

Geotecnica e Ingegneria Civile

Nell'evoluzione dell'ingegneria civile nel secolo appena scorso l'affermarsi della geotecnica come un settore chiaramente definito ed in certo senso autonomo è un aspetto che merita qualche considerazione. È evidente che l'integrazione delle opere di ingegneria con il terreno costituisce un fattore specifico e caratterizzante dell'intera ingegneria civile. Lo studio delle condizioni di vincolo delle opere, quindi delle caratteristiche meccaniche del mezzo che materializza il vincolo, ha costituito da sempre un capitolo importante dell'intera materia. Tuttavia, lo sviluppo tecnologico e la maggiore complessità delle opere di ingegneria, e conseguentemente la necessità di affinare i processi di progettazione e costruzione, il progresso nelle conoscenze sul comportamento meccanico dei terreni, l'evoluzione delle tecnologie costruttive delle strutture interagenti con il terreno, la possibilità di descrivere con modelli matematici e metodi numerici il comportamento di volumi di qualsiasi forma, costituiti da materiali con comportamento meccanico molto complesso, hanno aperto agli ingegneri civili prospettive prima impensabili, tanto nel campo della progettazione quanto in quello dell'esecuzione materiale.

In questo quadro si è inserita la geotecnica ed ha trovato la possibilità di espandersi grandemente.

Vale la pena di esaminare le fasi più significative dell'evoluzione di un settore che ha influenzato in modo significativo la storia dell'ingegneria europea ed italiana nell'ultimo mezzo secolo.

Questa singolare evoluzione è dipesa dallo sviluppo, quasi contemporaneo, nell'arco di circa settanta anni, di tre fattori tra loro indipendenti: la ricerca sperimentale nella meccanica delle terre, con il corrispondente inquadramento nelle teorie moderne della meccanica dei solidi; l'evoluzione delle macchine operative e dei mezzi tecnologici nel campo delle costruzioni; i calcolatori elettronici, il calcolo numerico e la modellazione matematica.

Certamente il primo e fondamentale fattore di sviluppo è stato l'interesse ad approfondire la conoscenza delle caratteristiche meccaniche delle terre, attraverso la ricerca sperimentale.

Quando nel 1923 K. Terzaghi pubblicò a Vienna il suo celebre libro *Erdbau-mechanik* pose la prima pietra di una costruzione che avrebbe avuto un enorme sviluppo nel corso dei seguenti decenni. In Austria e in Germania diversi ingegneri si dedicarono allo studio della meccanica delle terre e sorsero i primi laboratori dedicati alla ricerca sperimentale. È sorprendente constatare oggi con quanta rapidità si diffuse l'interesse al nuovo settore disciplinare ed iniziarono ricerche teoriche e sperimenta-

li e discussioni scientifiche ed accademiche; si pubblicarono memorie che ancora oggi colpiscono per la validità dei risultati e la modernità dell'impostazione scientifica.

Dalle prime misure sulla resistenza al taglio di elementi parallelepipedi di terre a grana fine, si passò rapidamente alla sperimentazione di stati tensionali più generali e più chiaramente definibili, applicati ad elementi cilindrici, in condizioni assialsimmetriche, ed all'osservazione delle deformazioni tangenziali e volumetriche. Le prime osservazioni sul fenomeno della dilatanza dei mezzi granulari addensati soggetti a sforzi tangenziali risalgono a quel periodo. Si ebbero anche le prime rappresentazioni sintetiche dei fenomeni di addensamento e d'incremento della resistenza delle terre argillose e i primi modelli reologici dei processi di consolidazione, con la distinzione tra gli effetti della viscosità strutturale dello scheletro solido e dell'acqua interstiziale.

Negli anni '30 era attivo in Italia un laboratorio sperimentale di indirizzo applicativo, dotato di apparecchiature di fabbricazione tedesca, realizzato da G. Rodio a sostegno dell'attività di impresa specializzata. Vi si eseguirono, tra l'altro, le prime misure delle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione della Torre di Pisa. A Roma, C. Cestelli Guidi, che aveva iniziato ad interessarsi di Meccanica delle Terre dopo un viaggio di studio a Berlino, nel 1938 stabilì nel chiostro di S. Pietro in Vincoli, sede della Facoltà d'Ingegneria, il primo laboratorio universitario di

meccanica delle terre, con apparecchiature fabbricate a Berlino, e pubblicò presso Hoepli nel 1942 il suo libro "Meccanica dei terreni e stabilità delle fondazioni", che fu il primo testo italiano sull'argomento.

Nel dopoguerra, dalla fine degli anni '40, si ebbe un nuovo impulso nello studio della meccanica delle terre in Gran Bretagna, all'Imperial College di Londra, per opera di A.W. Skempton, che vi stabilì il primo corso di Soil Mechanics nel 1946. Con una approfondita conoscenza della geologia e l'osservazione del comportamento dei terreni in sito e delle opere interagenti, diede un sostanziale contributo alla conoscenza del comportamento meccanico dei terreni naturali, in particolare coesivi, soprattutto nello studio delle condizioni di equilibrio dei pendii naturali e delle opere in terra (era il periodo di costruzione delle grandi dighe in terra nel subcontinente indiano). Intanto, negli anni '50, nel laboratorio dello stesso Istituto, A.W. Bishop progettò e realizzò nuove apparecchiature sperimentali¹, essenzialmente meccaniche, che divennero un equipaggiamento standard per la maggior parte dei laboratori geotecnici di indirizzo applicativo in Gran Bretagna e in Europa, e D.J. Henkel riprendeva le ricerche condotte da L. Rendulic nell'anteguerra per definire in modo organico e completo il comportamento meccanico dei terreni argillosi.

Nel decennio successivo un nuovo impulso alla ricerca nella meccanica delle terre venne dall'iniziativa di K.H.

Roscoe a Cambridge, con la collaborazione di A.N. Schofield e P.W. Wroth. A Cambridge si disegnarono apparecchiature sperimentali veramente nuove, impiegando strumenti di misura elettronici, anche miniaturizzati, per osservare localmente il comportamento di volumi di terreno anche di grandi dimensioni, e nell'ambito della teoria della plasticità fu proposto il primo completo modello unitario del comportamento meccanico delle terre coerenti e incoerenti, dotato di elasticità non lineare ed incrudimento isotropo (*"Teoria dello Stato Critico"*)². Nel laboratorio si fecero osservazioni sullo sviluppo delle deformazioni in un terreno incoerente interagente con una parete di sostegno al muoversi di questa, e per la prima volta si osservarono con la radiografia ai raggi X la formazione delle *"bande di taglio"* e gli effetti della dilatanza nelle sabbie addensate. A Cambridge gli sviluppi della microscopia elettronica a riflessione furono utilizzati per osservare la microstruttura delle argille naturali e gli effetti delle deformazioni, mentre si aprì un ulteriore campo di sperimentazione con la costruzione delle prime grandi centrifughe.

Intanto negli USA, T.W. Lambe e R.V. Whitman all'MIT, attivi nella ricerca in meccanica delle terre, mantenevano un approccio essenzialmente empirico, R.B. Peck all'Università dell'Illinois seguiva l'indirizzo di K. Terzaghi nello studio del comportamento meccanico dei materiali naturali per il progetto delle opere di ingegneria e H. Bolton Seed

all'Università della California a Berkeley avviava nel 1960 la ricerca geotecnica nel campo dell'ingegneria sismica.

La competizione tra le scuole inglesi fu il lievito della ricerca geotecnica degli anni seguenti. In varie università e centri europei si portavano avanti nuove ricerche teoriche sul comportamento dei mezzi granulari, nell'ambito di paralleli sviluppi delle teorie della plasticità. Nella meccanica delle terre allora i problemi prevalentemente trattati erano la definizione dei criteri di resistenza in forma generale e dei processi di consolidazione.

Particolare di quel periodo fu l'ampia partecipazione di cultori della meccanica dei solidi al dibattito sugli sviluppi delle ricerche teoriche e sperimentali nella meccanica delle terre, attraverso articoli di riviste internazionali e seminari, in Europa e negli USA. W. Prager, D.C. Drucker, R. Hill, C.R. Calladine sono solo alcuni dei nomi di ben noti studiosi di meccanica teorica ed applicata che con vari cultori della meccanica delle terre, tra cui R.E. Gibson, D.J. Henkel, K.H. Roscoe, P.W. Rowe, G. de Josselin de Jong, parteciparono al confronto di idee e alla proposta di interpretazioni teoriche del comportamento delle terre, via via che il progresso delle osservazioni sperimentali ne metteva in luce aspetti sempre più complessi³. Nel 1964 a Grenoble il Symposium della International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) *"Rheology and Soil Mechanics"*⁴ ebbe una grande partecipazione ed una notevole risonanza, sia per il numero di

memorie presentate, sia per l'ampiezza e la vivacità delle sessioni di discussione, che ne fecero una tappa singolare nello sviluppo della disciplina. Un'altra interessante occasione di confronto di approcci e visioni diverse e di collaborazione interdisciplinare nel campo della meccanica, fu il Simposio "*Plasticity and Soil Mechanics*"⁵ tenutosi nel 1973 a Cambridge, al quale parteciparono numerosi cultori di meccanica teorica ed applicata e di meccanica delle terre.

La ricerca sperimentale degli anni successivi, sempre più raffinata nei mezzi impiegati, approfondì lo studio dei materiali naturali e delle loro particolarità, non riproducibili in laboratorio e tuttavia determinanti per la soluzione dei problemi applicativi. La ricerca e la discussione dei risultati restarono prevalentemente nell'ambito dei cultori della disciplina, ma la base dei ricercatori si ampliò progressivamente: alle poche sedi universitarie che avevano avviato lo sviluppo della geotecnica si andarono aggiungendo in numero sempre crescente Università e centri di ricerca europei, americani ed asiatici.

In Italia la ricerca sul comportamento meccanico dei terreni è stata particolarmente attiva dalla fine degli anni '50 all'Università di Napoli, nel Centro Geotecnico della Fondazione Politecnica del Mezzogiorno fondato da A. Croce⁶, orientandosi allo studio dei terreni naturali e dei materiali granulari impiegati nella costruzione delle prime dighe in terra italiane, mentre a Roma, nel laboratorio fondato da C. Cestelli

Guidi, dai primi anni '60 si sono soprattutto studiate le caratteristiche di terre argillose, ricostituite e naturali, con riferimento alle teorie generali sviluppate a Cambridge. Alcuni anni dopo, la collaborazione con i centri di ricerca dell'Enel e dell'ISMES permise al gruppo geotecnico del Politecnico di Torino di apportare un significativo contributo alla conoscenza del comportamento delle terre incoerenti, mediante ricerche sperimentali condotte in laboratorio ed in sito. Vale la pena di sottolineare che la ricerca geotecnica italiana ha sempre mantenuto uno stretto rapporto con quella europea ed americana.

All'inizio degli anni '80, con l'istituzione dei Dottorati di Ricerca nelle Università italiane, si formarono due dottorati in ingegneria geotecnica, che raggrupparono in forma consortile i centri di ricerca delle Università e dei Politecnici del Nord e quelli delle Università del Centro e del Sud. La forma consortile ebbe il merito di coagulare le potenzialità di numerosi piccoli centri e di mettere costantemente a confronto i ricercatori di sedi diverse. Inoltre l'immissione di tanti giovani, permessa dalla nuova legge, produsse un incremento straordinario della ricerca, non solo in termini quantitativi, ma anche, o soprattutto, nel valore dei risultati raggiunti. La ricerca italiana nel campo della meccanica delle terre divenne da quel momento una delle più avanzate in ambito internazionale. Purtroppo questa forma di collaborazione interuniversitaria fu scoraggiata dalla legge sull'autonomia del 1999.

In campo applicativo, tra i grandi progressi nelle tecnologie di intervento nei terreni, costruzione delle strutture interagenti, consolidamento dei terreni deformabili, scavo, tecniche di costipamento, si individuano almeno due importanti sviluppi tecnologici, che hanno dato al settore prospettive e potenzialità del tutto nuove ed incisive.

All'inizio degli anni '50, con la scoperta che le sospensioni, o fanghi, di argilla bentonitica per le loro proprietà reologiche (*tixotropia*) permettono di applicare una pressione idrostatica alla superficie del terreno e perciò di sostenere il fronte durante uno scavo, divenne possibile eseguire perforazioni nel terreno in assenza di rivestimento. La bentonite è una argilla di origine vulcanica, per molti anni cavata nell'isola di Ponza, e lo sviluppo iniziale delle tecniche di scavo in fanghi bentonitici si deve ad una impresa specializzata italiana. Con il superamento sia del limite al diametro dei pali di fondazione, che derivava dalla forza necessaria all'avanzamento di un rivestimento metallico, sia del vincolo della perforazione a sezione circolare, hanno avuto origine i pali di grande diametro, le paratie in cemento armato, i diaframmi impermeabili e, più recentemente, le macchine Hydroshield per lo scavo di gallerie con fronte sostenuto.

Si tratta di strutture, macchine e tecniche operative che hanno inciso profondamente sul progresso dell'ingegneria civile: basti pensare al grande sviluppo delle costruzioni sotterranee degli ultimi decenni. È singolare il fatto

che ciò abbia avuto origine da una scoperta empirica, i cui fondamenti teorici sono stati a lungo dibattuti.

Alla fine degli anni '70 un'altra importante innovazione ha rivoluzionato i metodi di trattamento e consolidamento dei terreni: la miscelazione idraulica in posto nota come *jet-grouting*, introdotta in Giappone, ma poi fortemente sviluppata anche in Italia. Disgregando il terreno e miscelandolo al cemento, per mezzo di un getto d'acqua proiettato radialmente ad altissima pressione da un'asta di perforazione ruotante, si conferisce coesione ad un terreno incoerente, formando in posto una colonna di conglomerato. Questa tecnica di miscelazione, che con perforazioni di piccolo diametro, in terreni granulari sciolti permette di ottenere colonne cementate di oltre un metro di diametro, ha grandemente facilitato l'esecuzione di scavi profondi in condizioni difficili e ha aperto nuove possibilità per il consolidamento delle fondazioni, la realizzazione di diaframmi impermeabili, lo scavo di gallerie metropolitane, la stabilizzazione dei pendii. La relativa semplicità dell'intervento, il progresso ed il potenziamento delle macchine e delle tecniche operative, insieme alla progressiva riduzione dei costi causata dalla concorrenza, hanno portato ad una grande diffusione di questo tipo di intervento, cui si ricorre ormai per un numero sempre maggiore e più diversificato di lavori nel sottosuolo. In Italia il *jet-grouting* ha trovato larga applicazione, permettendo di realizzare opere di notevole impegno in terreni incoerenti,

in condizioni idriche sfavorevoli, ed il contributo delle imprese specializzate allo sviluppo delle macchine e delle tecnologie operative è stato significativo.

Paradossalmente la diffusione e la diminuzione di costo del *jet-grouting* può divenire una remora al progresso delle conoscenze nella meccanica delle terre ed allo sviluppo della ricerca. Infatti, la sostanziale modifica delle caratteristiche meccaniche dei terreni, che in posto vengono di fatto trasformati in conglomerati dotati di una resistenza paragonabile a quella di un materiale da costruzione, può rendere, o far apparire, economicamente meno conveniente il processo di adattamento del progetto di un'opera alle condizioni ambientali, secondo il tradizionale approccio dell'ingegneria civile, rispetto ad una sostanziale modifica di queste condizioni per mezzo di un intervento sul terreno.

Il terzo fattore che ha determinato un fondamentale progresso ed una profonda trasformazione dell'ingegneria geotecnica è stato certamente lo sviluppo del calcolo numerico. Analogamente a quanto è avvenuto negli altri settori dell'ingegneria civile, in un primo tempo, all'inizio degli anni '60, esso ha soltanto reso più rapida e semplice l'esecuzione di calcoli di progetto e verifica già diffusi e consolidati. Ad esempio si è proseguito a verificare le condizioni di stabilità dei pendii adottando il notissimo metodo approssimato proposto da Fellenius all'inizio del secolo: gli elaboratori elettronici dell'epoca permettevano di ripetere velocemente e senza sforzo le verifiche e di analizzare

perciò innumerevoli superfici potenziali di scorrimento. Alla metà degli anni '60 comparvero i primi programmi di verifica di stabilità dei pendii concepiti per il calcolo automatico, fondati su analisi dell'equilibrio staticamente corrette, che per la soluzione di sistemi di equazioni non lineari con centinaia di variabili facevano ricorso a metodi iterativi, perciò non altrimenti utilizzabili. Anche questa fase di sviluppo è concettualmente confrontabile con quella che parallelamente interessava l'ingegneria strutturale ed idraulica. Ma già nella metà degli anni '70 i metodi di analisi numerica, soprattutto alle Differenze Finite e agli Elementi Finiti, permisero di utilizzare il progresso delle conoscenze sul comportamento meccanico delle terre, assumendo le prime teorie generali e le leggi costitutive di tipo elastoplastico incrudente, per realizzare sofisticati modelli di comportamento del terreno e di risolvere problemi al finito molto complessi, aprendo orizzonti del tutto nuovi alla ricerca teorica ed applicata in area geotecnica. Il calcolo numerico ha reso effettivamente utilizzabili le sempre più complesse leggi costitutive dei terreni che, con il procedere di una sperimentazione via via più sofisticata, venivano proposte per tener conto dell'anisotropia dell'incrudimento plastico, della memoria degli stati tensionali, della non linearità in campo elastico, della viscosità dello scheletro solido. Perciò gli sviluppi del calcolo numerico e le ricerche teoriche e sperimentali in meccanica delle terre hanno progredito congiuntamente e la loro in-

tegrazione ha prodotto applicazioni più facilmente accessibili ed utilizzabili a fini applicativi, modificando in modo significativo la progettazione delle strutture interagenti con il terreno, la previsione delle deformazioni e degli spostamenti nel terreno, la variazione delle condizioni idriche sotterranee.

Si è quindi diffusa la modellazione numerica dei più diversi problemi di ingegneria geotecnica, soprattutto quelli posti dalla realizzazione di opere sotterranee, o fortemente interagenti con il terreno, al fine di definire meglio le loro condizioni di sicurezza ed il loro comportamento in ogni fase della costruzione e in esercizio, la loro funzionalità nel tempo, gli effetti su strutture interagenti e sull'ambiente.

Tuttavia sembra che questa evoluzione e le grandi opportunità che essa offre nella progettazione delle più complesse opere d'ingegneria non siano state ancora pienamente recepite ed utilizzate al meglio nell'ingegneria italiana. Questa considerazione dovrebbe inse-

rarsi in un più ampio discorso sulla posizione della geotecnica nell'ingegneria civile, riguardo all'attuale prassi progettuale, ai rapporti interdisciplinari, alla formazione universitaria degli ingegneri.

La profonda evoluzione dell'ingegneria civile nell'ultimo secolo ha influenzato anche la configurazione dei settori disciplinari, che hanno accentuato i loro caratteri specialistici. Per quanto riguarda la geotecnica si può facilmente constatare che le conoscenze e le potenzialità acquisite con l'eccezionale sviluppo della seconda metà del secolo appena trascorso, sono rimaste piuttosto confinate nell'ambito dei cultori della disciplina e solo in parte hanno interessato gli altri settori dell'ingegneria civile e modificato la prassi progettuale. Se sia possibile modificare questa situazione per ricomporre, pur in situazioni tanto mutate, la tradizionale unicità culturale dell'ingegnere civile italiano è un argomento che merita di essere affrontato.

¹ A.W. BISHOP, D.J. HENKEL, *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test*, Arnold, 1957.

² A.N. SCHOFIELD, P.W. WROTH, *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, 1968.

³ G. CALABRESI, *Caratteristiche meccaniche delle terre: osservazioni sperimentali e sintesi teoriche*, *Giornale del Genio Civile*, n.11/12-1967.

⁴ IUTAM, *Symposium Rheology and Soil Mechanics, Grenoble 1964*, Springer-Verlag, West Berlin 1966.

⁵ A.C. PALMER, ed., *Plasticity and Soil Mechanics*, Cambridge University Press, 1973.

⁶ A. CROCE, *Attività del Centro Geotecnico nel quadriennio 1947-51*, *Atti della Fondazione Politecnica del Mezzogiorno*, Vol. IV, 1952.

