

Indagini, Monitoraggi e Modello Geotecnico del Sottosuolo

Francesco Castelli - Università di Enna "Kore"

1. Introduzione

Le conoscenze nel campo della meccanica delle terre e delle rocce si sono evolute a tal punto da configurare un settore scientifico variamente articolato sia sotto il profilo teorico che applicativo. Per tali ragioni nell'Ingegneria Civile, accanto alle tradizionali progettazioni nei settori delle strutture, dell'idraulica e dei trasporti, si è ormai consolidata la progettazione geotecnica, il cui campo d'interesse spazia dalle fondazioni, alle costruzioni in materiale sciolto, alla stabilità dei versanti, alla dinamica ed agli interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni.

La progettazione geotecnica è regolamentata in campo nazionale dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) - NTC2008. Il campo di applicazione riguarda le opere di ingegneria civile, con particolare riguardo ai requisiti di resistenza, stabilità, funzionalità e durabilità. Nelle NTC2008 vengono inoltre enunciate le regole per il calcolo delle azioni che traggono origine dal terreno, come ad esempio la spinta delle terre, nel rispetto di quelle da considerare sulle strutture e dei requisiti richiesti in zona sismica.

La definizione delle azioni sulle strutture, in particolare, richiede l'individuazione di possibili casi di stato limite ultimo che, se pertinenti con il progetto, devono essere verificati separatamente nel rispetto delle azioni prevedibili per la struttura, indotte dall'uomo o dall'ambiente circostante. Nelle NTC2008 sono fissati i criteri propri del metodo degli stati limite, che sostituisce al concetto deterministico di un unico fattore di sicurezza per ciascuna verifica, il concetto di coefficienti di sicurezza parziali, definiti su basi statistiche, da applicare alle diverse grandezze. Il raggiungimento di uno stato limite può essere provocato dall'intervento concomitante di vari fattori di carattere aleatorio derivanti dalle incertezze relative alle resistenze dei materiali impiegati, alla intensità delle azioni ed alla probabilità della loro contemporanea presenza. Le verifiche sono finalizzate a mantenere la probabilità di raggiungimento dello stato limite considerato entro un valore prefissato.

Le NTC2008 specificano i coefficienti parziali da introdurre nelle verifiche geotecniche, distinguendo tra azioni permanenti e transitorie, specificando altresì i coefficienti parziali da applicare ai parametri di resistenza al taglio del terreno. Le azioni permanenti devono comprendere il peso proprio dei componenti strutturali e non strutturali, le azioni indotte dal terreno, dalla falda idrica e dall'acqua libera.

In relazione allo specifico caso da esaminare, si possono individuare le seguenti azioni:

- *pesi del terreno e dell'acqua;*
- *stato tensionale iniziale in sito;*
- *pressione dell'acqua libera;*
- *pressioni neutre;*
- *forze di filtrazione;*
- *carichi permanenti, imposti o ambientali, dovuti alla presenza della struttura;*
- *sovraccarichi;*
- *rimozione di carichi o scavi;*
- *movimenti dovuti a deformazioni viscoso o frane;*
- *movimenti conseguenti a fenomeni di degradazione, addensamento, e consolidazione;*
- *movimenti ed accelerazioni prodotti da terremoti, vibrazioni e carichi dinamici;*
- *effetti della temperatura, compreso le variazioni di volume per gelo;*
- *preensione applicata ad ancoraggi e puntoni.*

I valori caratteristici delle proprietà del terreno o della roccia devono essere scelti sulla base dei risultati delle prove in sito e di laboratorio. Al fine di ottenere dati che possano considerarsi rappresentativi del comportamento del terreno o della roccia in sito, si devono applicare, ove necessario, fattori correttivi ai risultati delle prove. Il valore caratteristico di un parametro del terreno può essere scelto applicando criteri statistici, in maniera che la probabilità di rilevare valori più sfavorevoli, per la manifestazione dello stato limite, non sia superiore al 5%.

La programmazione delle indagini geotecniche in situ ed in laboratorio viene effettuata preliminarmente al fine di valutare i requisiti che il sito deve possedere in relazione all'opera da realizzare e successivamente, in fase di progetto, con l'obiettivo di determinare in maniera affidabile i parametri geotecnici significativi del comportamento dei terreni, in relazione alle problematiche poste dalla progettazione. L'utilizzo dei diversi metodi d'indagine deve consentire l'acquisizione di un numero significativo di dati (adeguati al problema in studio, alla complessità stratigrafica dell'area ed alla fase di progettazione), necessari alla determinazione delle caratteristiche geotecniche (fisiche, meccaniche e idrauliche) dei terreni ricadenti nell'area d'interesse.

Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o d'intervento e devono riguardare il volume significativo di terreno (Figura 1), in modo da permettere la definizione del *modello geotecnico di sottosuolo* necessario per lo studio del problema in esame.

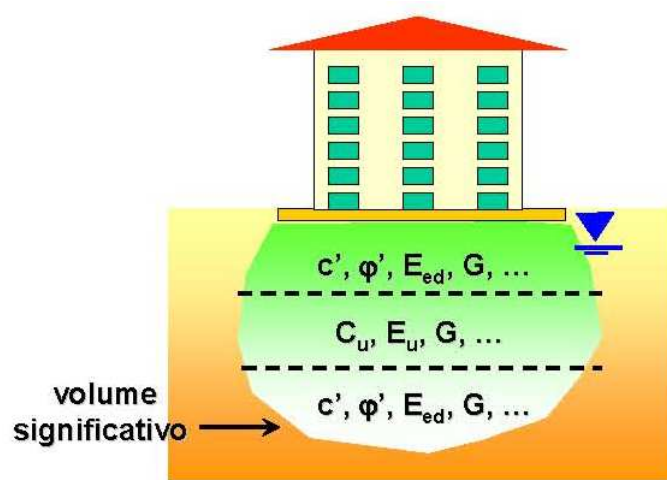


Figura 1. Volume significativo e grandezze geotecniche di riferimento.

Per garantire, infine, la sicurezza e la qualità dell'opera, devono essere precisati i controlli da effettuare in corso d'opera, nonché i criteri per il monitoraggio del comportamento dell'opera ultimata. Alla definizione del *modello geotecnico del sottosuolo* possono concorrere i dati acquisiti dai sistemi di monitoraggio, aventi lo scopo di verificare la corrispondenza tra le ipotesi progettuali, i comportamenti osservati, nonché di controllare la funzionalità dei manufatti nel tempo. Le grandezze fisiche da monitorare consistono in parametri "ambientali" (accelerazioni sismiche al suolo, piogge, temperature, neve, ecc.), pressioni interstiziali, spostamenti assoluti, spostamenti relativi, sforzi e deformazioni su elementi strutturali.

2. Principi di Progettazione Geotecnica

Nella progettazione geotecnica la problematica relativa alle indagini assume notevole importanza in quanto nelle NTC2008 si indicano esplicitamente come queste debbano essere com-

misurate ai requisiti minimi dell'opera. Nella determinazione di tali requisiti occorre stabilire la categoria del progetto distinguendo tra: a) strutture con rischio trascurabile per persone e cose e b) tutte le altre strutture. Per questa scelta si deve tenere conto del contesto in cui l'opera si inserisce esaminando i seguenti aspetti:

- *natura e dimensioni della struttura;*
- *natura e condizioni delle strutture circostanti;*
- *condizioni del sottosuolo;*
- *condizioni della falda idrica;*
- *sismicità;*
- *interazione con l'ambiente.*

Nel caso delle *indagini preliminari*, la loro finalità è quella di accertare l'idoneità generale del sito, confrontando se necessario anche siti alternativi. In tale indagine occorre valutare le modifiche che possono derivare dagli interventi proposti, individuare le cave di prestito e di deposito e programmare le indagini di progetto e di controllo in relazione al volume di terreno coinvolto dalla realizzazione della struttura. La programmazione delle indagini geotecniche rappresenta pertanto una fase progettuale non scindibile dal contesto dell'opera.

Successivamente alle indagini preliminari finalizzate all'accertamento dell'idoneità generale del sito ad accogliere l'opera, è necessario eseguire le *indagini di progetto e di controllo*, che devono essere mirate all'affidabile determinazione dei parametri significativi del comportamento meccanico dei terreni, anche in relazione alle problematiche poste dall'intervento e/o dall'opera da realizzare.

Le fasi di progetto e di controllo possono sovrapporsi alla precedente fase d'indagine in relazione a specifiche esigenze della progettazione. Tali parametri devono riguardare i seguenti possibili aspetti:

- *successione stratigrafia;*
- *caratteristiche di resistenza dei terreni;*
- *caratteristiche di deformabilità;*
- *caratteristiche di consolidazione;*
- *caratterizzazione dinamica;*
- *stato tensionale a riposo e storia dello stato tensionale;*
- *caratteristiche di permeabilità;*
- *distribuzione delle pressioni interstiziali;*
- *fenomeni di instabilità dei terreni;*
- *problemi di addensamento dei terreni;*
- *effetti dell'aggressività dei terreni e delle acque sotterranee;*
- *presenza di cavità;*
- *stato di degradazione della roccia, dei terreni e dei materiali di riporto;*
- *presenza di faglie, giunti e altre discontinuità;*
- *terreni soggetti a fenomeni di creep;*
- *terreni e rocce rigonfianti o collassabili;*
- *presenza di materiali di discarica o di riporto.*

Per definire le caratteristiche geotecniche del sottosuolo si deve ricorrere ad una opportuna combinazione di metodi di indagine che comprendano prove in sito e di laboratorio, fino a profondità oltre le quali la natura dei terreni non avrà influenza, in maniera sostanziale, sul comportamento della struttura e/o, viceversa, fino alla profondità alla quale non si risente della presenza della sovrastruttura.

3. Fasi della Caratterizzazione Geotecnica

3.1 Prove in Sito

Le prove in sito hanno il grande vantaggio di esaminare l'ammasso nel proprio stato indisturbato, rispettando quindi lo stato tensionale iniziale, la storia tensionale ed il regime delle pressioni neutre (Figura 2). Un secondo vantaggio è quello di consentire prove meccaniche anche sui terreni incoerenti per i quali, data la difficoltà di prelievo, non è possibile condurre una caratterizzazione geotecnica in laboratorio su campioni rappresentativi dello stato indisturbato.

Con le prove in sito si possono eseguire misure dirette ed indirette. Le misure dirette discendono da condizioni sperimentali strettamente pertinenti alla determinazione del parametro ricercato, viceversa con le misure indirette si fa riferimento a condizioni sperimentali non necessariamente finalizzate alla misura del parametro ricercato; in questo caso ci si avvale di correlazioni empiriche, opportunamente calibrate, per derivare il parametro di interesse dai risultati della prova.

Dato il notevole numero di variabili che condiziona i risultati delle prove in sito, si fa riferimento a procedure standardizzate in modo da garantire l'omogeneità dei risultati in relazione alla diversa natura dei terreni ed alle condizioni tensionali presenti alle profondità di prova.

La principale limitazione delle prove in sito, risiede nell'indeterminatezza delle condizioni al contorno e di drenaggio, la cui influenza non può essere conosciuta con precisione. Anche inevitabili effetti di disturbo, associati alle operazioni d'installazione e d'avanzamento dello strumento nella formazione, possono influire sui risultati: in qualche caso tale processo di interazione costituisce parte integrante della prova stessa.

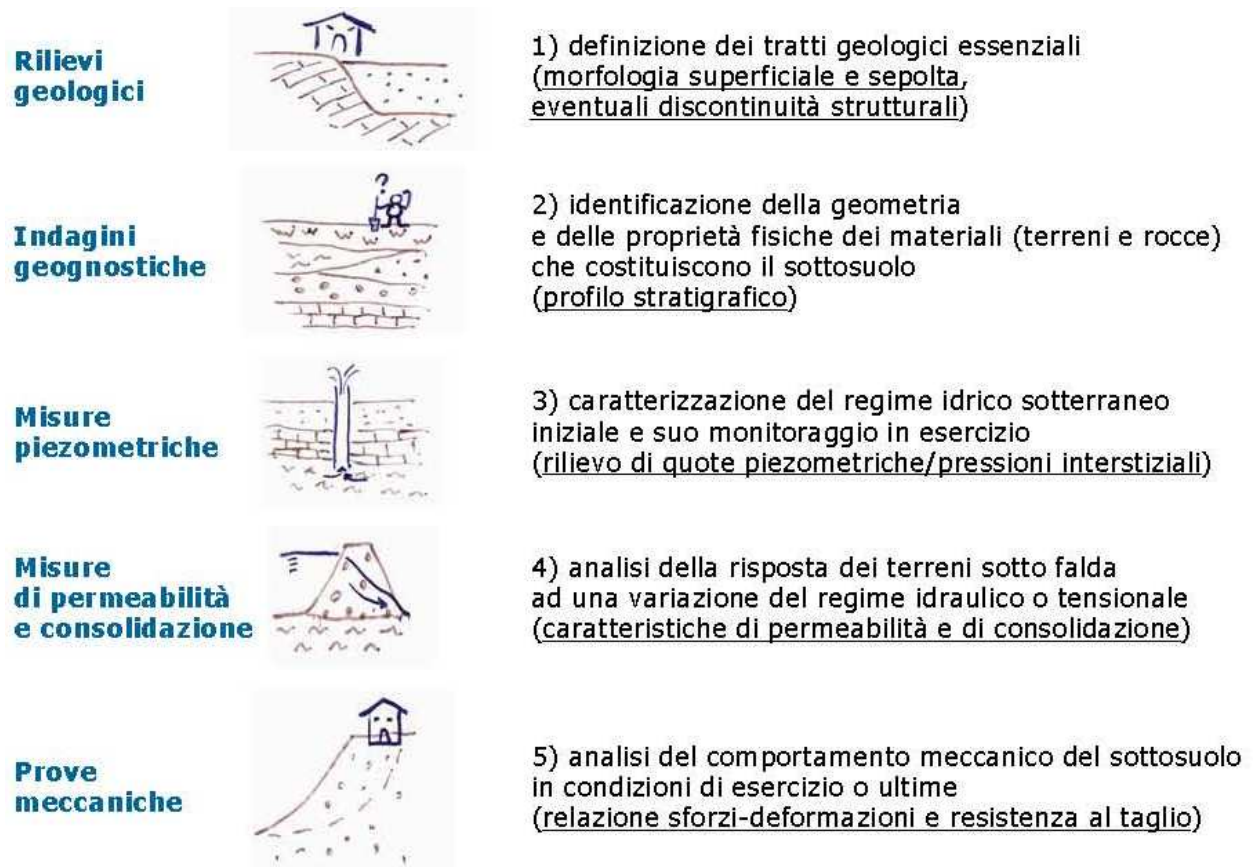


Figura 2. Fasi della caratterizzazione geotecnica.

3.1.1 Profilo Stratigrafico e Geotecnico

Per *profilo stratigrafico* s'intende la rappresentazione della successione dei terreni, identificati nell'ambito delle classificazioni geotecniche, attraversati dai mezzi di indagine (scavi o perforazioni di sondaggio) o osservabili su fronti naturali. Sul profilo stratigrafico sono riportati i dati obiettivi che si possono rilevare in cantiere mediante l'osservazione diretta o mediante prove semplici. Esso differisce dal *profilo geotecnico*, che è invece la rappresentazione sintetica di tutte le informazioni provenienti dalle indagini condotte in sito ed in laboratorio. Il profilo geotecnico implica l'elaborazione e l'interpretazione quantitativa di tutte le informazioni relative ai terreni investigati e rappresenta, quindi, la sintesi di tutti i dati geotecnici.

I profili stratigrafici possono essere determinati per via indiretta anche attraverso indagini continue di tipo sismico, penetrometrico e dilatometrico. I metodi sismici forniscono la distribuzione delle velocità delle onde elastiche nel terreno e possono fare riferimento ad onde dirette, riflesse o rifratte a seconda del metodo utilizzato.

Nei metodi indiretti i risultati delle misure sono influenzati dal livello tensionale corrente e dalla storia tensionale pregressa propri del deposito; la definizione della natura dei terreni può quindi presentare qualche incertezza in quanto le misure riflettono fundamentalmente alcune proprietà meccaniche dei terreni piuttosto che la loro composizione granulometrica. Per evitare errori di interpretazione è consigliabile pertanto associare sempre alle prove indirette almeno un sondaggio stratigrafico.

3.1.2 Resistenza al Taglio

La resistenza al taglio può essere valutata in sito con i metodi penetrometrici, dilatometrici, pressiometrici e scissometrici.

Le prove penetrometriche fanno uso di strumenti standardizzati e misurano la resistenza alla penetrazione con il progredire della profondità di prova. A seconda dei dispositivi utilizzati si dividono in prove statiche (avanzamento a pressione) e prove dinamiche (avanzamento a percussione). Le prove statiche vengono eseguite con successo sia nei terreni granulari che in quelli coesivi, mentre le prove dinamiche sono da preferirsi nei terreni granulari il cui comportamento meccanico, prevalentemente drenato, non risente eccessivamente delle modalità di applicazione del carico.

Le prove *penetrometriche dinamiche* si suddividono in continue e discontinue: le prove continue vengono eseguite infiggendo una punta conica con una prefissata energia associata al dispositivo di percussione; tali prove hanno il vantaggio di essere eseguite su terreno indisturbato, di fornire dati sulla resistenza penetrometrica con continuità e di consentire un più agevole avanzamento nelle formazioni sabbiose-ghiaiose dense. Tra gli svantaggi ricordiamo l'impossibilità di prelevare o identificare direttamente il terreno, e soprattutto la scarsa diffusione di tali prove nella pratica professionale, circostanza che ne ha determinato il declino.

Le prove *penetrometriche dinamiche* di tipo discontinuo vengono realizzate in foro di sondaggio e consistono nell'infissione a percussione di un carotiere a punta aperta o chiusa. Le modalità di infissione sono standardizzate e la prova è conosciuta col nome di *Standard Penetration Test (SPT)*. Con tale prova è anche possibile il prelievo del terreno su cui è stata condotta la prova e quindi l'identificazione visiva, ma i risultati possono essere influenzati dal disturbo tensionale e meccanico sperimentato dal terreno durante la fase di perforazione del foro di sondaggio. Il reale vantaggio della prova è quello della grande diffusione nella pratica professionale e quindi della possibilità di avvalersi di correlazioni empiriche calibrate nel tempo da numerosi ricercatori. La prova può essere eseguita con successo solo nei terreni con una

predominante frazione grossa; viceversa all'aumentare della frazione fine l'effetto delle sovrappressioni neutre determina una dispersione dei dati e la prova diviene poco significativa.

La *prova scissometrica* consente di determinare direttamente la resistenza al taglio dei terreni coesivi in termini di coesione non drenata. La prova consiste nella misura del momento torcente necessario a produrre la rottura del terreno lungo una superficie cilindrica di taglio, creata dalla rotazione di un utensile formato da quattro alette verticali di uguali dimensioni, disposte a croce. La prova viene effettuata in foro di sondaggio, circostanza questa che può influire sulla qualità dei risultati. Oggi sono disponibili apparecchiature scissometriche che consentono l'autoperforazione e quindi l'infissione continua dello strumento, ovviamente per tratte di limitata estensione. Il risultato della prova è espresso in termini di momento torcente che produce la rottura del terreno; dall'equilibrio alla rotazione delle palette attorno al proprio asse si deduce la resistenza al taglio non drenata.

Il *metodo pressiométrico* consiste essenzialmente nella misura delle deformazioni radiali indotte da una sonda cilindrica dilatabile entro una sezione di foro di sondaggio; la pressione viene incrementata fino alla pressione limite di rottura p_l del terreno. Il metodo è applicabile sia ai terreni coesivi che a quelli granulari, ma anche alle rocce tenere. Esistono due categorie principali di pressimetri: il *pressimetro Menard* ed il *pressimetro autoperforante*: con il *pressimetro Menard* la prova viene eseguita in foro di sondaggio e la sonda è composta da tre celle separate, una centrale per la misura e due laterali di guardia. Il *pressimetro autoperforante* consente l'autoperforazione e quindi il continuo avanzamento dello strumento nella formazione indisturbata, ovviamente per tratte di limitata estensione. La deduzione della resistenza al taglio del terreno viene effettuata facendo ricorso alla teoria dell'espansione di una cavità cilindrica in un mezzo omogeneo.

La *prova dilatometrica*, infine, si avvale di una speciale punta piatta, il *dilatometro Marchetti (DMT)*, che viene infisso a pressione nel terreno; la punta è dotata di una membrana piana circolare alloggiata su di una delle due facce. Ad intervalli regolari si arresta la penetrazione e si effettua la prova di dilatazione inviando gas in pressione alla membrana. Si effettuano due misure di pressione: la pressione P_0 necessaria a determinare il distacco del centro della membrana dalla sede e la pressione P_1 corrispondente ad uno spostamento prefissato di 1.1 mm del centro della membrana. Con questo strumento è possibile fornire valori empirici della resistenza al taglio non drenata c_u dei terreni.

3.1.3 Deformabilità

La deformabilità dei terreni viene investigata in sito con diverse prove in grado di mobilitare bassi o elevati livelli di deformazione; ambedue le possibilità interessano molteplici aspetti della risposta dinamica dei terreni e delle fondazioni, nonché i problemi di interazione terreno-struttura.

Con riferimento alle basse deformazioni si utilizzano tecniche di indagine di tipo sismico con la misura della velocità di propagazione delle onde di compressione (*o primae*) V_p , di taglio (*o secundae*) V_s e di *Rayleigh* nel terreno. Successivamente si correlano tali velocità ai parametri di deformabilità attraverso l'ausilio della teoria dell'elasticità. In particolare essendo la velocità delle onde di compressione fortemente dipendente dal grado di saturazione del terreno, si è andata sempre più affermando la tendenza di misurare prevalentemente solo la velocità delle onde trasversali e di *Rayleigh*. La velocità delle onde trasversali viene rilevata con le tecniche *Cross-Hole* e *Down-Hole* che consistono in una serie di misure dirette tra una sorgente ed un ricevitore dei quali è nota la distanza relativa.

Con la tecnica *Cross-Hole* le misure avvengono tra due fori di sondaggio entro cui vengono alloggiati sia il sistema di generazione che quello di ricezione delle onde elastiche, diversamente con la tecnica *Down-Hole* la sorgente è ubicata sul piano campagna e la ricezione avviene entro un foro di sondaggio. Ambedue le tecniche di misura mobilitano livelli di deformazione omogenei, caratteristici del comportamento lineare del terreno; in aggiunta la tecnica *Cross-Hole* fornisce misure locali non influenzate dalle condizioni al contorno.

La misura delle *onde di Rayleigh* avviene attraverso l'eccitazione stazionaria di una fondazione superficiale o attraverso l'analisi spettrale delle onde di superficie generate da un carico impulsivo applicato sempre sul piano campagna. In ambedue i casi occorre prevedere dei punti di misura in grado di rilevare gli spostamenti del piano campagna durante la sollecitazione dinamica. Nonostante la più spiccata economicità, le tecniche che si avvalgono della misura della velocità delle *onde di Rayleigh* devono essere considerate di tipo indiretto, basate sulla risposta dinamica globale dell'ammasso e quindi influenzate dalla eterogeneità del deposito.

Si ritiene infine utile ricordare, come i parametri di deformabilità dei terreni dipendano, oltreché dal livello della tensione corrente e dalla storia tensionale pregressa propri del deposito, anche dal livello di deformazione e dal percorso di sollecitazione caratteristici del tipo di prova che si esegue. Bisogna ancora includere gli effetti di disturbo meccanico associati alla esecuzione della prova, che sono ancora più influenti sui parametri di deformabilità che non su quelli di resistenza al taglio.

Gli approcci di tipo empirico consistono nel correlare i parametri di deformabilità del terreno ai risultati di prove non finalizzate a questo scopo. In tale ambito si sottolineano le relazioni sperimentali che correlano il modulo elastico del terreno al numero di colpi della prova *penetrometrica dinamica (SPT)*, il modulo drenato dei terreni granulari alla resistenza di punta delle *prova penetrometrica statica (CPT)*, ed al modulo dilatometrico della prova con il *dilatometro Marchetti (DMT)*.

La determinazione dei parametri di consolidazione dei depositi di terreno caratterizzati da una rilevante porzione fine può essere condotta con diverse procedure a secondo che interessi esaminare principalmente la compressibilità, primaria e secondaria, o il decorso della consolidazione nel tempo. La compressibilità può essere valutata direttamente con prove drenate in foro di sondaggio, quali le prove pressiometriche, oppure indirettamente attraverso la prova con il *dilatometro Marchetti*. In quest'ultimo caso si correla il modulo edometrico E_{ed} all'indice dilatometrico I_d , al modulo dilatometrico E_d e all'indice delle tensioni orizzontali K_d .

La valutazione dello stato tensionale iniziale e la storia tensionale pregressa di un deposito costituiscono un proposito molto impegnativo nell'ambito della caratterizzazione geotecnica di un deposito. La misura della tensione orizzontale a riposo è fortemente condizionata dal disturbo associato all'installazione della sonda e quindi dalle deformazioni indotte nel terreno durante le misure. La storia tensionale, oltre ad influenzare lo stato tensionale iniziale, ha effetti sia sulla resistenza al taglio che sulla deformabilità dei terreni: questa circostanza richiede l'esame congiunto dei risultati di diverse tecniche di indagini in sito con i risultati di prove di laboratorio.

Approcci diretti per la valutazione in sito del grado di sovraconsolidazione (*OCR*) possono fare riferimento ai valori della tensione orizzontale effettiva misurati con il *pressiometro autoporforante* o con il *pressiometro Menard*. Valutazioni indirette possono essere effettuate con il *dilatometro Marchetti* o con il *piezocono*. Con riferimento alle prove con *piezocono*, numerosi studiosi hanno mostrato come il valore di *OCR* sia correlabile alle misure di ΔU e di q_c : i limi e le argille normalconsolidate tendono a sviluppare elevate sovrappressioni neutre e basse

resistenze alla penetrazione; il discorso si inverte nel caso dei limi e delle argille sovraconsolidate che sviluppano sovrappressioni neutre modeste, se non addirittura negative, e resistenze alla penetrazione più elevate.

3.2 Pressioni Interstiziali e Permeabilità

Lo studio della distribuzione delle *pressioni interstiziali* costituisce un proposito di notevole importanza nella caratterizzazione geotecnica dei depositi interessati dalla presenza di falde acquifere. In virtù del principio delle tensioni efficaci, enunciato dal Terzaghi nel 1923, il comportamento meccanico dei terreni è fondamentalmente riconducibile al ruolo svolto dalle tensioni efficaci: queste come noto si evincono dalle tensioni totali σ detraendo la pressione dell'acqua u secondo l'espressione $\sigma' = (\sigma - u)$.

L'espressione che traduce il principio delle tensioni efficaci ha validità del tutto generale, sia nell'ambito di condizioni transitorie che stazionarie; gli strumenti con i quali si esegue la misura in sito della pressione interstiziale vengono denominati *piezometri*, ed in base al loro tempo di risposta possono risultare più o meno idonei al tipo di formazione in cui vengono installati o alla misura di condizioni idrauliche variabili nel tempo. Il tipo più semplice è il *piezometro a tubo aperto*, costituito da un tubo dotato di un tratto sfinestrato all'interno del quale sia possibile inserire una *sondina galvanometrica* per la misura del livello dell'acqua. Considerato il volume di acqua che deve fluire all'interno del tubo, in presenza di una causa perturbatrice delle condizioni di equilibrio, questo tipo di piezometro si rivela adatto per i terreni a grana grossa caratterizzati da elevata permeabilità.

Per ottenere una risposta più rapida in terreni meno permeabili si utilizza il *piezometro tipo Casagrande* dotato di pietra porosa nella porzione di misura a contatto con il terreno. Per ottenere tempi di risposta più ridotti è necessario ricorrere a piezometri pneumatici a circuito chiuso o addirittura a *celle piezometriche* molto rigide nelle quali l'elemento di misura è costituito da una membrana attrezzata con estensimetri elettrici a variazione di resistenza. Alla prontezza di risposta delle celle piezometriche fa contrasto una non sempre buona affidabilità legata alle variazioni dei parametri di taratura dello strumento per prolungati tempi di utilizzo.

La misura della pressione idrostatica può essere eseguita anche durante le prove con *dilatometro Marchetti*; nel caso in cui la prova interessi terreni coesivi, la misura della pressione idrostatica richiede tempi adeguati alla completa dissipazione delle sovrappressioni neutre indotte dalla penetrazione non drenata all'interno della formazione.

La determinazione delle *caratteristiche di permeabilità* dei depositi di terreno sciolto trova applicazione in tutti quei problemi legati agli abbassamenti di falda o ai moti di filtrazione in generale. Questo aspetto della caratterizzazione geotecnica in sito è documentato da una letteratura molto vasta, giustificata dal fatto che lo studio dei moti di filtrazione nel terreno ha tradizioni più antiche, riguarda problemi di moto sia stazionario che transitorio e può interessare condizioni al contorno molto diversificate tra loro.

Per la valutazione in sito del coefficiente di permeabilità la prova di pompaggio con controllo piezometrico costituisce la tecnica di misura diretta più appropriata, poiché consente di valutare la permeabilità per un volume di terreno molto ampio ed in condizioni praticamente indisturbate. Ha lo svantaggio di essere onerosa e praticabile solo in terreni permeabili. Si possiedono soluzioni relative ad acquiferi confinati e non confinati, in regime stazionario o transitorio. Le prove in regime stazionario sono di più semplice interpretazione ma richiedono in genere tempi lunghi di pompaggio.

Le prove sono condotte durante l'esecuzione di fori di sondaggio, predisponendo nella parte

terminale del foro un'opportuna sezione filtrante ed imponendo un dislivello piezometrico tra il fluido immesso nel foro e la falda esterna. La prova può essere eseguita a carico costante, ossia misurando la portata d'acqua necessaria a mantenere costante il dislivello piezometrico, oppure a carico variabile, ossia misurando l'intervallo di tempo Δt necessario alla variazione Δh del carico idraulico rispetto ad una condizione iniziale di riferimento. La portata Q immessa o estratta viene misurata attraverso la variazione del livello d'acqua oppure tramite un contatore. Tale portata è legata ad un coefficiente di ingresso F , avente le dimensioni di una lunghezza, dipendente dalla forma e dalle dimensioni della sezione filtrante.

Le prove di permeabilità in foro di sondaggio sono molto semplici ed economiche e possono essere eseguite in terreni con permeabilità medio bassa. Di contro sono prove puntuali ed in quanto tali sono poco rappresentative delle caratteristiche di permeabilità dell'ammasso nel suo insieme. Nel caso di terreni coesivi con permeabilità molto bassa, si possono eseguire prove a carico costante o variabile attraverso piezometri già installati o infissi direttamente dal piano campagna o dal fondo di un foro di sondaggio. Le prove a carico costante sono da preferirsi poiché, se protratte per un tempo sufficientemente lungo, offrono la possibilità di prescindere dal processo di consolidazione associato alla variazione delle tensioni effettive. Per una trattazione più esauriente sull'argomento si rimanda a trattati specialistici.

3.3 Prove di Laboratorio

Le prove di laboratorio si suddividono in prove di classificazione e prove per la valutazione delle proprietà meccaniche (Figura 3). Le prove di classificazione sono finalizzate alla determinazione di parametri indice e di parametri fisici e per *terreni sciolti* essi possono così essere elencati:

- *distribuzione granulometrica;*
- *forma dei grani;*
- *scabrezza superficiale dei grani;*
- *densità relativa;*
- *peso dell'unità di volume;*
- *contenuto naturale d'acqua;*
- *limiti di Atterberg;*
- *contenuto di carbonati e di sostanze organiche.*

Nel caso di *rocce* tali parametri possono così essere elencati:

- *composizione mineralogica,*
- *costituzione petrografica;*
- *contenuto d'acqua;*
- *peso dell'unità di volume;*
- *porosità;*
- *velocità di propagazione del suono;*
- *assorbimento rapido di acqua;*
- *rigonfiamento;*
- *indice di durezza;*
- *resistenza a compressione monoassiale.*

Quest'ultima può essere determinata con prove di compressione uniassiale, ma anche con procedure più semplici, come la prova di carico puntuale (*point load test*).

Con riferimento ai parametri meccanici del terreno, le prove di laboratorio consentono di determinare la resistenza in condizioni drenate e non drenate a seconda della velocità di carico e

Finalità	Mezzi di indagine	
Profilo stratigrafico	Diretti	<ul style="list-style-type: none"> • Scavi accessibili (pozzi, trincee, cunicoli) • Fori di sondaggio
	Indiretti	<ul style="list-style-type: none"> • Prove geofisiche
Proprietà fisico-meccaniche	In laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> • Compressione triassiale
		<ul style="list-style-type: none"> • Taglio diretto
		<ul style="list-style-type: none"> • Compressione edometrica
	In sito	<ul style="list-style-type: none"> • Penetrometriche statiche e dinamiche
<ul style="list-style-type: none"> • Pressiometriche, Dilatometriche, Scissometriche • Geofisiche 		
Misura pressione interstiziale	<ul style="list-style-type: none"> • Piezometri 	
Permeabilità	<ul style="list-style-type: none"> • Prove di emungimento 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Prove di immissione 	

Figura 3. Tipi d'indagini geotecniche e finalità.

delle condizioni di drenaggio imposte. In tal modo è possibile caratterizzare in maniera più appropriata i parametri di resistenza meccanica c' e ϕ' , o c_u in condizioni non drenate. In tale ambito trovano larga diffusione le prove triassiali di tipo non-consolidate non-drenate ($U-U$), le consolidate non-drenate ($C-U$) e le prove consolidate drenate ($C-D$). Tali prove possono essere condotte su provini di piccolo o di grande diametro, a seconda della rappresentatività che si vuole garantire in relazione alla macrostruttura del terreno. Tali prove possono risultare di notevole interesse anche per i terreni costipati o stabilizzati artificialmente.

Le prove triassiali consentono di investigare l'influenza del percorso tensionale sui parametri di resistenza e di deformabilità, essendo possibile realizzare prove di compressione e di estensione per carico o scarico. Lo studio della resistenza al taglio in condizioni di stato critico (assenza di variazioni volumetriche) può essere condotto anche attraverso prove di taglio diretto con l'apparecchio di Casagrande; è possibile in questo caso realizzare importanti scorrimenti su prefissate superfici di rottura. Lo studio delle caratteristiche di resistenza in condizioni residue può essere condotto attraverso l'impiego dell'apparecchio di taglio anulare. Quest'ultima tipologia di prova riveste grande interesse per lo studio dei movimenti franosi riattivatisi lungo preesistenti superfici di scorrimento; è noto come la presenza di superfici di discontinuità, su cui sono avvenuti rilevanti scorrimenti, comportino minimi valori di resistenza per l'effetto di orientazione delle particelle coesive.

Per quanto riguarda *le rocce* bisogna prestare particolare attenzione al comportamento ai piani di stratificazione ed ai giunti, che influenzano sensibilmente il comportamento dell'ammasso roccioso. Per i giunti si devono prendere in considerazione le seguenti caratteristiche:

- *spaziatura;*
- *orientazione;*
- *apertura;*
- *continuità;*
- *scabrezza;*
- *materiali di riempimento.*

La qualità della roccia può essere quantificata attraverso un *indice di qualità RQD*, che rappresenta ai fini ingegneristici un indicatore del comportamento meccanico dell'ammasso roccioso.

Per quanto riguarda le *caratteristiche di deformabilità* bisogna considerare i seguenti fattori:

- *condizioni di drenaggio;*
- *livello della tensione effettiva media;*
- *livello di deformazione imposta;*
- *la storia tensionale e deformativa.*

Altri fattori che possono influenzare il valore dei moduli di deformazione del terreno sono:

- *direzione della sollecitazione rispetto a quella della tensione principale di consolidazione;*
- *effetti del tempo e della velocità di deformazione;*
- *dimensioni del campione in rapporto alla granulometria ed alle caratteristiche macro-strutturali del terreno.*

Infine, con riferimento alla consolidazione ed alla compressibilità dei terreni coesivi, si possono impiegare prove di tipo edometrico, come ad esempio quelle ad incrementi di carico mantenuti, a velocità di deformazione controllata, a gradiente idraulico controllato ed a velocità di carico controllata.

Spesso nella pratica professionale si assume per semplicità una relazione sforzi-deformazioni di tipo lineare, tuttavia bisogna considerare l'eventualità che il comportamento del terreno possa essere significativamente non lineare ed isteretico. Lo studio di tali proprietà può essere condotto con apparecchiature di tipo ciclico quali il triassiale ciclico e l'apparecchio di taglio semplice ciclico. Inoltre, tra gli ulteriori sviluppi delle attrezzature per le prove di laboratorio bisogna annoverare le prove triassiali con misura della deformazione locale (Figura 4) e le prove dinamiche per la determinazione delle proprietà elastiche iniziali del terreno e la loro evoluzione con il livello di deformazione (Figura 5). Queste ultime proprietà trovano impiego nel progetto di costruzioni antisismiche, come indicato nell'NTC2008, o per quelle problematiche geotecniche che coinvolgano livelli di deformazione lontani dalla rottura e quindi adatti anche per la verifica dello stato limite di servizio.

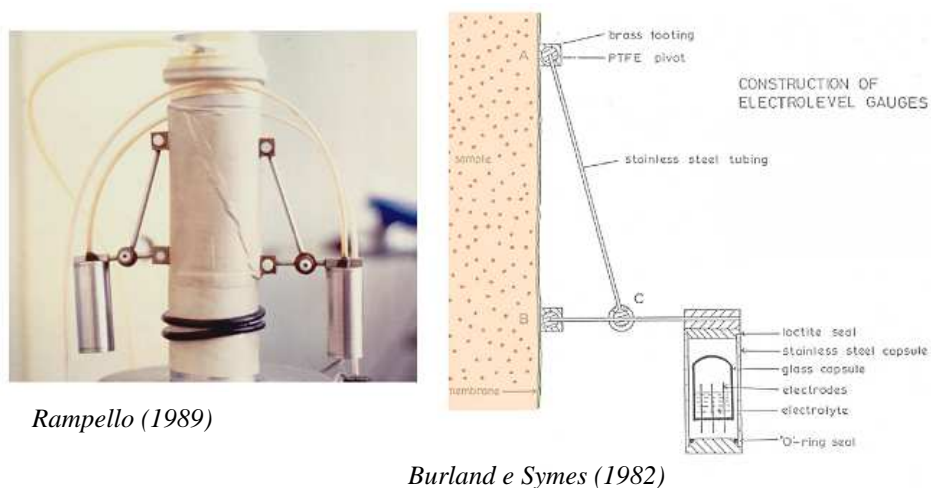


Figura 4. Misure locali di deformazione.

4. Monitoraggio

Oltre alle indagini geognostiche e geotecniche, alle prove in situ e di laboratorio finalizzate alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo assunto per il dimensionamento delle soluzioni progettuali proposte, devono essere eseguiti ulteriori controlli durante e dopo la realizzazione dei lavori, al fine di verificare le ipotesi di progetto, la funzionalità delle opere e con-



(a)



(b)

Figura 5. Attrezzature per prove dinamiche di laboratorio: a) triassiale ciclico e b) colonna risonante.

trollare il decorso nel tempo di cedimenti, spostamenti, tensioni e pressioni interstiziali. In tal modo è possibile verificare la rispondenza delle condizioni del sito alle ipotesi di calcolo assunte, la conformità dei manufatti alle indicazioni del progetto, il rispetto della sequenza dei lavori e la qualità dei materiali impiegati. Al fine di garantire la sicurezza e la qualità delle opere saranno pertanto programmate le seguenti attività di controllo:

- *supervisione del processo di costruzione;*
- *controllo del comportamento delle strutture durante e dopo la costruzione;*
- *manutenzione delle opere.*

Saranno preventivamente stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno, verificando che le soluzioni prescelte siano accettabili in rapporto a tali limiti. In particolare, con l'attività di monitoraggio si dovrà accertare che i valori delle grandezze misurate siano compatibili con i requisiti di sicurezza e funzionalità del singolo manufatto e di quelli contigui.

Gli spostamenti di punti significativi del terreno e le deformazioni negli elementi strutturali saranno misurati con strumenti adeguati, in relazione alla entità degli spostamenti, alla loro direzione, all'accessibilità dei punti di misura, al loro numero, alla scansione delle misure ed alla durata. Ad esempio se occorre monitorare con continuità punti inaccessibili quali gli spostamenti orizzontali profondi di un pendio in movimento è più appropriato fare uso di un *inclinometro*, in grado di fornire dati di spostamento con continuità. Analogo discorso nel caso dei movimenti verticali profondi di un deposito soggetto a fenomeni di subsidenza dove si possono impiegare *assestimetri* a molte basi di tipo recuperabile. Per il controllo degli spostamenti di opere relativamente accessibili può risultare più appropriato fare riferimento a metodi ottici, *comparatori* ed *assestimetri a piastra*.

Il controllo delle tensioni di contatto e delle azioni in generale potrà avvenire attraverso l'impiego di celle di pressione o di carico, mentre il controllo delle pressioni interstiziali attraverso l'utilizzo di piezometri di tipo idraulico, pneumatico o elettrico. Infine il controllo della integrità dei manufatti può essere eseguito con l'ausilio di *carotaggi meccanici*, *sonici* o con tecniche vibrazionali.

Resta inteso come i problemi di monitoraggio richiedano una notevole perizia nella scelta degli strumenti più idonei da utilizzare; questi infatti richiedono frequenti operazioni di taratura e possono risultare soggetti a mortalità, tanto maggiore quanto più delicato è lo strumento.

5. Considerazioni Conclusive

Una delle maggiori sfide dell'Ingegneria Civile nel terzo millennio è la mitigazione dei rischi naturali, ed a questa sfida un notevole contributo può essere apportato dalla Ingegneria Geotecnica. In generale i fenomeni naturali che possono divenire fonte di potenziale rischio si dividono in due categorie principali rispetto ai meccanismi genetici scatenanti: fenomeni di origine endogena (terremoti, eruzioni vulcaniche, ecc.), correlati a dinamiche interne alla Terra e quelli di origine esogena (alluvioni, frane, valanghe, ecc.), che avvengono sulla sua superficie. La prevenzione dei rischi naturali è strettamente connessa ad una pianificazione territoriale compatibile con l'assetto geologico e geomorfologico del territorio, con le condizioni di sismicità e con un'adeguata conoscenza del sottosuolo.

In questo contesto, le ricerche nel campo dell'Ingegneria Geotecnica sono indirizzate principalmente verso due settori: il primo, più tradizionale, è rivolto alla modellazione del comportamento della singola opera di ingegneria geotecnica (fondazioni, opere di sostegno, rilevati, dighe in terra, ecc.) e/o strutturale (edifici, ponti, torri, monumenti, ecc.), il secondo riguarda gli aspetti territoriali. Quest'ultimo settore è più marcatamente interdisciplinare rispetto al precedente, poiché in questo caso l'Ingegneria Geotecnica deve interagire con la Sismologia, con la Geologia, con l'Ingegneria Idraulica e Strutturale. L'obiettivo comune è quello di individuare le azioni che interessano il territorio sul quale sono ubicate le strutture e le infrastrutture, valutarne l'entità e mitigarne gli effetti.

Le conseguenze di alcuni recenti terremoti (L'Aquila, 2009) ed eventi alluvionali (Giampigliari, 2009; Genova, 2011; Barcellona Pozzo di Gotto, 2011), dimostrano tuttavia che questa sfida è ancora lontana dall'essere vinta. Infatti, nonostante il progredire delle conoscenze tecniche e scientifiche, le vittime ed i danni causati da eventi naturali hanno subito nell'ultimo periodo un notevole incremento, anche a causa della forte antropizzazione del territorio.

Vari fattori possono e devono concorrere al raggiungimento dell'obiettivo comune della salvaguardia della vita umana: certamente prioritaria è l'attività di prevenzione attraverso corrette politiche di pianificazione territoriale. Tuttavia non possono essere considerate secondarie, l'interdisciplinarietà dell'approccio con cui va affrontato lo studio di queste problematiche e la qualificazione dei tecnici preposti alla gestione del territorio.

In un territorio ad elevato rischio sismico ed idrogeologico, quale quello siciliano, con un tessuto urbano caratterizzato da elevati livelli di vulnerabilità e con un terziario prevalentemente rivolto all'industria delle costruzioni residenziali, l'implementazione dei risultati della ricerca scientifica, in termini di zonazione del rischio sismico e da frana, reti locali di monitoraggio e sistemi di sicurezza, può consentire la promozione di adeguate politiche di prevenzione e mitigazione degli effetti dei fenomeni naturali.

Per la riduzione dei rischi è tuttavia necessario lo sviluppo di attività sperimentali innovative che consentano l'approfondimento delle conoscenze nel campo della valutazione della pericolosità geotecnica dei siti e della vulnerabilità delle infrastrutture e delle strutture e civili ed industriali.

In passato lo studio di tali problematiche si è spesso limitato alla caratterizzazione geotecnica dei siti ed all'analisi di fenomeni quali, ad esempio, la subsidenza o l'amplificazione sismica locale, senza pervenire a concreti suggerimenti circa la possibilità di intervenire sul terreno per garantire la salvaguardia delle strutture. Di contro, le proposte d'intervento di tipo strutturale risultano a volte disgiunte dalla caratterizzazione geotecnica dei siti, dalla modellazione geotecnica del sottosuolo e dai possibili interventi per il miglioramento delle fondazioni degli edifici. Per superare i limiti di questi approcci è necessario approfondire l'analisi geotecnica

dei fenomeni che riguardano il sottosuolo, al fine di valutare l'influenza che questi esercitano sulla vulnerabilità delle strutture ed infrastrutture che ricadono in superficie.

Queste finalità possono essere conseguite mediante sperimentazioni innovative nel campo della modellazione del comportamento dei terreni e con una maggiore conoscenza del territorio, con l'ausilio delle moderne *smart technology* che consentono l'acquisizione, la gestione e la condivisione di informazioni complesse, quali le osservazioni dirette mediante tecnologie di sensing da remoto e sul campo e basi di dati relative alla reale esistenza e consistenza dei livelli di pericolosità dei fenomeni naturali, oltre che di vulnerabilità delle risorse esposte nelle aree urbanizzate.