medesima filosofia del volume III, anche in questo caso ritengo possa essere utile riferirsi alla scala dei tempi geologici rappresentata in figura 1.8. In questo modo è sempre possibile trovare la corrispondenza cronologica con l'età geologica di un determinato deposito, attraverso la quale ipotizzare il possibile comportamento meccanico atteso prima ancora di individuare la più

corretta campagna di indagini geognostiche; per ulteriori dettagli si consiglia la lettura del volume III – paragrafi 1.8, 1.8.1 e 1.8.2.

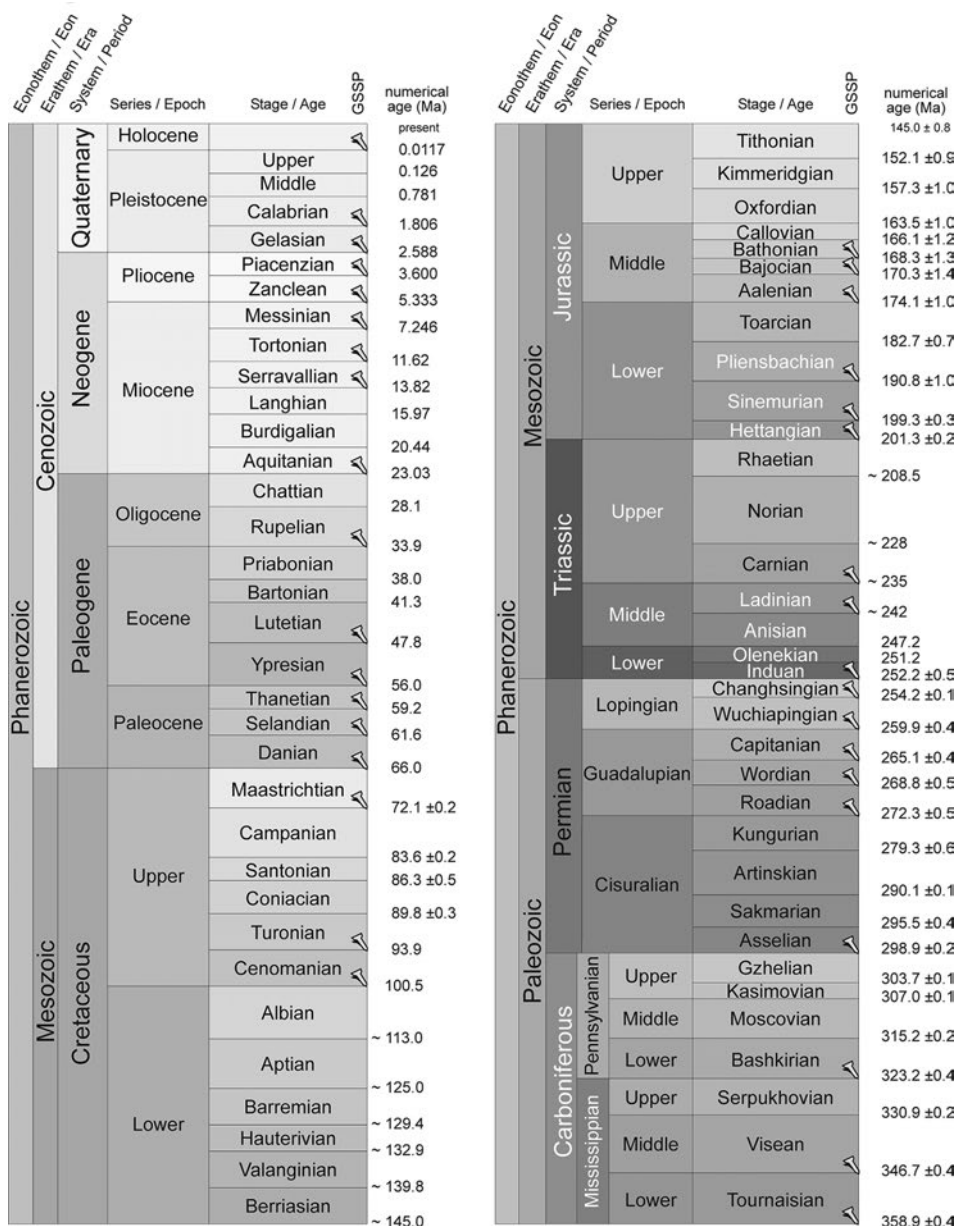


Figura 1.8. Scala dei tempi geologici degli ultimi 358,9 MA (fonte: International Commission on Chronostratigraphic Chart – agosto 2012; www.stratigraphy.org)