



CD ALLEGATO

[Scheda sul sito >](#)

INTRODUZIONE AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

Applicato a calcolo strutturale e geotecnico

Romolo Di Francesco

GEOTECNICA DEL TERZO MILLENNIO
INTRODUZIONE AL METODO
DEGLI ELEMENTI FINITI

Applicato a calcolo strutturale e geotecnico



*A Maria Bartolacci,
una grande amica e
una donna di grande coraggio
che ha lottato e sofferto per molti anni
e che ora non è più tra noi*

Romolo Di Francesco
Geotecnica del terzo millennio
INTRODUZIONE AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI
Applicato a calcolo strutturale e geotecnico

ISBN 978-88-579-0126-3

© 2012 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: aprile 2012

Di Francesco, Romolo <1965->

Geotecnica del terzo millennio : introduzione al metodo degli elementi finiti : applicato a calcolo strutturale e geotecnico / Romolo Di Francesco. - Palermo : D. Flaccovio, 2012.
ISBN 978-88-579-0126-3

1. Indagini geotecniche – Calcolo – Metodo degli elementi finiti.
624.1517CDD-22 SBN Pal0241989

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, aprile 2012

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

1. Presentazione dell'opera

1.1. Generalità.....	»	1
1.2. L'Ingegneria e la Geologia <i>sensu lato</i>	»	3
1.3. La Geotecnica e la Geomorfologia	»	7
1.3.1. Una metodologia di studio	»	8
1.3.2. Un caso di studio: la frana di Faieto.....	»	13
1.4. La moderna Geotecnica: quale approccio?.....	»	20
1.5. Introduzione all'opera.....	»	22
1.5.1. Introduzione al volume I	»	24
1.6. Ringraziamenti.....	»	26

2. Tecniche di analisi agli elementi finiti

2.1. Cenni introduttivi.....	»	29
2.2. Molle lineari.....	»	32
2.3. Elementi lineari tipo BAR	»	35
2.4. Il teorema di Castigliano.....	»	38

3. Il metodo delle rigidezze dirette

3.1. Cenni introduttivi.....	»	43
3.1.1. Passo 1: disconnessione dei singoli elementi finiti	»	46
3.1.2. Passo 2: localizzazione dei singoli elementi finiti	»	46
3.1.3. Passo 3: assemblaggio della matrice di rigidezza locale.....	»	47
3.1.4. Passo 4: assemblaggio della matrice di rigidezza globale.....	»	49
3.1.5. Passo 5: applicazione delle condizioni al contorno.....	»	53
3.1.6. Passo 6: soluzione	»	55
3.1.7. Passo 7: recupero delle quantità derivate	»	55

4. Il metodo degli elementi finiti

4.1. Cenni introduttivi.....	»	59
4.2. Le funzioni di forma	»	61

4.2.1. Passo 1: costruzione della matrice di rigidezza.....	»	66
4.2.2. Passo 2: funzione di interpolazione delle forze nodali.....	»	66
4.2.3. Passo 3: calcolo delle forze nodali	»	68
4.2.4. Passo 4: soluzione del problema	»	70
4.2.5. Passo 5: recupero delle quantità derivate	»	71
4.2.6. Riflessioni finali.....	»	71
4.3. La trave di Bernoulli.....	»	72
4.3.1. Passo 1: applicazione delle funzioni di forma.....	»	74
4.3.2. Passo 2: analisi dello stato di sforzo.....	»	75
4.3.3. Passo 3: assemblaggio del vettore forze nodali.....	»	75
4.3.4. Passo 4: assemblaggio della matrice di rigidezza	»	76
4.3.5. Passo 5: assemblaggio dell'equazione generale.....	»	77
4.3.6. Passo 6: recupero delle quantità derivate	»	78
4.4. La trave di Eulero-Bernoulli.....	»	78
4.5. La trave di Timoshenko	»	79
4.6. Modellazione dei carichi distribuiti	»	80
4.7. Modellazione dei vincoli elastici.....	»	84
4.8. Lo stato piano di tensione e deformazione	»	92
4.9. L'elemento piano triangolare	»	94
4.9.1. Passo 1: applicazione delle funzioni di forma.....	»	95
4.9.2. Passo 2: costruzione dell'equazione generale	»	96
4.9.3. Passo 3: definizione della matrice di rigidezza	»	99
4.10. Il triangolo bilineare e l'elemento piano Q4.....	»	100
4.11. Gli elementi isoparametrici.....	»	102
4.12. L'integrazione numerica	»	108
4.12.1. Il metodo di Gauss.....	»	108
4.12.2. La regola di Simpson.....	»	110
4.13. Conclusioni.....	»	111

5. Interazione terreno-struttura

5.1. Cenni introduttivi.....	»	113
5.2. Modellazione delle travi su suolo alla Winkler	»	115
5.2.1. Determinazione del momento e del taglio.....	»	117
5.2.2. Un esempio di calcolo	»	119
5.2.3. Considerazioni finali.....	»	122
5.3. Modellazione dei pali su suolo alla Winkler.....	»	130
5.3.1. Un esempio di calcolo	»	135
5.3.2. Determinazione del momento e del taglio.....	»	141
5.3.3. Considerazioni finali.....	»	149
5.4. Modellazione delle paratie su suolo alla Winkler.....	»	151
5.4.1. Un esempio di calcolo	»	155
5.4.2. Considerazioni finali.....	»	163
5.5. Conclusioni.....	»	163

6. Esempi di calcolo

6.1. Introduzione	» 165
6.1.1. Un problema termico.....	» 167
6.1.2. Un problema termo-meccanico	» 171
6.1.3. Un problema d'interazione tra fondazione adiacenti	» 176
6.1.4. Un problema d'interazione terreno-fondazione-struttura.....	» 180
6.1.5. Un problema dinamico	» 185

7. Appendice A: matrici, vettori e tensori

7.1. Introduzione ai sistemi lineari	» 201
7.1.1. Introduzione alle matrici	» 202
7.1.2. Particolari tipi di matrici.....	» 203
7.1.3. Operazioni algebriche sulle matrici.....	» 203
7.1.4. Determinanti.....	» 205
7.1.5. Matrici invertibili	» 207
7.1.6. Autovalori e autovettori.....	» 210
7.2. Introduzione ai vettori e scalari	» 211
7.2.1. Somma di vettori, prodotto di uno scalare per un vettore	» 212
7.2.2. Prodotto scalare	» 213
7.2.3. Prodotto vettoriale	» 213
7.2.4. Prodotto triplo.....	» 214
7.2.5. Coordinate cartesiane, versori e componenti di un vettore.....	» 214
7.3. Introduzione ai tensori	» 216
7.3.1. Notazione indiciale e convenzione di sommatoria.....	» 217
7.3.2. Equazioni di trasformazione delle coordinate	» 218
7.3.3. Il delta di Kronecker.....	» 219
7.4. Introduzione alle equazioni di rette e piani.....	» 220
7.4.1. Esempio A: l'equazione del piano ottaedrale	» 222
7.4.2. Esempio B: normalità tra tensioni ottaedriche	» 223

8. Appendice B: determinazione della costante di Winkler

8.1. Cenni introduttivi.....	» 225
8.2. L'approccio matematico	» 226
8.3. L'approccio sperimentale.....	» 233

Bibliografia	» 237
---------------------------	--------------

1. PRESENTAZIONE DELL'OPERA

1.1. Generalità

A prima vista, un nuovo testo di Geotecnica può sembrare, se rapportato alla produzione letteraria attinente tale materia, nulla più che una goccia nel mare incapace di aggiungere quel particolare elemento o quella particolare conoscenza che gli consenta di assumere un posto di rilievo in ambito scientifico e/o professionale. In effetti, esistono numerosi libri che cercano di spiegare alcuni aspetti che possiamo definire *essenziali* della Geotecnica, a partire dalle caratteristiche fisiche e dalle variabili di stato, passando attraverso lo studio delle tensioni efficaci fino a giungere all'analisi delle strutture interagenti con i terreni in termini di capacità di carico, sforzi, deformazioni e spostamenti esprimibili tramite concetti di analisi alle tensioni ammissibili o ai valori limite.

Il problema fondamentale che risiede in tale approccio dipende, però, proprio da una sorta di limiti definibili, seppur involontariamente, autoimposti, considerato che i terreni – pur potendo essere classificati e studiati in due grandi gruppi – rappresentano il prodotto di processi chimici e fisici molto complessi evolutisi in tempi geologici; un'evoluzione, la cui misura sfugge anche alla più sofisticata delle prove sperimentali, la cui conoscenza può essere capace di chiarire gli aspetti che sottendono il possibile comportamento idraulico e meccanico di un deposito.

Lo studio del comportamento dei terreni, di pertinenza della Meccanica delle terre, analizza la risposta del sottosuolo in funzione delle sollecitazioni naturali e dei carichi trasmessi dalle strutture progettate nell'ambito dell'Ingegneria Civile, all'interno della quale la Geotecnica si occupa dell'analisi dell'interazione terreno-struttura; un aspetto, quest'ultimo, che a sua volta definisce una frontiera tra l'ingegneria strutturale e quella propriamente geotecnica e che racchiude analisi in una veste rigorosamente matematica.

È allora evidente che, anche nell'ipotesi di voler trascurare l'aspetto geologico della questione, l'argomento assume una connotazione davvero complessa e

multidisciplinare, che richiede sempre più – in una società in rapida evoluzione culturale e tecnologica nella quale i confini tra le scienze diventano sempre più labili – una conoscenza ad ampio spettro di osservazione.

Riassumendo, un'opera moderna capace di affrontare in maniera esauriente la Geotecnica non può prescindere dalla conoscenza delle connessioni logiche che legano in maniera indissolubile tale materia con le altre dalle quali deriva, a partire dalla Meccanica delle terre sulla quale è fondata (figura 1.1); occorre poi considerare che quest'ultima, a sua volta, deriva dalla Meccanica del continuo dalla quale mutua molte delle proprietà matematiche intese in senso fenomenologico. Ma, mentre sulla Meccanica del continuo è noto essere stata costruita la Scienza delle costruzioni – conducendo a un perfetto parallelismo con la Geotecnica – non può essere, infine, sottaciuta l'importanza rivestita dalla Geologia nei confronti dello sviluppo e dell'utilizzo di tutti gli strumenti concettuali forniti dalla Meccanica delle terre.

Tutti elementi, questi, che, se adeguatamente connessi in un testo organico e completo – anche se apparentemente complesso – possono condurre a una visione nuova, moderna e definitivamente chiara della Geotecnica.

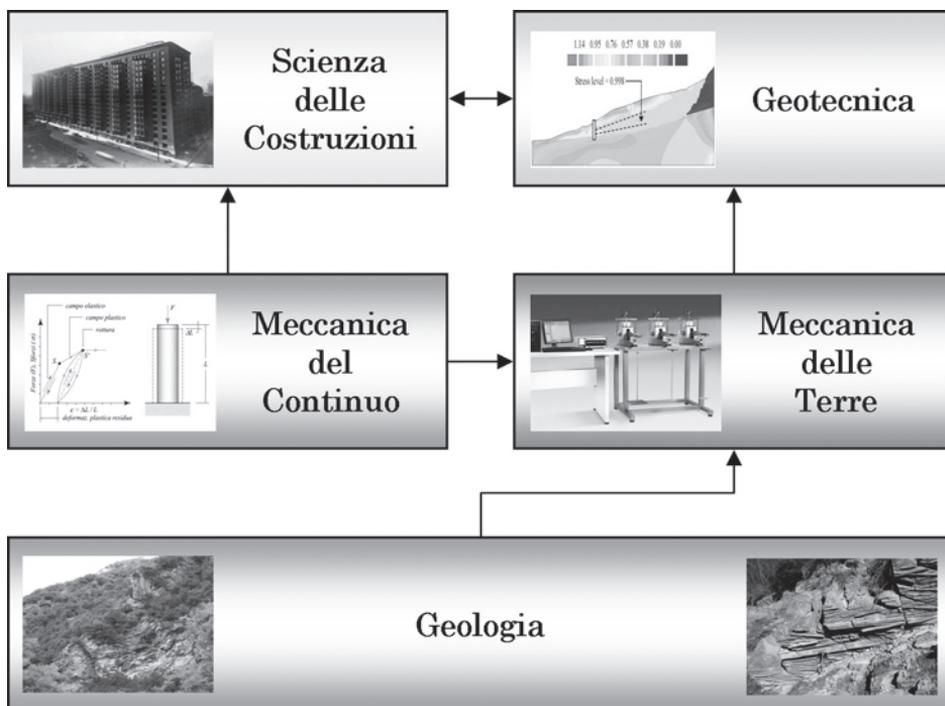


Figura 1.1. Schema di connessione logica tra la Geotecnica e altre branche ingegneristiche e geologiche

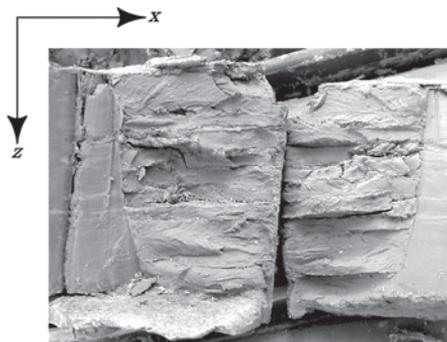
1.2. L'Ingegneria e la Geologia *sensu lato*

La Geotecnica può essere considerata come il luogo di incontro di due mondi scientifici e tecnici apparentemente diversi e contrapposti: l'ingegneria e la geologia, con problemi da risolvere che possono essere ricondotti a un unico assioma noto come *interazione terreno-struttura*; un argomento che, alla stregua dei fisici che assimilano i problemi a sistemi chiusi da analizzare, è interamente incentrato nella necessità di codificare i processi fisici reali in modelli matematici ai quali affidare le nostre previsioni progettuali. Ma, mentre gli ingegneri parlano un linguaggio fatto di elementi strutturali, vincoli e sollecitazioni, i geologi assumono un ruolo comprimario nello studio della genesi dei terreni e dell'evoluzione della superficie terrestre, dovendo fornire risposte esaurienti che possano essere tradotte – in definitiva – in un modello geologico comprensibile ai primi; nel contempo, mancando agli stessi una proprietà di linguaggio prettamente ingegneristico, risulta difficile restituire un modello capace di replicare e chiarire, con estrema sintesi, le infinite variabili utilizzate da Madre Natura in millenni, se non milioni di anni di evoluzione.

Il problema assume connotazioni più chiare se consideriamo, ad esempio, che il comportamento meccanico dei terreni risulta essere marcatamente non lineare e irreversibile, così come pure fortemente dipendente dalla storia tensionale pregressa, dall'anisotropia e dall'eterogeneità: tutti effetti che si traducono, in sostanza, nella conoscenza della storia geologica *sensu lato* (*sl*).

A titolo di esempio, le argille plioceniche e pleistoceniche (note con il termine tecnico di *argille strutturalmente complesse*), diffuse nella fascia adriatica dell'Italia centrale e meridionale (figura 1.2a), appartengono a formazioni geologiche che per comportamento meccanico possono essere ascritte al campo delle rocce tenere; eppure, risultano costituite da argille e limi fessurati ovvero a geomateriali difficili da trattare, con un comportamento meccanico e una resistenza a taglio (figura 1.2b) e compressione che dipendono dalla mineralogia dei costituenti il terreno, dal chimismo delle acque di coordinazione e di struttura, dallo stato di fessurazione tettonica, dal livello tensionale applicato a da quello subito nel corso dello loro evoluzione: tutte condizioni che si traducono, in definitiva, nella storia geologica intercorsa dalle condizioni di deposizione a quelle attuali, la cui conoscenza è essenziale in relazione alle strutture che progettiamo. Una storia, che può essere solo sintetizzata in laboratorio ricorrendo, ad esempio, alle prove edometriche, la cui conoscenza consente una migliore definizione del comportamento tensodeformativo dei terreni, grazie alla scelta del più appropriato legame costitutivo capace di descriverne gli effetti (figura 1.3).

La sola presenza dei piani di discontinuità tettonica, con una spaziatura da millimetrica a centimetrica (figura 1.2a), influenza marcatamente la risposta meccani-



(a)

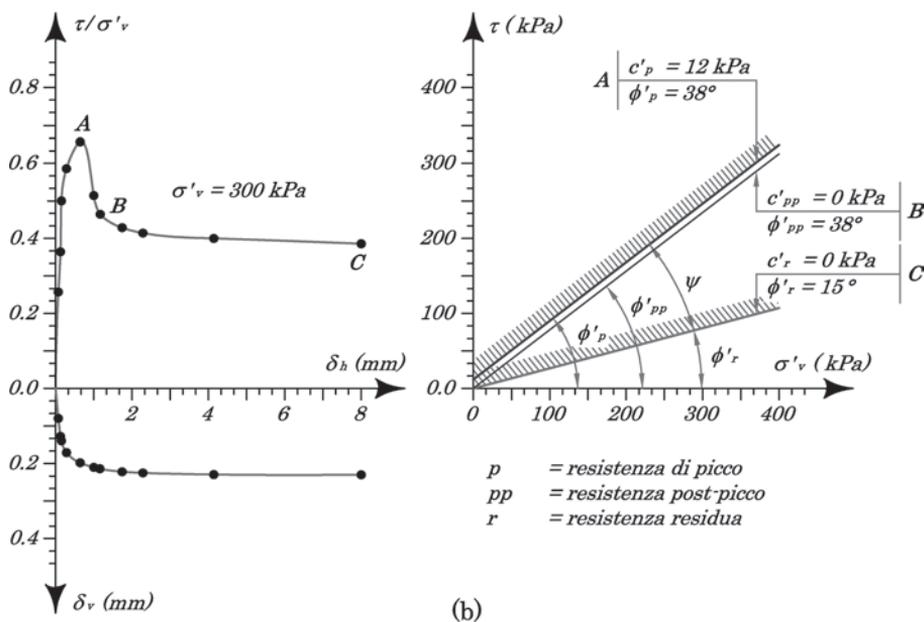


Figura 1.2. Campione di argilla strutturalmente complessa del centro-Italia a) e relativi risultati da una prova di taglio diretto b)

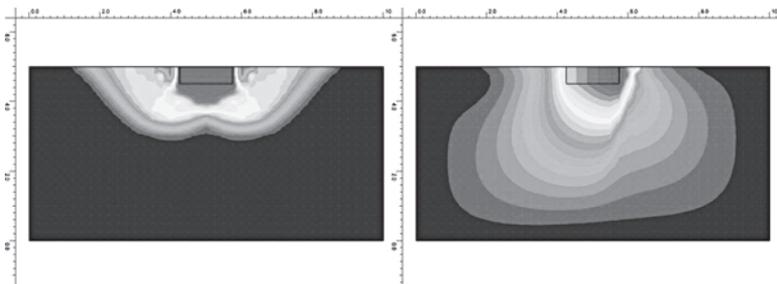


Figura 1.3. Analisi a elementi finiti del comportamento a rottura di una fondazione nastriforme utilizzando criteri elastoplastici di snervamento per mezzi continui a) e macrofessurati b)

ca (e idraulica) di tali depositi, conducendo a un'evidente differenza tra i risultati ottenuti nell'apparecchio di taglio diretto e quelli derivanti dalle prove in cella triassiale: una condizione spiegabile solo con l'analisi delle modalità di esecuzione di tali prove che conducono alla rottura secondo piani preimpostati nel primo caso (figura 1.4a) o lasciano, nel secondo caso, il provino libero di seguire le discontinuità naturali (figura 1.4b-c). In sostanza, si tratta di una condizione la cui mancata conoscenza potrebbe inficiare i risultati dei nostri progetti, stante una pronunciata anisotropia (strutturale e idraulica) che potrebbe essere, probabilmente, meglio risolta ricorrendo ad analisi nel campo della Meccanica della frattura piuttosto che della Meccanica del continuo.

In definitiva, una visione del comportamento meccanico delle terre limitata ai soli aspetti sperimentali non può essere in grado di spiegare molti degli effetti fenomenologici tipici dei terreni a grana fine come le argille e il limi; al contrario, dall'unione di una completa conoscenza della loro mineralogia con lo studio della risposta meccanica risulta possibile giungere a una corretta comprensione dei fenomeni di ritiro, rigonfiamento, cedimento, dilatanza, senza dimenticare il ruolo svolto dalle forze di attrazione elettrostatica, caratteristici delle argille, nei confronti dello sviluppo della resistenza per coesione e dell'interazione tra lo scheletro solido e la fase fluida contenuta negli spazi interparticellari. Allo stesso modo, la conoscenza della composizione mineralogica di tutte le terre conduce a una previsione più organica del loro comportamento meccanico nel campo delle grandi deformazioni, come nel caso delle frane o delle strutture con elevati livelli di sollecitazioni indotte nei terreni con i quali interagiscono.

È anche vero, però, che una profonda conoscenza del comportamento meccanico dei terreni e delle rocce è essenziale per tutti coloro che operano nel campo della geotecnica in funzione del proprio ruolo; diversamente, non saremmo mai in grado di dialogare correttamente con chi in fondo assume il ruolo di progettista, il quale deve sempre tradurre il problema in un sistema fisico chiuso capace di trasformare i dati di input in un output il quale, a sua volta, deve garantire una corretta cantierabilità dell'opera e la sua l'integrità per l'intera durata della vita utile prevista.

Trasferendo questi primi elementi, seppur preliminari, ad esempio, allo studio delle paratie – quali opere di sostegno dei fronti di scavo – risulta che la loro progettazione conduce a una schematizzazione a mensole verticali soggette contemporaneamente, in relazione all'ipotesi di esistenza di un centro di istantanea rotazione, a condizioni di spinta attiva e di spinta passiva: due stati tensionali, entrambi esercitati dai terreni con i quali l'opera interagisce, particolarmente influenzati dalle condizioni idrauliche del sottosuolo a loro volta funzione delle possibili variazioni stratigrafiche; ma, mentre la definizione di tali condizioni discende dalla conoscenza di concetti propri della Scienza delle costruzioni e della

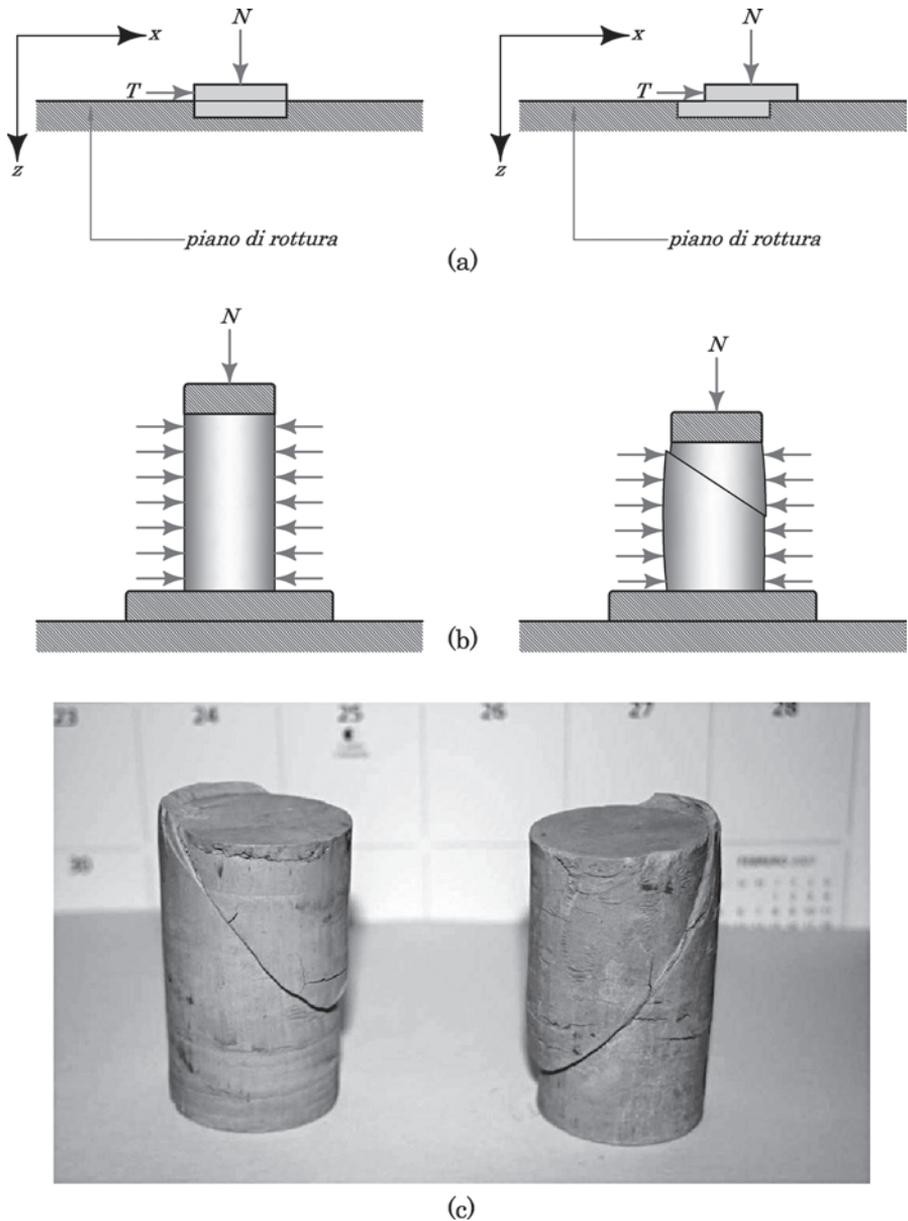


Figura 1.4. Differenze metodologiche di esecuzione tra le prove di taglio diretto a) e quelle triassiali b-c) in presenza di uno stato di fessurazione nelle argille

Meccanica delle terre, è essenziale comprendere che i corretti valori meccanici dei terreni da utilizzare nel calcolo delle due differenti condizioni di spinta dipendono dal livello e dalle modalità di deformazione del sottosuolo, i quali a loro volta risultano influenzati dalla geometria, dalle condizioni di vincolo, dai materiali utilizzati e, di conseguenza, dalla rigidità strutturale relativa dell'insieme terreno-opera di sostegno.

Traducendo, infine, i linguaggi ingegneristici e geologici in un unico idioma, si perviene allo sviluppo delle conoscenze sulle quali viene, in definitiva, costruita la Geotecnica la quale, pur assumendo un ruolo di scienza autonoma, richiede – nel suo studio e nella sua applicazione – un approccio essenzialmente multidisciplinare all'interno del quale è fondamentale che tutte le figure tecniche coinvolte siano in grado di dialogare correttamente in quanto accomunate dal medesimo linguaggio.

1.3. La Geotecnica e la Geomorfologia

Il problema dell'assenza di dialogo tra le parti assume un'ulteriore veste allorquando si opera sul territorio e sull'ambiente in generale nell'ambito dei quali materie apparentemente distanti, come la Geomorfologia e la Geotecnica, diventano invece due scienze imprescindibili; basti pensare, d'altronde, allo sviluppo e all'applicazione dei moderni modelli numerici, i quali necessitano di un numero di variabili molto maggiore rispetto ai modelli geotecnici classici. Ciò diventa evidente, ad esempio, nel caso di interventi sulle frane per motivi di studio, di monitoraggio e di redazione di progetti di consolidamento; oppure nel caso di interventi sulle aste dei fiumi laddove lo studio della dinamica fluviale, quale retaggio geologico *sl*, costituisce un elemento basilare per le successive applicazioni geotecniche.

Tutti argomenti che possono essere facilmente compresi evidenziando l'impossibilità pratica da replicare, con accuratezza, tali fenomeni anche nel più sofisticato degli apparati sperimentali in quanto dipendenti da condizioni al contorno la cui codifica richiede una buona conoscenza dell'evoluzione della superficie terrestre. Nel caso, poi, della pianificazione territoriale e nella progettazione antisismica, la distinzione tra le due scienze diventa ancora più labile, anche se le recenti normative tecniche (D.M. 14.01.2008) condensano gli studi geotecnici nell'iniziale modellazione geologica dei siti e nella successiva modellazione geotecnica, tentando di scindere due argomenti invece strettamente correlati (o correlabili).

È evidente, da questa breve descrizione, che l'intervento del geomorfologo diventa essenziale non solo nella fase iniziale, definibile *preliminare* secondo la codifica corrente dei livelli di progettazione, ma nell'intero iter progettuale; d'altra parte, se è vero che il modello fisico di un problema viene costruito in tale fase, è

anche vero che lo stesso richiede diversi livelli di approfondimenti al fine di costituire una corretta base alla quale affidare i successivi studi geotecnici e, infine, le applicazioni numeriche.

Di nuovo, se ciò richiede da parte degli studiosi della Terra una conoscenza che vada oltre la propria formazione professionale, è indispensabile che il progettista possa, non solo dialogare correttamente con il geologo, ma anche intervenire, in uno scambio continuo di informazioni, nella definizione del modello fisico; un dialogo che necessita, però, della conoscenza di informazioni, almeno basilari, sulle forme, depositi e processi tipici degli ambienti morfoclimatici del passato e del presente capaci di dispiegare, anche in termini geotecnici, un'evoluzione durata milioni di anni (da ora indicati con MA). Solo da tale rapporto biunivoco è allora possibile costruire modelli fisici e fisico-matematici il più aderenti possibile ai fenomeni reali, dal momento che gli stessi riescono a tenere conto – e a elaborare – un maggiore numero di variabili.

Una possibile ipotesi di lavoro può essere basata sul diagramma di flusso rappresentato nella figura 1.5, il quale, a partire dal *problema reale*, evolve secondo passi di calibrazione successivi passando per la costruzione in serie di *modelli fisici* evolventi in *modelli geotecnici* fino a giungere ai *modelli numerici convergenti* costituenti la base essenziale per la compilazione di *modelli numerici predittivi*; in questo modo appare evidente che il punto di forza di tale diagramma risiede proprio nel linguaggio comune dei tecnici che concorrono al suo sviluppo, oltre ad alcuni passi essenziali che richiedono la verifica costante della convergenza dei vari modelli.

Un esempio contribuirà a chiarire tutti gli aspetti, pertinenti lo studio di una frana il cui modello geomorfologico → fisico prevede l'esistenza di uno strato “cuscinetto” costituito da argille strutturalmente complesse, antiche milioni di anni, capaci di influenzare l'evoluzione morfologica del paesaggio in funzione delle proprie caratteristiche geotecniche.

Occorre però innanzitutto comprendere che la metodologia di lavoro qui proposta prende corpo solo da un'analisi di dettaglio del diagramma di flusso, cercando di superare l'ostacolo fondamentale rappresentato dalla differenza di linguaggio tecnico parlato dal geologo, in quanto esperto nella costruzione di modelli fisici aderenti ai fenomeni reali, e dal geotecnico, quale esperto nella traduzione in linguaggio ingegneristico dei medesimi fenomeni.

1.3.1. Una metodologia di studio

Nella prassi professionale è usuale per il geomorfologo interpretare ondulazioni ad ampio raggio di curvatura presenti sui versanti come *deformazioni plastiche*,

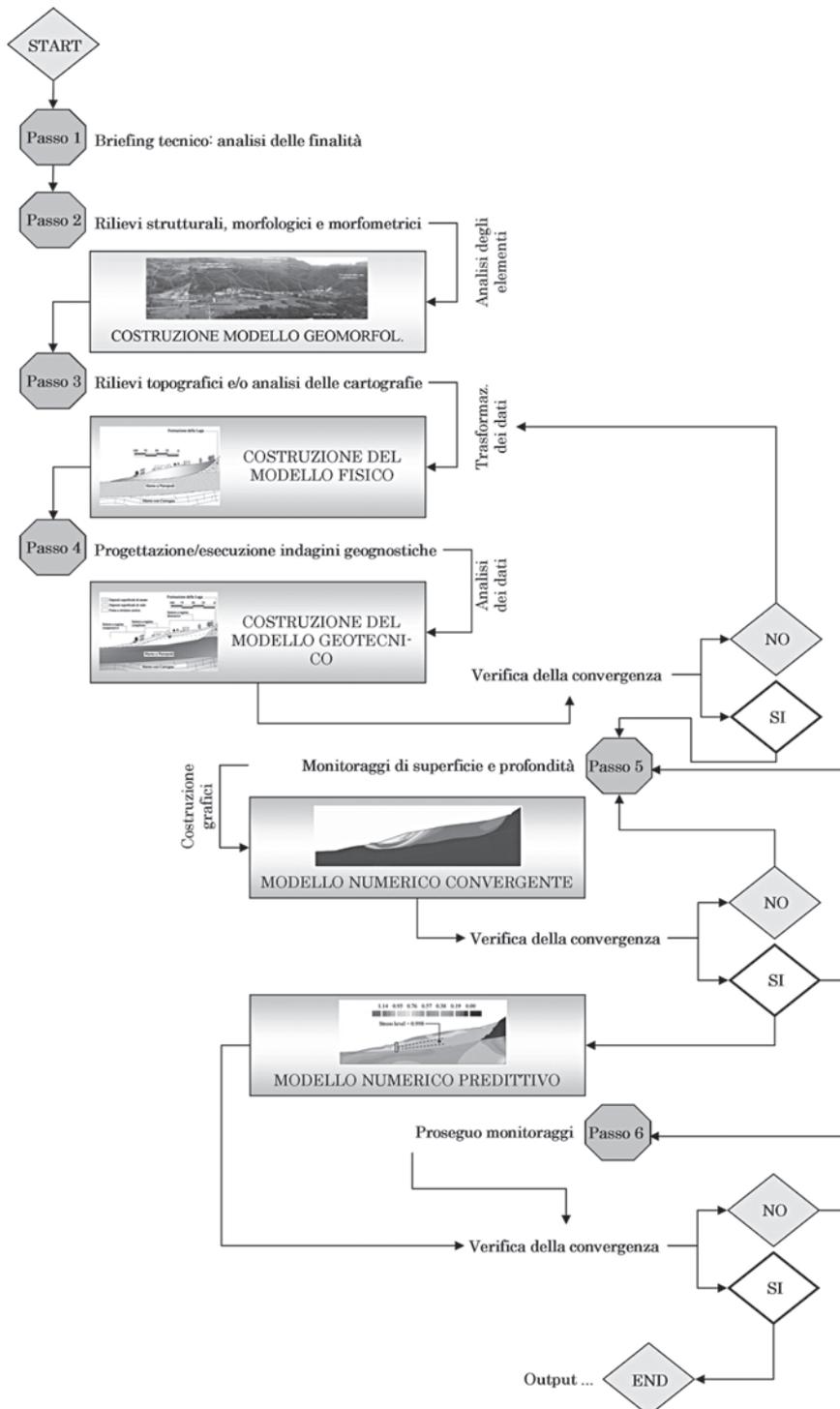
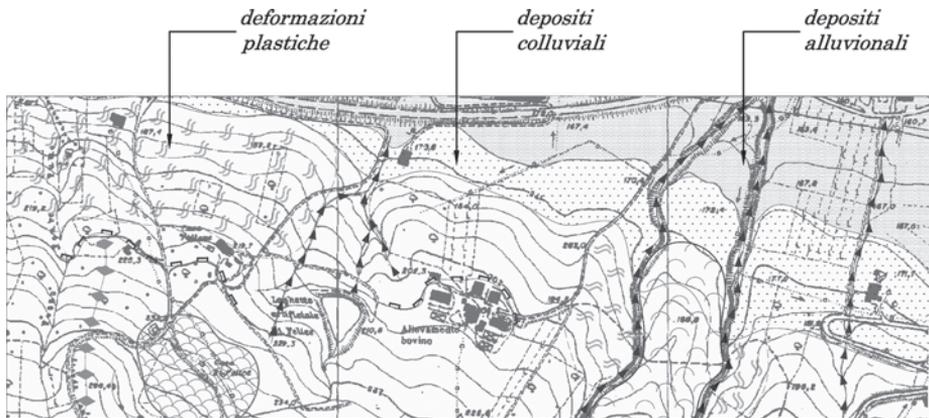


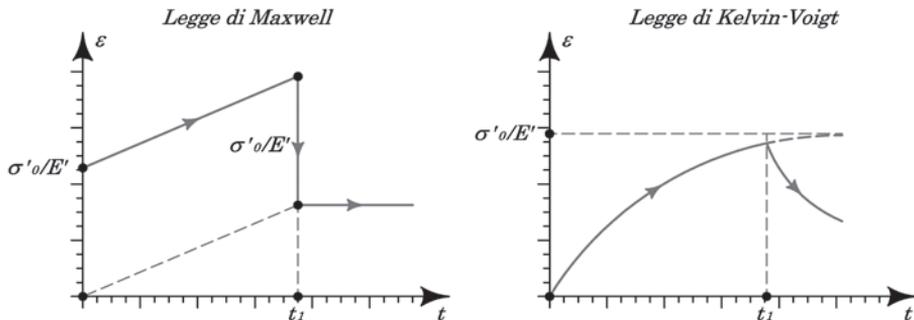
Figura 1.5. Diagramma di flusso di una possibile metodologia di lavoro in ambito geotecnico; per le spiegazioni si vedano i riferimenti infratestuali

il cui comportamento si traduce in “traslazioni lente e continue senza una vera e propria superficie di distacco” (Panizza R., 1987). In altre parole, la descrizione di una forma, interpretabile in termini di deposito quale risultato di un processo morfogenetico codificato, assume per il geologo un significato chiaramente definibile in termini di genesi ed evoluzione; un significato che trasposto alle deformazioni plastiche racchiude in un’unica definizione la presenza di un versante, con sottosuolo argilloso, e di una coltre detritica a granulometria fine in movimento lento coinvolgente anche parte del sottostante substrato.

Lette in questa maniera, le deformazioni plastiche possono essere già chiaramente interpretate – anche se necessitano ancora di una traduzione in linguaggio ingegneristico – mediante una cartografia tematica, nella quale ogni simbologia riassume i concetti espressi, talora coadiuvata da una sezione interpretativa (figura 1.6a).



(a)



(b)

Figura 1.6. Esempio di carta geomorfologica con versanti interessati da deformazioni plastiche, ossia creep in condizioni drenate a); esempi di modelli matematici per la simulazione di prove di creep b)

Per il geotecnico, invece, lo studio di una deformazione plastica assume un significato diverso interpretabile in termini di Meccanica delle terre o più propriamente, per il caso specifico, in termini puramente reologici afferenti un comportamento tempo-dipendente, tipo *creep in condizioni drenate*, funzione dalla componente viscosa delle deformazioni (figura 1.6b).

Ragionando in questo modo distinto, risulta, dall'esempio proposto, il differente punto di vista del medesimo problema per la cui definizione completa ed esaustiva concorrono entrambe le definizioni.

Orbene, appare chiaro che il problema da risolvere è tutto incentrato nel punto di unione delle diverse interpretazioni della medesima fenomenologia, il quale, utilizzando una definizione paleontologica, rappresenta l'anello di congiunzione orizzontale (differente dall'anello di congiunzione verticale tra due specie conseguenti) tra il geomorfologo e il geotecnico, ovvero richiede la traduzione dei linguaggi nei rispettivi idiomi.

Ritornando al diagramma proposto, è possibile fornire una corretta risposta alle problematiche finora rappresentate iniziando da un punto di partenza che prevede un briefing tecnico con l'analisi delle finalità da raggiungere e che evolve secondo i seguenti passi di calibrazione:

- *rilievi strutturali, morfologici e morfometrici*: comprendono praticamente il rilievo geologico classico di un'area, con lo scopo di definirne la struttura profonda e superficiale, e il rilievo geomorfologico in termini di forme, depositi e processi;
- *analisi degli elementi raccolti*: sintetizzabili in cartografie tematiche sovrapponibili con il fine di confrontare, ad esempio, l'eventuale influenza della struttura geologica nei confronti dell'evoluzione del paesaggio fisico; oppure, come vedremo, con un successivo esempio applicativo, l'influenza del comportamento meccanico di una formazione, o comunque di un deposito, nei confronti della genesi e dell'evoluzione di fenomeni franosi; il tutto coadiuvato da un numero sufficiente di sezioni geologico-geomorfologiche esplicative.

Appare chiaro, già dai primi passi, che l'analisi congiunta con il geotecnico degli elementi prodotti e sintetizzati in un "modello geologico" comporta una prima e accurata comprensione dei fenomeni in atto nell'area studiata, opportunamente coadiuvata dal medesimo linguaggio tecnico che accomuna entrambi i professionisti; nel contempo, è proprio in tale fase che, dal confronto comune, è possibile effettuare la prima verifica del lavoro svolto – in termini di rispondenza alle finalità preposte – per poi eventualmente prevedere l'esecuzione di rilievi topografici, e/o l'analisi di cartografie esistenti e/o l'approfondimento dei rilievi geologici per una migliore comprensione dei punti considerati cardini o comunque meritevoli di approfondimenti.

I passi successivi conducono alla trasformazione dei dati:

- nella *costruzione del modello fisico del problema*, costituente il cuore dell'argomento poiché dal suo grado di affidabilità e accuratezza dipende l'evoluzione dell'intero processo, a iniziare dalla progettazione delle indagini geognostiche. Il modello fisico costituisce, in sintesi, la base di tutto il successivo processo dei dati in termini puramente geognostici e geotecnici e, per tale motivo, deve essere in grado di poter trasmettere un messaggio chiaro ed inequivocabile in termini di *geometria e meccanica* del problema affrontato;
- nella successiva *esecuzione delle indagini geognostiche*, la cui progettazione è ovviamente influenzata dal modello fisico, le quali consentono – passando attraverso l'analisi dei dati raccolti – la definizione del *modello geotecnico*. Tale fase condensa praticamente tutte le conoscenze dell'area e del problema in termini stratigrafici, morfogenetici, geotecnici, idrogeologici; in altre parole, rappresenta lo stato dell'arte del fenomeno in analisi in funzione del livello di approfondimento raggiunto.

Quella descritta finora può essere considerata come la prima parte nell'analisi di un fenomeno, altresì definibile come preliminare, alla fine della quale deve essere eseguita la più importante verifica dei dati prodotti in termini di convergenza degli elementi raccolti e assemblati; è ovvio che se la verifica evidenzia una discrepanza tra gli elementi, si rende necessario un riesame degli stessi, rappresentato nel diagramma di flusso di figura 1.5 da una connessione con la trasformazione dei dati finalizzata alla costruzione del modello fisico; ovvero è necessario ripercorrere alcune tappe e, se indispensabile, modificare le iniziali ipotesi di lavoro.

Al contrario, in caso di congruenza dei dati è possibile, attraverso l'esecuzione di monitoraggi ambientali e – ove richiesto – anche strutturali (sintetizzati in grafici esplicativi) procedere alla:

- *costruzione del modello numerico* (elementi finiti, differenze finite, elementi discreti, ecc.) di riferimento per la successiva fase progettuale. Una fase che consiste, praticamente, nella costruzione di un modello numerico che sia convergente sia con i dati emersi dal monitoraggio e sia con gli elementi scaturiti dall'esecuzione delle prove di laboratorio e in sito; nuovamente, in caso di mancata convergenza, è necessario rielaborare gli elementi ripartendo dai dati propri del monitoraggio.

Infine, per raggiunta convergenza del modello numerico con tutte le variabili introdotte nel sistema, è possibile esplorare l'evoluzione del modello numerico in termini predittivi, fermo restando la necessità di un continuo aggiornamento delle informazioni sia in fase progettuale che, soprattutto, in fase esecutiva.

1.3.2. Un caso di studio: la frana di Faieto

Faieto è una frazione del comune di Cortino, ubicata nell'entroterra teramano ai piedi del massiccio appenninico dei Monti della Laga a struttura arenaceo-marnosa, oggetto di lavori di consolidamento stante la presenza di importanti quadri fessurativi sulla maggior parte degli edifici alcuni dei quali dichiarati inagibili. L'applicazione della metodologia proposta al caso in questione ha evidenziato, sin dalle prime fasi, alcune informazioni essenziali a partire dalle ricerche archeologiche che hanno dimostrato come il territorio antico fosse servito da alcuni assi viari principali e altri minori che collegavano Interamnia (nome latino di Teramo) con gli abitati dell'entroterra (Di Francesco e Scaletta, 2003). L'elemento di grande importanza è risultato insito nella constatazione che l'antica strada per Faieto risulta troncata da un corpo di frana sul quale sorge l'abitato moderno di stampo medioevale: un argomento a favore della tesi, puramente geomorfologica, dell'esistenza di un problema non più circoscrivibile a pochi edifici ma all'intero paese (figura 1.7).

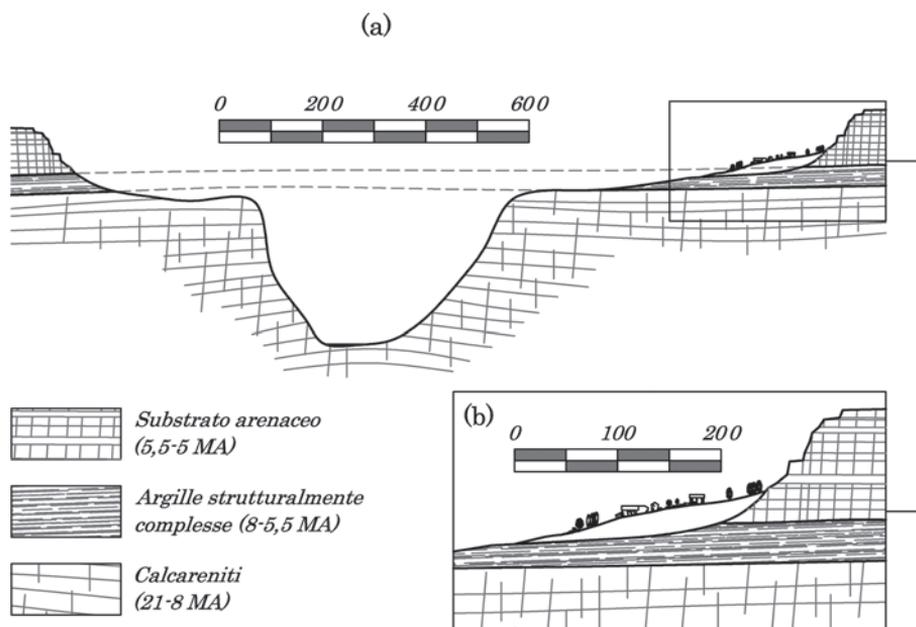


Figura 1.7. Sezione geologica schematica con ubicazione della frana di Faieto a); dettaglio della sezione stratigrafica inizialmente costruita esclusivamente su basi morfologiche e morfometriche b)

ANALISI DELLE FINALITÀ

Il problema fondamentale nello studio del caso di Faieto è consistito nell'individuazione delle condizioni che hanno prodotto, e continuano ad alimentare, il

corpo di frana; nel contempo, sin dal primo sopralluogo, è emersa l'esistenza di una struttura geologica complessa di origine sedimentaria durata alcuni milioni di anni, la quale ha condotto all'accumulo di tre unità deposizionali costituite, dal basso verso l'alto, da calcari, marne e arenarie. Ognuna di tali unità ha seguito una propria storia geologica iniziale, traducibile in una particolare evoluzione tensionale e deformativa dipendente dall'attività tettonica sinsedimentaria, nonché una storia geologica post-deposizionale comune con le altre.

Integrando i dati geologici con le conoscenze meccaniche, seppur preliminari, dei litotipi descritti appare evidente che i calcari e le arenarie devono possedere un comportamento, alla scala dei tempi umani, di tipo elastofragile, mentre alla scala dei tempi geologici non è più possibile prescindere dall'introduzione, nei modelli di analisi, del comportamento viscoso o tempo-dipendente; relativamente alle marne, costituenti un'intercalazione stratigrafica tra le unità rigide (figura 1.7), deve invece risultare evidente un comportamento meccanico marcatamente plastico stante la preponderante presenza di minerali appartenenti al gruppo delle argille, nonostante le stesse siano state assoggettate nel tempo ad elevati sforzi di compressione dipendenti tanto dal carico litostatico esercitato dalle arenarie sovrastanti quanto dagli sforzi tettonici orientati.

Infine, da un punto di vista idrogeologico è anche chiaro che le marne devono comportarsi da acquicludi, mentre le sovrastanti arenarie da acquiferi (per porosità e fratturazione) capaci di alimentare un'attiva idrodinamica di falda responsabile dello stato di attività di tutte le frane, compresa quella di Faieto.

COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOMORFOLOGICO

La metodologia di intervento, necessaria per una corretta impostazione del progetto di consolidamento, è stata basata sull'iniziale esecuzione di un accurato rilievo di superficie (studi geologici e geomorfologici) che, integrato con informazioni stratigrafiche e archeologiche di varia origine, ha messo in debita luce la necessità di dover interpretare la configurazione attuale del paesaggio come il risultato dell'interazione tra i processi morfogenetici (esogeni) e le caratteristiche strutturali e geotecniche del substrato, le quali hanno in qualche modo influito sulle condizioni di innesco ed evoluzione del fenomeno franoso. Contestualmente, è stato anche possibile stimare la data di innesco della frana, la quale deve essere necessariamente posteriore al periodo tardo-imperiale (circa il IV secolo d.C.), stante la presenza di manufatti di tale epoca e antecedente alla data impressa sul portaletto della Chiesa dedicata a S. Andrea Apostolo (1519), cioè del più antico edificio conosciuto.

Considerata inoltre la necessità di ricorrere ad analisi numeriche ad elementi fini-

ti, in relazione alla complessità delle problematiche rilevate, l'impostazione del modello fisico del problema è stata preceduta dalla ricostruzione della struttura profonda del sito, alla quale è stato successivamente sovrapposto il modello evolutivo dell'area in grado di chiarire il ruolo di ogni singolo agente geologico che ha influito sul prodotto finale.

Le formazioni litoidi presenti nell'area sono risultate appartenere alla fase di strutturazione della catena appenninica, ognuna caratterizzata da una litologia e da una reologia differente, ovvero procedendo dal basso verso l'alto:

- formazione delle marne con cerrognà (21÷8 MA), rappresentata da calcareniti che alla scala delle osservazioni possono essere considerate indeformabili; un elemento di importanza fondamentale anche per l'impostazione del modello numerico poiché la loro posizione stratigrafica può essere sostituita, nella costruzione della mesh, da vincoli a cerniera capaci di limitare la dimensione della stessa e di evitare nel contempo il fastidioso *effetto bordo*;
- formazione delle marne a pteropodi (8÷5,5 MA), costituita da argille strutturalmente complesse, plastiche e a comportamento *strain softening* ovvero rammollente;
- formazione della laga (5,5÷5 MA), con strati di spessore decametrico di arenarie che, con la loro estrema rigidità e la presenza di due sistemi di fratture tettoniche intersecantesi ad alto angolo, alimentano con crolli episodici i detriti di versante e i corpi di frana.

Il problema, sostanzialmente, è tutto incentrato sia sullo spessore e sia sul comportamento delle Marne a Pteropodi le quali, con affioramenti variabili da pochi metri fino a circa 50 metri, sono risultate essere effettivamente plastiche (*limite liquido* = 45,3%; *limite plastico* = 17,9%; *indice di plasticità* = 27,4; *contenuto d'acqua* = 8,5%) nonché dotate di un pronunciato comportamento rammollente, agendo da “cuscinetto lubrificante” tra la formazione sovrastante e quella sottostante; un elemento che da solo è effettivamente capace di spiegare le condizioni di innesco della frana di Faieto, anche se nel contempo non fornisce alcuna indicazione sulla relativa tipologia, evoluzione e in particolare sulla localizzazione a *macchia di leopardo* dei quadri fessurativi sugli edifici.

Approfondendo il concetto, è stato ritenuto, innanzitutto, che lo spessore delle marne a pteropodi fosse dovuto a due effetti importanti:

- alla deposizione in un ambiente marino asfittico, cioè caratterizzato da condizioni riducenti e non ossidanti, tipico delle zone più depresse; in altre parole, lo spessore deve essere considerato originariamente esiguo;
- alla successiva compressione differenziale subita in relazione all'accumulo di centinaia di metri di arenarie.

Ne è risultato, in sostanza, che a seguito delle fasi di seppellimento → diagenesi → emersione → erosione in ambiente sub-aereo, le marne a pteropodi devono aver subito una sovraconsolidazione di origine sia chimica che meccanica, rendendone complessa l'analisi e l'interpretazione del comportamento geotecnico. Le analisi geomorfologiche del paesaggio hanno evidenziato, in definitiva, una diretta influenza della complessa struttura profonda dell'area nei confronti delle fasi di approfondimento e di stasi del reticolo idrografico, con la conseguente formazione di valli sospese e ripide scarpate, impostate sulle formazioni rigide delle marne con cerroigna e della Laga, e di scarpate a basso angolo tipicamente coincidenti con le argille strutturalmente complesse (figura 1.8). La conseguenza diretta di tale deduzione è insita nella constatazione che tutti i fenomeni franosi, compreso quello in studio, risultano sistematicamente impostati sulle marne a pteropodi; inoltre, è anche emerso chiaramente, dallo studio della

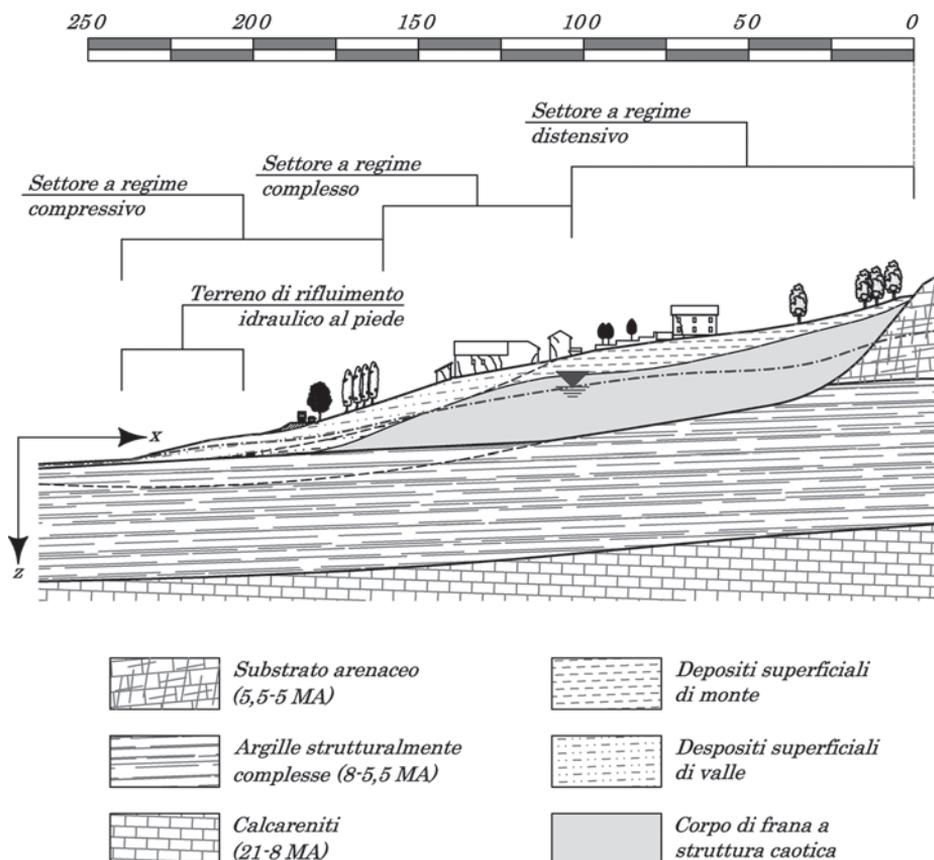


Figura 1.8. Sezione stratigrafica di dettaglio della frana di Faieto; notare la congruenza con la figura 1.7 quale risultato della metodologia di lavoro applicata (fonte: Di Francesco et al., 2007 – modificata)

geometria e dei rapporti strutturali (analisi morfometrica), che la frana di Faieto deve aver avuto origine per fenomeni di crollo la cui genesi è da ricondurre alla combinazione dell'intensa alterazione in ambiente subaereo delle argille antiche ed alla diffusa fratturazione dei sovrastanti strati arenacei.

COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOTECNICO

La successiva fase di approfondimento delle conoscenze geotecniche ha richiesto, innanzitutto, l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo con lo scopo di conoscere la stratigrafia, di prelevare dei campioni per il laboratorio e di strumentare i fori con piezometri e inclinometri; quindi, di prevedere un monitoraggio di profondità (inclinometrico) e di superficie (topografico). In questo modo, è stato possibile ricostruire la frana, in termini di geometria e meccanica del problema, con estrema precisione, considerato che il numero e la posizione dei punti di indagini sono stati guidati dai risultati emersi dalla costruzione del modello geomorfologico.

È bene a questo punto evidenziare anche le difficoltà operative riscontrate in fase di campionamento delle argille (il quale ha richiesto l'utilizzo del triplo carotiere stante la tendenza delle marne a pteropodi a incollarsi letteralmente alle fustelle) e della matrice del corpo di frana, che è risultata, come previsto, costituita da blocchi arenacei di grandi dimensioni a rappresentare lo scheletro solido, tipico di una frana di crollo, i cui interstizi sono riempiti di limi e sabbie.

Integrando i risultati di tutti gli studi, è stato anche possibile ipotizzare le condizioni di innesco della frana, la quale può essere considerata come costituita da più eventi di crollo originatisi sulle pareti rocciose arenacee successivamente scivolati lungo il sottostante pendio costituito dalle argille antiche di alcuni milioni di anni. Allorquando la zona di alimentazione ha poi raggiunto uno stato di quasi-equilibrio, è continuata la normale deposizione di superficie a opera delle acque di ruscellamento, come dimostrato dalla presenza di materiali limosi e sabbiosi di copertura (figura 1.8). In alternativa, è anche possibile che la frana abbia avuto un'origine proprio all'interno della formazione argillosa, considerata la presenza di una superficie di scivolamento profonda, relativa al settore centro-basale, e individuata tanto con i sondaggi quanto con il monitoraggio di profondità; in particolare, tale superficie è apparsa come una sottile zona di taglio che ha comportato la destrutturazione delle argille e la formazione di calcite isoorientata, tipica di condizioni di sforzi orientati.

In definitiva, è emersa con estrema chiarezza un'evidente collimazione del modello geotecnico con quello geomorfologico, a riprova della bontà del lavoro eseguito e della validità della metodologia adottata.

IMPOSTAZIONE DEL MODELLO NUMERICO A CONVERGENZA

A questo punto risultano anche note tutte le informazioni necessarie per comprendere la presenza e la localizzazione dei quadri fessurativi, nonché per simulare al computer il comportamento meccanico della frana e la sua risposta ai possibili interventi di consolidamento.

In effetti, le deformazioni strutturali degli edifici sono imputabili in parte all'azione di scivolamento del corpo di frana ed in parte alla constatazione che lo stesso possiede una struttura interna costituita da enormi blocchi di arenaria, accostati, con gli spazi riempiti da una matrice fina di limi e sabbie; di conseguenza, gli edifici fondati sul medesimo blocco risultano all'incirca integri, mentre quelli poggianti su combinazioni di due blocchi, blocchi-matrice o solo matrice hanno subito cedimenti differenziali che si sono sommati agli spostamenti causati dallo scivolamento della frana.

Occorre inoltre considerare che la frana è risultata smembrata in tre sub-corpi, in relazione alla presenza di ulteriori superfici di rottura e scivolamento che si congiungono con quella profonda principale, ognuno caratterizzato da una diversa velocità di deformazione; un problema che ha complicato non poco la costruzione del modello numerico, ma che nel contempo ha anche fornito un'ulteriore chiave di lettura della localizzazione dei principali quadri fessurativi nel settore centrale dell'abitato, come chiaramente comprensibile dalla lettura della figura 1.8.

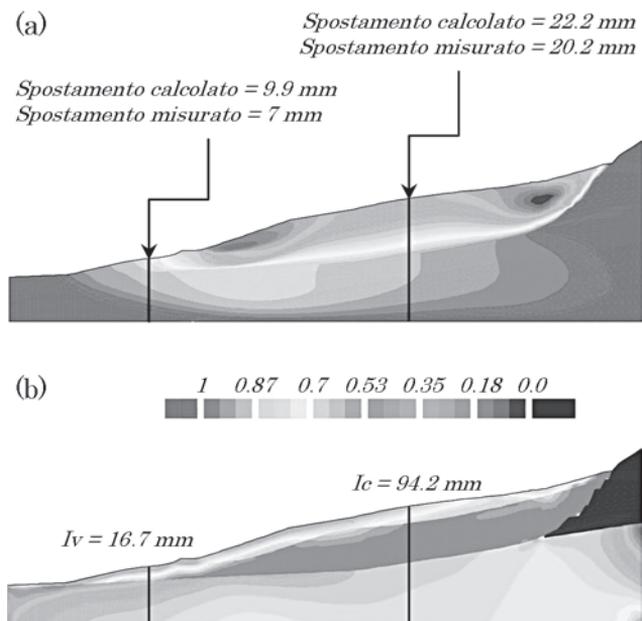


Figura 1.9
Risultati delle analisi FEM relative alla frana di Faieto: confronto tra gli spostamenti inclinometrici misurati e quelli calcolati relativi all'anno 2001 a); proiezioni dei dati, mediante modello predittivo, nel quinquennio successivo b) (fonte: Di Francesco et al., 2007 – modificata)

Dunque, stante la particolare complessità del fenomeno, è stato necessario esplorare le diverse leggi costitutive, note in letteratura, capaci di simulare il comportamento meccanico dei vari geomateriali presenti e di ricostruire la storia tensionale e deformativa dell'intero corpo di frana, da utilizzare quale base per le successive previsioni di progetto; ma, nonostante gli sforzi profusi e l'utilizzo, in decine di modelli, di leggi elastiche, elastoplastiche incrudenti o rammollenti con criteri di flusso associati o non associati, elastoviscoplastiche e tutte in campo non-lineare, non è mai stato possibile raggiungere una condizione di convergenza soddisfacente.

In effetti, utilizzando come riferimento la figura 1.9, lo scarto tra i valori misurati agli inclinometri e quelli calcolati con il modello a elementi finiti è risultato essere del 9% per il settore centrale, condizione quasi accettabile, e del 23% per quello di valle. Tutti elementi, questi, che hanno impedito, di fatto, il completamento della metodologia di lavoro poiché non è mai stato possibile costruire il modello numerico predittivo.

ANALISI A POSTERIORE

In definitiva, lo studio della frana di Faieto ha rappresentato un momento di insegnamento per tutti coloro che hanno lavorato al suo consolidamento, considerato che, nonostante gli sforzi profusi e la ricerca della calibrazione dei modelli numerici attraverso il monitoraggio geotecnico, i risultati predittivi non sono mai stati incoraggianti.

Una successiva rielaborazione dei dati ha consentito di attribuire le differenze tra il modello reale e quello numerico ad alcune condizioni al contorno del tutto particolari, quali (Di Francesco et al., 2007):

- la complessità della simulazione del comportamento delle argille strutturalmente complesse, frutto di un'articolata storia geologica durata diversi milioni di anni. Occorre in tal senso precisare che tali marne, di colore variabile dal grigio piombo al quasi nero, risultano essere fittamente fessurate con rottura scagliosa e presenza di abbondante calcite la quale, per fenomeni di pressione-soluzione, ha abbandonato la matrice argillosa per poi ridepositarsi in sottili intercalazioni lungo i piani di fratturazione;
- la presenza di una struttura interna della frana costituita da uno scheletro solido derivante da più eventi di crollo. Quindi un sistema che sfugge alle regole che fondano la Meccanica del continuo dalla quale ha poi preso origine la Meccanica delle terre;
- un'idrodinamica della falda corrispondente non tanto a una piezometrica conti-

nuova quanto, piuttosto, a linee preferenziali di drenaggio che tendono a seguire gli interstizi presenti all'interno dello scheletro solido.

Con riferimento al primo punto, occorre anche rilevare la possibile influenza esercitata dal chimismo delle acque dolci continentali, le quali interagendo con le argille, depositatesi in un ambiente marino salato e ora affioranti, possono averne modificato la mineralogia e conseguenzialmente il comportamento meccanico nel corso dei millenni.

In definitiva, con la frana di Faieto è emerso che la ricerca nel campo geotecnico, e in particolare nella Meccanica delle terre, non è ancora capace di codificare leggi costitutive in grado di simulare il comportamento di tutti i geomateriali e di tutte le strutture naturali presenti sulla superficie terrestre; un limite di cui bisogna essere sempre coscienti, considerato che ogni terreno manifesta un proprio comportamento meccanico in funzione della personale storia geologica.

Un limite che cercheremo di avvicinare quanto più possibile stante l'impossibilità di poterlo superare.

1.4. La moderna Geotecnica: quale approccio?

Analizzando con dovuto rigore i risultati ottenuti con l'analisi del caso trattato, si scopre un aspetto di non trascurabile importanza: la necessità di dover approfondire tutte le conoscenze teoriche e sperimentali nei casi reali che conduce, a sua volta, a un ulteriore passo di traduzione Geologia → Geotecnica spesso di difficile esecuzione. Appare nel contempo evidente che l'effettiva comprensione dei concetti che stanno alla base della Meccanica delle terre, sulla quale si "fonda" la Geotecnica, richiede la conoscenza di concetti provenienti da entrambi i mondi culturali, quello ingegneristico e quello geologico; in altre parole, il problema fondamentale nello studio della Geotecnica, e delle sue applicazioni, dipende sostanzialmente dal differente linguaggio tecnico parlato dalle figure professionali coinvolte spesso sorde al dialogo tra le parti.

La Geotecnica è effettivamente una materia davvero molto complessa poiché, trattando argomenti inerenti la Meccanica e la Dinamica delle terre nonché l'interazione terreno-struttura, coinvolge di fatto altre discipline come la Scienza e la Tecnica delle costruzioni (figura 1.1); a ciò deve essere poi aggiunta la rapida evoluzione della velocità e della potenza di calcolo dei moderni personal computer, i quali hanno consentito la diffusione di modelli matematici che, implementati in software commerciali, consentono di riprodurre fenomenologie anche di elevata complessità. Ma, quale indigesto rovescio della medaglia, si scopre in parallelo la comparsa di un nuovo problema derivante proprio dall'elevata intrinseca complessità dei moderni mezzi di calcolo i quali, trattando un numero enorme di variabili, necessitano di un elevato numero di dati in ingresso.

Se consideriamo, ad esempio, la sola legge elastica, cioè il primo e più semplice legame costitutivo, e sfruttiamo i concetti di simmetria cristallina che analizzeremo nel volume II, scopriamo che è possibile identificare i materiali secondo tre condizioni differenti:

- i *mezzi ortotropi*, che possono essere descritti mediante l'utilizzo di 9 costanti elastiche;
- i *mezzi trasversalmente isotropi* per i quali le costanti elastiche scendono a 5;
- i *mezzi isotropi* il cui comportamento, associato ad una condizione di omogeneità, può essere analizzato mediante 2 soli parametri: il modulo di Young e il coefficiente di Poisson.

È evidente, allora, che la scelta del legame costitutivo dipende sostanzialmente dagli obiettivi che devono essere raggiunti, considerato che all'aumentare del grado di precisione aumenta anche il numero delle proprietà meccaniche che devono essere determinate mediante prove di laboratorio e/o in sito, costituendo in tal modo un problema spesso di non facile soluzione, affrontabile, talora, solo per scopi di ricerca pura.

Se poi aggiungiamo la necessità che abbiamo per i terreni di esplorare lo studio delle tensioni e delle deformazioni anche in campo plastico, ecco che anche per mezzi semplici come quelli isotropi dobbiamo necessariamente aggiungere ulteriori parametri come l'angolo di resistenza al taglio, la coesione e l'eventuale angolo di dilatanza, il quale, valido per geomateriali sovraconsolidati, comporta la necessità dell'adozione di leggi di flusso non associate piuttosto che associate, tutti elementi che saranno esplorati nei prossimi volumi.

La ricerca e l'esperienza professionale insegnano nel contempo che attualmente non esiste una metodologia di analisi capace di replicare tutte le variabili, coinvolte, ad esempio, in processi che riguardano l'interazione di una struttura con l'ambiente in senso generale; possiamo solo tentare di approssimare gli effetti cercando, con metodologie appropriate, la convergenza dei calcoli con il modello reale.

Sintetizzando, al momento, l'unica strada percorribile richiede l'impostazione di un modello inizialmente convergente con i risultati degli studi eseguiti, per poi trasformare lo stesso in un modello predittivo capace di proiettare nel futuro l'evoluzione dei processi attuali anche in funzione di possibili interventi progettuali. Tutti elementi che, se risultano utili nella progettazione di nuove strutture, appaiono decisamente essenziali negli interventi su quelle esistenti e in particolare modo sul patrimonio artistico, storico e monumentale di cui l'intero vecchio continente è ricco (Di Francesco et al., 2004); un percorso che comporta, ovviamente, la necessità di individuare in maniera chiara e univoca la problematica in esame senza possibilità alcuna di dubbio, poiché, diversamente, qualunque

azione potrebbe risultare inutile, se non addirittura dannosa. Appare allora ovvio che, in funzione della costruzione di modelli affidabili e convergenti con i fenomeni reali, è necessario dover procedere alla formazione delle figure professionali coinvolte, affinché possano dialogare in maniera corretta e costruttiva attraverso l'acquisizione di cognizioni provenienti da materie differenti unite da un filo logico comune.

A tal proposito, il prof. R. Nova (2002) ha scritto: “Lavorando nel campo della Meccanica delle terre da molti anni, ho potuto infatti rendermi conto che sui principi base della materia discussi in questo libro esiste molta confusione. Spesso anche le persone che operano nella pratica geotecnica, intesa in senso lato, non si rendono ben conto di quel che fanno quando utilizzano formule, e soprattutto metodi di calcolo, di cui non hanno ben chiari i fondamenti. Il dialogo tra i molti attori presenti in un progetto che coinvolga il terreno (ingegneri civili e ambientali, geologi, architetti) rischia di essere un dialogo tra sordi, in cui non è nemmeno tanto chiaro quale debba essere il ruolo di ciascuno”.

Ebbene la collana, pur cosciente della complessità della materia che mi accingo a trattare, proverà a fare chiarezza proprio sugli aspetti finora rappresentati, cercando di fornire una linea guida chiara, univocamente percepibile e che parli un linguaggio geotecnico universale rappresentante una fascia di demarcazione, quasi una frontiera libera, tra il mondo dell'ingegneria e quello della geologia: un argomento già introdotto da Karl Terzaghi, il padre indiscusso della Geotecnica, quando, nella presentazione del primo numero della Rivista Italiana di Geotecnica (1967), scrisse: *“Dare importanza alla sola geologia o alla sola meccanica dei terreni sarebbe stato un passo in direzione sbagliata. La meccanica dei terreni non è in grado di raggiungere i suoi scopi pratici se non viene intesa come mezzo per determinare le conseguenze tecniche di determinati aspetti geologici”*.

Un argomento caduto nell'oblio negli anni seguenti.

1.5. Introduzione all'opera

Riprendendo alcuni elementi introdotti nel paragrafo precedente, si ritiene fondamentale tenere ben presenti alcuni concetti essenziali legati al significato stesso del termine “geotecnica”, i quali possono essere espressi in due soli punti:

- 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;
- 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: il cosiddetto *algoritmo di trasformazione* il quale risulta essere particolarmente sensibile ai dati di input, per quantità e qualità (Di Francesco e Siena, 2007); ossia, dovremmo cominciare a pensare alla Geotecnica come a un meccanismo a ingranaggi il quale, alimentato dalla matematica necessaria, sia in grado di produrre output all’altezza dei nostri problemi. Ma è proprio qui che emergono tutte le lacune e le limitazioni, poiché l’inserimento di dati di input non all’altezza della complessità dei modelli di calcolo utilizzati riesce a inficiare il migliore dei progetti.

Proprio per tali motivi, la presente 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. Ragionando in tale direzione (secondo lo schema di figura 1.1), gli argomenti sono stati suddivisi in diversi volumi dedicati alla Meccanica del continuo, alla Meccanica delle terre in tutte le sue sfaccettature e 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 e 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 T.W. Lambe (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 consentire 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

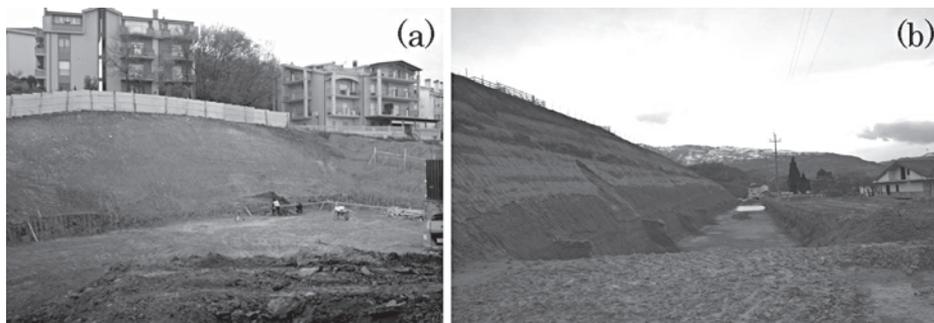


Figura 1.10. Esempi di fronti di scavo progettati come opere temporanee a) e definitive b) in assenza di strutture di sostegno

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 (figura 1.10): elementi che saranno trattati nell'ottica della massima chiarezza e semplicità non solo espositiva ma anche fruitiva, in relazione alla necessità 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 quotidianamente presenta; 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.

1.5.1. *Introduzione al volume I*

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 e il principio dei lavori virtuali che aprono, e guidano, i successivi argomenti a essi obbligatoriamente correlati.

Allo stesso modo tali concetti guideranno, nei volumi successivi, la compren-

sione del comportamento meccanico dei solidi continui e la trattazione, e contestuale applicazione, dei legami costitutivi fino a condurre all'evoluzione verso la Meccanica dei terreni e infine verso l'analisi dell'interazione terreno-struttura in funzione dell'influenza dei possibili ambienti geologici: 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.

In effetti, come sarà dimostrato con l'introduzione alle varie tecniche e con i relativi esempi di calcolo, il ricorso al metodo di analisi agli elementi finiti richiede – innanzitutto – lo studio della validità dei modelli di calcolo implementati nei programmi commerciali, com'è d'altronde richiesto anche dalle nuove normative tecniche sulle costruzioni che impongono la validazione dei risultati da parte dell'utilizzatore; nel contempo tale filosofia evidenzierà anche la necessità di riuscire ad adottare il giusto bilanciamento tra la più corretta discretizzazione dei mezzi continui e degli elementi strutturali e il relativo incremento dell'onere computazionale; senza ovviamente dimenticare anche l'incremento dei parametri da determinare in funzione della sempre più crescente complessità dei criteri di snervamento utilizzabili. Tutti problemi che si traducono, in definitiva, nella necessità di padroneggiare almeno le tecniche poste alla base dei meccanismi che sottendono le analisi ad elementi finiti.

Per tali motivi, 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; segue l'analisi del metodo delle rigidità dirette grazie al quale è 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 conduce all'introduzione alle tecniche fondamentali che possono essere definite il vero e proprio motore del metodo degli elementi finiti le quali, tramite il principio dei lavori virtuali, riescono a costruire il comportamento matematico di elementi strutturali semplici, come le travi di Bernoulli, di Eulero-Bernoulli e di Timoshenko, nonché degli elementi isoparametri grazie ai quali è possibile simulare il comportamento di geometrie comunque complesse. Quindi, una volta definiti gli elementi principali, viene trattato il difficile argomento relativo all'interazione terreno-struttura mediante l'illustrazione di un modello a macroelementi, il quale, ricavato in originale, è 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 chiuso da alcuni esempi applicativi (con vocazione prevalentemente geotecnica) relativi al comportamento termico e termo-meccanico delle 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.

1.6. Ringraziamenti

Per la stesura del libro necessariamente ringrazio gli ingegneri Mauro Rastelli e Andrea Di Mattia ed il geologo Fernando Di Pierdomenico, miei soci nella "GEO&GEO Instruments® – research & development", per avermi spronato alla scrittura di un testo di geotecnica che, improntato su basi scientifiche, costituisca una valida guida professionale e, nel contempo, un punto di riferimento per la ricerca scientifica.

Un ringraziamento speciale va al professore Aurelio Ghersi, ordinario di Tecnica delle Costruzioni all'Università di Catania, per avermi offerto la possibilità di crescere grazie all'insegnamento congiunto nei suoi corsi di perfezionamento e di aggiornamento professionale: un mondo nel quale ho scoperto le vere necessità sia degli studenti che dei tecnici laureati. Grazie a lui ho anche potuto conoscere gli ingegneri Luigi Ruggeri e Cirino Cillepi, quest'ultimo responsabile dei corsi di aggiornamento dell'Ordine degli Ingegneri di Siracusa del quale sono stato gradito ospite. Altresì voglio ringraziare l'ingegnere Francesco Pisante, della Kipendoff Engineering, per avermi voluto nei suoi corsi di aggiornamento dedicati tanto alle strutture quanto alla geotecnica pura.

Non ultimo sarei negligente se non ringraziassi tutti i docenti e i ricercatori universitari di Ingegneria Civile, Ingegneria Geotecnica, Ingegneria Meccanica, Ingegneria Sismica, Geologia, Geomorfologia, Idrogeologia, Geologia Applicata 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. Conto, di conseguenza, che ognuno di loro trovi nell'opera qualcosa del proprio bagaglio culturale e del modo personale di insegnare e fare ricerca.

Infine un ringraziamento sincero va alla casa editrice Dario Flaccovio di Palermo e all'intero staff, per aver creduto in un'opera ponderosa che li ha impegnati nella realizzazione di una nuova collana di Geotecnica ad essa dedicata.

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

Romolo Di Francesco