



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 PALERMO

### Opere civili

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

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 PALERMO

Num. Documento: TMVCS-PA-PF-00-050106-04-A

## INDICE

<b>1. Premessa.....</b>	<b>3</b>
1.1. Sintesi delle indagini.....	3
<b>2. 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 litoide.....	6
2.3.4. Pozzetti di protezione strumentazione.....	6
2.3.5. Allestimento piezometro "tipo tubo aperto".....	6
2.3.6. Installazione di tubi per prove geofisiche "down-hole".....	7
2.3.7. Esecuzione di prove geofisiche "down-hole".....	8
2.3.8. Prove di resistenza meccanica.....	11
2.4. Prospezioni geofisiche.....	14
2.4.1. Georadar.....	14
2.4.2. Analisi tramite metodo HVSR.....	15
2.4.3. Sismica a Rifrazione.....	16
2.5. Analisi e prove geotecniche di laboratorio.....	17
2.5.1. Prove di compressione monoassiale su provini di roccia cilindrici, con determinazione della deformabilità assiale e longitudinale.....	17

## 1. PREMESSA

Nel quadro della progettazione di fattibilità tecnico-economica, finalizzato alla realizzazione dei termovalorizzatori di Palermo, 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 Palermo		
Tipo di indagine	N°	Profondità / Lunghezza [m]
Sondaggi	6	30
Sismica a rifrazione	7	100 - 150
HVSR	4	-

Tabella 1.1. *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 e litoide.

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 vigente

Cassette catalogatrici

Le carote estratte nel corso della perforazione saranno sistemate in apposite cassette catalogatrici (in legno, metallo o plastica), munite di scomparti divisori 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 litoide**

In roccia saranno prelevati dal carotaggio spezzoni di lunghezza > 15 cm, purché rappresentativi del tipo litologico perforato. Gli spezzoni di carota devono essere paraffinati ed inseriti in un involucro rigido in PVC di protezione. Il campione stesso dovrà poi essere imballato e protetto dai possibili danneggiamenti durante il suo trasporto al laboratorio geotecnico.

### **2.3.4. 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.

### **2.3.5. 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.

### 2.3.6. 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 e 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;

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 sposterà 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.

### **2.3.7. 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 preliminare 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.

## **2.3.8. Prove di resistenza meccanica**

### **2.3.8.1. 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 campionatore 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 campionatore per i primi 15 cm, assunti come tratto di "avviamento";
- N2 = numero di colpi che provoca la penetrazione del campionatore 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 Cu tuttavia si considera accettabile solo per argille sensitive, ossia per quelle argille per cui la sensibilità  $A = C_{ui} / C_{ur}$  (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.

### 2.3.8.2. Prove dilatometriche in roccia

L'attrezzatura impiegata dovrà avere le seguenti caratteristiche minime:

- sonda dilatometrica di diametro compreso tra 75 e 100 mm e di lunghezza  $\geq 1000$  mm, in modo che la lunghezza efficace sia pari a  $5 \div 15$  diametri; la sonda sarà costituita da un corpo cilindrico di acciaio rivestito da una guaina di gomma armata abbastanza flessibile da trasmettere almeno il 90% della pressione idraulica applicata;
- tubo di calibrazione di proprietà elastiche note, con un diametro interno uguale a quello del foro di prova e di lunghezza simile alla lunghezza attiva della sonda;
- comparatore centesimale per la misura del diametro esterno della sonda dilatometrica, con una precisione non inferiore a  $\pm 0,01$  mm;
- sorgente di pressione ((bambola d'azoto o pompa idraulica) e cavi di collegamento in grado di riempire, gonfiare e sgonfiare la sonda e di applicare e mantenere i valori delle pressioni richiesti;
- sistema di regolazione della pressione in grado di mantenere costante la pressione applicata;
- sistema per la misurazione degli spostamenti, in grado di determinare il diametro del foro con una precisione di  $1 \mu\text{m}$ , costituito da almeno 3 trasduttori di spostamento (LVDT) con fondo scala non inferiore a 25 mm, posizionati su piani diversi nella parte centrale della sonda, disposti in posizione diametrale a  $60^\circ$  (o  $45^\circ$  nel caso di 4 trasduttori) l'uno dall'altro e connessi mediante cavi elettrici ad una unità di lettura superficiale;
- sistema per la misura della pressione, costituito da un trasduttore elettrico di pressione o da una coppia di manometri con fondo scala diverso ( ad es. 1 MPa e 10 MPa), dotato di una precisione di lettura non inferiore a  $\pm 2\%$  del range di pressione utilizzato per ogni prova;
- unità superficiale per la registrazione e l'elaborazione dei dati, collegata alla sonda dilatometrica, e dotata di display per la visualizzazione sia delle variazioni di diametro della membrana (uno per ciascun trasduttore) che della pressione di espansione della membrana.
- apposita attrezzatura per l'inserimento, l'abbassamento e il sollevamento della sonda all'interno del foro, in grado di misurare la sua posizione con una precisione di  $\pm 5$  cm; possono essere utilizzate aste di perforazione oppure apposite aste di manovra.

Il modulo dilatometrico secante  $E_d$  (MPa) dovrà essere calcolato per ogni ciclo di prova, sia in fase di carico che di scarico, secondo la seguente espressione:

$$E_d = (1 + \nu_{ar}) \cdot D \cdot \frac{\Delta p_i}{\Delta D}$$

dove:  $\nu_{ar}$  = coefficiente di Poisson dell'ammasso roccioso

D = diametro del foro di prova

$\Delta p_i$  = incremento di pressione nell'intervallo considerato

$\Delta D$  = deformazione diametrale media del foro nell'intervallo considerato.



In particolare, per ciascun ciclo dovranno essere determinati i seguenti moduli:

- modulo di primo carico, calcolato in fase di carico tra la massima pressione applicata nel ciclo precedente e la massima pressione del ciclo considerato;
- modulo di scarico, calcolato in fase di scarico tra la pressione massima e la pressione minima del ciclo considerato;
- modulo di ricarico, calcolato in fase di carico tra la pressione minima del ciclo in esame e la pressione massima del ciclo precedente;
- modulo di deformazione, calcolato in fase di carico tra la pressione minima di prova e la pressione massima del ciclo considerato.

I valori di deformabilità dovranno essere calcolati per ognuna delle tre direzioni di misura e come media, determinata sulla base della deformazione media del foro.

Documentazione da consegnare

- Relazione conclusiva interpretativa dei risultati ottenuti contenente:
  - informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
  - metodo, diametro di perforazione e tipo di fluido impiegato;
  - localizzazione dei tratti di foro rivestiti o cementati;
  - livello piezometrico della falda;
  - profondità della sezione di misura;
  - descrizione dell'ammasso roccioso nel tratto di prova, con particolare riguardo alle caratteristiche geomeccaniche delle discontinuità;
  - caratteristiche della attrezzatura impiegata per la prova;
  - metodo utilizzato per la calibrazione e risultati;
  - tabelle con le letture registrate durante la prova, includendo i valori non corretti e quelli corretti;
  - diagrammi pressione - dilatazione (deformazione diametrale) per ogni trasduttore;
  - diagramma pressione - dilatazione media;
  - diagramma polare dei valori di dilatazione, in funzione della posizione del trasduttore e della pressione applicata;
  - diagramma dilatazione-tempo a pressione costante relativo alla massima pressione applicata dei singoli trasduttori e della media dei trasduttori;
  - schema di calcolo e relazioni matematiche per il calcolo dei moduli elastici e di deformabilità;
  - tabelle riassuntive e grafici dei moduli elastici e di deformabilità calcolati;
  - copia dei certificati di calibrazione del manometro o trasduttore di pressione e dei trasduttori di spostamento di data non anteriore di sei mesi la data della prova.

## 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  $f_r$ ;
- 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 " $f_r$ " 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. 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 litoidi 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 di sei mesi alla data di prova.

### **2.5.1. Prove di compressione monoassiale su provini di roccia cilindrici, con determinazione della deformabilità assiale e longitudinale.**

Le prove dovranno essere eseguite con l'applicazione di almeno quattro estensimetri elettrici e con il rilievo del comportamento post-rottura del provino.

Le prove dovranno necessariamente ottemperare ai seguenti riferimenti normativi:

- ASTM D2938-95. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens.
- ASTM 3148- 02. Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression.
- ISRM (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials.
- Rivista Italiana di Geotecnica (1994). Raccomandazioni per determinare la resistenza a compressione monoassiale e la deformabilità dei materiali rocciosi, n° 3.