

POLITECNICO DI TORINO



Corso :

INDAGINI E CONTROLLI GEOTECNICI

Prof. Otello Del Greco Politecnico di Torino

Tema:

**INDAGINI E CONTROLLI GEOTECNICI PER IL PROGETTO E
LA COSTRUZIONE DI GALLERIE IN AMBIENTE URBANO**

Prof. Gianfranco Perri Universidad Central di Caracas

a.a. 1999-2000

SINTESI CURRICULARE DEL PROF. GIANFRANCO PERRI

Gianfranco Perri é nato a Bríndisi, il 21/09/51 ed ha completato i suoi studi nel "Politecnico di Torino" ottenendo la laurea in "Ingeniería Minera" con lode il 25/10/74.

É stato assistente di "Principi di Geomeccanica" nel Politecnico de Torino (1974-75) e professore di "Meccanica delle Rocce" e di "Geotecnica" nella Escuela Superior Politécnica del Litoral di Guayaquil-Ecuador (1975-78). Durante la sua permanenza in Ecuador, ha anche esercitato la cattedra di "Geostatística" nella Universidad di Guayaquil e di "Geotecnica stradale" nell' Universidad Cattolica di Guayaquil. Dal 1978 é professore di "Progetto di gallerie" nell' Universidad Centrale del Venezuela in Caracas, dove ha anche rivestito la funzione di direttore del Dipartimento di ingegneria mineraria durante poco piú di sei anni.

Durante gli anni 1991 e 1992 é stato il presidente della "Societá venezuelana di meccanica delle terre ed ingeniería delle fondazioni", attuale Societá venezuelana di geotecnica.

In qualità di ingegnere consulente e progettista, ha sviluppato una ampia attività nelle distinte aree della geotecnica: Meccanica delle terre e delle Rocce, Ingeniería delle fondazioni, Opere in terra e, specialmente, Ingeniería delle gallerie. Tra i piú recenti lavori in cui ha partecipato, ha progettato le gallerie urbane della Línea III e le gallerie extraurbane della Línea Las Adjuntas-Los Teques della Metropolitana di Caracas. Attualmente sta eseguendo il progetto geotecnico delle venti gallerie della línea ferroviaria Caracas-Tuy Medio ed é il responsabile geotecnico di tutte le opere civili previste in questi 40 Km di via ferrea. É consulente geotécnico per il progetto e per l'esecuzione delle Metropolitane delle città venezuelane di Valencia e Maracaibo. Partecipa nell'elaborazione del progetto esecutivo della Metropolitana Automatica di Torino.

INDAGINI E CONTROLLI GEOTECNICI PER IL PROGETTO E LA COSTRUZIONE DI GALLERIE IN AMBIENTE URBANO

Indice

INTRODUZIONE	pag. 1
Assestamenti indotti dalle gallerie	3
<i>Tunneling through gasoline contamination. The Caracas Metro experience</i>	
<i>Presencia de hidrocarburos en las lineas del Metro de Caracas</i>	
INDAGINI PROGETTUALI PER GALLERIE URBANE	40
Indagini geomorfologiche	41
<i>Limites y posibilidades de la exploración geotecnica en el caso de la falla del muro...</i>	
<i>Problemas constructivos en los anclajes de la estación Maternidad de la Linea 2 del..</i>	
<i>Aspectos geomorfologicos del trazado de la Linea II del Metro de Caracas</i>	
Indagini geoidrologiche	70
Misure piezometriche	
Misure di permeabilità	
<i>Fluctuación del nivel freatico a consecuencia de la construcción de la Linea I del ...</i>	
Indagini geotecniche	87
<i>Site exploration and quantification of significant properties of rock mass</i>	
Indagini geofisiche	99
MISURE E CONTROLLI PER GALLERIE URBANE	104
(in sotterraneo, dalla superficie, sulle strutture adiacenti, durante l'esercizio, etc.)	
Misure ottiche	105
Cataloghi	126

INDAGINI E CONTROLLI GEOTECNICI PER IL PROGETTO E LA COSTRUZIONE DI GALLERIE IN AMBIENTE URBANO

Prof. Gianfranco Perri

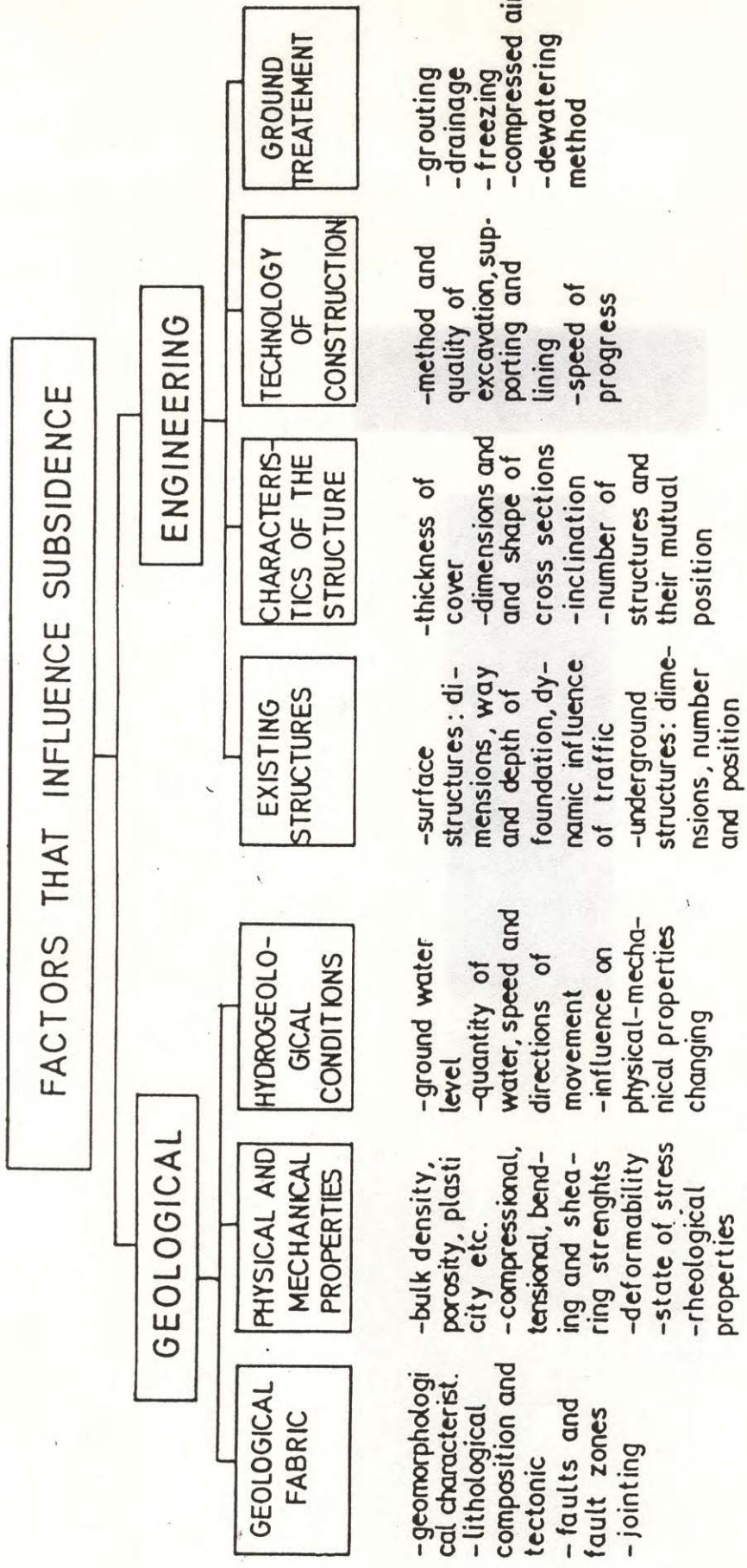
INTRODUZIONE

Dati per acquisiti i concetti, le problematiche, le motivazioni e le attività generali in materia di indagini, misure e controlli geotecnici, da eseguire prima, durante e dopo la realizzazione di un'opera eventualmente sotterranea, ci si chiede in questa sede quali siano per questi temi le peculiarità relative al caso in cui l'opera in oggetto sia una galleria che si sviluppi in un ambiente tipicamente urbano.

La risposta può certo essere inizialmente ricercata individuando da una parte, quali siano le peculiarità delle gallerie urbane in relazione alle non urbane e dall'altra, individuando quali siano le peculiarità dell'ambiente, o territorio, tipicamente urbano, segnalandone quindi le principali differenze in relazione agli altri territori ed ambienti tipicamente interessati da gallerie: minerarie, idroelettriche, autostradali, ferroviarie, etc.

Le gallerie urbane sono tipicamente "poco profonde", con coperture che vanno da 0 metri fino a poche (1,2, o 3) decine di metri. Le ragioni di questa caratteristica geometrica sono abbastanza ovvie: le gallerie urbane generalmente adempiono un servizio, di sottopasso, di trasporto, di drenaggio, di scolo, di immagazzinamento, etc., quasi sempre collegato sistematicamente e frequentemente (cioè con distanze corte tra un punto ed il seguente) con la superficie; si pensi per esempio alle metropolitane od alle fognature. In conseguenza, se si considera poi che le massime pendenze longitudinali delle gallerie, che sono in ogni caso limitate dalle operazioni proprie del servizio, non superano che pochi percento, il risultato è la inevitabile suddetta sub superficialità delle gallerie urbane.

I territori urbani sono tipicamente "congestionati" dalle strutture e dalle infrastrutture che sono non solo adagate appoggiate od attaccate alla superficie, ma anche e molto spesso alloggiate sotto la superficie: edificazioni, strade, ponti, acquedotti, serbatoi, drenaggi, fognature, linee elettriche ed elettroniche, etc.



Lokin Petar
 Pavlocic Nenad
 Bogdanovic Aleksandar

SURFACE SUBSIDENCE IN URBAN AREA DUE TO
 UNDERGROUND STRUCTURES CONSTRUCTION

A questo punto resta solo da ricordare che tutti i terreni sono, in minor o maggior grado dipendendo dalla loro natura meccanica, deformabili. Che lo scavo di una galleria sempre, in minor o maggior grado dipendendo dalla sua dimensione e forma dalla natura del terreno e dal processo costruttivo impiegato, induce al suo intorno una redistribuzione degli sforzi naturali preesistenti nel terreno con le conseguenti inevitabili deformazioni di questo. E che tali deformazioni inevitabilmente si propagano dal perimetro dello scavo in tutte le direzioni, incluse quelle che vanno verso la superficie potendola raggiungere, con maggiore o minore velocità ed intensità, in funzione della grandezza delle deformazioni iniziali, delle caratteristiche meccaniche del terreno e della "distanza" dal punto in cui le deformazioni si siano generate, in funzione cioè della profondità della galleria.

Però, si era appunto detto che le gallerie urbane sono poco profonde! Ed allora ecco qui qualche risposta alla domanda relativa alle peculiarità dei temi su indagini misurative e controlli geotecnici per gallerie urbane: si deve con assoluta enfasi indagare, misurare e controllare tutto ciò che abbia qualcosa a che vedere con le deformazioni del terreno intorno allo scavo, con quelle che si propagano nel sottosuolo e con quelle che raggiungono la superficie fino a quelle che possono interessare anche le sovrastrutture presenti sulla superficie.

Naturalmente ci sono altre peculiarità importanti e determinanti, come per esempio quelle relative più specificamente alle indagini geotecniche e che derivano dalla frequente immettizzazione superficiale delle aree urbane. Si tratta in effetti sempre di territori che sono stati intensamente ed a volte ripetutamente intervenuti e modificati anche radicalmente; interessando molte volte anche il sottosuolo ed in ogni caso occultando tracce ed indizi geomorfologici che in altre circostanze rappresenterebbero preziosi strumenti ausiliari, quando non addirittura principali, di diagnostico geotecnico.

Da un lato bisogna quindi aumentare e considerevolmente, ravvicinandoli opportunamente, i siti di esplorazione diretta e dall'altro bisogna necessariamente ricorrere all'uso di mezzi di indagine remota, come per esempio quelli offerti dallo studio di foto aeree, possibilmente anche corrispondenti a periodi anteriori e di preurbanizzazione del territorio.

Finalmente, si deve citare l'esistenza di altre e più eccezionali peculiarità geotecniche dell'ambiente urbano e tra queste, solo ad esempio: la presenza nel sottosuolo di idrocarburi, in prossimità delle stazioni di servizio; un elemento di forte preoccupazione e di conseguenze potenzialmente gravi.

Assestamenti indotti dalle gallerie

Naturalmente resta fuori dagli obiettivi qui preposti, l'affrontare in maniera esauriente la complessa problematica riguardante l'analisi, la stima ed il calcolo delle deformazioni che si producono intorno allo scavo e che si possono riflettere anche con assestamenti in superficie o che, con ogni probabilità, possono interessare strutture ed infrastrutture superficiali e subsuperficiali la cui sicurezza ed agibilità devono essere preservate e mantenendo dentro i prestabiliti limiti di accettabilità, gli assestamenti totali e soprattutto, quelli differenziali.

Nonostante, è però importante richiamare quelle nozioni, quei concetti e quelle idee fondamentali dell'ingegneria geotecnica sotterranea dalle quali si possa poi facilmente dedurre la risposta al quesito già implicitamente posto quando si commentava che si deve indagare, misurare e controllare tutto ciò che abbia qualcosa a che vedere con le deformazioni del terreno intorno allo scavo: cosa si deve indagare misurare e controllare? Basterebbe capire da cosa dipendono, o quali sono i fattori che controllano, gli assestamenti del terreno in prossimità di una galleria!

PRINCIPALI FATTORI CHE CONTROLLANO GLI ASSESTAMENTI

- **Caratteristiche meccaniche di deformazione del terreno**
- **Condizioni idrologiche ed idrauliche del terreno**
- **Caratteristiche reologiche del terreno**
- **Dimensioni e forma della galleria**
- **Profondità della galleria**
- **Metodo costruttivo:**
 - * Scavo convenzionale
 - * Scavo meccanizzato
 - * Sopperto convenzionale
 - * Sopperto prefabbricato

Del resto la bibliografia sul tema degli assestamenti da scavi sotterranei è molto ampia e diffusa, consentendo senza difficoltà una selezione sufficientemente adatta agli scopi qui individuati. Per esempio:

Settlements induced by tunnelling (Recommendations AFTES in "Tunnels et ouvrages souterrains" N.132, November/December 1995).

INDAGINI PROGETTUALI PER GALLERIE URBANE

Si è già commentato che su di un territorio urbano le indagini geotecniche devono essere in principio più abbondanti, nel senso che devono essere condotte su intervalli di superficie più brevi, con l'obiettivo di compensare pur solo parzialmente l'handicap che deriva dalla trasformazione e spesso mimetizzazione sofferta dal territorio in superficie e subsuperficialmente, come diretta conseguenza degli interventi urbanistici propri di ogni insediamento.

Sono usuali separazioni di poche (2 a 5) decine di metri tra le perforazioni sistematicamente condotte per l'indagine geotecnica di progetto lungo l'asse di una galleria urbana, spesso anche integrate da perforazioni disposte su direttrici trasversali quando le circostanze di notevole eterogeneità del sottosuolo lo richiedono.

Però allo stesso tempo, il solo aumento della densità (pur sempre limitata dai costi, dai tempi e dagli ostacoli fisici) dei punti di esplorazione diretta mediante adeguate terebrazioni del terreno, non sempre è di per sé sufficiente a sopperire la mancanza di quelle importanti indicazioni che normalmente derivano da una semplice attenta ed esperta osservazione della geomorfologia di un territorio naturale vergine.

Si deve pertanto indispensabile ricorrere a strumenti più sofisticati di indagine geologica e geomorfologica, quali quelli della fotointerpretazione di fotografie aeree, possibilmente relative ad epoche distinte, o quelli della geologia regionale, per l'impiego dei quali si rende indispensabile il lavoro di specialisti delle rispettive materie.

Queste indagini inoltre, devono essere realizzate, sia anticipatamente che in parallelo o successivamente però, sempre in perfetta coordinazione e sintonia con quelle che impiegano gli strumenti classici delle indagini geognostiche dirette, con le quali devono sistematicamente, utilitarimente e reciprocamente, complementarsi ed integrarsi.

Di seguito si accenneranno sia i temi dell'indagine geoidrologica e geomorfologica, sia quelli dell'indagine geofisica e della geotecnica classica, comprendendo in quest'ultima gli aspetti fondamentali relativi alle perforazioni geognostiche, alla campionatura del terreno, alle prove e misure in situ ed accennando infine alla caratterizzazione geotecnica dei terreni in laboratorio.

In questo contesto inoltre, si darà una certa priorità, senza però giungere all'esclusività, a quelle indagini che sono più tipicamente impiegate negli ambienti geologici caratterizzati dalla presenza predominante di terreni sciolti (terre), fronte a quelle proprie degli ambienti predominantemente rocciosi, in considerazione della maggiore diffusione statistica dei primi, nelle grandi estensioni territoriali urbane.

Indagini geomorfologiche

Gli studi geomorfologici analizzano la configurazione, l'origine e l'evoluzione della superficie terrestre, con il compito principale di spiegare le forme del suolo e di capire i fenomeni da cui esse sono derivate, per poi utilizzare tali conoscenze a vari fini applicativi, quali per esempio quelli geotecnici o quelli idrologici in generale od altri in particolare, come ad esempio quelli relativi a specifici aspetti progettuali e costruttivi delle gallerie subsuperficiali.

In questo contesto risulta fondamentale la conoscenza sia degli agenti dell'azione morfologica, sia delle caratteristiche e conseguenze pratiche proprie di ogni diverso agente ed ogni diversa azione dalle cui peculiarità derivano direttamente: azione solare, azione gravitativa, azione del vento, azione del ghiaccio, azione delle acque piovane, fluviali, pluviali, lacustri e marine.

In quanto agli elementi fisiografici risultanti, essi sono alle volte visibili e riconoscibili dal semplice occhio umano, più o meno esperto, quando sia possibile ubicarlo in buona posizione di osservazione, mentre altre volte sono deducibili dall'analisi e dallo studio di segnali ed indizi precisi. Però in ogni caso, sono indiscutibilmente più chiaramente visibili ed interpretabili quando osservati da grandi distanze, come occorre nella visione aerea diretta o nello studio tridimensionale di coppie di fotografie aeree in scala opportuna (da 1:1.000 a 1:100.000).

Elementi fisiografici quali i terrazzi fluviali e marini, le conoidi, le pianure alluvionali e le valli glaciali, i detriti, le morene, i solchi, gli alvei ed i paleoalvei, le pendenze e gli strapiombi, le fratture e gli scollamenti, le doline e le cavità, etc., hanno tutti un significato preciso e si possono collegare sempre a specifici aspetti applicativi di notevole importanza.

Nonostante quanto appena affermato, è però doveroso segnalare che, anche se da un lato è abbastanza diffusa ed accettata l'idea dell'utilità pratica degli studi geomorfologici quali strumenti di lavoro nelle fasi di analisi

studio e selezione dei tracciati in interurbani, dall'altro non succede esattamente lo stesso per i casi relativi al progetto ed alla costruzione delle opere urbane.

Per queste, in considerazione del fatto che la selezione dei tracciati è in ogni caso molto strettamente condizionata e praticamente imposta dalle esigenze operative, si crede spesso non necessario o quanto meno non vantaggioso il ricorso allo studio geomorfologico, nonostante i limitati costi e tempi necessari, affidando in genere l'indagine geologica e geotecnica ai molto più costosi e lenti strumenti tradizionali (perforazioni) della meccanica delle terre e delle rocce, erroneamente considerati sempre più precisi, più affidabili e quindi auto sufficienti, fermo restando la loro indiscussa utilità ed assoluta necessità.

Nel caso specifico delle gallerie urbane, gli studi geomorfologici costituiscono elementi di informazione basilica di grande utilità fin dal momento di scegliere le macchine più appropriate per realizzare lo scavo e poi per riconoscere la possibilità e frequenza di incontro lungo lo scavo, di depositi alluvionali non coesivi eventualmente sotto falda, o di livelli di sottosuolo eventualmente interessati dalla presenza di grandi blocchi rocciosi, o di alvei sommersi però particolarmente attivi, etc.

Nonostante l'approfondimento del pur sempre interessante tema della geomorfologia esuli dai propositi stabiliti, si ritiene utile presentare un paio di esempi di applicazione puntuale dello strumento dell'indagine geomorfologica al diagnostico geotecnico di due situazioni impreviste (anche se prevedibili) occorse durante la costruzione del Metro di Caracas: il collasso di un pannello di diaframma ancorato nella Linea 1 e difficoltà operative nella realizzazione di ancoraggi di contenimento nella Linea 2.

Limites y posibilidades de la exploración geotecnica en el caso de la f.....

G. Perri y P. Feliziani (XII Seminario venezolano de Geotecnia, 1992)

Problemas constructivos en los anclajes de la estación Maternidad

Gianfranco Perri (XII Seminario venezolano de Geotecnia, 1992)

Quindi per concludere il capitolo si riproduce, complementandolo con l'illustrazione di alcuni piani tipici estratti dagli studi originali, un articolo che riassume alcuni aspetti geomorfologici generali relativi alla metropolitana di Caracas:

Aspectos geomorfologicos del trazado de la Linea 2 del Metro de Caracas

Roberto Centeno W. (XII Seminario venezolano de Geotecnia, 1992)

Indagini geoidrologiche

L'acqua entra in gioco con distinti ruoli, tutti ugualmente importanti, quando si tratta del progetto, la costruzione e l'esercizio di una galleria urbana.

Il comportamento geotecnico di un terreno è indissolubilmente controllato dall'elemento acqua: uno dei tre che, assieme all'aeriforme ed al solido, lo costituiscono: quando l'aria è assente e quindi tutti gli spazi lasciati liberi dal solido sono occupati dall'acqua, il terreno è saturo; nel caso contrario il terreno si dichiara parzialmente saturato e l'analisi del suo comportamento meccanico è ancor più complesso; a volte infine l'acqua può essere assente.

Dall'acqua dipendono tra l'altro, la resistenza, la deformabilità e la reologia, quindi la stabilità e la lavorabilità del terreno. Dall'acqua dipendono i carichi sugli stegni delle gallerie e la loro evoluzione, così come gli assestamenti del terreno intorno allo scavo e la loro evoluzione.

Alla presenza dell'acqua ed alla necessità di mantenerla al di fuori dei vuoti utili creati dalle gallerie durante il loro esercizio, si devono tutti gli importanti e svariati aspetti tecnologici dell'impermeabilizzazione delle strutture sotterranee. Ed a tale presenza ed ai deterioramenti che può eventualmente indurre sulle strutture sotterranee, si devono gli ugualmente importanti e svariati aspetti tecnologici contro la corrosione e gli altri effetti negativi della potenziale aggressività delle acque sotterranee.

Generalmente l'acqua fluisce nei terreni a conseguenza dell'azione gravitativa e con velocità e volumi proporzionali alle pressioni idrostatiche (più precisamente proporzionali ai gradienti idraulici) presenti ed alla permeabilità dei terreni, seguendo più o meno approssimativamente la legge sperimentale di Darcy.

La permeabilità dei terreni (velocità con cui fluisce l'acqua attraverso il terreno quando è sottoposta ad un gradiente idraulico unitario) è una delle grandezze fisiche che ammette maggiori variazioni in funzione del tipo di terreno: varia tra limiti così elevati che vanno da 1 o 10 o 100 cm/s in rocce intensamente fratturate od in ghiaie pulite, fino a 10^{-6} o 10^{-7} o 10^{-8} cm/s in rocce massive od in argille montmorillonitiche praticamente impermeabili.

Bisogna quindi indagare: sulla presenza e qualità dell'acqua nei terreni da scavare ed in quelli al di sopra ed al di sotto, sulle pressioni e sui gradienti idraulici, e sull'evoluzione naturale od artificiale di tutti questi fattori; e bisogna infine indagare sulla permeabilità dei terreni interessati dalle opere.

Misure piezometriche

Nonostante la rimbombanza del titolo (*Indagini geoidrologiche*) assegnato al presente capitolo, non sono purtroppo rari i casi in cui l'indagine geoidrologica per il progetto e la costruzione di una galleria urbana, resta limitata di fatto alla semplice segnalazione, più o meno documentata, della presenza d'acqua nei fori delle perforazioni geognostiche.

Naturalmente una tale indagine è troppo limitata ed è quasi sempre insufficiente, però è anche certo che deve essere sempre eseguita perché in ogni caso è utile oltre che semplice ed economica; pertanto deve anche essere fatta bene.

Nelle norme per l'esecuzione degli studi geotecnici della Metropolitana di Caracas, si legge: ... Durante l'esecuzione di una perforazione, la misura della profondità freatica dovrà essere effettuata all'inizio della giornata lavorativa, poi ogni 6 ore e quindi al termine della giornata quando si procederà inoltre, a svuotare opportunamente e totalmente il foro. Al giorno seguente, prima di eventualmente riprendere ad approfondire la perforazione, si misurerà nuovamente la quota dell'acqua rientrata nel foro e così via fino al completamento dello stesso. ...

Poi la stessa norma continua: ... Nei casi in cui si constati l'esistenza di una falda freatica, una volta che la perforazione esplorativa selezionata a tale fine abbia raggiunto la profondità d'indagine prevista, si dovranno collocare piezometri per poter quindi eseguire letture periodiche. Quando si riscontri la presenza di vari acquiferi a differenti profondità in una stessa perforazione, questi dovranno essere tra di essi isolati mediante adeguati tamponi impermeabili, con il fine di poter poi monitorare le varie quote piezometriche.

La descrizione delle attrezzature, dei materiali e dei procedimenti che si impiegano comunemente per segnalare la presenza d'acqua, o per installare e misurare piezometri, perlomeno quelli più semplici però allo stesso tempo effettivi in molte circostanze, è un compito abbastanza facile e pertanto può essere affidato alla sola lettura delle tavole illustrative allegate.

Ben più approfonditi commenti invece richiederebbe il tema della corretta e completa interpretazione che dei dati piezometrici è necessario eseguire, ai fini della reale conoscenza e comprensione dell'andamento delle pressioni e dei gradienti idraulici nei terreni poi interessati dagli scavi sotterranei.

Misure di permeabilità

Le prove di permeabilità che si eseguono nei terreni in situ (prove in laboratorio tradizionalmente si eseguono solo per terreni molto omogenei a grana fine, nei quali è possibile prelevare campioni rappresentativi relativamente indisturbati) possono in principio differenziarsi in due categorie, dipendendo dal diametro della perforazione che si realizza a tale fine: prove di pompaggio in pozzo (diametro da 50 a 100 cm) e prove in foro (diametro da 10 a 50 cm).

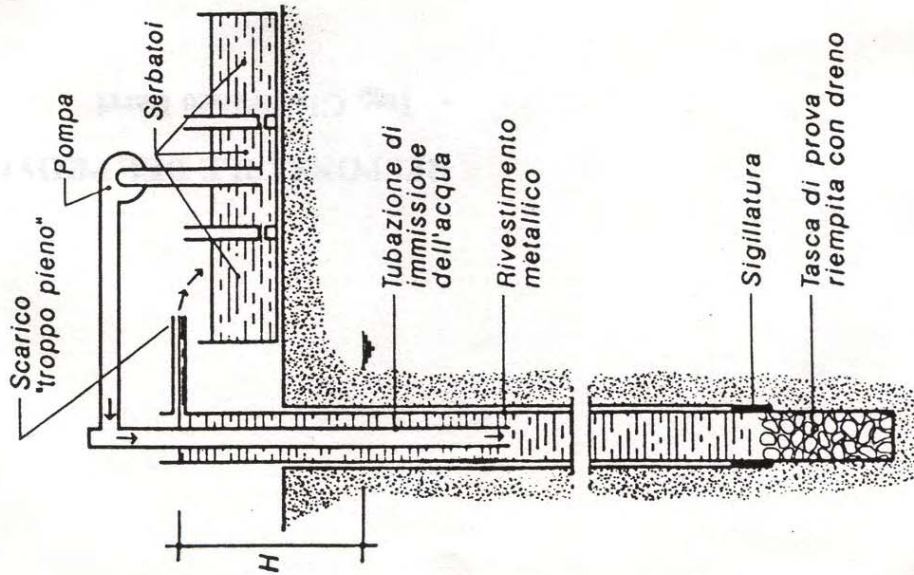
Le prove di pompaggio con pozzo e piezometri vengono eseguite emungendo una portata d'acqua costante da un pozzo e misurando gli abbassamenti del livello della stessa nel medesimo e nei fori piezometrici (da 3 a 9) installati lungo un allineamento radiale rispetto ad esso. Se la falda non è alimentata il livello continua a diminuire sempre più lentamente fino al valore prossimo alla stabilizzazione con un raggio d'influenza teoricamente infinito, se invece la falda è alimentata il regime si stabilizza con un raggio d'influenza del pozzo definito. In linea di massima il raggio d'azione sensibile di un terreno molto permeabile è dell'ordine dei 2 o 3 volte il diametro del pozzo, mentre scende all'ordine di uno o mezzo diametro per i terreni poco permeabili.

Le prove di permeabilità in foro permettono misurare la permeabilità del terreno intorno al foro generalmente per livelli o strati di terreno con spessori compresi tra qualche cm ed 1 o 2 m, creando all'interno del foro un gradiente idraulico mediante immissione od estrazione d'acqua tale per cui si possa misurare la tendenza al ristabilirsi dell'equilibrio idraulico (prove a carico variabile) oppure misurare la portata del flusso mantenendo costante il gradiente ossia mantenendo costante un livello dell'acqua nel foro, superiore a quello stabilizzato corrispondente alla falda esterna immettendo acqua, od inferiore allo stesso emungendo acqua, (prove a carico costante).

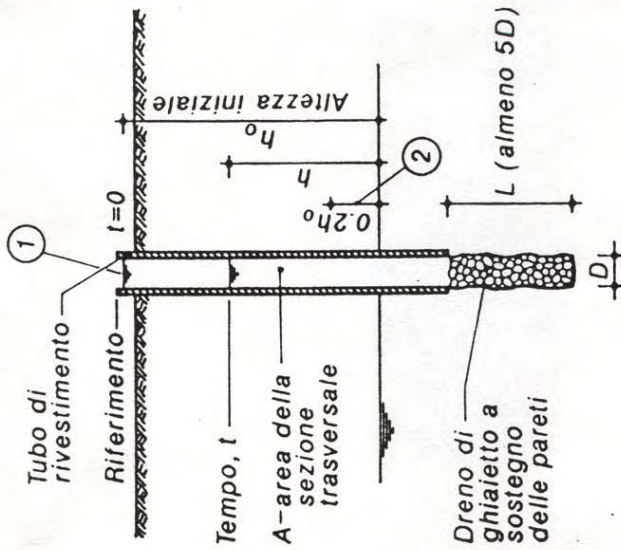
Nelle prove a carico variabile l'intero tratto in prova deve essere in falda, nelle prove a carico costante è possibile la misura anche nel caso in cui il tratto in prova sia fuori falda (prova di dispersione), però l'interpretazione della prova è notevolmente più complessa.

Nei massicci rocciosi, per i quali la circolazione dell'acqua avviene principalmente attraverso le fessure, le prove di permeabilità (meglio circolabilità) si eseguono iniettando acqua in tratte di foro (opportunamente orientato) isolate in avanzamento od in risalita, misurando l'assorbimento d'acqua in unità Lugeon: portata di 1 litro al minuto a 1 MPa per 10 minuti.

Prove di permeabilità in foro

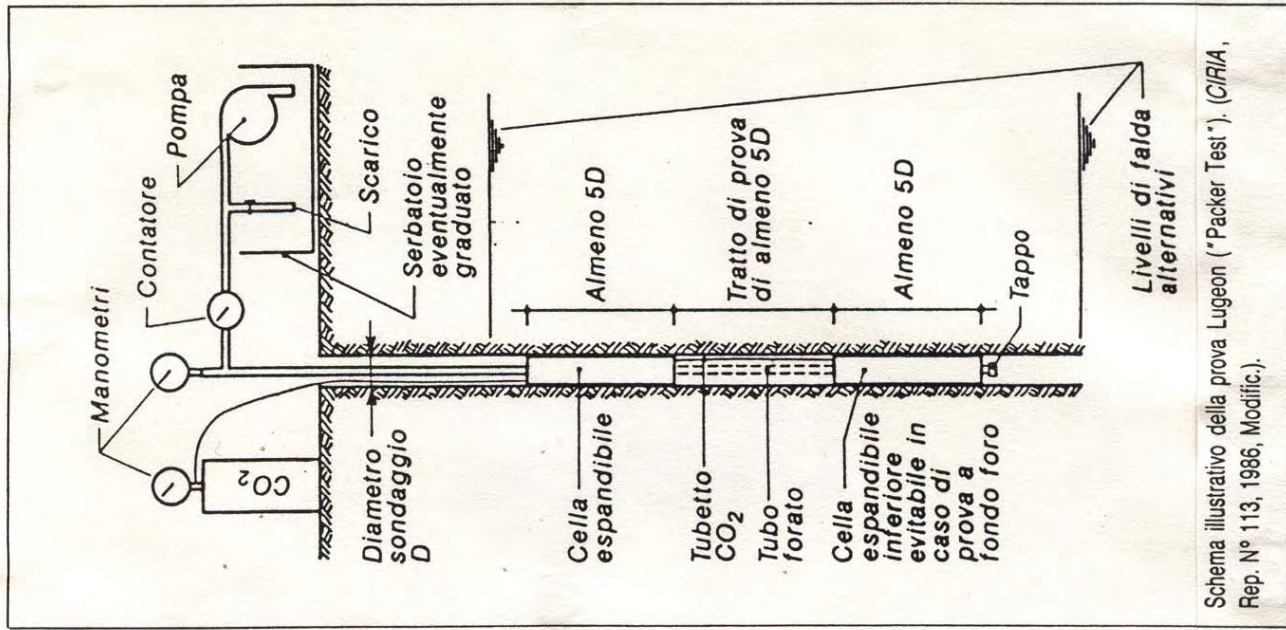


Schema di prova per misure di permeabilità tipo Leifranck a carico costante, con immissione d'acqua.



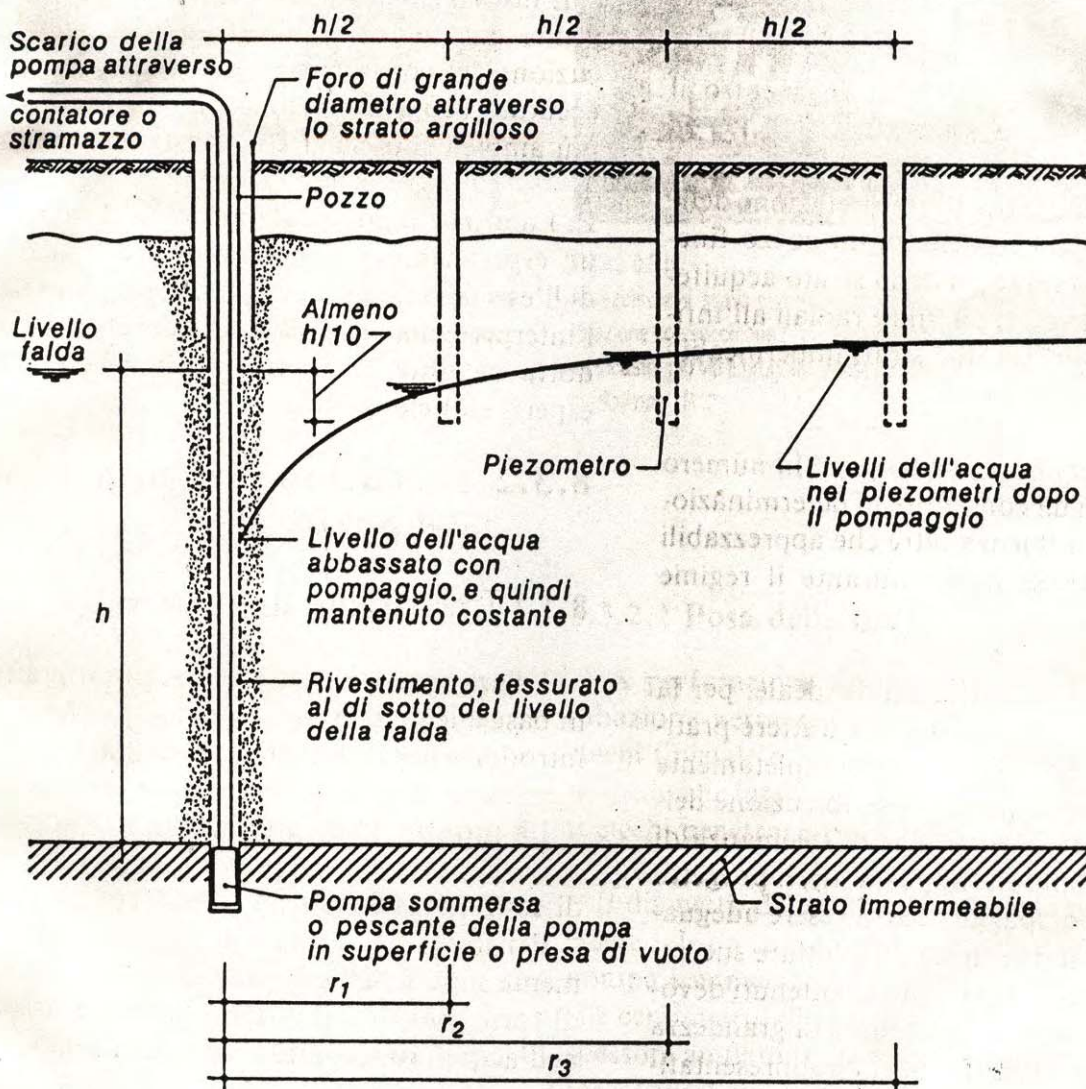
1. Si aggiunge acqua per innalzare il livello nel foro, quindi si sospende consentendo al livello di abbassarsi secondo il flusso naturale
2. Le letture vengono proseguite fino a che il livello dell'acqua nel foro non scende al disotto di questo valore

Schema di prova tipo Leifranck, per immissione, a carico variabile (CIRIA, Rep. N° 113, 1986).



Schema illustrativo della prova Lugeon ("Packer Test"). (CIRIA, Rep. N° 113, 1986, Modific.).

Prove di pompaggio con pozzo e piezometri



Schema ideale di pozzo per prove di pompaggio; acquifero orizzontale, indefinito orizzontalmente, confinato verticalmente. Pozzo che attraversa tutto l'acquifero. (CIRIA, Rep. N. 113, 1986).

Indagini geotecniche

Sia l'esplorazione geotecnica che la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo condotte per il progetto e la costruzione di gallerie urbane, in termini specifici relativi ai tipi ed ai metodi di indagine impiegati in sito ed in laboratorio, non si discostano in principio da quelle esplorazioni e caratterizzazioni che si eseguono per le altre opere dell'ingegneria civile nelle quali il terreno è più comunemente utilizzato come elemento recettore di fondazioni.

Pertanto, non ci sono peculiarità importanti da segnalare mentre è invece certamente utile fare naturale riferimento agli amplissimi e classici capitoli della meccanica delle terre e dell'ingegneria delle fondazioni, dedicati alle tecniche più o meno tradizionali di esplorazione diretta ed indiretta del sottosuolo ed a quelle di prove in sito ed in laboratorio.

Si allega una tavola riassuntiva relativa alle " *Principali prove in sito e loro applicabilità* ", mentre è da segnalare che anche nel campo della meccanica delle rocce la tradizione si è in qualche modo, anche se più di recente, consolidata in quanto alle tecniche di esplorazione e di caratterizzazione, ed a tale proposito si allega una sintesi qualificata (*Site exploration and quantification of significant properties of rock mass*), anch'essa accompagnata da una tavola riassuntiva sulle " *Measuring techniques for in situ and laboratory tests* ".

Ritornando al dominante ambiente geologico urbano caratterizzato da un sottosuolo di depositi sedimentari recenti, deve essere segnalato che gli operatori della geotecnica hanno da sempre incluso le prove in sito nello studio dei problemi che riguardano la meccanica del comportamento del terreno, anche se le moderne tecniche di valutazione delle proprietà geotecniche dei terreni mediante prove in sito hanno certamente avuto un più forte sviluppo durante gli ultimi decenni.

In ogni caso, sono stati significativi i miglioramenti nelle apparecchiature, nella strumentazione, nelle modalità esecutive e nei metodi di analisi dei dati in entrambi i campi di caratterizzazione: in laboratorio ed in sito.

Le moderne tecniche di laboratorio offrono la possibilità di eseguire prove, in genere sui campioni indisturbati o semi indisturbati prelevati in sondaggi o scavi, che permettono di ottenere informazioni attendibili sulle caratteristiche tensioni-deformazioni-tempo dei provini, in condizioni di drenaggio controllate e per i più svariati percorsi di sollecitazione.

Persistono tuttavia molti problemi, in particolare derivanti dagli inevitabili disturbi arrecati al campione durante il prelievo e dalla modesta rappresentatività del volume di terreno provato, rispetto a quello reale. In conseguenza è certamente l'utilizzo combinato delle prove di laboratorio e di quelle in sito, che costituisce il più affidabile percorso per raggiungere od approssimarsi al raggiungimento della soluzione dei problemi di natura geotecnica, essendo i due tipi di prove fortemente complementari.

In riferimento quindi generale alle indagini progettuali, si può osservare che gli obiettivi primari di un'indagine geotecnica sono nell'ordine: da un lato determinare la stratigrafia e la variabilità spaziale dei depositi, cioè disegnare i profili geologico-geotecnico-stratigrafici del sottosuolo; e dall'altro determinare, con il complemento delle prove di laboratorio, le principali caratteristiche fisiche e meccaniche di ciascuno degli strati già identificati.

L'approccio moderno delle indagini in sito per il primo dei suddetti obiettivi, è quello che utilizza sempre più le prove penetrometriche statiche, piuttosto che i sondaggi con frecce ma non continue prove penetrometriche dinamiche. In effetti le prove statiche, oltre a fornire una continuità verticale delle informazioni, hanno il vantaggio di essere economiche, di permettere una rapida esecuzione e di consentire una valutazione preliminare dei parametri del terreno; però le prove dinamiche prevedono spesso anche il recupero fisico del campione da analizzare, poi eventualmente anche in laboratorio.

Per raggiungere il secondo obiettivo di una più approfondita definizione delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni, con le indagini in sito si ricorre a prove puntuali più sofisticate, più lente e quindi più costose.

Nella già citata tavola riassuntiva delle prove in sito, sono elencate le principali prove con indicazione della loro applicabilità nei differenti tipi di terreno, nonché della loro affidabilità nei confronti dei singoli quesiti di carattere geotecnico, attribuiti questi da non dover però considerare di validità assoluta, ma piuttosto di validità relativa ad esperienze specifiche e pertanto da essere assunti con la dovuta prudenza.

L'esame del contenuto della tavola mostra che la maggior parte delle prove elencate, che non rappresentano certamente la totalità delle conosciute possibili od utilizzate, è applicabile a terreni poco cementati e che hanno una dimensione media dei grani minore di quella della ghiaia fina, giacché solo poche prove in sito trovano applicabilità in tali terreni e richiedono in genere un preforo.

- Principali prove in sito e loro applicabilità

	INFORMAZIONI GEOTECNICHE													CONDIZIONI DI TERRENO					
	Tipo di terreno	Stratigrafia	Pressione idrostatica (U_0)	Angolo di attrito (ϕ)	Resist. al taglio non drenata (S_u)	Densità relativa (D_R)	Compressibilità (m_v, C_c)	Consolidazione (C_v, C_h)	Permeabilità (k)	Modulo: taglio e di Young (G; E)	Sforzo orizzontale in sito (K_0)	Storia dello stato tensionale (OCR)	Curva sforzo-deformazione	Roccia dura	Roccia tenera, morene, ecc.	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
SCISSOMETRICA (FV)	C	C	-	-	A	-	-	-	-	C	B	-	-	-	-	-	B	A	B
DILATOMETRICA (DMT)	B	A	B	B	B	C	B	B	B	B	B	C	-	C	-	A	A	A	A
PENETROMETRICA STATICA MECCANICA	B	A	-	B	C	B	C	-	-	C	C	C	-	-	C	-	A	A	A
ELETTRICA (CPT)	B	A	-	B	C	B	C	-	-	B	C	C	-	-	C	-	A	A	A
PIEZOCONO (CPTU)	A	A	A	B	B	B	C	A	B	B	C	B	C	-	C	-	A	A	A
(PIEZOCONO-SISMICO) (SCPTU)	A	A	A	B	B	B	C	A	B	A	B	B	B	-	C	-	A	A	A
PRESSIOMETRICA CON PREFORO (MENARD) (MPM)	B	B	-	C	B	C	C	C	-	A	C	C	C	A	A	B	B	B	A
CON AUTOPERFORANTE (SBP)	B	B	B	B	B	B	C	A	B	A	A	A	A	-	C	-	B	A	A
STANDARD PENETR. TEST (SPT)	A	B	-	B	C	B	-	-	-	B	-	C	-	-	C	B	A	B	C
PENETROMETRICA DINAMICA (DP)	C	B	-	C	C	B	-	-	-	C	-	-	C	-	C	B	A	B	B
DI CARICO SU PIASTRA TRADIZIONALE (PLT)	C	C	-	C	B	B	B	C	C	A	C	B	B	B	A	B	B	A	A
AD ELICA (SPLT)	C	C	-	C	B	C	B	C	C	A	C	B	C	-	-	-	A	A	A
PERMEABILITÀ (K)	C	-	A	-	-	-	-	B	A	-	-	-	-	A	A	A	A	A	B
CELLA DI PRESSIONE TOTALE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	B	B	-	-	-	-	-	-	C	A
FRATTURAZIONE IDRAULICA	-	-	A	-	-	-	-	C	C	-	B	B	-	B	B	C	C	B	A
SISMICA: CROSS-HOLE; DOWN-HOLE;	C	B	-	-	-	C	-	-	-	A	C	C	C	A	A	A	A	A	A

Note: A = elevata applicabilità
C = limitata applicabilità

B = moderata applicabilità
- = nessuna applicabilità

ENSAYOS DE LABORATORIO DE SUELOS

Identificación y Clasificación:

Descripción

Contenido de Humedad

Peso Específico de partículas sólidas

Peso Unitario

Granulometría

Tamizado

Sedimentación

Limites de Consistencia

Plástico

Líquido

Contracción

Contenido de Materia Orgánica

Contenido de Cementantes

Caracterización Mecánica:

Deformabilidad:

Consolidación y colapso

Expansión

Libre

Controlada

Resistencia:

Compresión sin confinar

Corte Simple

Corte Directo

Compresión Triaxial

Caracterización Hidráulica:

Permeabilidad

Carga Constante

Carga Variable

Consolidación

Estabilización:

Compactación y CBR

Estabilización Química

Estabilización Física

Caracterización Físico – Química:

Agresividad Química:

Determinación de pH, Cloruros y Sulfatos

Agresividad Bacteriológica:

Determinación de bacterias Sulfato - reductoras y Ferruginosas

Microscopía Electrónica

Térmica Diferencial

Difracción de Rayos X

Measuring Techniques for In Situ and Laboratory Tests

Field Index Tests for Characterization

Discontinuity orientation
 Discontinuity spacing
 Discontinuity persistence
 Discontinuity roughness
 Discontinuity wall strength
 Discontinuity aperture
 Discontinuity filling
 Discontinuity seepage
 Discontinuity number of sets
 Discontinuity block size
 Discontinuity drill core recovery/RQD
 Geophysical logging of boreholes
 Seismic refraction (2 methods)
 Acoustic logging
 Seismic measurements between boreholes
 Sonic log
 Caliper log
 Temperature log
 SR log
 Resistivity logs (2 methods)
 Focused current logs
 Induction log
 Gamma ray log
 Neutron log
 Gamma-gamma log

Field « Quality Control Tests »

Rockbolt anchor strength
 Rockbolt tension (torque wrench)
 Rockbolt tension (load cells)
 Cable anchor tests
 Shotcrete - visual assessment
 Shotcrete - pull tests
 Shotcrete - box mould tests
 Shotcrete - core tests
 Gas level measurements

Laboratory Index Tests for Characterization

Water content
 Porosity/density (4 methods)
 Void index (quick absorption)
 Swelling pressure
 Swelling strain (2 methods)
 Slake-durability
 Uniaxial compressive strength
 Uniaxial deformability (E , ν)
 Point load strength index
 Resistance to abrasion (Los Angeles test)
 Hardness (Schmidt rebound)
 Hardness (Shore scleroscope)
 Sound velocity
 Petrographic description

Field « Design Tests »

Deformability using a plate test
 Deformability plate test down a borehole
 Deformability radial jacking test
 Deformability flexible borehole jack
 Deformability rigid borehole jack
 Deformability flat jack
 Deformability *in situ* uniaxial/triaxial test
 Shear strength-direct shear
 Shear strength-torsional shear
 Piezometric head (3 methods)
 Permeability/transmissivity (5 methods)
 Flow velocity logs
 Flow velocity - tracer dilution
 Flow paths using tracers (4 methods)
 Stress determination - flat jack
 Stress determination - surface coring
 Stress determination - « doorstopper »
 Stress determination - strain-gauge cell
 Stress determination - USBM-type gauge
 Stress determination - hydraulic fracturing

Field Monitoring

Movements - probe inclinometer
 Movements - fixed-in-place inclinometer
 Movements - tiltmeter
 Movements - borehole extensometers
 Movements - convergence meter
 Movements - joints and faults
 Movements - survey triangulation
 Movements - survey leveling
 Movements - survey offset
 Movements - survey EDM
 Vibration and blast monitoring
 Pressure - hydraulic cells
 Rock stress variations
 Pendulum and inverted pendulum
 Strains in linings and steel ribs

Laboratory « Design Tests »

Triaxial strength
 Direct tensile strength
 Indirect (Brazil) tensile strength
 Direct shear test (+ field method)
 Permeability
 Time-dependent and plastic properties

Indagini geofisiche

Come deducibile da quanto già accennato in precedenza, le metodologie d'indagine geotecnica basica di tipo prettamente geognostico applicate nel campo delle gallerie, anche urbane, si possono integrare con le più recenti tecniche di prospezione geofisica e con le relative metodologie di elaborazione ed interpretazione.

I rilievi geologici e geognostici di dettaglio forniscono una massa di dati da eventualmente elaborare anche statisticamente al fine di definire la caratterizzazione geologica e geomeccanica del sottosuolo, mentre le prospezioni geofisiche consentono le varie interpolazioni tra i valori puntuali misurati e la stima dei parametri geomeccanici caratterizzanti volumi di terreno ben definiti.

Con l'applicazione delle metodologie d'indagine geofisica si possono fondamentalmente ricavare due blocchi di informazioni: i dati sulla geometria delle strutture del sottosuolo ed i dati per la caratterizzazione del comportamento meccanico dello stesso.

Dal primo blocco di informazioni si ricava la forma e la consistenza dei vari litotipi evidenziandone eventuali stratificazioni, discontinuità, cavità e comunque tutto quanto permetta la elaborazione di una sezione geologica.

Dal secondo blocco di informazioni possono ricavarsi alcuni parametri fisici che sono poi correlabili con le caratteristiche litologiche e geomeccaniche del terreno.

Le metodologie di indagine geofisica impiegabili nello studio geotecnico di una galleria, sono essenzialmente quelle sismiche e quelle geoelettriche, ed in subordine (e mirate solo alla risoluzione di una specifica e locale problematica) quelle che applicano i metodi gravimetrici, magnetici, elettromagnetici e radioattivi.

I metodi sismici, in cui possono oggi essere inclusi anche i rilievi con l'uso delle onde radar, sono sicuramente quelli maggiormente usati e quelli che nel contempo consentono una più estesa applicabilità.

I dati che se ne ricavano, oltre che fornire informazioni sulla geometria delle strutture del sottosuolo, consentono di misurare la velocità di propagazione delle onde elastiche e di elaborare quindi una valutazione delle caratteristiche geomeccaniche delle diverse porzioni di terreno che eventualmente compongono il sottosuolo indagato.

I metodi di prospezione sismica si basano essenzialmente sull'analisi del comportamento spaziale di un'onda elastica (sismica o radar) che si propaga nel terreno da una sorgente di energia ad una serie di punti di ricezione.

Fondamentalmente le metodologie d'indagine sismica possono sintetizzarsi in tre tipi: per rifrazione, per riflessione e per trasparenza (tomografia). Senza entrare nel merito delle tre metodologie, è possibile e comunque sintetizzarne i campi d'impiego specifici e complementari.

Il metodo sismico a rifrazione, sfruttando la diversa velocità di propagazione delle onde sismiche nei vari terreni, è impiegabile per le indagini più superficiali ove sia ad esempio necessario definire la profondità del basamento roccioso sotto coltri di terreno detritico od alluvionale.

Il metodo sismico a riflessione, si basa sui tempi di ritorno dell'onda sismica alla superficie del suolo dopo essere stata riflessa dalle varie discontinuità. Questo metodo si impiega per indagini sino a qualche migliaio di metri di profondità (escludendo il primo centinaio di metri che può essere meglio indagato con la sismica a rifrazione) e permette una accurata definizione della geometria del sottosuolo anche quando questa ha una forma abbastanza complessa.

Il metodo a riflessione con impiego di onde radar, è invece impiegato per indagini ancor più corticali quali ad esempio quelle volte alla ricerca di eventuali cavità subsuperficiali.

Il metodo che impiega le misure per trasparenza (o dirette), più recente e legato alle moderne tecniche tomografiche di elaborazione, permette un forte recupero di informazioni puntuali circa la geometria, la struttura e le caratteristiche geomeccaniche del terreno presente nel sottosuolo indagato.

Si basa sulla misura del tempo di propagazione dell'onda sismica o radar diretta tra due fori di sonda, oppure tra punti diversi del piano topografico. Le applicazioni sono in genere dirette ad analizzare in dettaglio situazioni particolari od a definire localmente le caratteristiche geomeccaniche, del sottosuolo soprattutto sotto il profilo della fratturazione.

I rilievi geoelettrici infine, hanno invece un'applicabilità più circoscritta, sia perché più sensibili alle eterogeneità del piano topografico, sia perché il parametro fisico rilevato è correlabile, nell'ambito di un litotipo, alla sola permeabilità, ed infine perché la definizione della geometria del sottosuolo diventa, per questo metodo, più problematica se ci si allontana da modelli semplici, in genere stratificati.

MISURE E CONTROLLI PER LE GALLERIE URBANE (in sottterraneo, dalla superficie, sulle strutture adiacenti, durante l'esercizio, etc.)

Questa seconda parte del corso é dedicata ai temi delle misure e dei controlli geotecnici usuali e necessari nelle fasi del corso d'opera ed, eventualmente, in quelle di esercizio delle gallerie urbane.

Si tratta in essenza di temi strumentali molto ampi e variati, legati all'uso di tecnologie meccaniche, ottiche, elettriche ed elettroniche, coadiuvate tutte dalle analisi interpretative le quali vanno dalle piú semplici ed immediate fino a quelle piú complesse e totalmente integrate da sistemi, analitici e numerici, di software ed hardware avanzati in estremo.

In forma estremamente schematica si elencano di seguito, sulla base sia delle grandezze oggetto delle misure e dei controlli, sia degli strumenti di misura, i principali temi che saranno successivamente illustrati:

LIVELLI PIEZOMETRICI	<i>Piezometri</i>
PRESSIONI INTERSTIZIALI	<i>Piezometri</i>
SPOSTAMENTI	<i>Inclinometri - Tiltimetri - Clinometri Livellometri - Assestimetri - Estensimetri</i>
CONVERGENZE	<i>Distometri - Perfilometri - Fessurimetri</i>
CARICHI	<i>Celle</i>
PRESSIONI	<i>Celle</i>
SOLLECITAZIONI	<i>Strain gauges</i>