



REGIONE SICILIA



REGIONE SICILIA



Mandataria



Mandanti

Ing.  
**Corrado  
Pecora**

iBi studio

PROGETTAZIONE DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA, CSP, REDAZIONE DELLA RELAZIONE GEOLOGICA E DEL PEF DI MASSIMA CON OPZIONE DI AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI DIREZIONE LAVORI E DI CSE

## REALIZZAZIONE TERMOVALORIZZATORE DI CATANIA

### Opere civili

Lotto Stazione Appaltante		Direttore della Progettazione	Progettista	Scala:
RUP S.Cocina	DEC P.Frisenda	C. Turrini CREW	M. Pietrantoni Systra S.p.A.	-

Rev.	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato	Data
A	EMISSIONE	F. Stella	M.Pietrantoni	C. Turrini	Ott. 2025



REGIONE SICILIA

PROGETTAZIONE DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA, CSP, REDAZIONE DELLA RELAZIONE GEOLOGICA E DEL PEF DI MASSIMA CON  
OPZIONE DI AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI DIREZIONE LAVORI E DI CSE, INERENTE AGLI INTERVENTI DI:

## REALIZZAZIONE TERMOVALORIZZATORE DI CATANIA

Num. Documento: TMVCS-CT-PF-00-050101-01-A **PMO-GE-CRW-P2-00-01- XGEN- 000000-A**

## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa.....</b>	<b>3</b>
1.1	Sintesi delle indagini.....	3
<b>2</b>	<b>Capitolato tecnico delle Indagini.....</b>	<b>3</b>
2.1	Disposizioni generali, norme e prescrizioni di carattere tecnico per l'esecuzione dei lavori	3
2.2	Modalità e tecnologie d'esecuzione delle indagini.....	4
2.3	Prospezioni meccaniche.....	4
2.3.1	Installazione dell'attrezzatura su ciascun punto di perforazione.....	4
2.3.2	Perforazione a carotaggio continuo.....	4
2.3.3	Prelievo di campioni di tipo indisturbato.....	6
2.3.4	Prelievo di campioni di tipo rimaneggiato.....	7
2.3.5	Prove di permeabilità tipo Lefranc.....	8
2.3.6	Prove pressiometriche con pressimetro tipo Menard.....	8
2.3.7	Pozzetti di protezione strumentazione.....	10
2.3.8	Allestimento piezometro "tipo tubo aperto".....	10
2.3.9	Allestimento piezometro "tipo Casagrande".....	10
2.3.10	Installazione di tubi per prove geofisiche "down-hole".....	12
2.3.11	Esecuzione di prove geofisiche "down-hole".....	14
2.3.12	Prove di resistenza meccanica.....	16
2.4	Prospezioni geofisiche.....	18
2.4.1	Georadar.....	18
2.4.2	Analisi tramite metodo HVSr.....	19
2.4.3	Profili di resistività ERT.....	20
2.4.4	Sismica a Rifrazione.....	20
2.5	Analisi e prove geotecniche di laboratorio.....	21
2.5.1	Caratteristiche fisiche, classificazione delle terre e limiti di Atterberg.....	22
2.5.2	Caratteristiche meccaniche delle terre: prove di taglio diretto (cd).....	23
2.5.3	Caratteristiche meccaniche delle terre: prove edometriche.....	25
2.5.4	Caratteristiche meccaniche delle terre: prove triassiali (uu).....	25
2.5.5	Caratteristiche meccaniche delle terre: prove triassiali (cu).....	26
2.5.6	Caratteristiche meccaniche delle terre: prove di colonna risonante (RC).....	28



REGIONE SICILIA

PROGETTAZIONE DI FATTIBILITÀ TECNICO-ECONOMICA, CSP, REDAZIONE DELLA RELAZIONE GEOLOGICA E DEL PEF DI MASSIMA CON  
OPZIONE DI AFFIDAMENTO DEI SERVIZI DI DIREZIONE LAVORI E DI CSE, INERENTE AGLI INTERVENTI DI:

## REALIZZAZIONE TERMOVALORIZZATORE DI CATANIA

# 1 PREMESSA

Nel quadro della progettazione di fattibilità tecnico-economica, finalizzato alla **realizzazione dei termovalorizzatori di Catania**, è stato redatto un piano di indagini.

Il fine primario delle indagini proposte è quello di approfondire le conoscenze geotecniche e geologiche a supporto della progettazione di fattibilità tecnico-economica delle opere.

Le modalità operative ed i requisiti tecnici di tutte le indagini indicate seguiranno quanto indicato nel Capitolato Speciale d'Appalto della Regione Sicilia, che si allega al presente documento.

Si specifica che, a questo stadio della progettazione, l'esatta ubicazione ed il numero delle indagini sono da intendersi non definitive, in quanto saranno possibili ottimizzazioni.

Inoltre, in base alle evidenze stratigrafiche, potrà essere modificato il numero di campioni e la loro esatta profondità, nonché il numero e la tipologia delle prove in sito e delle prove di laboratorio previste.

## 1.1 Sintesi delle indagini

Le indagini previste sono indicate, in estrema sintesi, nella tabella seguente. Sono previste sia indagini dirette, vale a dire sondaggi geognostici, sia indirette, ossia prospezioni geofisiche.

Termovalorizzatore di Catania		
Tipo di indagine	N°	Profondità / Lunghezza [m]
Sondaggi	8	30 - 50
CPTu	8	30
ERT	4	250
HVSR	4	-

Tabella 2.1. *Riepilogo delle indagini geognostiche proposte.*

# 2 CAPITOLATO TECNICO DELLE INDAGINI

Le modalità operative ed i requisiti tecnici di tutte le indagini indicate seguiranno quanto indicato nel Capitolato Speciale d'Appalto della Regione Sicilia, che si allega al presente documento.

## 2.1 Disposizioni generali, norme e prescrizioni di carattere tecnico per l'esecuzione dei lavori

L'Appaltatore dovrà eseguire i sondaggi e le prove geofisiche con l'impiego di attrezzature adeguate alla natura del lavoro garantendo la presenza continua di un assistente tecnico e con personale specializzato ed in numero sufficiente per completare i lavori entro il termine contrattuale.

Il posizionamento planimetrico del sondaggio e delle prove geofisiche da eseguire sarà effettuato dall'Amministrazione. Sarà cura dell'Appaltatore individuare i punti sul terreno e mantenere i segnali predisposti ed i capisaldi topografici di appoggio.

Le piste di accesso alle singole postazioni e le piazzole sono a carico dell'Appaltatore così come, la sistemazione finale del terreno compreso lo spostamento dei serbatoi di decantazione fanghi, lo smaltimento dei residui compresi i fluidi di perforazione.

L'Appaltatore è tenuto ad eseguire i lavori senza arrecare danni dovuti a conduzione impropria del lavoro. È a carico dell'Appaltatore il trasporto, la conservazione e successiva rimozione delle cassette catalogatrici contenenti le carote estratte nel corso della perforazione che dovranno essere, al termine della stessa, trasportate e conservate per tutta il periodo dei lavori in un apposito riparo, in un sito prossimale all'area dei lavori, non accessibile da esterni, protette dal sole e dalle intemperie, e disposte in maniera tale da renderle facilmente ispezionabili dalla Direzione dei lavori.

L'Appaltatore dovrà redigere giornalmente un rapporto dei lavori eseguiti che comprenda le dettagliate colonne stratigrafiche, i dati e le misure relative alle prove in situ ed al prelevamento dei campioni e la descrizione di elementi di particolare interesse quali: perdita di acque di perforazione, presenza di cavità ecc. e consegnarlo firmato alla Direzione dei lavori ogni settimana.

Qualora le percentuali di recupero del carotaggio continuo fossero inferiori a quelle indicate nella relazione tecnica l'Amministrazione a suo insindacabile giudizio può richiedere la ripetizione del sondaggio fino alla quota raggiunta senza che per questo l'Appaltatore possa pretendere nessun compenso.

## **2.2 Modalità e tecnologie d'esecuzione delle indagini**

Si farà riferimento, oltre a quanto sotto riportato, al D. M. 11/03/1988 ed alle indicazioni contenute nell'Elenco Prezzi ed alle prescrizioni impartite dalla Direzione dei lavori.

## **2.3 Prospezioni meccaniche**

### **2.3.1 Installazione dell'attrezzatura su ciascun punto di perforazione**

Nel compenso per l'installazione dell'attrezzatura verrà compresa anche la formazione di una piazzola di dimensioni adeguate a quelle della macchina che si intende utilizzare, all'eventuale scavo per la formazione delle vasche per il recupero dei fanghi bentonici, alla stesura di opportune tubazioni e manichette per l'approvvigionamento diretto da acquedotto od altra sorgente d'acqua in un raggio massimo di mt. 50 e con un dislivello di mt. 10,00, al suo piazzamento sulla verticale dei fori da eseguire.

Stabilizzazione del foro durante l'esecuzione della perforazione necessaria ad assicurare la stabilità delle pareti e del fondo del foro, arrecando il minimo disturbo al terreno.

### **2.3.2 Perforazione a carotaggio continuo**

Le modalità di perforazione ed il diametro del foro sarà tale da rendere minimo il disturbo dei terreni attraversati e da consentire il prelievo di campioni rappresentativi di terreno rimaneggiato ed indisturbato.

Il diametro del foro di sondaggio sarà non minore di 100 mm. e non maggiore di 120 mm.

Le pareti del foro saranno sostenute, secondo le esigenze, da normali fluidi di circolazione o rivestimenti provvisori e le perforazioni saranno eseguite mediante l'uso di carotieri semplici o doppi provvisti di corone al Widia e comunque adeguati al prelievo di carote utili da conferire al laboratorio geotecnico.

Le carote prelevate durante il corso della perforazione saranno conservate in apposite cassette catalogatrici, sulle quali verranno riportati il numero del sondaggio e le profondità di prelievo.

#### Rilievo Stratigrafico

Nel corso della perforazione, che dovrà essere eseguita in modo tale da arrecare il minor disturbo possibile al materiale estratto, verrà rilevata la stratigrafia del terreno attraversato; nella scheda compariranno (oltre agli elementi relativi ai campionamenti ed alle prove in sito elencate successivamente), le seguenti notazioni:

- Data di perforazione;
- Metodo di perforazione
- Attrezzatura impiegata;
- Diametro di perforazione;
- Descrizione dei singoli strati attraversati, comprendente per terreni coesivi e granulari:
  - colore/i prevalente/i della formazione;
  - composizione granulometrica approssimata, nei termini correnti (trovanti, ciottoli, ghiaia, sabbia, limo, argilla), indicando il diametro max della ghiaia, elencando per prima la frazione prevalente e di seguito le eventuali altre frazioni in ordine d'importanza percentuale;
  - caratteristiche di consistenza (terreni coesivi) nei termini (molle, plastico, compatto, molto compatto) correnti relativi a valori di "pocket penetrometer" e "vane", misurati sulla carota appena estratta previa scortecciatura;
  - Caratteristiche di addensamento (terreni non coesivi) nei termini usuali (sciolto, mediamente addensato, addensato);
  - Presenza di sostanze organiche o torbe, fossili, legno, calcinacci, ecc.;
  - grado di arrotondamento e/o di appiattimento e natura di ghiaie e ciottoli;
  - grado di uniformità dei materiali non coesivi (ben gradato, uniforme).
- Registrazioni particolari in corso di perforazione. Oltre alla registrazione della stratigrafia, il responsabile di cantiere annoterà sinteticamente, nella documentazione provvisoria del lavoro, ogni notizia utile o interessante:

- velocità di avanzamento;
- perdite di fluido di circolazione;
- rifluimenti in colonna;
- perdite di carota;
- vuoti;

#### Rilievo della falda

Nel corso della perforazione sarà rilevato in forma sistematica il livello della falda nel foro.

Le misure saranno eseguite in particolare prima e dopo ogni interruzione del lavoro (sera, mattina, altre pause) con annotazione di quanto segue:

- livello acqua nel foro rispetto al piano campagna;
- quota del fondo foro;

- quota della scarpa del rivestimento; - data ed ora della misura.

Tali annotazioni devono comparire anche nella documentazione definitiva di lavoro.

I sondaggi saranno valutati a metro lineare di foro, eseguito nel tipo di terreno o roccia descritto nella corrispondente voce di prezzo presente nell'elenco regionale dei prezzi per lavori edili, impianti tecnologici, infrastrutture a rete, lavori stradali ed impianti sportivi vigenti

Cassette catalogatrici

Le carote estratte nel corso della perforazione saranno sistemate in apposite cassette catalogatrici (in legno, metallo o plastica), munite di scomparti divisorii e coperchio apribile a cerniera.

Sul fondo di ogni scomparto sarà posto un foglio di plastica trasparente di dimensioni tali da poter essere rivoltato a proteggere la carota, una volta sistemata.

Le carote coesive verranno scortecciate, le lapidee lavate. Dei setti separatori suddivideranno i recuperi delle singole manovre, recando indicate le quote rispetto al p.c. Per ogni cassetta dovranno essere eseguite due fotografie ad alta definizione e a colori con angolazioni diverse, una perpendicolare e l'altra obliqua, in modo da individuare in maniera ottimale le variazioni litologiche. Nelle foto dovrà essere ben visibile l'etichetta dove sono apposte le indicazioni riguardanti il cantiere, il sondaggio e le quote di riferimento ed un metro per i riferimenti di scala. Le fotografie effettuate saranno consegnate in originale oppure, se realizzate con macchina fotografica digitale, su supporto magnetico e dovranno essere allegate nella relazione illustrativa finale. I carotaggi contenuti nelle cassette catalogatrici dovranno essere tempestivamente trasportati e conservati in ambienti riparati dalle intemperie secondo le direttive della D.L.

### **2.3.3 Prelievo di campioni di tipo indisturbato**

Il prelievo di campioni di terreno indisturbato potrà essere effettuato negli strati coesivi e semicoesivi (limo sabbiosi - limi - argille) durante l'esecuzione dei sondaggi secondo le indicazioni della D.L. In via orientativa si prevede l'impiego di campionatori tipo Denison o Mazier per terreni di elevata consistenza, di campionatori a pareti sottili (Shelby) per terreni a media consistenza, di campionatori a pistone tipo Osterberg per terreni a debole consistenza, ad altri particolari campionatori. Per il mancato o inadeguato uso del campionatore necessario al prelievo dei campioni indisturbati utili per determinare, in laboratorio geotecnico, i parametri fisico tecnici per la redazione dei calcoli strutturali, non si darà luogo al pagamento dell'intera attività geognostica commissionata

all'Impresa, poiché i dati di laboratorio geotecnico sono prevalenti rispetto agli altri già noti.

I contenitori o fustelle potranno essere di plastica o di acciaio (inox, plastificato o zincato) a seconda del tipo di campionatore usato, e dovranno risultare in ottimo stato di conservazione prima di poter essere usate per il prelievo; esse dovranno avere le seguenti dimensioni:

- . int. = 75 - 95 mm.
- spessore: 2 - 3 mm.
- lunghezza utile: 60 - 90 cm.

Dette fustelle potranno essere restituite integre all'impresa dopo l'esecuzione delle prove di laboratorio.

In linea di massima il diametro dei campioni indisturbati sarà compreso fra 70 e 95 mm.

I prelievi saranno eseguiti dopo aver pulito il fondo del foro da eventuali detriti ed i campioni verranno sigillati subito dopo il prelievo con paraffina fusa o tappi particolari e contraddistinti con



opportuna etichetta indelebile riportante il numero del sondaggio e la profondità iniziale e finale del prelievo e l'orientamento (alto/basso).

I prelievi di campioni indisturbati saranno valutati per ogni operazione di prelievo eseguita con idoneo campionatore.

Indicazioni sui campioni prelevati.

I campioni prelevati devono essere contraddistinti da cartellini inalterabili, che indichino:

- 1) cantiere;
- 2) numero del sondaggio;
- 3) numero del campione;
- 4) profondità di prelievo;
- 5) tipo di campionatore impiegato;
- 6) data di prelievo;
- 7) parte alta.

Il numero del campione, il tipo di campionatore usato ed il metodo di prelievo devono essere riportati sulla stratigrafia alla relativa quota, questi dati devono essere riportati anche nel caso di prelievi non riusciti.

Imballaggio e trasporto dei campioni

I campioni destinati al laboratorio saranno sistemati verticalmente e nel senso naturale in cassette appositamente costruite, con adeguati separatori ed imbottiture alle estremità, onde assorbire le vibrazioni del trasporto.

Le cassette andranno collocate in un locale idoneo a proteggerle dal sole e dalle intemperie, fino al momento della spedizione.

Le cassette dovranno contenere un massimo di 8 fustelle, onde facilitarne il maneggio; saranno dotate di coperchio e maniglie. Sul coperchio s'indicherà la parte alta.

Il trasporto, a carico della Ditta, verrà effettuato con tutte le precauzioni necessarie per evitare il danneggiamento dei campioni sotto la diretta responsabilità della Ditta secondo le indicazioni della D.L.

Il numero dei campioni prelevati potrà essere suscettibile di variazioni, rispetto a quanto previsto, in conseguenza della natura dei terreni oggetto dell'indagine. In particolare si sottolinea che le prove di taglio diretto e le prove dinamiche verranno realizzate solo ed esclusivamente su campioni indisturbati.

Il prezzo per il numero dei campioni prelevati è stato calcolato sulla base della voce di prezzo presente nell'elenco regionale dei prezzi per lavori edili in vigore.

### 2.3.4 Prelievo di campioni di tipo rimaneggiato

Il prelievo di campioni di terreno rimaneggiato potrà essere effettuato negli strati di terreno incoerenti durante l'esecuzione dei sondaggi.

Una prova di laboratorio da compiere su questo tipo di campione sarà il contenuto di acqua; per questo si renderà necessario isolare opportunamente il campione prelevato con della paraffina per evitare così fuoriuscite di acqua.

Il numero dei campioni prelevati potrà essere suscettibile di variazioni, rispetto a quanto previsto, in conseguenza della natura dei terreni oggetto dell'indagine.

Il prezzo per il numero dei campioni prelevati è stato calcolato sulla base della voce di prezzo presente nell'elenco regionale dei prezzi per lavori edili, in vigore.

### 2.3.5 Prove di permeabilità tipo Lefranc

Durante l'avanzamento del foro di sondaggio si eseguono le prove di permeabilità Lefranc, al fine di determinare la permeabilità nei tratti selezionati del foro rivestito. Con lo scopo di isolare il tratto di foro in prova si predispone il rivestimento fino alla quota raggiunta dalla perforazione, quest'ultima eseguita senza l'uso di fluido di circolazione per almeno l'ultimo metro di infissione.

In funzione della tipologia di terreno incontrato durante la perforazione, si effettuano prove di permeabilità a carico costante o a carico variabile.

La prova a carico costante consiste nella misurazione delle portate immesse o emunte in foro al fine di mantenere costante il livello dinamico, a seguito dell'abbassamento o innalzamento del livello dell'acqua in foro rispetto al livello statico della falda.

- Misurazione del livello indisturbato della falda, se presente;
- Immissione o emungimento di acqua nel foro fino al raggiungimento di un determinato livello dinamico dell'acqua;
- Attendere che il livello d'acqua in foro si stabilizzi;
- Mantenimento del livello dinamico per tutta la durata della prova tramite operazioni di immissione o emungimento d'acqua;
- Misurazione nel tempo dalla portata d'acqua immessa o emunta nel foro.
- Attendere il ripristino del livello statico della falda.

La prova di permeabilità a carico variabile si esegue variando il livello statico dell'acqua in foro e misurandone i valori nel tempo. L'esecuzione della prova avviene secondo le modalità seguenti:

- Misurazione del livello indisturbato della falda, se presente;
- Immissione o emungimento di acqua nel foro fino al raggiungimento di un determinato livello dinamico dell'acqua;
- Interruzione dell'immissione di acqua;
- Attendere che il livello d'acqua in foro raggiunga le condizioni di equilibrio;
- Misurazione del delta del livello d'acqua nel tempo.

### 2.3.6 Prove pressiometriche con pressimetro tipo Menard

Da eseguirsi con una sonda pressiometrica. La sonda cilindrica ad espansione idraulica è costituita da una cella centrale di misura, espandibile radialmente, posta tra due celle di guardia che devono impedire, durante la prova, deformazioni della cella di misura che non siano quelle radiali. La cella centrale di misura, piena d'acqua, è collegata ad un serbatoio in superficie che funge da separatore aria-acqua. La pressione è fornita da gas neutro (aria o azoto) e la variazione di raggio del foro, a seguito dell'espansione della membrana, viene ottenuta indirettamente misurando la variazione di volume dell'acqua nella cella centrale. Le pareti della cella di misura consisteranno di una membrana di gomma e di un involucro deformabile esterno in grado di adattarsi alla forma progressivamente assunta dalle pareti del foro nel corso della prova. La membrana potrà essere protetta da un involucro esterno a lamelle metalliche parzialmente sovrapposte, qualora reso necessario della tipologia del terreno. Le celle di guardia, anch'esse dotate di membrana elastica, vengono espanse mediante pressione di gas o di acqua attraverso un circuito indipendente da quello della cella centrale di misura. Dovranno essere utilizzate sonde pressiometriche di norma di diametro

pari a 44, 58 o 70 mm con un rapporto lunghezza (comprese celle)/diametro pari ad almeno 6 (sei). L'apparato di espansione delle celle deve permettere di variare il volume e la pressione all'interno delle stesse in forma del tutto regolabile e controllabile mediante la centralina di misura. La cella di misura sarà espansa mediante pressione idraulica; le celle di confinamento mediante pressione idraulica o di gas.

I tubi di connessione delle celle con gli apparati di espansione e di misura saranno di tipo plastico rigido, preferibilmente coassiali, con gas a pressione regolabile nell'intercapedine in modo da prevenire e contenere le variazioni di volume in corso di prova.

La centralina di misura deve includere un meccanismo per l'applicazione di incrementi controllati di pressione o di volume alla cella di misura ed un regolatore della pressione del gas nelle celle di guardia. Le pressioni applicate devono essere misurate mediante manometri di precisione con fondo scala di 2,5÷10 Mpa e risoluzione di 25 kPa nel caso dei terreni e con fondo scala di 10÷30 Mpa nel caso di rocce tenere. Le variazioni di volume devono essere misurate mediante tubicini graduati con risoluzione di circa 1 cm<sup>3</sup>. Sarà presente un dispositivo per amplificare di almeno 50 volte la sensibilità di lettura delle variazioni di volume, da impiegarsi quando tali variazioni diventino inferiori a 0,5 cm<sup>3</sup> per incrementi di pressione di 1 bar.

È richiesta la taratura della strumentazione prima dell'esecuzione delle prove.

Il livello piezometrico nel foro deve essere misurato immediatamente prima della prova in foro e registrato. Modalità esecutive.

Prima di posizionare la sonda pressiometrica nel foro, si procederà alla accurata lettura del volume V (volume della cella di misura alla pressione atmosferica). Tutti i circuiti saranno disaerati e i manometri azzerati con sonda a piano campagna. Il circuito per il controllo dei volumi sarà quindi chiuso e la sonda calata nel foro in queste condizioni. La profondità di prova viene assunta essere quella corrispondente al punto medio della cella di misura. Preparato il foro, che deve essere perfettamente pulito, la sonda pressiometrica sarà posizionata alla quota indicata dal programma. In accordo alle indicazioni del programma, la prova pressiometrica potrà essere eseguita in conformità ai due metodi descritti di seguito. Si noti che la pressione che deve essere mantenuta nelle celle di confinamento laterale durante la prova deve sempre essere inferiore a quella agente all'interno della cella di misura e sarà definita in base alla espressione:  $P_g = P_r + P_w - P_d$  dove:  $P_g$  = pressione celle di guardia  $P_r$  = pressione letta al manometro  $P_w$  = pressione idrostatica agente tra unità di misura e sonda pressiometrica a quota prova  $P_d$  = differenza di pressione tra cella di misura e celle di guardia. C1.

La prova pressiometrica dovrà essere eseguita esclusivamente in avanzamento.

Per ogni prova dovrà essere consegnato il certificato di prova recante indicazione su:

- cantiere e numero di sondaggio;
- profondità di prova;
- descrizione delle modalità di perforazione e del diametro relativo;
- descrizione stratigrafica del terreno nell'intervallo di prova;
- livello piezometrico;
- curve di taratura per le perdite di pressione e di volume;
- tabella delle letture a 30" e a 60";
- tabella con le letture volumetriche a 30" e a 60" dall'applicazione dell'incremento di pressione;
- curva di cantiere con i valori non corretti di pressione (kPa) e volume a 60" (cm<sup>3</sup>);

- curva pressiométrica (valori corretti);
- curva di creep;
- determinazione di  $v_0$  (volume iniziale) e  $p_0$  (pressione iniziale);
- determinazione di  $v_F$  (volume di scorrimento o fluage) e  $p_F$  (pressione di scorrimento o fluage);
- calcolo del modulo pressiométrico con indicazione degli intervalli di pressione e volume utilizzati (nel caso di prova con ciclo di scarico-ricarico dovrà essere calcolato anche il modulo nell'asola disegnata dal ciclo eseguito);
- calcolo della pressione limite  $p_L$ , con indicazione del metodo utilizzato e relativo grafico;
- note su qualsiasi variazione rispetto alle modalità di prova;
- calcolo della resistenza al taglio (angolo di attrito, coesione);
- descrizione del tempo atmosferico e della temperatura;
- copia dei certificati di taratura dei manometri, non anteriori di 6 mesi alla data di esecuzione della prova.

### 2.3.7 Pozzetti di protezione strumentazione

A bocca foro verrà applicato un pozzetto di protezione, dotato di lucchetto di chiusura solo se verrà installata strumentazione in foro.

### 2.3.8 Allestimento piezometro "tipo tubo aperto"

Il piezometro consente di misurare la quota del livello idrico e si posiziona all'interno del foro di perforazione, il quale deve preventivamente essere pulito da eventuali residui di perforazione. Esso è costituito da una batteria di tubi in PVC, filettati alle estremità, di diametro interno pari a 3" finestrati esclusivamente nel tratto in falda.

Per tutta la lunghezza del tratto finestrato, fino a risalire di 1,00 m dall'estremità superiore dello stesso, l'intercapedine tra il foro di perforazione e il tubo in PVC deve essere riempito di un materiale inerte drenante (ghiaietto arrotondato).

Al di sopra bisogna prevedere un tappo impermeabile di bentonite nell'intercapedine al fine di isolare l'acquifero sottostante ed evitare ingressi indesiderati di acqua.

Sulla sommità, in corrispondenza del boccaforo, si impermeabilizza l'intercapedine con malta cementizia al fine di impedire l'infiltrazione delle acque superficiali nel piezometro.

Infine, bisogna prevedere un idoneo pozzetto con chiusino al di sopra il piano campagna per evitare infiltrazioni di acque di ruscellamento all'interno del piezometro.

### 2.3.9 Allestimento piezometro "tipo Casagrande"

Il piezometro è costituito da una punta filtrante che va localizzata in corrispondenza dello strato da esaminare, opportunamente isolata dagli strati contigui e da un collegamento fino al piano campagna costituito da n. 2 tubicini in PVC del diametro di 1/2" circa.

L'isolamento della punta viene realizzato mediante l'esecuzione di un tappo impermeabile in sfere di argilla o bentonite opportunamente pestellate, da uno strato filtrante di circa ml 1,5 ove viene posizionata la punta e da un ulteriore tappo impermeabile; il tratto di collegamento viene comunemente riempito con materiale di risulta.

**REALIZZAZIONE TERMOVALORIZZATORE DI CATANIA**

La possibilità dello spurgo della cella da un lato e della doppia lettura del livello acquifero dell'altro, assicurano l'esattezza della misura.

In superficie si provvederà ad eseguire un idoneo pozzetto con chiusino per il contenimento della testa del piezometro. Tale chiusino verrà compensato con il relativo prezzo di elenco.

L'installazione del piezometro è compensata per ogni punta piezometrica e per ogni metro lineare di doppio tubo installato tra la quota del piano campagna ed il piezometro e comprende il rilievo di falda per ogni piezometro durante la durata del cantiere.

Preparazione del foro.

Il foro o il tratto di foro dove deve essere installata la cella piezometrica deve essere perforato ad acqua oppure con fanghi a polimeri degradabili.

In ogni caso, prima dell'installazione, il foro deve essere riempito (ritirando man mano i rivestimenti) fino ad una quota che sia di 0,5 m più bassa di quella di installazione del primo piezometro, con miscela cemento-bentonite-acqua in proporzioni tale che la consistenza della miscela, a presa avvenuta, sia simile a quella del terreno nella zona del piezometro. Indicativamente una miscela costituita da 30 parti di peso cemento, 6 di bentonite e 100 di acqua, può essere considerata adeguata nei terreni medi.

Ad avvenuto inizio della presa, il foro deve essere accuratamente lavato (previo degrado nel caso di presenza di fanghi a polimeri) con acqua pulita interponendo se necessario un sottile tappo di palline di bentonite e ghiaietto per stabilizzare il tetto della miscela plastica.

Installazione.

L'installazione seguirà le seguenti fasi:

- a) posa di uno strato di spessore 0,5 m di sabbia grossa pulita (1-4 mm);
- b) discesa a quota del piezometro con i relativi tubi di collegamento alla superficie. Nel caso di piezometri collegati a mezzo di tubi rigidi o semirigidi (PVC), comunque in spezzoni aggiuntabili, le giunzioni devono essere sigillate con teflon, loctite, ecc..., in modo da garantire la perfetta tenuta.
- c) posa di sabbia pulita attorno e sopra (0,5 m) il piezometro, ritirando man mano la colonna di rivestimento, senza l'ausilio della rotazione, con l'avvenenza di controllare che il piezometro non risalga assieme ai rivestimenti e che in colonna ci sia sempre un po di sabbia.
- d) posa del tappo impermeabile superiore costituito da palline di bentonite preconfezionate (1-2 cm) in strati di 20 cm alternate a straterelli di ghiaietto di 2-3 cm, per lo spessore complessivo di 1 m, ritirando man mano i rivestimenti (senza ruotare) e costipando sui livelli di ghiaietto. il rivestimento viene man mano ritirato con la solita avvertenza. Nel caso di vicinanza alla quota di posa del secondo piezometro (ove prescritti) il tappo impermeabile può essere prolungato fino a 0,5 m al di sotto di tale quota; la posa del secondo piezometro avverrà ripetendo le operazioni a), b), c), d), precedentemente descritte.)
- e) Riempimento del foro al di sopra del tappo impermeabile superiore fino alla sommità, mediante miscela plastica identica a quella già menzionata, colata attraverso aste discese al fondo del foro. Va tenuto presente che in presenza di 2 piezometri, può risultare difficoltoso (e pericoloso per i tubetti di collegamento) l'inserimento di questa batteria di astine, per la presenza di numerosi tubi nel foro. Si deve pertanto provvedere all'installazione delle astine di immissione della miscela fino dalla fase di messa in opera del secondo piezometro.

f) Sistemazione e protezione dell'estremità del (dei) piezometro (i) con la creazione di pozzetto a raso drenato al fine di evitare che eventuali acque superficiali penetrino nei tubicini del piezometro, ben cementato nel terreno, e munito di coperchio con lucchetto le cui chiavi verranno consegnate ad A4.

g) Spurgo e collaudo del piezometro con la determinazione della prima lettura significativa a seguito dell'esecuzione di una serie di almeno tre letture, la prima delle quali deve avvenire a non meno di 2 ore dalla realizzazione del piezometro e le successive a distanza di 24 ore l'una dall'altra.

### **2.3.10 Installazione di tubi per prove geofisiche "down-hole"**

I tubi per prospezioni sismiche "down-hole" hanno sezione circolare, con le seguenti caratteristiche:

spessore = 3 mm

diametro interno  $\varnothing_{int}$  = 75-100 mm.

I tubi sono realizzati in PVC in spezzoni da 3 m. di lunghezza ed assemblati mediante filettatura a vite o eventuali manicotti di giunzione.

#### Modalità di installazione

La perforazione sarà eseguita con diametro sufficiente a permettere l'installazione nel foro del tubo completo dei tubi esterni di iniezione.

Nel corso della perforazione si avrà cura di evitare reflussi in colonna e decompressioni del terreno nell'intorno del foro.

I rivestimenti dovranno poter essere estratti con sola trazione senza rotazione.

Prima dell'installazione, dovranno essere eseguiti i seguenti controlli:

controllare che i tubi ed i manicotti non presentino lesioni o schiacciature dovuti al trasporto, soprattutto nelle parti terminali;

controllare che le estremità dei tubi e dei manicotti non presentino sbavature che possano compromettere il buon accoppiamento dei tubi stessi;

verifica della disponibilità e dell'efficienza del tubo per l'iniezione della miscela di cementazione da applicare all'esterno della colonna;

controllo e preparazione dei componenti per la realizzazione della miscela di cementazione che sarà composta da acqua, cemento e bentonite rispettivamente in proporzione di 100, 30 e 5 parti in peso;

controllo degli utensili per l'installazione; diametro delle punte del trapano, diametro e lunghezza dei rivetti, tipo e scadenza del collante, efficienza della morsa di sostegno.

La posa in opera dei tubi dovrà avvenire in accordo con le seguenti modalità (l'uso dei manicotti e dei rivetti è facoltativo):

a) lavare accuratamente la perforazione con acqua pulita;

b) preassemblare i tubi in spezzoni di 6,00 m, terminanti ad un estremo con un manicotto, nella forma seguente:

inserire il manicotto sul tubo per metà della sua lunghezza;

praticare i fori per i rivetti lungo generatrici equidistanti dalle guide ed a circa 50 mm dall'estremità del manicotto;

mantenendo in posizione il manicotto mediante spine, introdurre l'altro tubo e forare; rimuovere il manicotto;

applicare un sottile strato di mastice sul tubo e all'interno del manicotto, attendere almeno 5 minuti;

infilare il primo tubo sul manicotto e chiodare con rivetti o serrare con nastro adesivo;



**REALIZZAZIONE TERMOVALORIZZATORE DI CATANIA**

evitando bruschi movimenti che possano causare torsioni, fasciare abbondantemente con nastro autovulcanizzante.

- c) montare sul primo spezzone, già munito di manicotto, il tappo di fondo e fissare il tubo per l'iniezione;
- d) inserire il primo tubo predisposto nella perforazione (in terreni sotto falda riempire il tubo di acqua per contrastare la spinta di Archimede e favorirne l'affondamento);
- e) bloccare il tubo mediante l'apposita morsa in modo che dalla perforazione fuoriesca solamente il manicotto di giunzione;
- f) inserire lo spezzone successivo ed eseguire l'incollaggio, la rivettatura e la sigillatura del giunto;
- g) allentare la morsa e calare il tubo nel foro (riempiendolo d'acqua se necessario) fissando nel contempo il tubo d'iniezione. Bloccare la colonna con la morsa quando fuoriesce solamente il manicotto;
- h) procedere di seguito fino al completamento della colonna annotando la lunghezza dei tratti di tubo e la posizione dei manicotti;
- i) completata la colonna, iniziare la cementazione che dovrà avvenire a bassa pressione ( $P = 2 \text{ atm}$ ) attraverso il tubo di iniezione, osservando la risalita della miscela all'esterno dei tubi. I rivestimenti di perforazione devono essere estratti, operando solo a trazione, non appena la miscela appare in superficie. Nella fase di estrazione dei rivestimenti il rabbocco di miscela potrà essere eseguito dalla testa del foro anziché attraverso il tubo di iniezione, per mantenere il livello costante a piano campagna.; qualora si noti l'abbassamento del livello della miscela il rabbocco dovrà continuare nei giorni successivi;
- l) nella fase finale della cementazione si dovrà provvedere all'installazione attorno al tratto superiore del tubo di prova di un tubo di protezione in acciaio o p.v.c. pesante (diametro interno minimo  $\varnothing_{\text{int}} = 0,12 \text{ m.}$ , lunghezza  $L = 1,00 \text{ m.}$ )(Flangia). Il tubo sporgerà di  $10 \div 15 \text{ cm.}$  dalla sommità del tubo per prove geofisiche e sarà provvisto di un coperchio in acciaio dotato di lucchetto;
- m) terminata la cementazione il tubo di prova sarà accuratamente lavato con un attrezzo a fori radiali e acqua pulita;
- n) dopo il lavaggio e a presa avviata, si dovrà verificare la continuità e l'integrità del tubo che dovrà essere internamente liscio e privo di sporgenze.

**Dispositivo di energizzazione**

La direzione dei lavori può richiedere alla distanza di 2,00 m. dalla bocca del foro la realizzazione di un cubo in calcestruzzo di lato 50 cm., inserito nel terreno per 20 cm. e reso ben solidale con il medesimo.

A presa e indurimento avvenuti, tale cubo deve essere resistente alla percussione manuale con mazza da 10 kg. e privo di lesioni, fratture, fessure da ritiro.

In alternativa al cubo, sempre se richiesto, sarà realizzato un alloggiamento interrato in cls per l'uso di un percussore idraulico.

**Documentazione**

La documentazione comprenderà:

- informazioni generali;
- schema geometrico del tubo installato;
- quota assoluta della testa del tubo;
- caratteristiche del tubo installato;
- modalità, quantità e composizione della miscela iniettata nell'intercapedine;

ubicazione e caratteristiche descrittive del dispositivo di energizzazione con date di esecuzione del getto.

### 2.3.11 Esecuzione di prove geofisiche "down-hole"

La prospezione sismica Down-Hole misura la velocità di propagazione delle onde sismiche di compressione ( $V_p$ ) e di taglio ( $V_{SH}$ ) nei terreni all'intorno di un foro di sondaggio. Le misure si eseguono attraverso il rilievo dei tempi di percorrenza di impulsi sismici da una sorgente emettitrice, posta in superficie, ad una o più unità riceventi (geofoni) ubicate all'interno del foro di sondaggio verticale, rivestito con idonea tubazione in PVC o ABS.

#### Strumentazione

Il sistema di energizzazione, di tipo esplosivo o meccanico, sarà ubicato in superficie a distanza adeguata dalla bocca foro in funzione della migliore risoluzione dell'indagine.

La sorgente di energia dovrà essere calibrata in funzione della natura e delle caratteristiche dei terreni interessati e che sono da considerarsi noti in quanto le misure geosismiche sono successive alla perforazione dei sondaggi entro i quali si eseguono.

Per il rilievo delle onde trasversali la sorgente di energia dovrà garantire la produzione di impulsi sismici idonei a generare onde a prevalente componente di taglio.

La strumentazione di acquisizione dati deve essere di tipo digitale incrementale con le seguenti caratteristiche:

sismografo registratore con un numero di canali uguale o superiore al numero di ricevitori utilizzati, con capacità di campionamento dei segnali tra 0,025 e 2 msec e dotato di filtri High Pass, Band Pass e Band Reject, di "Automatic Gain Control" e di convertitore A/D del segnale campionato, almeno a 16 bit;  
geofoni da foro triassiali, con frequenza compresa tra 8 e 14 Hz, di diametro minore o uguale a 70 mm da calare nel foro a profondità prefissate in grado di registrare i tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio; ogni ricevitore deve poter essere reso solidale con la tubazione di rivestimento del foro tramite un dispositivo - dispositivo di energizzazione per la generazione di onde P ed onde S, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali cioè con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione (onde P) e/o di taglio polarizzate sul piano orizzontale (onde SH):

- fucile o cannoncino sismico;
- massa battente (mazza da 10 kg) agente su un blocco/trave di legno o calcestruzzo adeguatamente ancorato al terreno e posto nelle adiacenze della bocca foro. La forma del blocco deve essere tale da potere essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità.

Altri dispositivi dovranno essere preventivamente approvati.

#### Modalità esecutive

L'esecuzione della prova Down-Hole richiede la predisposizione di un foro di sondaggio di diametro sufficiente a permettere l'installazione nel foro di un tubo in PVC munito dei necessari complementi per eseguire la cementazione dello stesso da fondo foro verso la superficie.

Durante la perforazione si dovrà avere particolare cura ad evitare rifluimenti in colonna e decompressioni del terreno nell'intorno del foro; l'eventuale rivestimento del foro dovrà essere estratto a trazione, senza rotazione della colonna.

In cantiere, prima dell'installazione del tubo in PVC o ABS, si dovrà provvedere a:



- 1) controllare che i tubi non presentino lesioni o schiacciamenti dovuti al trasporto con particolare riferimento alle parti terminali;
- 2) controllare che le estremità dei tubi non presentino irregolarità che possano compromettere il loro buon accoppiamento;
- 3) verificare l'efficienza del tubo per l'iniezione della miscela di cementazione da applicare all'esterno della colonna;
- 4) controllare e preparare i componenti per la realizzazione della miscela di cementazione che sarà composta da acqua, cemento e bentonite rispettivamente in proporzione di 100, 30 e 5 parti in peso;
- 5) controllare gli utensili per l'installazione ed in particolare l'efficienza della morsa di sostegno.

I tubi per prove Down-Hole dovranno avere sezione circolare con spessore  $\geq 3$  mm e diametro interno  $\geq 75$  mm. I tubi dovranno essere realizzati in PVC/ABS, in spezzoni in genere di 3 m di lunghezza ed assemblati, preferibilmente, mediante filettatura a vite in modo tale da garantire giunti lisci e a perfetta tenuta.

In linea di massima la posa in opera dovrà seguire la seguente procedura:

- 1) pulizia accurata della perforazione con acqua pulita;
- 2) pre-assemblaggio dei tubi in spezzoni di lunghezza in genere pari a 6 m con fasciatura delle giunzioni con nastro autovulcanizzante;
- 3) montaggio sul primo spezzone del tappo di fondo e fissaggio del tubo per l'iniezione;
- 4) inserimento del primo tubo predisposto nella perforazione; in presenza di terreni sottofalda si dovrà riempire il tubo con acqua per favorirne l'affondamento;
- 5) bloccaggio del tubo mediante l'apposita morsa in modo che dalla perforazione fuoriesca solamente l'estremità superiore del tubo in PVC/ABS;
- 6) inserimento dello spezzone successivo ed esecuzione delle operazioni di incollaggio e sigillatura del giunto;
- 7) prosecuzione delle operazioni di cui al punto VI. fino al completamento della colonna;
- 8) inizio della cementazione a partire dal fondo foro, a bassa pressione ( $\approx 2$  atm) attraverso il tubo di iniezione.

La cementazione deve risultare priva di sacche d'aria o discontinuità confrontando il volume teorico dell'intercapedine tubo/parete foro con il volume della miscela iniettata. Il rivestimento di perforazione dovrà essere estratto non appena la miscela appare in superficie. Nella fase di estrazione del rivestimento il rabbocco di miscela potrà essere eseguito da testa foro anziché attraverso il tubo di iniezione, per mantenere il livello costante a piano campagna; qualora si noti l'abbassamento del livello della miscela il rabbocco dovrà continuare nei giorni successivi;

- 9) nella fase finale della cementazione si dovrà provvedere alla installazione, attorno al tratto superiore di prova, di un tubo di protezione in acciaio o PVC pesante (diametro minimo = 120 mm, lunghezza  $\geq 1$  m). Il tubo dovrà sporgere di almeno 15 cm dalla sommità del tubo di prova e dovrà essere provvisto di un coperchio in acciaio dotato di lucchetto;
- 10) al termine delle operazioni di cementazione il tubo di prova dovrà essere accuratamente pulito con acqua per eliminare l'eventuale cemento rimasto all'interno della tubazione;
- 11) verifica della direzione e dello scostamento dalla verticale del foro mediante misure clinometriche, se richiesto.

A seguito delle operazioni preliminari su indicate le modalità di esecuzione della prova Down-Hole dovranno seguire la seguente procedura:

- 1) posizionamento e bloccaggio degli energizzatori delle onde di compressione e di taglio in prossimità della bocca pozzo (a qualche metro di distanza dai 2-5 m);
  - 2) posizionamento e bloccaggio del ricevitore a fondo foro;
  - 3) generazione di un impulso di taglio normale e coniugato con relativa registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio per verifica dei parametri di acquisizione (record time). Con questo primo test si dovrà riconoscere in maniera chiara l'arrivo delle onde di taglio mediante inversione di polarità del segnale acquisito. Stabiliti gli esatti parametri di acquisizione si procede nei modi indicati nei successivi punti;
  - 4) energizzazione delle onde di compressione e registrazione del file relativo;
  - 5) energizzazione delle onde di taglio e registrazione del file relativo;
  - 6) riposizionamento del ricevitore 1 metro (o quanto stabilito) più superficiale rispetto a fondo foro e ripetizione delle energizzazioni di compressione e di taglio come sopra
  - 7) ripetizione delle operazioni precedenti lungo tutto il foro (o parte di esso) interessato dal rilievo sismico.
- Le misure dovranno essere eseguite con la frequenza richiesta dal dettaglio dell'indagine.

#### Documenti da consegnare

- a) Relazione conclusiva contenente sia una nota tecnica descrittiva della prospezione eseguita (con indicazioni del numero del foro, ubicazione, modalità esecutive, caratteristiche della tubazione installata, quota assoluta o relativa della bocca foro e del fondo foro ecc.), sia gli algoritmi di calcolo impiegati (tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi), nonché una diagrafia con tutte le indicazioni riferibili ai dati misurati o calcolati (stratigrafia del sondaggio, tempi di arrivo delle onde P e S, velocità delle onde di P e S per ogni stazione, velocità intervallari delle onde P e S, attenuazione e fattore Q, coefficiente di Poisson dinamico, moduli di elasticità, di taglio e di compressibilità dinamici, tracce sismografiche onde P e S, risultanze finali ed interpretative).
- b) Sismogrammi in originale correlati dalle informazioni necessarie all'identificazione ai tempi di arrivo delle onde P e S nei singoli tiri.

## **2.3.12 Prove di resistenza meccanica**

### **2.3.12.1 Prove penetrometriche dinamiche discontinue (spt)**

La prova SPT si esegue durante la perforazione. Consiste nel registrare il numero di colpi necessari per far penetrare di 45 cm nel terreno a fondo foro un tubo campionario di dimensioni standard, collegato alla superficie mediante batteria di aste in testa alle quali agisce un maglio del peso di 73 kg che cade liberamente da un'altezza di 0.75 m.

Durante la prova si misura:

- N1 = numero di colpi di maglio necessari a provocare l'avanzamento del campionario per i primi 15 cm, assunti come tratto di "avviamento";
- N2 = numero di colpi che provoca la penetrazione del campionario nei successivi 15 cm;
- N3 = numero di colpi necessari per gli ultimi 15 cm di avanzamento. Si assume come resistenza alla penetrazione il valore:  $NSPT = N2 + N3$  Si utilizzano le seguenti attrezzature standard:

- Aste d'infissione del diametro esterno 50 mm e peso di 7 kg/m;
- testa di battuta di acciaio avvitata sulle aste;
- maglio di acciaio di 73 kg;
- dispositivo automatico che consente la caduta del maglio da un'altezza di 0.75 m;
- centratore di guida per le aste fra la testa di battuta e il piano campagna;
- campionatore standard (detto Raymond dalla società che lo ha introdotto per prima).

Si tratta di un tubo carotiere avente diametro esterno di 51 mm, spessore 16 mm e lunghezza complessiva comprendente scarpa e raccordo alle aste di 813 mm. Nei terreni ghiaiosi la scarpa del carotiere viene sostituita da una punta conica di diametro 51 mm, angolo 60°.

Il campionatore Raymond consta di un tubo diviso longitudinalmente a metà; i due semitubi sono tenuti insieme, durante l'infissione, da una scarpa tagliente avvitata alla base e da un anello in testa. Alla fine della prova si svita la scarpa, il carotiere si apre in due permettendo di estrarre il campione di terreno.

La sua vasta diffusione è dovuta principalmente alla facilità di realizzazione, potendo essere eseguita in qualunque tipo di terreno direttamente durante il sondaggio, senza l'adozione di attrezzature supplementari; il suo uso in tutto il mondo ha portato alla produzione di una abbondante bibliografia che rende agevole l'interpretazione dei risultati ottenuti.

Vi sono numerose correlazioni tra la resistenza alla penetrazione (NSPT) e i parametri geotecnici dei terreni sia granulari che coesivi:

Terreni granulari

Le correlazioni ritenute più attendibili tra la resistenza alla penetrazione (NSPT) ed alcuni parametri geotecnici sono le seguenti:

- 1) Correlazione di Gibbs-Holtz. Permette di determinare la densità relativa dei terreni granulari mediante la relazione tra la resistenza alla penetrazione e la pressione verticale efficace.
- 2) Correlazione di De Mello. Permette di ricavare l'angolo di attrito in funzione dello sforzo verticale efficace.
- 3) Le correlazioni di Schmertmann. Pongono in relazione l'angolo di attrito efficace con la densità relativa in funzione di differenti granulometrie, utilizzando sia i valori della densità relativa  $D_r$  elaborati con il metodo di Gibbs-Holtz che con il metodo di Terzaghi-Pech-Skempton.  

$$= 28 + 0.14 \cdot D_r = 31.5 + 0.115 \cdot D_r = 34.5 + 0.10 \cdot D_r = 38 + 0.08 \cdot D_r$$
- 4) Correlazioni tra la resistenza alla penetrazione NSPT e la compressibilità.

I metodi si dividono in due gruppi.

Il primo gruppo collega il valore della resistenza penetrometrica dinamica al cedimento; questo comprende il metodo di Terzaghi e Peck, di Meyerhof e di Peck-Bazaraa.

Il secondo gruppo si basa su correlazioni empiriche tra NSPT ed il modulo di deformazione delle sabbie; il gruppo comprende il metodo di Alpan, di D'Apollonia, di Parry.

Dal confronto dei cedimenti calcolati con i vari metodi e dei cedimenti reali misurati in America da Peck (1948) – Bazaraa (1967) – Baker (1965), Parry (1971) sembra che il metodo di Parry risulti più attendibile,

mentre i metodi più sperimentati sono quelli di Meyerhof, Peck-Bazaraa, Alpan e di Burland-Burbidge (1984).

Terreni coesivi

È di largo uso la correlazione di Terzaghi e Peck tra la resistenza alla penetrazione NSPT, la consistenza e la resistenza non drenata  $C_u$ .

La relazione tra NSPT e  $C_u$  tuttavia si considera accettabile solo per argille sensitive, ossia per quelle argille per cui la sensitività  $A = C_{ui} / C_{ur}$  (rapporto tra la coesione non drenata del campione indisturbato e coesione non drenata del campione rimaneggiato) varia da 4 a 8.

Negli altri casi si considera inattendibile la valutazione dei cedimenti dei terreni coesivi basati sul valore della resistenza dinamica NSPT.

### **2.3.12.2 Prove penetrometriche CPTU)**

La prova penetrometrica con piezocono CPTU, eseguita con una attrezzatura per prove penetrometriche statiche nella quale la punta elettrica è dotata di un filtro poroso, consente di misurare in maniera continua, oltre alla resistenza alla penetrazione alla punta  $q_c$  e alla resistenza per attrito laterale  $f_s$ , anche la pressione dell'acqua nei pori presente nel terreno durante la penetrazione.

A quote prefissate è possibile arrestare la penetrazione della punta ed eseguire una prova di dissipazione nel tempo della sovrappressione (positiva o negativa) indotta dalla penetrazione della punta, per determinare il valore della pressione idrostatica. La prova CPTU può essere eseguita solo in terreni saturi, al disotto del livello della falda.

La punta conica, con cui si effettua la prova, è costituita da una punta conica fissa, interamente solidale con il movimento della batteria di aste cave, con le seguenti dimensioni:

diametro di base del cono =  $34.8 \div 36.0$  mm

altezza della parte conica del cono =  $24.0 \div 31.2$  mm

altezza dell'estensione cilindrica =  $2 \div 5$  mm

angolo di apertura del cono =  $60^\circ$

La resistenza per attrito laterale viene misurata attraverso l'attrito sviluppato da un manicotto liscio, posizionato subito sopra la punta conica, con superficie laterale di  $147 \div 153$  cm<sup>2</sup> e diametro almeno uguale al diametro di base del cono e non superiore ad esso di 0,35 mm. La rugosità del manicotto di attrito nella direzione dell'asse longitudinale deve essere compresa tra 0,25 e 0,75  $\mu$ m.

## **2.4 Prospezioni geofisiche**

### **2.4.1 Georadar**

L'attrezzatura di base deve comprendere: un'unità georadar centrale di comando, controllo ed amplificazione, in grado di operare con almeno due canali, e dotato di un registratore magnetico digitale, di un monitor e di una stampante entrambe a colori; antenne, dotate di amplificatore di potenza, con frequenza compresa tra 80 e 1500 MHz; cavo multipolare di collegamento tra l'unità georadar e l'antenna. Dovranno essere disponibili appositi software necessari per l'analisi ed il trattamento dei segnali registrati. Modalità esecutive ed elaborazione dei dati.

La prospezione si esegue spostando le antenne lungo la superficie da investigare o manualmente o per mezzo di veicoli. Il rilievo si esegue lungo profili isolati, organizzati in maglie di dimensione idonea all'obiettivo della prospezione. Compatibilmente al tipo di superficie da indagare dovrà essere garantita una buona linearità del piano di lavoro, cercando preventivamente di eliminare, se possibile, asperità od oggetti metallici che possono produrre interferenze.

Documenti da consegnare

- Relazione conclusiva con le indicazioni delle attrezzature impiegate, delle modalità esecutive dei rilievi e dei criteri di elaborazione adottati;
- Rappresentazione plano-altimetrica in scala adeguata dei profili eseguiti e delle anomalie riscontrate;
- Radar-grammi di campagna, a diverse intensità cromatiche, con le distanze (m) in ascissa e i tempi di ascolto (ns) in ordinata;
- Radar-grammi interpretati in funzione delle costanti dielettriche dei mezzi attraversati, con le distanze (m) in ascissa e i tempi di ascolto (ns) in ordinata e/o la profondità (m).

## **2.4.2 Analisi tramite metodo HVSR**

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

- trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza ( $< 1-2$  Hz);
- amplificatori;
- digitalizzatore;
- frequenza di campionamento:  $> 50$  Hz;
- convertitore A/D (analogico digitale) a 16 o 24 bit;
- durata registrazione:  $> 30$  minuti;
- collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale

Prestare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc., in quanto possono creare disturbo nell'effettuazione delle misure, inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza. Si dovrà specificare il tipo di apparecchiatura utilizzata e documentare le condizioni in cui viene registrato il rumore ambientale.

La documentazione consegnata dovrà contenere:

- descrizione delle procedure eseguite (frequenza di campionamento, durata della registrazione);
- planimetria con ubicazione della prova e posizionamento dello strumento;
- criteri di attendibilità della misura;
- criteri di validità del picco di fr;
- valori di soglia delle condizioni di stabilità;
- curve H/V con deviazione standard in tutto l'intervallo di frequenze considerato;
- indicazione dei vari picchi ottenuti e deviazione standard in ampiezza e frequenza;
- verifica dell'assenza di rumore elettromagnetico;
- interpretazione di "fr" e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito;
- valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alle frequenze di risonanza;
- spessori della coltre di copertura;

### 2.4.3 Profili di resistività ERT

La prospezione consiste nel progressivo spostamento lungo una linea definita (o secondo una maglia – in questo caso si parlerà più opportunamente di mappe di resistività) di un quadripolo AMNB, con distanza tra gli elettrodi mantenuta fissa, misurando di volta in volta la resistività dei terreni attraversati.

L'attrezzatura minima dovrà comprendere:

- georesistivimetro analogico o digitale con impedenza di ingresso minima pari a 10 megaohm, sensibilità di almeno 0,1 millivolt, circuito di compensazione dei potenziali spontanei;
- generatore di potenza costituito da gruppo elettrogeno con raddrizzatore di potenza adeguata o con batterie a secco anch'esse di tensione e potenza adeguata;
- cavi elettrici multipolari (preferibilmente fino a 32 conduttori) ad alto isolamento, con specifica guaina di protezione resistente alle azioni di trazione e abrasione;
- elettrodi in acciaio, in rame e impolarizzabili; in particolare gli elettrodi di tensione M ed N dovranno essere in rame e, in terreni particolarmente secchi, dovranno essere immersi in una soluzione satura di solfato di rame (elettrodi impolarizzabili).

Si potranno utilizzare indifferentemente dispositivi elettrodi di Wenner, di Schlumberger, polo-polo, polodipolo dipolo-dipolo. Preliminarmente all'esecuzione della campagna di prospezione geoelettrica dovrà essere effettuata una prova di isolamento dei cavi del circuito elettrico. La lettura agli elettrodi di tensione dovrà essere sufficientemente elevata in rapporto al rumore; La durata del periodo di registrazione dovrà essere tale da permettere di valutare, senza incertezze, il valore della differenza di potenziale  $\Delta V$ . La determinazione della distanza interelettrodica sarà determinata sulla base di alcuni sondaggi elettrici verticali. Fissata questa si effettueranno le misure di resistività spostando ogni volta sui punti prestabiliti il quadripolo mantenendo costante la distanza interelettrodica.

Documenti da consegnare:

- a) Relazione conclusiva contenente la descrizione della strumentazione impiegata, delle operazioni eseguite, con commento e interpretazione dei dati acquisiti e delle anomalie riscontrate eventualmente tarate sulla base di sondaggi;
- b) Carta con l'ubicazione planimetrica dei punti di misura e dei sondaggi di taratura eventualmente eseguiti;
- c) Profili di resistività in scala adeguata all'estensione dell'indagine e ai dettagli riscontrati;
- d) Carta di resistività in scala adeguata;
- e) Copia dei libretti di campagna originali.

### 2.4.4 Sismica a Rifrazione

L'attrezzatura per l'acquisizione dei dati dovrà avere le seguenti caratteristiche minime:

- sismografo con un minimo di n. 24 canali, di tipo digitale incrementale, dotato di capacità di campionamento di 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 msec, mille o più punti di campionamento per traccia sismica; il sismografo dovrà, inoltre, presentare la possibilità di stack degli impulsi sismici, filtri analogici e digitali programmabili (filtri attivi tipo high pass, band pass e band reject), guadagno verticale del segnale (in ampiezza) e sensibilità tra 6 e 99 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita non inferiore a 16 bit.

- geofoni verticali con frequenza propria variabile tra 8-100 Hz per il rilievo delle onde di compressione;
  - geofoni orizzontali con frequenza propria variabile tra 6-14 Hz per il rilievo delle onde di taglio;
  - sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" (time-break).
  - sistema di energizzazione necessario a generare le onde sismiche, adeguato per le onde P e le onde S.
- Per la sismica con acquisizione tomografica, indicativamente la spaziatura può variare tra 1/4 ed 1/5 della profondità dell'obiettivo.

I processi fondamentali di analisi per la misura dell'attenuazione dovranno seguire le seguenti procedure: • analisi del rapporto spettrale delle ampiezze variabili nelle diverse componenti di frequenza dell'impulso microsismico ed assorbite in vario grado in funzione della distanza; • analisi del decadimento d'ampiezza dei primi eventi o di quelli successivi in ragione della distanza e successiva rettificazione della valutazione per compensare la diminuzione dovuta alla geometria di propagazione; • valutazione delle variazioni di larghezza dell'impulso sismico (pulse width time) in relazione alla distanza; la misura deve essere effettuata sul primo quarto di ciclo del primo evento.

Documenti da consegnare:

- Relazione conclusiva in cui siano dettagliatamente descritte le operazioni eseguite, i criteri di calcolo e di interpretazione adottati, nonché una sintesi dei risultati ottenuti;
- Cartografia in scala 1:5000 (o 1:2000) con l'esatta ubicazione degli stendimenti effettuati;
- Sismogrammi in originale rilegati in fascicolo con le necessarie indicazioni per la loro esatta individuazione sulla cartografia;
- Diagrammi "Distanze/Tempi Rifratti" (Dromocrone), rappresentati con la stessa sequenza e continuità degli stendimenti effettuati, corredati degli eventuali passaggi intermedi dell'elaborazione;
- Sezioni sismostratigrafiche in termini di velocità delle onde. Dette sezioni dovranno riportare tutte le indicazioni parametriche dei singoli rifrattori individuati e, in proiezione, la posizione di eventuali sondaggi meccanici e/o misure geofisiche in foro eseguiti per taratura e/o controllo;
- Sezioni tomografiche con elaborazione a celle di velocità o isolinee, in termini di velocità delle onde sismiche, in una scala adeguata.

## 2.5 Analisi e prove geotecniche di laboratorio

Sui campioni indisturbati prelevati in fase di sondaggi diretti, saranno effettuate le analisi e le prove previste in progetto o diversamente disposte dalla Direzione dei Lavori. L'Appaltatore, se non dispone di laboratorio geotecnico e di personale specializzato, dovrà inviare, con la massima cautela, i campioni al laboratorio prescelto, di gradimento della Direzione dei Lavori.

Le risultanze delle analisi e delle prove geotecniche, svolte secondo le modalità esplicative e le indicazioni fornite dalla DLL, dovranno essere riportate in un elaborato che l'Impresa dovrà consegnare alla DLL in n° 5 copie. Tale elaborato, a firma di un Geologo e di un Ingegnere, dovrà comprendere:

- descrizione dei campioni esaminati;



- certificazione delle prove a mezzo di appositi stampati, dai quali si evincano le curve caratteristiche ed i parametri determinati;
- un quadro riepilogativo di tutte le indagini, dal quale sinteticamente si possano rilevare le caratteristiche fisico-meccaniche dei campioni esaminati;
- una relazione esplicativa delle modalità seguite durante le analisi e le prove, ed illustrativa dei risultati ottenuti.

Nella stessa relazione dovrà essere inserita una nota sullo stato di conservazione dei campioni pervenuti in laboratorio, in fustelle o contenitori, sulla loro qualità e sui residui riconservati e riconsegnati all'Impresa. Le prove dovranno essere effettuate facendo riferimento alle più importanti normative nazionali ed internazionali esistenti (C.N.R., U.N.I., A.S.T.M., A.A.S.H.T.O., B.S.) e saranno compensate con i prezzi di elenco.

### 2.5.1 Caratteristiche fisiche, classificazione delle terre e limiti di Atterberg

Per ogni campione, di qualsiasi natura, dovrà essere compilata una scheda sulla quale dovranno essere riportati i risultati delle determinazioni di laboratorio per l'acquisizione delle più importanti caratteristiche fisiche dei campioni:

- il contenuto naturale in acqua;
- il peso di volume;
- il peso unitario secco (o densità secca);
- il peso specifico del solido;

e le immediate determinazioni da queste:

- l'indice dei vuoti;
- la porosità;
- il grado di saturazione;
- il peso di volume saturo.

La scheda dovrà riportare, inoltre, tutte le indicazioni riguardanti il sondaggio, il numero del campione, la profondità ed il cantiere di provenienza.

La classificazione delle terre, con l'osservanza di quanto dettato dalle norme vigenti (A.S.T.M. o U.N.I.), richiede la determinazione dei limiti di Atterberg e della granulometria.

Per la determinazione del limite di liquidità dovrà essere usato il "cucchiaino di Casagrande". Per ogni campione e sulla sola frazione di terra passante al setaccio U.N.I. 0.425 (A.S.T.M. 40) si dovranno eseguire non meno di tre prove con contenuto d'acqua differente, per ciascuna delle quali dovranno contare i colpi necessari affinché un solco operato nel provino opportunamente steso nel cucchiaino, si chiuda diametralmente per la lunghezza di 13 millimetri. La diagrammazione semilogaritmica dei dati dovrà consentire la chiara determinazione dei limiti di liquidità, che sarà dato dal contenuto in acqua corrispondente a 25 colpi.



Il limite di plasticità dovrà essere determinato sempre sul passante al setaccio U.N.I. 0.425 (A.S.T.M. 40) e verrà dato dal grado di umidità di un bastoncino di terra ricavato dal campione, di lunghezza di circa 10 cm e diametro di 3 mm, nel momento in cui questo, dopo opportuno arrotolamento su di un piano assorbente, si rompe in frammenti di 5-10 millimetri.

Con il limite di ritiro dovrà essere determinato il contenuto d'acqua  $w_r$  che corrisponde al passaggio dallo stato solido a quello semisolido. È il punto al di sotto del quale il volume di un campione di limo e/o argilla non diminuisce con una qualsiasi riduzione del contenuto d'acqua

Per le analisi granulometriche dovranno essere impiegati setacci o crivelli della serie C.N.R., U.N.I. o A.S.T.M. Per le terre con grana di dimensioni maggiori di 0.075 mm l'analisi per vagliatura meccanica dovrà essere effettuata per "via secca". Se la terra presenta una non trascurabile percentuale di limi ed argille, di difficile separazione dalla frazione grossa, si dovrà ricorrere all'analisi granulometrica "umida", per l'allontanamento del passante al setaccio U.N.I. 0.075 (A.S.T.M. 200). Alla frazione di terre passanti al setaccio suddetto, l'analisi dovrà, invece, essere effettuata con il metodo della sedimentazione.

I risultati sia dei limiti di Atterberg che delle granulometrie dovranno essere riportati in appositi diagrammi e consegnati in n° 5 copie alla Direzione dei Lavori.

## 2.5.2 Caratteristiche meccaniche delle terre: prove di taglio diretto (cd)

Per la conoscenza della resistenza al taglio di terreni coerenti o incoerenti, l'Appaltatore, dovrà effettuare la prova di taglio diretto con la scatola di Casagrande. Tale prova, che dovrà essere eseguita obbligatoriamente in condizione drenate, sarà valida se sviluppata su almeno tre provini consolidati e svolta secondo le normative e le specifiche di riferimento: ASTM D 3080-04 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions; UNI CEN ISO/TS 17892/10/2005. La prova sarà quindi eseguita su tre provini cilindrici o a sezione quadrata di diametro o lato non inferiore a 50 mm e rapporto diametro/altezza compreso tra 2 e 2.5 preparati con apposito tornietto campionario a partire da campioni indisturbati; per materiali poco consistenti si potrà infiggere a pressione, direttamente nel campione da analizzare, apposita fustella calibrata; in nessun caso sarà possibile infiggere a mano la fustella. L'altezza dei provini dovrà in ogni caso essere maggiore di 6 volte il diametro massimo delle particelle costituenti il materiale in prova. Particolare importanza assume la preparazione delle facce terminali dei provini che dovranno essere perfettamente piane e perpendicolari all'asse dei provini. La preparazione del provino dovrà avvenire in ambiente ad umidità controllata in modo da evitare qualsiasi variazione al contenuto d'acqua iniziale. La prova si articola nelle due distinte fasi di consolidazione e di taglio:

*Fase di consolidazione:* nella fase di consolidazione viene gradualmente incrementato il carico assiale applicato al provino, fino al raggiungimento della pressione di consolidazione indicata dalla direzione dei lavori per ciascun provino. Durante la fase di consolidazione, si monitoreranno le deformazioni assiali in funzione del tempo, in modo da poter stabilire la fine della fase di consolidazione primaria, prima di ciascun incremento di carico, in analogia a quanto indicato per le prove edometriche ad incrementi di carico controllati. I valori delle deformazioni assiali in funzione del tempo relativi all'ultimo gradino di carico saranno registrati e diagrammati in funzione del logaritmo o della radice quadrata del tempo per la determinazione del  $t_{100}$  di fine consolidazione assunto come parametro base per il calcolo della velocità di rottura.

*Fase di rottura:* nella fase di rottura verrà gradualmente incrementato il carico orizzontale fino ad ottenere deformazioni orizzontali non inferiori al 20% del diametro iniziale del provino. Al fine di evitare l'insorgere di sovrappressioni idrauliche conseguenti l'incremento tensionale, la velocità di deformazione  $V_r$  sarà stabilita sulla base del  $t_{100}$  di fine consolidazione e dello scorrimento orizzontale atteso a rottura  $\delta_r$ , secondo la seguente equazione:

$$V_r = \frac{\delta_r}{10 \cdot t_{100}}$$

Per quanto riguarda i valori dello scorrimento a rottura, funzione del tipo di materiale in prova, si forniscono nella tabella seguente alcuni valori indicativi.

Tipo di terreno	Scorrimento a rottura [mm]
argille tenere	8
argille sovraconsolidate	2 ÷ 5
argille molto sovraconsolidate	1 ÷ 2
sabbie	1 ÷ 5

Durante la fase di rottura si monitoreranno e si registreranno ad opportuni intervalli temporali i valori di spostamento orizzontale, deformazione verticale e resistenza al taglio. Ove indicato, al termine della fase di rottura, si procederà alla determinazione della resistenza residua, effettuando almeno cinque cicli completi di andata e ritorno della scatola di taglio fino a fondo corsa alla medesima velocità di scorrimento adottata per la determinazione della resistenza di picco (procedura completa), controllando in ogni caso che si sia raggiunta la completa stabilizzazione della curva resistenza al taglio - scorrimento orizzontale.

La resistenza residua può essere determinata anche attraverso l'esecuzione di 5 cicli di taglio veloci, condotti a velocità di scorrimento compresa tra 1 e 2 mm/min. fino a deformazioni del 20% per ciascun ciclo, e di un ciclo di taglio finale con misura della resistenza al taglio in funzione dello scorrimento orizzontale, condotto alla medesima velocità di scorrimento, adottata per la determinazione della resistenza di picco (procedura semplificata).

La documentazione minima da fornire dovrà comprendere:

- identificazione completa del campione e dei provini sottoposti a prova;
- dimensioni iniziali dei provini;
- peso di volume naturale, contenuto d'acqua e grado di saturazione iniziale e finale dei provini;
- tabella con la progressione di carico adottata in fase di consolidazione per ciascun provino;
- tabella con i valori della variazione di altezza e dei relativi tempi di acquisizione durante la fase di consolidazione per ciascun provino;
- diagramma della deformazione verticale - logaritmo del tempo, o in alternativa deformazione verticale - radice quadrata del tempo per ciascun provino;
- valore del tempo di fine consolidazione  $t_{100}$  di ciascun provino;
- altezza dei provini al termine della fase di consolidazione;
- velocità di deformazione adottata nella fase di rottura;
- tabella di sintesi con i valori di resistenza al taglio, scorrimento orizzontale e deformazione

verticale registrati per ciascun provino in fase di rottura;

- diagramma della resistenza al taglio - scorrimento orizzontale per ciascun provino;
- diagramma della deformazione verticale - scorrimento orizzontale per ciascun provino;
- eventuale diagramma cumulato della resistenza al taglio - scorrimento orizzontale per la determinazione della resistenza residua;
- valori della resistenza al taglio e dello scorrimento orizzontale a rottura per ciascun provino;
- eventuali valori della resistenza al taglio residua e del relativo scorrimento orizzontale per ciascun provino;
- rappresentazione dello stato di sollecitazione a rottura ed eventualmente allo stato residuo di tutti i provini sottoposti a prova espresso in termini di sforzi efficaci nel piano  $\sigma/\tau$  con indicazione dell'involuppo di rottura;
- indicazione del valore di resistenza al taglio di picco ed eventualmente residua del campione esaminato espresso in termini di tensioni efficaci dai parametri  $c'$  e  $\phi'$ ;
- documentazione delle misure effettuate;
- copia del certificato di taratura degli strumenti di misura e controllo (bilancia, comparatori millesimali o trasduttori lineari di spostamento, anelli dinamometrici o trasduttori di carico), non anteriore di sei mesi alla data di prova.

### **2.5.3 Caratteristiche meccaniche delle terre: prove edometriche**

Le prove dovranno essere eseguite secondo le raccomandazioni AGI, ASTM e UNI. Il coefficiente  $e_{ed}$  dovrà essere calcolato per ogni intervallo di carico, mentre la determinazione dei coefficienti "CV" e "K" verrà eseguita su tre intervalli di carico da scegliersi in base alle tensioni litostatiche esistenti e ai sovraccarichi da applicare. La determinazione del "T50" (o "T90") e della pressione massima di consolidazione dovrà essere riportata rispettivamente sui grafici abbassamenti /  $\log T$  e indice dei vuoti /  $\log p$ .

### **2.5.4 Caratteristiche meccaniche delle terre: prove triassiali (uu)**

La prova consiste nella determinazione della resistenza al taglio non drenata, espressa in termini di tensioni totali, e della relazione sollecitazione-deformazione di terreni coesivi sottoposti a condizioni di sollecitazione triassiale. Normative e specifiche di riferimento: ASTM D 2850-03 Standard Test Method for Unconsolidated, Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression; UNI CEN ISO/TS 17892-8/2005.

La prova sarà eseguita su tre provini cilindrici, di diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5, preparati con apposito tornietto campionario a partire da campioni indisturbati; per materiali poco consistenti si potrà infiggere a pressione, direttamente nel campione da analizzare apposita fustella calibrata; in nessun caso sarà possibile infiggere a mano la fustella. Il diametro dei provini dovrà in ogni caso essere maggiore di 6 volte il diametro massimo delle particelle costituenti il materiale in prova. Particolare importanza assume la preparazione delle facce terminali dei provini che dovranno essere perfettamente piane e perpendicolari all'asse dei provini. La preparazione del provino dovrà avvenire in ambiente ad umidità controllata, in modo da evitare qualsiasi variazione al contenuto d'acqua iniziale.

La prova sarà condotta senza saturazione preliminare adottando tre diversi valori della tensione di confinamento (tensione di cella) stabiliti dalla direzione dei lavori. La fase di compressione assiale sarà condotta adottando velocità di deformazioni comprese tra 0.3 e 1%/min. in funzione delle caratteristiche di plasticità del materiale e sarà in ogni caso protratta sino al raggiungimento di valori della deformazione assiale non inferiori al 15 %. La documentazione minima da fornire dovrà comprendere:

- identificazione completa del campione e dei provini sottoposti a prova;
- dimensioni dei provini;
- peso di volume naturale;
- contenuto d'acqua iniziale dei provini;
- velocità di deformazione adottata;
- valore della pressione di cella adottata per ciascun provino;
- tabella di sintesi con i valori di sforzo deviatorico e deformazione assiale registrati per ciascun provino;
- diagramma dello sforzo deviatorico - deformazione assiale per ciascun provino;
- valori dello sforzo deviatorico e della deformazione assiale a rottura per ciascun provino;
- rappresentazione dello stato di sforzo a rottura, espresso in termini di sforzi totali nel piano  $\sigma/\tau$  a mezzo cerchi di Mohr, con indicazione dell'involuppo di rottura;
- indicazione del valore di resistenza al taglio del campione esaminato, espresso in termini di tensioni totali dal parametro  $c_u$ ;
- documentazione delle misure effettuate;
- copia del certificato di taratura degli strumenti di misura e controllo (bilancia, comparatori millesimali o trasduttori lineari di spostamento, anelli dinamometrici o trasduttori di carico; manometri o trasduttori di pressione), non anteriore di sei mesi alla data di prova.

### **2.5.5 Caratteristiche meccaniche delle terre: prove triassiali ( $c_u$ )**

La prova consiste nella determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni totali ed efficaci di un campione di terreno sottoposto a condizioni di sollecitazione triassiale; la prova può inoltre essere utilizzata per la determinazione dei parametri di deformabilità non drenati.

La prova sarà eseguita su tre provini cilindrici, di diametro non inferiore a 35 mm e rapporto altezza/diametro compreso tra 2 e 2.5, preparati con apposito tornietto campionatore a partire da campioni indisturbati; per materiali poco consistenti si potrà infiggere a pressione direttamente nel campione da analizzare apposita fustella calibrata; in nessun caso sarà possibile infiggere a mano la fustella. Il diametro dei provini dovrà in ogni caso essere maggiore di 6 volte il diametro massimo delle particelle costituenti il materiale in prova. Particolare importanza assume la preparazione delle facce terminali dei provini che dovranno essere perfettamente piane e perpendicolari all'asse dei provini. La preparazione del provino dovrà avvenire in ambiente ad umidità controllata in modo da evitare qualsiasi variazione al contenuto d'acqua iniziale.

La prova verrà condotta attraverso tre distinte fasi: saturazione, consolidazione e rottura.

Fase di saturazione: la saturazione preliminare sarà condotta attraverso l'applicazione di backpressure in diversi gradini di pressione di entità variabile in funzione delle caratteristiche di consistenza dei terreni in prova e comunque mai superiori a 50 kPa; durante tutta la fase di saturazione si dovrà mantenere una

differenza di pressione tra pressione di cella e back-pressure compresa tra 5 e 10 kPa al fine di evitare premature consolidazioni dei provini.

Dopo ogni gradino di saturazione, una volta raggiunta la completa stabilizzazione delle pressioni, si provvederà alla misura del grado di saturazione raggiunto attraverso la determinazione del parametro B; la fase di saturazione potrà essere conclusa solo quando il parametro B assumerà valori superiori a 0.95 in due successive determinazioni.

Fase di consolidazione: la fase di consolidazione sarà condotta incrementando la pressione di cella fino a raggiungere il prefissato valore della pressione di consolidazione da adottare per ciascun provino stabilito dalla Direzione Lavori. Dopo la stabilizzazione della pressione interstiziale conseguente l'incremento tensionale applicato si avvierà la fase di consolidazione consentendo il drenaggio e registrando le variazioni di volume ed eventualmente le variazioni di pressione interstiziale in funzione del tempo.

Dal diagramma variazione di volume - logaritmo del tempo, o in alternativa variazione di volume - radice quadrata del tempo, si determinerà il tempo di fine consolidazione  $t_{100}$  che sarà assunto come parametro base per il calcolo della velocità di rottura.

Fase di rottura: durante la fase di rottura, che avverrà in condizioni di drenaggio impedito si incrementerà progressivamente lo sforzo deviatorico, mantenendo fissa la pressione di cella, fino ad ottenere deformazioni assiali non inferiori al 15%. Al fine di assicurare una uniforme distribuzione ed equalizzazione della sovrappressione idraulica conseguente l'incremento tensionale, la velocità di deformazione  $v_r$  sarà stabilita sulla base del  $t_{100}$  di fine consolidazione e della deformazione attesa a rottura  $\epsilon_r$  secondo la seguente equazione:

con  $H_c$  = altezza del provino al termine della fase di consolidazione

I valori di  $\epsilon_r$ , funzione del tipo di materiale, risultano generalmente compresi tra un valore minimo del 2%, valido per terreni molto consistenti, sovraconsolidati, ad un valore massimo del 10÷12% valido per terreni coesivi teneri.

Durante tutta la fase di rottura verranno monitorati e registrati ad intervalli di tempo opportuni, i valori di sforzo deviatorico, deformazione assiale e pressione interstiziale.

La documentazione minima da fornire dovrà comprendere:

- identificazione completa del campione e dei provini sottoposti a prova;
- dimensioni iniziali dei provini;
- peso di volume naturale, contenuto d'acqua e grado di saturazione iniziale dei provini;
- tabella riassuntiva con i valori delle pressioni di cella e della back-pressure adottati durante la fase di saturazione, con indicazione del valore assunto dal parametro B al termine di ciascun gradino;
- valori della back-pressure e della pressione di cella adottati durante la fase di consolidazione per ciascun provino;
- tabella con i valori della variazione volumetrica e dei relativi tempi di acquisizione durante la fase di consolidazione per ciascun provino;
- diagramma variazione di volume - logaritmo del tempo, o in alternativa variazione di volume – radice quadrata del tempo per ciascun provino;
- valore del tempo di fine consolidazione  $t_{100}$  di ciascun provino;

- peso di volume, contenuto d'acqua e grado di saturazione di ciascun provino al termine della fase di consolidazione;
- dimensioni dei provini al termine della fase di consolidazione;
- velocità di deformazione adottata nella fase di rottura;
- peso di volume, contenuto d'acqua e grado di saturazione di ciascun provino al termine della fase di rottura;
- tabella di sintesi con i valori di sforzo deviatorico, deformazione assiale e pressione interstiziale registrati per ciascun provino in fase di rottura;
- diagramma sforzo deviatorico - deformazione assiale per ciascun provino;
- diagramma pressione interstiziale - deformazione assiale per ciascun provino;
- diagramma rapporto degli sforzi principali efficaci - deformazione assiale per ciascun provino;
- diagramma parametro A delle pressioni interstiziali - deformazione assiale per ciascun provino;
- valori dello sforzo deviatorico e della deformazione assiale a rottura per ciascun provino;
- rappresentazione del percorso di sollecitazione di tutti i provini sottoposti a prova espresso in termini di sforzi efficaci nel piano  $p'/q$  con indicazione dell'involuppo di rottura;
- rappresentazione dello sforzo a rottura in termini di sforzi efficaci nel piano  $\sigma/\tau$  a mezzo di cerchi di Mohr con indicazione dell'involuppo di rottura;
- indicazione del valore di resistenza al taglio del campione esaminato espresso in termini di tensioni efficaci dai parametri  $c'$  e  $\phi'$ ;
- documentazione delle misure effettuate;
- copia del certificato di taratura degli strumenti di misura e controllo (bilancia, comparatori millesimali o trasduttori lineari di spostamento, anelli dinamometrici o trasduttori di carico; manometri o trasduttori di pressione) di data non anteriore di sei mesi alla data di prova.

## **2.5.6 Caratteristiche meccaniche delle terre: prove di colonna risonante (RC)**

La prova di colonna risonante è una prova di laboratorio dinamica che consiste nell'applicare a un provino in cella cilindrica una sollecitazione pulsante torsionale ciclica, ad una frequenza tale da mandare in risonanza il sistema provino-oscillatore.

Modalità esecutive e caratteristiche della strumentazione:

La prova dovrà essere effettuata su un provino di terreno di forma cilindrica avente diametro  $\geq$  a 38 mm, tramite apparecchiatura dotata di motore torsionale capace di applicare l'eccitazione alla sommità del provino alla sommità del provino fino ad una frequenza non inferiore a 250 Hz, con cella triassiale con capacità di confinamento non inferiore a 1000 kPa, con sistema di misurazione delle pressioni di cella ed interstiziali a due trasduttori di pressione con linearità pari a 0,25%, in un campo di applicazione di 1000 kPa, con trasduttore differenziale di pressione per la determinazione delle variazioni volumetriche con una capacità non inferiore a 500 ml di acqua e 0,25% di linearità, comprensiva di almeno n°10 determinazioni del modulo di taglio e dello smorzamento eseguite su uno stato tensionale isotropo.

Documenti da consegnare:

La documentazione minima da fornire dovrà comprendere:

- a) Informazioni generali;
- b) identificazione completa del campione e del provino sottoposto a prova;
- c) tabella riassuntiva con i valori del modulo di taglio  $G$ , della deformazione di taglio  $\gamma$ , del rapporto di smorzamento  $D$  e dell'incremento delle pressioni neutre  $\Delta u$  durante le varie fasi della prova e nella fase di decadimento;
- d) valore del modulo di taglio  $G_{max}$  espresso in percentuale di quello critico;
- e) grafico del modulo di taglio  $G$  in funzione della deformazione di taglio  $\gamma$ ;
- f) grafico dello smorzamento  $D$  in funzione della deformazione di taglio  $\gamma$ ;
- g) grafico del modulo di taglio  $G/G_{max}$  in funzione della deformazione di taglio  $\gamma$ .

Riferimenti normativi:

ASTM D 4015-07 - Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method.