



# **ASSOCIAZIONE SOCIETA' DI GEOFISICA**

## **LINEE GUIDA PER INDAGINI GEOFISICHE**

**Associazione società di geofisica  
c/o CGT – Via dei Vetri Vecchi, n° 34  
52027 SAN GIOVANNI VALDARNO (AR)**

**[www.associazionegeofisica.org](http://www.associazionegeofisica.org)  
[info@associazionegeofisica.org](mailto:info@associazionegeofisica.org)**



## INDICE

<b>1. PRESCRIZIONI DI CARATTERE GENERALE</b> .....	<b>6</b>
1.1. PREMESSA .....	6
1.2. PROGETTO DELLE INDAGINI .....	6
1.3. INIZIO LAVORI .....	6
1.4. DIREZIONE DEL CANTIERE .....	6
1.5. INDAGINI IN GARANZIA DI QUALITÀ .....	7
1.6. DOCUMENTAZIONE DELLE INDAGINI.....	7
1.7. UBICAZIONE E QUOTA.....	7
<b>2. PROSPEZIONI SISMICHE</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE AD ONDE DI COMPRESSIONE (ONDE P) ....</b>	<b>8</b>
2.1.1. Generalità .....	8
2.1.2. Normative e specifiche di riferimento .....	8
2.1.3. Caratteristiche delle attrezzature.....	8
2.1.4. Modalità esecutive.....	8
2.1.5. Elaborazione tomografica dei dati .....	9
2.1.6. Documentazione.....	10
2.1.7. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	10
<b>2.2. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE AD ONDE DI TAGLIO (ONDE SH) .....</b>	<b>11</b>
2.2.1. Generalità .....	11
2.2.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	11
2.2.3. Modalità esecutive.....	11
2.2.4. Elaborazione tomografica dei dati .....	12
2.2.5. Documentazione.....	13
2.2.6. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	13
<b>2.3. ANALISI DELLA ATTENUAZIONE ANELASTICA E DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI QUALITÀ DA ONDE DI VOLUME .....</b>	<b>14</b>
2.3.1. Generalità .....	14
2.3.2. Elaborazione tomografica dei dati .....	14
2.3.3. Documentazione.....	14
<b>2.4. INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE AD ONDE DI COMPRESSIONE .....</b>	<b>16</b>
2.4.1. Generalità .....	16
2.4.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	16
2.4.3. Modalità esecutive.....	16
2.4.4. Documentazione.....	17
2.4.5. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	17



<b>2.5. INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE AD ONDE DI TAGLIO (SH).....</b>	<b>18</b>
2.5.1. Generalità .....	18
2.5.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	18
2.5.3. Modalità esecutive.....	18
2.5.4. Documentazione.....	19
2.5.5. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	19
<b>2.6. PROSPEZIONE SISMICA IN FORO DI SONDAGGIO (DOWN-HOLE).....</b>	<b>20</b>
2.6.1. Generalità .....	20
2.6.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	20
2.6.3. Modalità esecutive.....	20
2.6.4. Documentazione.....	21
<b>2.7. PROSPEZIONE SISMICA TRA FORI DI SONDAGGIO (CROSS-HOLE) .....</b>	<b>22</b>
2.7.1. Generalità .....	22
2.7.2. Normative e specifiche di riferimento .....	22
2.7.3. Caratteristiche delle attrezzature.....	22
2.7.4. Modalità esecutive.....	23
2.7.5. Documentazione.....	23
<b>2.8. PROSPEZIONE SISMICA CON CONO SISMICO .....</b>	<b>25</b>
2.8.1. Generalità .....	25
2.8.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	25
2.8.3. Modalità esecutive.....	25
2.8.4. Documentazione.....	26
<b>2.9. PROSPEZIONE GEOTOMOGRAFICA (FRA SONDAGGI O FRA SONDAGGIO E SUPERFICIE TOPOGRAFICA).....</b>	<b>27</b>
2.9.1. Generalità .....	27
2.9.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	27
2.9.3. Modalità esecutive.....	27
2.9.4. Elaborazione dei dati .....	28
2.9.5. Documentazione.....	28
2.9.6. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	28
<b>2.10. PROVE PER ONDE SUPERFICIALI ATTIVE .....</b>	<b>29</b>
2.10.1. Generalità .....	29
2.10.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	29
2.10.3. Modalità esecutive.....	29
2.10.4. Acquisizione .....	29
2.10.5. Elaborazione dei dati .....	30
2.10.6. Inversione .....	31
2.10.7. Documentazione.....	31
2.10.8. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	31
<b>2.11. PROVE PER ONDE SUPERFICIALI PASSIVE .....</b>	<b>32</b>
2.11.1. Generalità .....	32
2.11.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	32
2.11.3. Modalità esecutive.....	32
2.11.4. Acquisizione .....	32
2.11.5. Elaborazione dei dati .....	33
2.11.6. RE.MI. (REfraction Microtremor).....	33
2.11.7. Inversione .....	34
2.11.8. Documentazione.....	34
2.11.9. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica.....	35



<b>2.12. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA (HVSr)</b> .....	<b>36</b>
2.12.1. Generalità .....	36
2.12.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	36
2.12.3. Modalità esecutive.....	36
2.12.4. Elaborazione dei dati .....	36
2.12.5. Documentazione.....	37
<b>3. PROSPEZIONI ELETTRICHE</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1. SONDAGGIO ELETTRICO VERTICALE (SEV)</b> .....	<b>38</b>
3.1.1. Generalità .....	38
3.1.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	38
3.1.3. Modalità esecutive.....	38
3.1.4. Documentazione.....	39
<b>3.2. TOMOGRAFIA ELETTRICA</b> .....	<b>40</b>
3.2.1. Generalità .....	40
3.2.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	40
3.2.3. Modalità esecutive.....	40
3.2.4. Documentazione.....	41
<b>4. PROSPEZIONI CON GEORADAR</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1. PROSPEZIONI CON GEORADAR DALLA SUPERFICIE</b> .....	<b>42</b>
4.1.1. Generalità .....	42
4.1.2. Caratteristiche delle attrezzature.....	43
4.1.3. Modalità esecutive.....	44
4.1.4. Documentazione.....	46
<b>4.2. PROVE GEORADAR IN FORO</b> .....	<b>47</b>
4.2.1. Generalità .....	47
4.2.2. Modalità del rilievo.....	47
4.2.3. Rapporto finale .....	47
<b>5. PROSPEZIONI ELETTROMAGNETICHE</b> .....	<b>48</b>
<b>5.1. MAPPE DI CONDUCIBILITÀ</b> .....	<b>48</b>
5.1.1. Generalità .....	48
<b>5.2. PROFILI DI CONDUCIBILITÀ</b> .....	<b>48</b>
5.2.1. Generalità .....	48
<b>5.3. SONDAGGI MAGNETOTELLURICI</b> .....	<b>48</b>
5.3.1. Generalità .....	48
5.3.2. Modalità esecutive.....	48
5.3.3. Modalità di intervento .....	49
5.3.4. Dotazione tecnica.....	49
5.3.5. Rapporto finale .....	49



<b>6.</b>	<b>PROSPEZIONI GRAVIMETRICHE .....</b>	<b>50</b>
<b>6.1.</b>	<b>RILIEVO GRAVIMETRICO .....</b>	<b>50</b>
6.1.1.	Generalità .....	50
6.1.2.	Quantità delle misure.....	50
6.1.3.	Specifiche tecniche.....	50
6.1.4.	Rapporto Finale .....	50
<b>7.</b>	<b>CAROTAGGI GEOFISICI.....</b>	<b>51</b>
7.1.1.	Generalità .....	51
7.1.2.	Caratteristiche delle attrezzature.....	51
7.1.3.	Modalità esecutive.....	51
7.1.4.	Elaborazione delle misure .....	51
7.1.5.	Documentazione.....	52

## **1. PRESCRIZIONI DI CARATTERE GENERALE**

### **1.1. PREMESSA**

Le presenti Specifiche Tecniche fanno parte integrante del contratto di appalto

L'Impresa dovrà eseguire le attività in ottemperanza alle Leggi, ai regolamenti vigenti ed alle prescrizioni delle Autorità competenti, in conformità agli ordini che saranno impartiti dalla Direzione Lavori.

Le presenti Specifiche Tecniche determinano in modo prioritario le modalità di esecuzione e di valutazione dei lavori di indagine geofisica.

Nella esecuzione delle attività concernenti le indagini geofisiche si devono considerare inclusi oneri e costi per la documentazione fotografica delle attività svolte, per i carburanti e ogni altro materiale di consumo, i costi logistici e del personale, le attrezzature primarie, quelle accessorie e quanto necessario per l'esecuzione a perfetta regola d'arte di tutti i lavori oggetto del Contratto.

Sono esclusi specificatamente gli oneri e costi per la picchettazione e il rilievo plano-altimetrico e per la bonifica da residui bellici; tali oneri, sostenuti dall' Impresa e qualora ad essa demandati, potranno essere compensati se documentati e concordati con la D. L..

L'Impresa esecutrice si impegna a visitare preventivamente i siti considerando le problematiche connesse con lo svolgimento a regola d'arte dei lavori d'indagine e ad evidenziare le proprie osservazioni al progetto delle indagini nella compilazione del Piano Qualità di Commessa.

### **1.2. Progetto delle indagini**

Le presenti Specifiche Tecniche hanno carattere generale. Esse saranno integrate, per l'appalto, da un progetto delle indagini, fornito dalla Direzione Lavori, che indicherà il numero, la tipologia delle indagini geofisiche da eseguirsi.

I lavori di indagine geofisica dovranno essere realizzati dall'Impresa con personale, modalità operative ed attrezzature conformi alle prescrizioni delle presenti Specifiche Tecniche, senza apportare variazioni che non siano state preventivamente concordate ed approvate dalla Direzione Lavori.

### **1.3. Inizio Lavori**

La Direzione Lavori comunicherà all'Impresa la data d'inizio dei lavori in forma scritta, quando non preventivamente indicato nel progetto delle indagini. Prima dell' inizio dei lavori l' Impresa dovrà presentare, se richiesto dalla Direzione Lavori, il Piano Qualità di Commessa (PQC) relativo al lavoro affidato, qualora l'impresa sia in Assicurazione di qualità.

In tutti gli altri casi dovrà essere presentato comunque il Piano Operativo di Commessa, indicando le attrezzature che dovranno essere utilizzate per lo sviluppo dei lavori, lo sviluppo temporale delle indagini, i nomi degli operatori ed il responsabile del cantiere e le esperienze acquisite.

### **1.4. Direzione del Cantiere**

L'Impresa dovrà assicurare la presenza a tempo pieno in cantiere di un geologo con almeno due anni di esperienza nel campo specifico delle indagini geofisiche, al quale verrà affidato il coordinamento dei lavori di indagine.



Il geologo sarà responsabile della corretta esecuzione delle attività, della realizzazione delle indagini e dei certificati di prova, della raccolta dei dati e della loro trasmissione alla Direzione Lavori nonché della fornitura di eventuali documenti integrativi che potrebbero servire alla definizione particolareggiata delle attrezzature e delle modalità esecutive.

Nel caso in cui le indagini vengano svolte in Garanzia di Qualità, l' Impresa indicherà un geologo con funzione di Responsabile Controllo Qualità (RCQ) presente in cantiere a tempo pieno.

Al geologo di cantiere (RCQ) sarà affidato il coordinamento dei lavori di indagine e sarà responsabile della corretta esecuzione delle varie fasi dell' indagine. In particolare egli dovrà adottare quanto necessario per prevenire il verificarsi di non conformità, gestire le eventuali non conformità in collaborazione con il Responsabile del Servizio Garanzia di Qualità (RSGQ) e/o con la Direzione Lavori, proporre quanto ritenuto più idoneo per la risoluzione delle non conformità, raccogliere i dati da fornire alla Direzione Lavori, organizzare le varie attività in sito, mantenere i rapporti con la Direzione Lavori per tutto quanto riguarda il corretto svolgimento delle indagini.

## **1.5. Indagini in garanzia di qualità**

La Direzione Lavori si riserva il diritto di individuare una Impresa certificata secondo la normativa UNI EN ISO 9002 qualora lo ritenga opportuno, a seguito delle problematiche legate alla progettazione dell' opera.

La certificazione dovrà essere emessa da un Organismo internazionale esterno ed autonomo, riconosciuto in Italia dal SINCERT.

L'emissione della Certificazione di qualità implica che le procedure aziendali, i processi di produzione, la documentazione ed ogni altro aspetto della gestione della qualità adottate dall' Impresa stessa siano tali da garantire alla Società una superiore qualità del servizio offerto.

## **1.6. Documentazione delle Indagini**

La documentazione preliminare del lavoro svolto verrà progressivamente aggiornata nel corso dei lavori e sarà resa disponibile e trasmessa alla Direzione Lavori quando richiesta e comunque a fine lavoro.

La documentazione in forma definitiva sarà presentata non oltre 20 giorni solari dal completamento dei lavori, salvo diversa prescrizione.

Tutta la documentazione finale dovrà essere fornita in formato digitale, secondo gli standards concordati con la Direzione Lavori.

## **1.7. Ubicazione e Quota**

L'ubicazione e la quota di ciascun punto di indagine dovrà essere determinata mediante rilevazione delle coordinate x, y, z eseguite tramite rilevazione con sistema GPS e se espressamente richiesto, l'ubicazione di ciascun punto di indagine dovrà risultare da un apposito rilievo topografico eseguito dall'Impresa.

In tal caso la posizione planimetrica di ciascun punto di indagine sarà definita rispetto a capisaldi forniti dalla Direzione Lavori e la quota di ciascun punto di indagine sarà definita rispetto al livello medio marino o al riferimento locale fornito dalla Società.

## **2. PROSPEZIONI SISMICHE**

### **2.1 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE AD ONDE DI COMPRESSIONE (ONDE P)**

#### **2.1.1. Generalità**

L'indagine sismica a rifrazione consiste nella registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione (P), create allo scopo tramite opportuna energizzazione, e rifratte dalle superfici che costituiscono contrasti di impedenza del sottosuolo. La registrazione si realizza attraverso uno stendimento di geofoni disposti a intervalli regolari lungo il profilo da indagare. L'equidistanza tra i geofoni ed il loro numero dipendono dal dettaglio e dal target (profondità di indagine richiesta).

La misura dei tempi di arrivo delle onde P ai diversi geofoni permette di ricostruire l'andamento e la profondità degli orizzonti rifrattori presenti nel sottosuolo e, nel caso di misura anche delle onde secondarie o di taglio (S), di calcolare le caratteristiche elastiche dinamiche dei terreni e degli ammassi rocciosi investigati.

#### **2.1.2. Normative e specifiche di riferimento**

- \* ASTM D 5777 - 95 - Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation

#### **2.1.3. Caratteristiche delle attrezzature**

L'attrezzatura di prova consigliata dovrà essere costituita dai seguenti componenti:

- \* sismografo minimo a 24 canali, con 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 92 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita minimo a 16 bit;
- \* minimo 24 geofoni verticali a frequenza propria variabile tra 8 e 40 Hz;
- \* sistema di energizzazione adeguato alla lunghezza dei tiri da realizzare; potrà essere costituito da:
  - martello strumentato lasciato cadere con violenza su una piastra metallica appoggiata al suolo;
  - cannoncino sismico;
  - energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati;
  - cariche di esplosivo.

È necessario che il tipo di energizzatore utilizzato permetta dopo qualche stack (massimo 5) di determinare inconfutabilmente i primi arrivi su tutti i ricevitori dell'allineamento.

#### **2.1.4. Modalità esecutive**

La "copertura" dei tiri sullo stendimento dovrà essere tale da consentire una corretta e dettagliata ricostruzione del campo di velocità locale fino alle profondità stabilite dal progetto delle indagini o dalla Direzione Lavori ed in ogni caso dovranno essere ogni 3, 4 stazioni riceventi; nel caso in cui non sia prevista una elaborazione tomografica i tiri dovranno essere anche esterni allo stendimento di almeno 2 posizioni per ogni estremo.





Generalmente per ogni stendimento la profondità massima raggiunta dalla prospezione sismica è funzione sia delle velocità sismiche dei singoli strati sia della lunghezza dei tiri sismici.

Indicativamente la profondità massima indagata è circa 1/4 - 1/5 della lunghezza dei tiri sismici e per ottenere dei risultati ottimali occorre mantenere il target della ricerca entro i 2/3 della profondità massima indagata.

Tale indicazione è adeguata sia per l'elaborazione sismica di tipo ordinario che tomografica.

La spaziatura delle stazioni geofoniche è funzione del dettaglio che si vuole ottenere in particolare nella sismica tomografica: indicativamente la spaziatura intergeofonica può variare tra 1/4 ed 1/5 della profondità del target.

Ad esempio se la profondità del target è posta a

10 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 2 - 2.5 metri [ $10/4(5)=2.5(2.0)$  m]

20 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 4 - 5 metri [ $20/4(5)=5(4)$  m]

50 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 10 - 12 metri [ $50/4(5)=12(10)$  m]

100 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà di 20 - 25 metri [ $100/4(5) = 25(20)$  m]

In entrambi i casi (sismica tomografica o ordinaria) si consiglia di non superare mai la spaziatura di 20 m perché si inficierebbe l'analisi della porzione superficiale (copertura allentata) la quale può determinare importanti variazioni sia dei parametri elastici del sottosuolo sia degli orizzonti se la sua determinazione è errata.

Per stendimenti di lunghezza inferiore o uguale al numero di canali del sismografo moltiplicato per la distanza intergeofonica (esempio: sismografo da 24 canali con distanza intergeofonica di 10 metri si avrà uno stendimento da 230 metri) sarà necessario effettuare gli scoppi in corrispondenza dei ricevitori n° 1, 4, 8, 12, 16, 20 e 24 inoltre verranno effettuati scoppi anche esternamente allo stendimento di almeno 40 metri per ogni lato dello stendimento.

Per stendimenti superiori al numero di canali del sismografo moltiplicato per la distanza intergeofonica (esempio: sismografo da 24 canali con distanza intergeofonica di 10 metri si avrà uno stendimento da 230 metri) sarà necessario effettuare gli scoppi in corrispondenza dei ricevitori n° 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 e così via fino alla fine dello stendimento inoltre verranno effettuati scoppi anche esternamente allo stendimento di almeno 40 metri per ogni lato dello stendimento i tiri in questo caso dovranno coprire tutti i geofoni dello stendimento.

Nel caso in cui si debba realizzare uno stendimento da 470 metri costituito da 48 ricevitori interspaziati di 10 metri con una profondità massima di indagine di circa 100 metri, si può procedere in due modi:

se si ha a disposizione un sismografo a 48 canali verranno realizzati tiri nella stessa posizione di cui al paragrafo precedente (geofoni 1, 4, 8 etc) e tali tiri dovranno essere leggibili su tutti i 48 ricevitori;

nel caso in cui si disponga di un sismografo da 24 canali sarà necessario realizzare due stendimenti contigui (prima i geofoni 1-24 e tiri interni allo stendimento come sopra 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24 poi anche nelle posizioni dei geofoni 28, 32, 36, 40, 44 e 48; poi verranno stesi i geofoni 25 - 48 [geofono 24 e geofono 25 devono essere sovrapposti] e verranno realizzati i tiri nella posizione 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 e 48).

L'elaborazione dei dati dovrà essere realizzata mediante software ad elevata valenza diagnostica in grado di fornire i valori dei parametri di velocità, relativi ai rifrattori individuati, per ogni stazione geofonica (ad esempio software che utilizzi il metodo "GRM" - Generalized Reciprocal Method, Palmer '80).

### **2.1.5. Elaborazione tomografica dei dati**

Se richiesto dal progetto delle indagini, l'elaborazione dovrà essere sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropica, la quale dovrà fornire, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. (Ray Tracing Curvilineo) e algoritmi di ricostruzione tomografica (ad

esempio con l'impiego di algoritmi ART - Algebraic Reconstruction Technique, SIRT - Simultaneous Iterative Reconstruction Technique o ILST - Iterative Least Square Technique), il campo delle velocità del sottosuolo ad elevata densità di informazioni: le celle unitarie, di forma rettangolare, potranno avere dimensioni orizzontali (asse x) e verticali (asse z) pari a, rispettivamente,  $1/3 \div 1/5$  e  $1/5 \div 1/10$  della spaziatura tra i geofoni.

### **2.1.6. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- sismogrammi originali sia su supporto cartaceo e/o digitale;
- profili sismostratigrafici in scala adeguata con indicati i valori delle velocità delle onde di compressione ( $V_p$ ) calcolati per intervalli omogenei;
- elaborazione a isolinee o a campiture di colore delle velocità delle onde di compressione ( $V_p$ ) in caso di elaborazione tomografica;
- relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicate le strumentazioni utilizzate, le metodologie operative, gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi, procedure applicate, le risultanze finali ed interpretative;
- documentazione fotografica.

### **2.1.7. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Ad integrazione dell'indagine sismica dovrà essere eseguito un rilievo topografico comprendente la determinazione planoaltimetrica delle ubicazioni dei geofoni delle basi sismiche a rifrazione, riferita a punti notevoli o ad elementi cartografici noti dell'area interessata. Le coordinate del rilievo topografico, dovranno essere inquadrare in un sistema di coordinate generale di progetto fornito dal Committente. Qualora quest'ultimo non risulti disponibile il suddetto rilievo sarà fornito in coordinate relative.

Tale rilievo dovrà essere corredato dai libretti di campagna dei rilievi ed informatizzazione dei dati nei formati digitali stabiliti dalla Società o dalla Direzione Lavori.

## **2.2. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE AD ONDE DI TAGLIO (ONDE SH)**

### **2.2.1. Generalità**

L'indagine sismica a rifrazione consiste nella registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio (SH), create allo scopo tramite opportuna energizzazione, e rifratte dalle superfici di discontinuità fisica del sottosuolo. La registrazione si realizza attraverso uno stendimento di geofoni orizzontali disposti a intervalli regolari lungo il profilo da indagare. L'equidistanza tra i geofoni e il loro numero dipendono dal dettaglio e dal target (profondità di indagine richiesta).

La misura dei tempi di arrivo delle onde SH ai diversi geofoni permette di ricostruire l'andamento e la profondità degli orizzonti rifrattori presenti nel sottosuolo e, nel caso di misura anche delle onde di compressione (P), di calcolare le caratteristiche elastiche dinamiche dei terreni e degli ammassi rocciosi investigati.

### **2.2.2. Caratteristiche delle attrezzature**

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita da almeno:

- \* sismografo a 24 canali, con 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 92 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita minimo a 16 bit;
- \* 24 geofoni orizzontali a frequenza propria variabile tra 8 e 14 Hz;
- \* sistema di energizzazione adeguato alla lunghezza dei tiri da realizzare; potrà essere costituito da:
  - martello strumentato agente lateralmente su un blocco adeguatamente ancorato (per attrito radente) al terreno;
  - energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati (pendoli) che producono onde di taglio polarizzate sul piano orizzontale;
  - cariche di esplosivo (solo in casi eccezionali).

È necessario che il tipo di energizzatore utilizzato permetta dopo qualche stack (massimo 5) di determinare inconfutabilmente i primi arrivi su tutti i ricevitori dell'allineamento.

### **2.2.3. Modalità esecutive**

La "copertura" dei tiri sullo stendimento dovrà essere tale da consentire una corretta e dettagliata ricostruzione del campo di velocità locale fino alle profondità stabilite dal progetto delle indagini o dalla Direzione Lavori ed in ogni caso dovranno essere ogni 3, 4 stazioni riceventi; nel caso in cui non sia prevista una elaborazione tomografica i tiri dovranno essere anche esterni allo stendimento di almeno 2 posizioni per ogni estremo.

Per la corretta determinazione delle onde di taglio, qualora non si disponesse di specifici sensori, sarà necessario realizzare per ogni punto di energizzazione anche la registrazione coniugata (rovesciata di 180° sul piano orizzontale rispetto alla direzione individuata dallo stendimento) in tal modo sarà possibile determinare correttamente l'arrivo dell'onda di taglio (dove si avrà inversione di fase) sul sismogramma.

Generalmente per ogni stendimento la profondità massima raggiunta dalla prospezione sismica è funzione sia delle velocità sismiche dei singoli strati sia della lunghezza dei tiri sismici.



Indicativamente la profondità massima indagata è circa 1/4 - 1/5 della lunghezza dei tiri sismici e per ottenere dei risultati ottimali occorre mantenere il target della ricerca entro i 2/3 della profondità massima indagata.

Tale indicazione è adeguata sia per l'elaborazione sismica di tipo ordinario che tomografica.

La spaziatura delle stazioni geofoniche è funzione del dettaglio che si vuole ottenere in particolare nella sismica tomografica: indicativamente la spaziatura intergeofonica può variare tra 1/4 ed 1/5 della profondità del target.

Ad esempio se la profondità del target è posta a  
10 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 2 - 2.5 metri [ $10/4(5)=2.5(2.0)$  m]  
20 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 4 - 5 metri [ $20/4(5)=5(4)$  m]  
50 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà 10 - 12 metri [ $50/4(5)=12(10)$  m]  
100 m la spaziatura dei geofoni ottimale sarà di 20 - 25 metri [ $100/4(5) = 25(20)$  m]

In entrambi i casi (sismica tomografica o ordinaria) si consiglia di non superare mai la spaziatura di 20 m in quanto si inficerebbe l'analisi della porzione superficiale (copertura allentata) la quale può determinare importanti variazioni sia dei parametri elastici del sottosuolo sia degli orizzonti se la sua determinazione è errata.

Per stendimenti di lunghezza inferiore o uguale al numero di canali del sismografo moltiplicato per la distanza intergeofonica (esempio: sismografo da 24 canali con distanza intergeofonica di 10 metri si avrà uno stendimento da 230 metri) sarà necessario effettuare gli scoppi in corrispondenza dei ricevitori n° 1, 4, 8, 12, 16, 20 e 24 inoltre verranno effettuati scoppi anche esternamente allo stendimento di almeno 40 metri per ogni lato dello stendimento.

Per stendimenti superiori al numero di canali del sismografo moltiplicato per la distanza intergeofonica (esempio: sismografo da 24 canali con distanza intergeofonica di 10 metri si avrà uno stendimento da 230 metri) sarà necessario effettuare gli scoppi in corrispondenza dei ricevitori n° 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 e così via fino alla fine dello stendimento inoltre verranno effettuati scoppi anche esternamente allo stendimento di almeno 40 metri per ogni lato dello stendimento i tiri in questo caso dovranno coprire tutti i geofoni dello stendimento.

Nel caso in cui si debba realizzare uno stendimento da 470 metri costituito da 48 ricevitori interspaziati di 10 metri con una profondità massima di indagine di circa 100 metri, si può procedere in due modi:

se si ha a disposizione un sismografo a 48 canali verranno realizzati tiri nella stessa posizione di cui al paragrafo precedente (geofoni 1, 4, 8 etc) e tali tiri dovranno essere leggibili su tutti i 48 ricevitori;

nel caso in cui si disponga di un sismografo da 24 canali sarà necessario realizzare due stendimenti contigui (prima i geofoni 1-24 e tiri interni allo stendimento come sopra 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24 poi anche nelle posizioni dei geofoni 28, 32, 36, 40, 44 e 48; poi verranno stesi i geofoni 25 - 48 [geofono 24 e geofono 25 devono essere sovrapposti] e verranno realizzati i tiri nella posizione 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44 e 48).

L'elaborazione dei dati dovrà essere realizzata mediante software ad elevata valenza diagnostica in grado di fornire i valori dei parametri di velocità, relativi ai rifrattori individuati, per ogni stazione geofonica (ad esempio software che utilizzi il metodo "GRM" - Generalized Reciprocal Method, Palmer '80).

#### **2.2.4. Elaborazione tomografica dei dati**

Se richiesto dal progetto delle indagini, l'elaborazione dovrà essere sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropica, la quale dovrà fornire, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. (Ray Tracing Curvilineo) e algoritmi di ricostruzione tomografica (ad esempio con l'impiego di algoritmi ART - Algebraic Reconstruction Technique, SIRT - Simultaneous Iterative Reconstruction Technique o ILST - Iterative Least Square Technique), il campo delle velocità del sottosuolo ad elevata densità di informazioni: le celle unitarie, di forma rettangolare, potranno



avere dimensioni orizzontali (asse x) e verticali (asse z) pari a, rispettivamente,  $1/3 \div 1/5$  e  $1/5 \div 1/10$  della spaziatura tra i geofoni.

### **2.2.5. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- sismogrammi originali su supporto cartaceo e/o digitale;
- profili sismostratigrafici in scala adeguata con indicati i valori di velocità delle onde di taglio ( $V_S$ ) calcolati per intervalli omogenei;
- elaborazione a isolinee o a campiture di colore delle velocità delle onde di taglio ( $V_S$ ) in caso di elaborazione tomografica;
- relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicate le strumentazioni utilizzate, le metodologie operative, gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi, procedure applicate, le risultanze finali ed interpretative;
- documentazione fotografica.

### **2.2.6. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Ad integrazione dell'indagine sismica dovrà essere eseguito un rilievo topografico comprendente la determinazione planoaltimetrica delle ubicazioni dei geofoni delle basi sismiche a rifrazione, riferita a punti notevoli o ad elementi cartografici noti dell'area interessata. Le coordinate del rilievo topografico, dovranno essere inquadrare in un sistema di coordinate generale di progetto fornito dal Committente. Qualora quest'ultimo non fosse disponibile il suddetto rilievo sarà fornito in coordinate relative.

Tale rilievo dovrà essere corredato dai libretti di campagna dei rilievi ed informatizzazione dei dati nei formati digitali stabiliti dalla Società o dalla Direzione Lavori.

## 2.3. ANALISI DELLA ATTENUAZIONE ANELASTICA E DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI QUALITÀ DA ONDE DI VOLUME

### 2.3.1. Generalità

Consiste in una elaborazione dei dati ottenuti da prospezioni sismiche a rifrazione ad onde di compressione (onde P) e onde di taglio (onde S) in grado di determinare i parametri di Attenuazione Anelastica e Fattore Qualità dei terreni o degli ammassi rocciosi investigati.

Il fattore di qualità Q è correlato al coefficiente di attenuazione attraverso la seguente relazione:

$$1/Q = \alpha \cdot V_p / \pi \cdot f$$

con

$\alpha$  = coefficiente di attenuazione;

$V_p$  = velocità delle onde di compressione;

f = frequenza dominante dell'analisi sismica.

Il coefficiente di attenuazione esprime l'entità del fenomeno di assorbimento dell'energia sismica in relazione allo specifico divario rispetto alla condizione di perfetta elasticità nei diversi materiali in cui l'onda sismica si propaga.

A seguito dell'attenuazione le componenti ad alta frequenza degli impulsi sismici si estinguono più rapidamente di quelli a bassa frequenza; la misura di  $1/Q$ , proporzionale alla frazione di perdita dell'energia per ciclo d'onda sinusoidale, contribuisce a fornire informazioni sulle caratteristiche del mezzo attraversato (frequenza di fratturazione, grado di saturazione, ecc.).

I valori numerici prodotti dall'elaborazione tomografica in velocità, attenuazione e Fattore Qualità saranno trasformati in informazioni grafiche e cromatiche bidimensionali e tridimensionali tramite software di trasferimento dati su un sistema C.A.D.

L'elaborazione dei dati dovrà essere realizzata mediante software ad elevata valenza diagnostica in grado di fornire i valori dei parametri di Attenuazione e Fattore Qualità, relativi ai rifrattori individuati e per ogni stazione geofonica utilizzando l'algoritmo del "Rapporto Spettrale".

### 2.3.2. Elaborazione tomografica dei dati

Se richiesto dal progetto delle indagini, l'elaborazione dovrà essere sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropica, la quale dovrà fornire, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. (Ray Tracing Curvilineo) e algoritmi di ricostruzione tomografica (ad esempio con l'impiego di algoritmi ART - Algebraic Reconstruction Technique, SIRT - Simultaneous Iterative Reconstruction Technique o ILST - Iterative Least Square Technique), il campo delle velocità del sottosuolo ad elevata densità di informazioni: le celle unitarie, di forma rettangolare, potranno avere dimensioni orizzontali (asse x) e verticali (asse z) pari a, rispettivamente,  $1/3 \div 1/5$  e  $1/5 \div 1/10$  della spaziatura tra i geofoni.

### 2.3.3. Documentazione

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* profili sismostratigrafici in scala adeguata con indicati i parametri dei Fattori Qualità calcolati per intervalli omogenei;
- \* elaborazione a isolinee o a campiture di colore in caso di elaborazione tomografica;



- \* relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicati:
- \* gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi;
- \* la caratterizzazione su base geofisica ottenuta da correlazione delle risultanze delle analisi ad onde di compressione ( $V_P$ ) e o taglio ( $V_S$ ) e Attenuazione onde di compressione ( $\alpha_P$ ) e di taglio ( $\alpha_S$ ) e Fattore Qualità delle onde di compressione ( $Q_P$ ) e delle onde di taglio ( $Q_S$ );
- \* le risultanze finali ed interpretative.

## 2.4. INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE AD ONDE DI COMPRESSIONE

### 2.4.1. Generalità

L'indagine sismica a riflessione consiste nell'energizzazione del sottosuolo e nella registrazione degli arrivi delle onde di compressione (onde P) riflesse, in corrispondenza di geofoni verticali disposti secondo un allineamento con interassi tra i geofoni e lunghezza totale dello stendimento tali da permettere una adeguata profondità di indagine.

La misura dei tempi di arrivo delle onde P ai diversi geofoni permette di ricostruire l'andamento e la profondità delle diverse discontinuità sismiche che costituiscono delle superfici riflettenti.

### 2.4.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova consigliata dovrà essere costituita dai seguenti componenti:

- \* sismografo minimo a 24 canali, con 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 92 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita minimo a 16 bit;
- \* minimo 24 geofoni verticali a frequenza propria variabile tra 25 e 100 Hz;

Sistema di energizzazione adeguato alla profondità di indagine che potrà essere costituito da:

- martello strumentato lasciato cadere con violenza su una piastra metallica appoggiata al suolo
- cannoncino sismico
- energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati
- cariche di esplosivo.

### 2.4.3. Modalità esecutive

Il rilievo sismico a riflessione dovrà essere eseguito per mezzo di stese lineari con geofoni posti ad intervalli regolari scelti in relazione alla profondità dell'obiettivo da raggiungere. In generale l'interdistanza tra i geofoni dovrà essere pari a 0,5, 1, 2,5, 5, 10 o 20 metri.

I punti di origine dell'energia dovranno essere ubicati o nel centro di simmetria del gruppo di registrazione (metodologia "Split Spread") oppure ad un estremo dello stendimento (metodologia "End On") o infine in posizione distanziata dai due punti precedenti fino ad un massimo di 30-50 metri dalla stesa ed in direzione parallela alla stesa stessa.

L'indagine e l'elaborazione dei dati dovranno garantire una "copertura multipla" minima del 1200%.

La prospezione sismica a riflessione dovrà essere realizzata secondo criteri di "stacking orizzontale" mediante copertura multipla di stendimenti in ragione variabile da un minimo del 1200% secondo gli indirizzi e la finalità dell'indagine.

Per ottenere una copertura multipla del 1200% con un sismografo da 24 canali è necessario energizzare lungo linea con una interdistanza fra una energizzazione e l'altra esattamente pari alla distanza intergeofonica.

Con un registratore a 48 canali si può ottenere una copertura multipla del 1200 % energizzando ogni due distanze intergeofoniche mentre se si energizza ogni distanza intergeofonica si ottiene una copertura multipla del 2400%.

Allo stesso modo utilizzando un sismografo a 96 canali si ottiene una copertura multipla del 4800% energizzando ad ogni distanza intergeofonica; mentre se si energizza al doppio della distanza





intergeofonica si ottiene una copertura multipla del 2400% e, infine, si può ottenere una copertura multipla del 1200% energizzando ogni 4 distanze intergeofoniche.

La prospezione sismica a riflessione dovrà indicativamente rispettare le seguenti correlazioni tra spaziatura intergeofonica della linea (da 24 canali di registrazione) e profondità ottimale dell'obiettivo di indagine

<b>SPAZIATURA GEOFONICA</b>	<b>PROFONDITÀ OBIETTIVO</b>
0.5 m	< 25 m
1 m	25-50 m
2.5 m	50 – 100 m
5 m	100 – 250 m
10 m	> 250 m

L'insieme dei dati acquisiti dovrà essere organicamente elaborato, mediante software dotati di alta valenza risolutiva, attuando nel modo più rigoroso le fasi sequenziali del procedimento analitico.

- 1) Correzioni statiche
- 2) Muting
- 3) Analisi spettrale
- 4) Filtraggi sia nel dominio dei tempi che in quello delle frequenze con filtri variabili
- 5) FK filter sia in velocità che polinomiali
- 6) Analisi di velocità (Normal Move Out)
- 7) Deconvoluzione
- 8) Stacking
- 9) Correzioni statiche residue
- 10) Migrazione

#### **2.4.4. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* sismogrammi in originale su supporto magnetico o disco ottico delle registrazioni di campagna;
- \* sismosezioni dei tempi (ms) in ordinate e delle distanze (m) in ascisse della elaborazione finale di ogni linea sismica a riflessione;
- \* sismosezioni delle profondità (m) in ordinate e delle distanze (m) in ascisse della elaborazione finale di ogni linea sismica a riflessione;
- \* relazione conclusiva con indicate le metodologie impiegate, gli algoritmi e i criteri di calcolo ed elaborazione adottati con commenti sulle risultanze ottenute e correlazione con le informazioni di natura geologica dell'area in esame;
- documentazione fotografica.

#### **2.4.5. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Ad integrazione dell'indagine sismica dovrà essere eseguito un rilievo topografico comprendente la determinazione planoaltimetrica delle ubicazioni dei geofoni delle basi sismiche a riflessione, riferita a punti notevoli o ad elementi cartografici noti dell'area interessata. Le coordinate del rilievo topografico, dovranno essere inquadrare in un sistema di coordinate generale di progetto fornito dalla Società. Qualora quest'ultimo non risulti disponibile il suddetto rilievo sarà fornito in coordinate relative.

Tale rilievo dovrà essere corredato dai libretti di campagna dei rilievi ed informatizzazione dei dati nei formati digitali stabiliti dalla Società o dalla Direzione Lavori.

## **2.5. INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE AD ONDE DI TAGLIO (SH)**

### **2.5.1. Generalità**

L'indagine sismica a riflessione consiste nell'energizzazione del sottosuolo e nella registrazione degli arrivi delle onde di taglio (onde SH) riflesse, in corrispondenza di geofoni orizzontali disposti secondo un allineamento con interassi tra i geofoni e lunghezza totale dello stendimento tali da permettere una adeguata profondità di indagine.

La misura dei tempi di arrivo delle onde SH ai diversi geofoni permette di ricostruire l'andamento e la profondità delle diverse discontinuità sismiche che costituiscono delle superfici riflettenti.

### **2.5.2. Caratteristiche delle attrezzature**

L'attrezzatura di prova consigliata dovrà essere costituita dai seguenti componenti:

- \* sismografo minimo a 24 canali, con 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 92 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita minimo a 16 bit;
- \* minimo 24 geofoni orizzontali a frequenza propria variabile tra 8 e 14 Hz;

Sistema di energizzazione adeguato alla profondità di indagine che potrà essere costituito da:

- martello strumentato agente lateralmente su un blocco adeguatamente ancorato (per attrito radente) al terreno;
- energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati (pendoli) che producono onde di taglio polarizzate sul piano orizzontale.

### **2.5.3. Modalità esecutive**

Il rilievo sismico a riflessione dovrà essere eseguito per mezzo di stese lineari con geofoni posti ad intervalli regolari scelti in relazione alla profondità dell'obiettivo da raggiungere. In generale l'interdistanza tra i geofoni dovrà essere pari a 0.5, 1, 2.5, 5, 10 o 20 metri.

I punti di origine dell'energia dovranno essere ubicati o nel centro di simmetria del gruppo di registrazione (metodologia "Split Spread") oppure ad un estremo dello stendimento (metodologia "End On") o infine in posizione distanziata dai due punti precedenti fino ad un massimo di 30-50 metri dalla stesa ed in direzione parallela alla stesa stessa.

L'indagine e l'elaborazione dei dati dovranno garantire una "copertura multipla" minima del 1200%.

La prospezione sismica a riflessione dovrà essere realizzata secondo criteri di "stacking orizzontale" mediante copertura multipla di stendimenti in ragione variabile da un minimo del 1200% secondo gli indirizzi e la finalità dell'indagine.

Per ottenere una copertura multipla del 1200% con un sismografo da 24 canali è necessario energizzare lungo linea con una interdistanza fra una energizzazione e l'altra esattamente pari alla distanza intergeofonica.

Con un registratore a 48 canali si può ottenere una copertura multipla del 1200 % energizzando ogni due distanze intergeofoniche mentre se si energizza ogni distanza intergeofonica si ottiene una copertura multipla del 2400%.



Allo stesso modo utilizzando un sismografo a 96 canali si ottiene una copertura multipla del 4800% energizzando ad ogni distanza intergeofonica; mentre se si energizza al doppio della distanza intergeofonica si ottiene una copertura multipla del 2400% e, infine, si può ottenere una copertura multipla del 1200% energizzando ogni 4 distanze intergeofoniche.

La prospezione sismica a riflessione dovrà indicativamente rispettare le seguenti correlazioni tra spaziatura intergeofonica della linea (da 24 canali di registrazione) e profondità ottimale dell'obiettivo di indagine

<b>SPAZIATURA GEOFONICA</b>	<b>PROFONDITÀ OBIETTIVO</b>
0.5 m	< 25 m
1 m	25-50 m
2.5 m	50 – 100 m
5 m	100 – 250 m
10 m	> 250 m

L'insieme dei dati acquisiti dovrà essere organicamente elaborato, mediante software dotati di alta valenza risolutiva, attuando nel modo più rigoroso le fasi sequenziali del procedimento analitico.

- 1) Correzioni statiche
- 2) Muting
- 3) Analisi spettrale
- 4) Filtraggi sia nel dominio dei tempi che in quello delle frequenze con filtri variabili
- 5) FK filter sia in velocità che polinomiali
- 6) Analisi di velocità (Normal Move Out)
- 7) Deconvoluzione
- 8) Stacking
- 9) Correzioni statiche residue
- 10) Migrazione

#### **2.5.4. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* sismogrammi in originale su supporto magnetico o disco ottico delle registrazioni di campagna;
- \* sismosezioni dei tempi (ms) in ordinate e delle distanze (m) in ascisse della elaborazione finale di ogni linea sismica a riflessione;
- \* sismosezioni delle profondità (m) in ordinate e delle distanze (m) in ascisse della elaborazione finale di ogni linea sismica a riflessione;
- \* relazione conclusiva con indicate le metodologie impiegate, gli algoritmi e i criteri di calcolo ed elaborazione adottati con commenti sulle risultanze ottenute e correlazione con le informazioni di natura geologica dell'area in esame;
- documentazione fotografica.

#### **2.5.5. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Ad integrazione dell'indagine sismica dovrà essere eseguito un rilievo topografico comprendente la determinazione planoaltimetrica delle ubicazioni dei geofoni delle basi sismiche a riflessione, riferita a punti notevoli o ad elementi cartografici noti dell'area interessata. Le coordinate del rilievo topografico, dovranno essere inquadrare in un sistema di coordinate generale di progetto fornito dalla Società. Qualora quest'ultimo non fosse disponibile il suddetto rilievo sarà fornito in coordinate relative.

Tale rilievo dovrà essere corredato dai libretti di campagna dei rilievi ed informatizzazione dei dati nei formati digitali stabiliti dalla Società o dalla Direzione Lavori.

## 2.6. PROSPEZIONE SISMICA IN FORO DI SONDAGGIO (DOWN-HOLE)

### 2.6.1. Generalità

La prova consiste nella misurazione dei tempi di arrivo di impulsi sismici generati in superficie ad uno o più ricevitori posti all'interno di un foro di sondaggio verticale, adeguatamente rivestito con apposita tubazione in PVC o ABS con spessore >3 mm da assemblare mediante filettatura M/F oppure con manicotti di giunzione incollati; tale rivestimento dovrà essere cementato al terreno incassante mediante opportuna miscela cementizia.

La prova consente la misura diretta delle velocità di propagazione  $V_P$  delle onde di compressione (onde P) e  $V_S$  delle onde di taglio (onde SH) utili alla determinazione dei parametri elastici dei terreni in condizioni dinamiche.

### 2.6.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita dai seguenti componenti:

- \* sistema di energizzazione (per onde di compressione P) costituito da:
  - martello strumentato lasciato cadere con violenza su una piastra metallica appoggiata al suolo
  - cannoncino sismico
  - energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati
- \* sistema di energizzazione (per onde di taglio SH) costituito da una massa battente manovrata a mano, pneumaticamente o oleopneumaticamente agente a percussione sul piano orizzontale in modo coniugato ( $180^\circ$ ) su un'incudine di legno o di altro materiale, ben saldo al terreno solo per attrito radente e posto nelle adiacenze della testa foro;
- \* geofoni da foro tridimensionali, a frequenza compresa fra 8 e 14 Hz, e 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 potere essere reso solidale con la tubazione di rivestimento del foro tramite un dispositivo di bloccaggio meccanico, pneumatico e/o elettrico.

In caso si utilizzi un solo ricevitore, questo potrà essere anche:

- a doppia terna ovvero costituito da due terne cartesiane ortogonali di ricevitori spaziate fra loro di un metro (1 Verticale e 2 Orizzontali)
- costituito da 3 o più geofoni orizzontali (1 Verticale 3 o più geofoni Orizzontali) disposti sul piano orizzontale ad angoli variabili ( $60^\circ$  se 3 geofoni orizzontali –  $45^\circ$  se 4 geofoni orizzontali)
- \* sismografo registratore con un numero di canali uguale o superiore al numero di ricevitori utilizzati, in grado di realizzare campionature di segnali tra 0.025 e 2 millisecondi e dotato di filtri high pass, band pass e band reject, di "Automatic Gain Control" e di convertitori A/D del segnale campionato ad almeno 16 bit;
- \* apposito software per l'elaborazione dei dati, in grado di fornire i valori di velocità delle onde di compressione e di taglio per ogni stazione di misura impiegando interattivamente algoritmi di calcolo adeguati (es. ART, SIRT, e ILSP) previo controllo dei tragitti dei raggi sismici (Ray Tracing Curvilineo).

### 2.6.3. Modalità esecutive

Le modalità di esecuzione della prova dovranno essere le seguenti:

- 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 ).

- posizionamento e bloccaggio del ricevitore a fondo foro;
- 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). Durante questo test si deve riconoscere chiaramente l'arrivo delle onde di taglio mediante inversione di polarità del segnale acquisito. Stabiliti gli esatti parametri di acquisizione si procede con la registrazione nel seguente modo:
- energizzazione delle onde di compressione e registrazione del file relativo
- energizzazione delle onde di taglio e registrazione del file relativo
- riposizionamento del ricevitore 1 metro (o quanto stabilito dalla DL) più superficiale rispetto a fondo foro e ripetizione delle energizzazioni di compressione e di taglio come sopra
- ripetizione delle medesime operazioni lungo tutta la verticale d'indagine .

Le misure saranno relative all'intervallo di profondità e avranno frequenza non inferiore a 1 misura ogni metro di sondaggio.

#### **2.6.4. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* la quota assoluta o relativa della testa della tubazione di misura;
- \* sismogrammi in originale delle registrazioni di campagna su supporto magnetico;
- \* relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicati:
- \* gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi;
- \* diagrafie riportanti:
  - \* stratigrafia del sondaggio;
  - \* tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio;
  - \* velocità delle onde di compressione e di taglio per ogni stazione;
  - \* intervallari delle onde di compressione e di taglio;
  - \* coefficiente di Poisson dinamico;
  - \* modulo di elasticità dinamico;
  - \* modulo di taglio dinamico;
  - \* modulo di compressibilità dinamico;
  - \* tracce sismografiche onde di compressione;
  - \* tracce sismografiche onde di taglio;

## 2.7. PROSPEZIONE SISMICA TRA FORI DI SONDAGGIO (CROSS-HOLE)

### 2.7.1. Generalità

La prova consiste nella misurazione dei tempi di arrivo di impulsi sismici generati in profondità all'interno di un foro di sondaggio verticale ad un ricevitore posto all'interno di un secondo foro di sondaggio verticale. I fori, paralleli e adeguatamente rivestiti con apposita tubazione, dovranno essere ad una distanza reciproca compresa tra 3 e 8 m.

La prova consente la misura diretta delle velocità di propagazione  $V_P$  delle onde di compressione (onde P) e  $V_S$  delle onde di taglio (onde Sv) e la determinazione dei parametri elastici dei terreni in condizioni dinamiche.

### 2.7.2. Normative e specifiche di riferimento

- \* ISRM -"Suggested methods for seismic testing within and between boreholes", 1988

### 2.7.3. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita almeno dai seguenti componenti:

- \* sistema di energizzazione per onde di compressione di tipo pneumatico, oleodinamico elettrico o a capsula esplodente

N.B. l'energizzatore deve contenere al proprio interno un dispositivo di controllo del T"0" ovvero deve trasmettere al ricevitore oltre che l'impulso del T"0" anche una traccia sismografica che permetterà di eliminare gli eventuali errori del T"0" stesso. Se così non fosse sarà necessario realizzare il Cross-hole fra tre sondaggi e non più fra due.

- \* Sistema di energizzazione per onde di taglio oleodinamico che possa produrre energia polarizzata ed invertibile sul piano verticale, in grado di fornire energia in quantità sufficiente alla generazione di impulsi in modo che risultino leggibili; è onere e responsabilità dell'Impresa dimensionare correttamente il sistema di energizzazione, in funzione della natura e delle caratteristiche dei terreni e che sono da considerarsi noti, in quanto le misure sono successive alla perforazione dei sondaggi entro i quali si eseguono le stesse.

N.B. l'energizzatore deve contenere al proprio interno un dispositivo di controllo del T"0" ovvero deve trasmettere al ricevitore oltre che l'impulso del T"0" anche una traccia sismografica che permetterà di eliminare gli eventuali errori del T"0" stesso. Se così non fosse sarà necessario realizzare il Cross-hole fra tre sondaggi e non più fra due.

- \* Uno o più geofoni da foro tridimensionali, a frequenza compresa fra 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 potere essere reso solidale con la tubazione di rivestimento del foro tramite un dispositivo di bloccaggio meccanico, pneumatico e/o elettrico;

- \* sismografo registratore con un numero di canali uguale o superiore al numero di ricevitori utilizzati, in grado di realizzare campionature di segnali tra 0.025 e 2 millesecondi e dotato di filtri high pass, band pass e band reject, di "Automatic Gain Control" e di convertitori A/D del segnale campionato ad almeno 16 bit;

- \* apposito software per l'elaborazione dei dati, in grado di fornire i valori di velocità delle onde di compressione e di taglio per ogni stazione di misura impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati (es. ART, SIRT, e ILSP), previo controllo dei tragitti dei raggi sismici (Ray Tracing Curvilineo).

#### 2.7.4. Modalità esecutive

Le modalità di esecuzione della prova dovranno essere le seguenti:

- posizionamento e bloccaggio di sorgente (in un foro) e ricevitore (nell'altro foro) in corrispondenza della prima coppia di posizioni coniugate, in accordo con il progetto delle indagini; sorgente e ricevitore dovranno essere posizionati alla medesima profondità, in modo da realizzare un percorso delle onde ipoteticamente orizzontale;
- generazione dell'impulso (è ammessa anche la somma di più impulsi) e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione;
- generazione dell'impulso (è ammessa anche la somma di più impulsi) e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio polarizzate sul piano verticale in direzione alto (o basso);
- generazione dell'impulso (è ammessa anche la somma di più impulsi) e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio polarizzate sul piano verticale in direzione basso (o alto);
- ripetizione delle medesime operazioni per ciascuna coppia di punti coniugati lungo le due verticali d'indagine.

Le misure saranno relative all'intervallo di profondità e avranno frequenza stabilita dalla DL (solitamente 1 misura ogni metro).

È necessario altresì procedere con la misura della verticalità dei sondaggi stessi ovvero bisogna stabilire esattamente la distanza reciproca esistente fra i due (o più) sondaggi alle varie quote di misura delle onde di compressione e di taglio.

Per queste misure verrà utilizzata una sonda inclinometrica con 2 sensori ortogonali con sensibilità superiore a 0.07 gradi. La sonda sarà del tipo a controllo azimutale o sarà calata con aste con connessione a baionetta, in grado di evitare modifiche dell'orientazione azimutale della sonda per l'intera profondità. Le misure verranno effettuate ogni 1 ÷ 2 m e la loro restituzione grafica, che evidenzia la distanza in ogni punto della coppia di fori cross-hole, farà parte integrante della documentazione.

#### 2.7.5. Documentazione

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* le modalità esecutive del foro;
- \* lo schema geometrico di ogni tubazione installata;
- \* la quota assoluta o relativa della testa della tubazione di misura;
- \* le caratteristiche della tubazione installata;
- \* modalità di iniezione, quantità e composizione della miscela iniettata nell'intercapedine;
- \* grafici e tabulati del rilievo della verticalità presentati in modo che risulti facilmente determinabile la distanza fra i fori alle diverse profondità;
- \* sismogrammi in originale delle registrazioni di campagna su supporto magnetico;
- \* relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicati:
- \* gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi;
- \* diagrafie riportanti:
  - stratigrafie dei sondaggi;
  - tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio;
  - velocità delle onde di compressione e di taglio nella sezione compresa tra i due fori;
  - coefficiente di Poisson dinamico;
  - modulo di elasticità dinamico;
  - modulo di taglio dinamico;
  - modulo di compressibilità dinamico;



- tracce sismografiche onde di compressione;
- tracce sismografiche onde di taglio;
- misure inclinometriche;
- risultanze finali ed interpretative.



## 2.8. PROSPEZIONE SISMICA CON CONO SISMICO

### 2.8.1. Generalità

La prova consiste nella misurazione dei tempi di arrivo di impulsi sismici di taglio (SH) generati in superficie ad un ricevitore posto all'interno di un' asta penetrometrica opportunamente attrezzata con una punta sismica.

La prova consente la misura diretta delle velocità di propagazione  $V_{SH}$  delle onde di taglio (onde SH) fra due ricevitori posti all'interno di una punta sismica applicata ad un penetrometro.

### 2.8.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita almeno dai seguenti componenti:

- \* sistema di energizzazione (per onde di taglio SH) costituito da una massa battente manovrata a mano, pneumaticamente o oleopneumaticamente agente a percussione sul piano orizzontale in modo coniugato ( $180^\circ$ ) su un'incudine di legno o di altro materiale, ben saldo al terreno solo per attrito radente e posto nelle adiacenze della testa foro;
- \* Punta penetrometrica sismica costituita da un corpo metallico e da due ricevitori sismici (geofoni e/o accelerometri) paralleli fra loro a distanza di 1 metro l'uno dall'altro incapsulati ed opportunamente isolati nella punta sismica.
- \* sismografo registratore con un numero di canali uguale o superiore al numero di ricevitori utilizzati in grado di realizzare campionature di segnali tra 0.025 e 2 millisecondi e dotato di filtri high pass, band pass e band reject, di "Automatic Gain Control" e di convertitori A/D del segnale campionato ad almeno 16 bit;

### 2.8.3. Modalità esecutive

Le modalità di esecuzione della prova dovranno essere le seguenti:

- posizionamento e bloccaggio degli energizzatori delle onde di taglio in prossimità della prova penetrometrica da realizzare (2 – 5 m ).
- Infilaggio della punta sismica nel terreno fino alla posizione in cui si avrà il primo ricevitore a -1 m dal p.c. e il secondo al p.c.; la direzione dei ricevitori dovrà essere parallela alla direzione di polarizzazione dell'energizzatore.
- Impostare i parametri di registrazione del sismografo in modo tale che l'intervallo di campionamento dello stesso sia posizionato sul valore massimo (ad esempio 0.0025 millisecc) e il tempo di registrazione sia di almeno 300 millisecondi.
- generazione di un impulso di taglio in una direzione (es normale) e registrazione dei tempi di arrivo dell' onda di taglio.
- generazione di un impulso di taglio nella direzione coniugata ( $180^\circ$  sul piano orizzontale) e registrazione dei tempi di arrivo dell'onda di taglio.
- Infilaggio della punta penetrometrica 1 metro più in profondità senza far ruotare le aste. In tal modo l'intervallo di ricezione sarà fra -2 e -1 m dal p.c. e si ripetono le energizzazioni fino al rifiuto e / o fino alla profondità richiesta.

#### 2.8.4. Documentazione

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* sismogrammi in originale delle registrazioni di campagna su supporto magnetico;
- \* relazione conclusiva, elaborata in base ai risultati delle indagini svolte in cui saranno indicati:
- \* gli algoritmi di calcolo impiegati, tabelle e tavole ad integrazione e chiarimento delle analisi;
- \* diagrafie riportanti:
  - tempi di arrivo delle onde di taglio;
  - velocità intervallari delle onde di taglio;
  - tracce sismografiche onde di taglio.

## **2.9. PROSPEZIONE GEOTOMOGRAFICA (FRA SONDAGGI O FRA SONDAGGIO E SUPERFICIE TOPOGRAFICA)**

### **2.9.1. Generalità**

Nella prospezione sismica geotomografica, eseguita in corrispondenza di una sezione delimitata da due superfici comunque inclinate (costituite ad es. da due fori di sondaggio oppure dalla superficie topografica e un foro di sondaggio) si utilizza una superficie come superficie di energizzazione e l'altra come superficie di ricezione.

Nel caso in cui ci si trovi di fronte a una prospezione fra due sondaggi in un sondaggio saranno posizionati dei ricevitori e nell'altro verranno effettuate le energizzazioni.

Nel caso invece in cui ci trovi di fronte a una prospezione fra un sondaggio e la superficie topografica saranno posizionati nel sondaggio i ricevitori e sulla superficie topografica verranno effettuate le energizzazioni (eventualmente si possono invertire le posizioni)

### **2.9.2. Caratteristiche delle attrezzature**

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita almeno dai seguenti componenti:

- \* sismografo a 24 canali, con 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 92 decibel, registrazione dei dati in digitale per elaborazioni successive con formato in uscita minimo a 16 bit;

- \* sistema di energizzazione per onde di compressione di tipo pneumatico, oleodinamico elettrico o a capsula esplodente (per le energizzazioni in pozzo)

- \* geofoni di superficie a frequenza propria variabile tra 8 e 100 Hz (per le ricezioni sulla superficie topografica);

- \* geofoni da pozzo o idrofonici (se in falda), a frequenza propria variabile tra 8 e 14 Hz (per le ricezioni in pozzo)

- \* sistema di energizzazione per le onde di compressione da superficie che può essere costituito da:

- martello strumentato lasciato cadere con violenza su una piastra metallica appoggiata al suolo;
- cannoncino sismico;
- energizzatori oleopneumatici e/o gravimetrici trainati e/o trasportati.

### **2.9.3. Modalità esecutive**

#### **Fra due sondaggi**

Tali indagini vengono effettuate, solitamente, per la determinazione e la definizione di oggetti sepolti all'interno di un terreno incassante sia il caso di cavità o di fondazioni in jet grouting e/o pali di fondazioni nonché per la definizione di eventuali piani di fatturazione tettonica nello spazio compreso fra le due verticali.

La prospezione sarà tanto più precisa e definita quanto più le superfici di indagine saranno vicine fra loro e la distanza fra i ricevitori/emissioni di energia sarà piccola.

In linea di massima la distanza fra i ricevitori/emissioni di energia sarà non più vicini di 0.5 metri e la distanza minima fra i sondaggi non dovrà essere inferiore ai 2-3 metri

Solitamente si utilizzano stringhe di 24 ricevitori in pozzo spaziate 0,5 metri e si emettono impulsi di

energia nel pozzo adiacente ad intervalli di 0.5 m alle stesse quote dei ricevitori.

### **Fra sondaggio e superficie topografica**

Tali indagini vengono effettuate, solitamente, per la determinazione di cavità o per la definizione di eventuali piani di fatturazione tettonica o superfici di allentamento della scarpata.

Solitamente la superficie topografica è molto inclinata (scarpata) rispetto all'orizzontale e il sondaggio è realizzato a bordo scarpata.

Tale prospezione viene realizzata inserendo di solito nel sondaggio una stringa di 24 ricevitori interspaziati 0,5 m e si energizza lungo la scarpata a distanza di 0.5 metri (in quota).

Sarà altresì possibile posizionare 24 ricevitori lungo la scarpata ed energizzare nel sondaggio per 24 volte alla stessa quota dei ricevitori.

### **2.9.4. Elaborazione dei dati**

L'elaborazione dovrà essere sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropica, la quale dovrà fornire, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. (Ray Tracing Curvilineo) e algoritmi di ricostruzione tomografica (ad esempio con l'impiego di algoritmi ART - Algebraic Reconstruction Technique, SIRT - Simultaneous Iterative Reconstruction Technique o ILST - Iterative Least Square Technique), il campo delle velocità del sottosuolo ad elevata densità di informazioni: le celle unitarie, di forma rettangolare, potranno avere dimensioni orizzontali (asse x) e verticali (asse z) pari a, rispettivamente,  $1/3 \div 1/5$  e  $1/5 \div 1/10$  della spaziatura tra i geofoni.

### **2.9.5. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* sismogrammi originali su supporto magnetico;
- \* mappature in tonalità di colore relative alla sezione tomografica in termini di ray tracing, di densità dei dati e di velocità delle onde di compressione ( $V_P$ );
- \* tabelle con i parametri di input e calcolati;
- \* relazione in cui vengono riportate le metodologie di indagine, gli algoritmi impiegati, le analisi realizzate e le risultanze dell'analisi.

### **2.9.6. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Ad integrazione dell'indagine sismica dovrà essere eseguito un rilievo topografico comprendente la determinazione planoaltimetrica delle ubicazioni dei ricevitori/sorgenti lungo la scarpata, riferita a punti notevoli (bocca pozzo) o ad elementi cartografici noti dell'area interessata. Le coordinate del rilievo topografico, dovranno essere inquadrare in un sistema di coordinate generale di progetto fornito dalla Società. Qualora quest'ultimo non fosse disponibile il suddetto rilievo sarà fornito in coordinate relative.

Tale rilievo dovrà essere corredato dai libretti di campagna dei rilievi ed informatizzazione dei dati nei formati digitali stabiliti dalla Società o dalla Direzione Lavori.

È necessario altresì procedere con la misura della verticalità dei sondaggi stessi ovvero bisogna stabilire esattamente la distanza reciproca esistente fra i sondaggi (o il sondaggio) alle varie quote di misura delle onde di compressione.

Per queste misure verrà utilizzata una sonda inclinometrica con 2 sensori ortogonali con sensibilità superiore a 0.07 gradi. La sonda sarà del tipo a controllo azimutale o sarà calata con aste con connessione a baionetta, in grado di evitare modifiche dell'orientazione azimutale della sonda per l'intera profondità. Le misure verranno effettuate ogni  $1 \div 2$  m e la loro restituzione grafica, che evidenzia la distanza in ogni punto della coppia di fori cross-hole, farà parte integrante della documentazione.

## 2.10. PROVE PER ONDE SUPERFICIALI ATTIVE

### 2.10.1. Generalità

Il metodo delle onde superficiali è una tecnica di caratterizzazione sismica basata sull'analisi della dispersione geometrica delle onde superficiali (solitamente si tratta di onde di Rayleigh in caso di acquisizioni terrestri). In particolare, poiché le onde di Rayleigh si propagano lungo la superficie topografica in uno strato di profondità circa pari alla lunghezza d'onda, in mezzi stratificati verticalmente eterogenei, le diverse lunghezze d'onda, relative alla propagazione di armoniche a diversa frequenza, si propagano con velocità di fase che dipende dalle proprietà dei materiali interessati dalla propagazione. Ciò fa sì che la velocità di fase sia funzione della frequenza dell'onda stessa. Tale dipendenza prende il nome di dispersione geometrica e viene rappresentata tramite la curva di dispersione (velocità di fase vs. frequenza). La propagazione delle onde di superficie è un fenomeno multimodale, una stessa frequenza può propagarsi contemporaneamente a diverse velocità, e ogni velocità viene chiamata modo.

Dalla curva di dispersione sperimentale è possibile caratterizzare il sottosuolo in termini di variazione della velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_{SV}$ ), e quindi del modulo di rigidità al taglio dinamico ( $G_0$ ), in funzione della profondità.

L'utilizzo delle prove per onde superficiali ha molti campi di applicazione, dalla stima della  $V_{S30}$  richiesta dalle NTC 08, alla valutazione dei parametri utili a studi approfonditi di pericolosità sismica; dalla caratterizzazione di discariche, alla valutazione della profondità e dello stato di alterazione di substrati superficiali in presenza di falde acquifere, la caratterizzazione di versanti e depositi.

Generalmente il metodo assume come modello del terreno un mezzo elastico-lineare a strati omogenei. Nella maggior parte delle applicazioni, la tecnica è quindi utilizzata per stimare un profilo verticale 1D di VS, ma vi sono molte applicazioni in siti con moderate variabilità laterali in cui il metodo consente di stimare distribuzioni di VS pseudo-2D/3D.

Il metodo per onde superficiali maggiormente utilizzato prende comunemente il nome di MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) e si basa sulla misura delle onde superficiali eseguita con un dispositivo lineare di sensori sismici e con sorgenti artificiali.

### 2.10.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita almeno dai seguenti componenti:

- \* sismografo digitale a 12 canali (meglio 24), con possibilità di stack delle registrazioni, guadagno del segnale (in ampiezza) e dinamica del convertitore A/D minima a 16 bit.
- \* per prove relative alla caratterizzazione del sottosuolo, 12 (meglio 24) geofoni verticali (o accelerometri) a frequenza propria uguale o inferiore a 4.5 Hz; per prove non distruttive su pavimentazioni o manufatti è possibile utilizzare sensori a frequenza maggiore.
- \* sistema di energizzazione costituito da uno dei seguenti dispositivi da scegliersi in funzione della scala delle indagini:
  - mazza battente con eventuale piastra di ripartizione appoggiata al suolo;
  - energizzatori sismici impulsivi oleopneumatici e/o a gravità;
  - fucili sismici;
  - cariche di esplosivo;
  - sorgenti vibranti (vibrochina).

### 2.10.3. Modalità esecutive

La procedura consiste in tre step principali: l'acquisizione dei dati sismici sul terreno; l'elaborazione per la stima delle curve di dispersione sperimentali e l'inversione delle curve di dispersione, volta alla stima dei profili di  $V_S$  che costituisce il risultato della prova.

### 2.10.4. Acquisizione

La fase di acquisizione, prevede l'utilizzo di una sorgente (impulsiva o controllata) tramite la quale creare una perturbazione sismica che si propaga lungo la superficie libera che viene rilevata da più ricevitori (di norma geofoni verticali a bassa frequenza) posti lungo dispositivi lineari sul piano campagna. La sorgente viene posta ad un estremo dello stendimento di misura e di norma si effettuano energizzazioni ai due lati opposti dello stendimento per confrontare i risultati (si suggerisce di effettuare almeno 10 ripetizioni dell'energizzazione – con eventuale stacking - per ogni punto sorgente). Gli obiettivi dell'acquisizione sono quelli di fornire dati relativi alla propagazione di onde superficiali in una banda di frequenza più ampia possibile poiché ciò consente di ottenere informazioni sulle proprietà degli strati profondi, che influenzano le componenti a bassa frequenza, e di descrivere con adeguata risoluzione gli strati più superficiali, che influenzano in maniera significativa soprattutto le componenti ad alta frequenza. Ciò implica la scelta di corretti parametri di acquisizione nello spazio e nel tempo.

Il campionamento temporale deve garantire che tutto il treno d'onda relativo alla propagazione delle onde superficiali sia registrato, quindi la durata dell'acquisizione (T) deve essere maggiore o uguale al tempo necessario per l'armonica più lenta a raggiungere il sensore più lontano. L'intervallo di campionamento (dt) deve garantire la stima delle armoniche di interesse in base alle regole del campionamento (frequenza di campionamento almeno doppia (meglio pari a cinque volte) della frequenza più alta da registrare).

Il campionamento spaziale deve consentire di stimare affidabilmente le lunghezze d'onda di interesse. In particolare la lunghezza dello stendimento di misura (L) non deve essere inferiore alla metà della massima lunghezza d'onda e la distanza intergeofonica (dl) deve essere metà della minima lunghezza d'onda.

Inoltre, poiché dal punto di vista fisico, le onde di superficie sono sensibili alle proprietà del mezzo in cui si propagano fino a circa  $\lambda/2.5$  -  $\lambda/3$  la lunghezza L deve essere definita anche in funzione della profondità d'indagine desiderata.

Tipicamente per indagini a scala ingegneristica sono da considerarsi adeguati, in senso cautelativo, i seguenti parametri di acquisizione:

Profondità d'indagine	T [s]	dt [ms]	L [m]	dl [m]
1 (pavimentazioni)	0,15	0.125	3	0.1
10	1	0.5	23	1
30	2	1	46	2
100	4	2	200	5-10

I parametri di acquisizione precedentemente definiti per un profilo di misura singolo, possono anche essere adottati per l'acquisizione in modalità "continuous profiling" che prevede di traslare tutto il dispositivo di misura lungo una linea di acquisizione per stimare una serie di curve di dispersione.

Nel caso in cui dalle registrazioni sismiche effettuate per l'analisi delle onde superficiali si vogliano anche stimare i tempi di primo arrivo da utilizzare in indagini sismiche a rifrazione, i parametri indicati dovranno essere adeguati a soddisfare i requisiti di entrambe le tecniche.

### 2.10.5. Elaborazione dei dati

Esistono diverse tecniche di processing per stimare le curve di dispersione sperimentali a partire dai sismogrammi registrati. Le metodologie più diffuse sono l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda) e  $\omega$ -p (frequenza angolare-lentezza) dove i massimi di energia dello spettro sono associabili alle onde di Rayleigh e vengono identificati e trasformati in punti della curva di dispersione. Gli obiettivi dell'elaborazione dei dati sono quelli di riconoscere gli eventi dispersivi e di estrarli dalla globalità dei dati isolando eventi coerenti in ampi range di frequenza e, possibilmente, riconoscendo diversi eventi associabili a diversi modi di propagazione. L'obiettivo minimo dell'elaborazione è comunque l'identificazione del modo fondamentale privo di interferenze relative ai modi superiori e altri eventi sismici (onde di volume o guidate). Quest'ultimo punto è di fondamentale importanza poiché la non corretta identificazione di un modo può portare a errori grossolani nella successiva fase di inversione. È opportuno che il riconoscimento dei massimi spettrali avvenga con l'ausilio di codici di ricerca automatica.

Qualora non si eseguano le operazioni di stack in acquisizione, le registrazioni relative alle diverse energizzazioni relative al medesimo punto sorgente, possono essere processate separatamente. Per ogni registrazione viene condotta la procedura di elaborazione precedentemente descritta e i risultati (velocità di fase ad ogni frequenza) possono essere trattati statisticamente per ottenere una curva di

dispersione media e le incertezze ad essa associate.

È inoltre utile confrontare le curve di dispersione stimate in diversi punti sorgente per valutare l'eventuale presenza di forti discontinuità laterali.

### 2.10.6. Inversione

La curva di dispersione sperimentale (eventualmente costituita da più modi), viene utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale di  $V_S$ . La risoluzione del problema inverso implica la parametrizzazione del modello di sottosuolo assunto, che viene di norma schematizzato come un mezzo elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. I parametri di modello sono  $V_S$ ,  $V_P$  (o rapporto di Poisson), spessore e densità di ogni strato. I parametri incogniti dell'inversione sono  $V_S$  ed eventualmente lo spessore degli strati, mentre  $V_P$  (Poisson) e la densità sono assunti a priori. Inoltre, l'utilizzo di un modello monodimensionale è un'ipotesi che deve essere in linea di massima soddisfatta dal sito per garantire la validità del risultato finale.

Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente delle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto (simulazione della curva di dispersione teorica) viene risolto diverse volte variando i parametri incogniti di modello in modo da minimizzare lo scarto fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata). Il processo termina quando viene individuato un insieme di parametri di modello che renda lo scarto accettabile. Il numero dei parametri di modello deve essere scelto come il minimo in grado di descrivere la curva di dispersione sperimentale (solitamente 2-3-4 strati). Una sovrapparametrizzazione rischia, infatti, di ridurre la risoluzione dei singoli parametri dovuta a problemi di equivalenza.

La procedura di inversione può essere condotta con tecniche di ricerca locale (metodi linearizzati) o globale (metodi Monte Carlo) della soluzione.

### 2.10.7. Documentazione

La relazione in cui vengono riportate le metodologie di indagine, gli algoritmi impiegati, le analisi realizzate e i risultati ottenuti dovrà contenere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione possibilmente georeferenziata, data, nominativo dell'operatore, parametri di acquisizione e strumentazione utilizzata);
- \* sismogrammi originali su supporto magnetico;
- \* immagini relative alla trasformata bidimensionale del campo d'onda (f-k, w-p, f-v) con massimi spettrali evidenziati;
- \* confronto tra la curva stimata e quella sintetica generata a partire dal modello finale di  $V_S$ ;
- \* confronto tra il profilo di  $V_S$  di primo tentativo e quello finale del processo di inversione;
- \* tabelle con i parametri calcolati e parametri assunti a priori (spessore degli strati,  $V_S$ , rapporto di Poisson o  $V_P$  e densità).

### 2.10.8. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica

Come descritto precedentemente, per l'interpretazione delle misure di campagna si assume come modello del terreno un mezzo elastico-lineare a strati omogenei. Tale modello implica la necessità di avere un piano campagna sostanzialmente libero da ostacoli e privo di marcate irregolarità topografiche. Inoltre, per ottenere risultati significativi, è necessario che le condizioni geologiche del sottosuolo siano tali da soddisfare il modello di stratificazione sub-orizzontale.

## 2.11. PROVE PER ONDE SUPERFICIALI PASSIVE

### 2.11.1. Generalità

Tali misurazioni sono in linea di principio analoghe alle prove per onde di Rayleigh con sorgente attiva. L'unica differenza è costituita dalla procedura di acquisizione e di stima della curva di dispersione sperimentale. Infatti, le misure sismiche passive non richiedono una sorgente artificiale ma sono basate sulla registrazione del rumore ambientale, che consiste in vibrazioni del terreno indotte da attività antropiche (come il traffico, il rumore derivante da macchinari industriali, ecc.), o da fenomeni naturali; tali vibrazioni del terreno prendono il nome di microtremori. Il vantaggio principale delle tecniche passive, rispetto a quelle attive, è costituito dalla possibilità di ottenere informazioni relative alla propagazione di onde a bassa frequenza e quindi di estendere le informazioni estraibili dalla curva di dispersione a profondità elevate.

L'integrazione di dati ottenuti con misure attive e passive consente, in linea teorica, di estendere l'intervallo di frequenza in cui è possibile stimare la curva di dispersione e, di conseguenza, di incrementare la profondità d'indagine raggiungibile senza perdere le informazioni di maggior dettaglio sugli strati superficiali.

### 2.11.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita almeno dai seguenti componenti:

- \* sismografo digitale a 12 canali (meglio 24), guadagno del segnale (in ampiezza) e dinamica del convertitore A/D minima a 16 bit, possibilità di registrazione di finestre temporali di alcuni minuti;
- \* 4 geofoni verticali/triassiali (o accelerometri) a frequenza propria uguale o inferiore a 2 Hz (requisito minimo, ma si consiglia l'utilizzo di 12 ricevitori);

### 2.11.3. Modalità esecutive

Il metodo si basa sull'assunzione che il rumore sismico sia costituito prevalentemente da onde superficiali e che sia generato da sorgenti lontane dal sito di misura. Un aspetto di particolare rilevanza è costituito dalla necessità di acquisire i segnali utilizzando una configurazione di prova bidimensionale sul piano campagna. Infatti, non essendo nota a priori la direzione di propagazione (funzione della posizione della sorgente che genera il rumore ambientale), è necessario eseguire una scansione spaziale che consenta di determinare la direzione di propagazione dell'onda dominante e conseguentemente la sua velocità di propagazione. Anche le tecniche di processing dovranno essere in tal senso adeguate.

### 2.11.4. Acquisizione

La strumentazione necessaria è del tutto analoga a quella utilizzata per le misure di tipo attivo; infatti si utilizzano come ricevitori dei geofoni verticali o triassiali a bassa frequenza, disposti secondo dispositivi bidimensionali, ad esempio a "L", a "T", a croce o circolari. Le geometrie dotate di un asse di simmetria verticale sono preferibili in quanto dotate della medesima risposta a tutte le possibili direzioni di provenienza del campo d'onde.

È fondamentale considerare le caratteristiche geometriche dell'array di acquisizione. Il campionamento spaziale deve consentire di stimare affidabilmente le lunghezze d'onda di interesse. Le regole del campionamento impongono che si possa stimare affidabilmente una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) massima pari a due volte la massima distanza tra ricevitori lungo la direzione di provenienza del segnale ( $D$ ), mentre la minima distanza intergeofonica ( $d$ ) deve essere metà della minima lunghezza d'onda misurabile.

Trattandosi di una registrazione di rumore ambientale (quindi ignota e variabile nel tempo) conviene acquisire per il maggior tempo ( $T$ ) possibile consentito dal sismografo, ed eventualmente ripetere l'acquisizione per due-tre volte. L'intervallo di campionamento ( $dt$ ) condiziona la massima frequenza misurabile.

Inoltre, poiché dal punto di vista fisico, le onde di superficie sono sensibili alle proprietà del mezzo



in cui si propagano fino a circa  $\lambda/2.5 - \lambda/3$  la lunghezza  $D$  deve essere definita anche in funzione della profondità d'indagine desiderata. Ad esempio, se si dispone di un array circolare del diametro di 100m, si potrà stimare affidabilmente una  $\lambda$  di 200m con una profondità di indagine di circa 80m. Ovviamente, trattandosi di misure passive, occorre che la componente in frequenza con quella lunghezza d'onda sia contenuta nel rumore ambientale. Ipotizzando che questa viaggi in un mezzo con velocità di fase di 1000 m/s, corrispondente ad una frequenza di 5 Hz, tale frequenza dovrà essere una componente del rumore ambientale.

### 2.11.5. Elaborazione dei dati

Esistono diverse tecniche per acquisire ed elaborare i dati di microtremori allo scopo di ottenere una curva di dispersione, basate sull'analisi dello spettro f-k e sulla correlazione spaziale SPAC e ESAC. Esistono poi tecniche che prevedono acquisizioni passive con dispositivi monodimensionali note con la sigla RE.MI. (REfraction Microtremor), per cui si rimanda alla sezione 1.1.11.4.

I metodi basati sullo spettro f-k, ad esempio, consentono la stima dello spettro, secondo numeri d'onda in direzione qualsiasi nello spazio bidimensionale del piano campagna. Per ogni frequenza è quindi possibile ottenere uno spettro bidimensionale in dominio di numero d'onda ( $k_x$  e  $k_y$ ) e individuare in tale spettro i massimi di energia. La posizione del massimo spettrale a ciascuna frequenza consente la stima della direzione di arrivo dell'onda e della sua velocità, infatti, il numero d'onda associato all'onda dominante è dato dalla distanza tra il picco e l'origine degli assi. L'analisi viene ripetuta per diverse frequenze in modo da poter stimare la velocità di fase su un intervallo di frequenze sufficientemente ampio. Tale approccio consente quindi di estrarre i punti della curva di dispersione alle diverse frequenze superando il problema dell'impossibilità di conoscere le sorgenti che hanno generato il rumore misurato. Di norma, le acquisizioni durano alcuni minuti ma, in fase di elaborazione, i sismogrammi possono essere frazionati in sotto-finestre di durata più limitata. Per ogni sottofinestra viene condotta la procedura di elaborazione precedentemente descritta e i risultati (velocità di fase ad ogni frequenza) ottenuti dall'elaborazione delle diverse sotto-finestre temporali possono essere trattati statisticamente per ottenere una curva di dispersione media e le incertezze ad essa associate.

I metodi SPAC ed ESAC sono invece basati sull'autocorrelazione spaziale per la stima delle curve di dispersione. Per una particolare frequenza, la velocità di fase è uguale a quella che fa sì che l'autocorrelazione spaziale stimata descriva meglio la funzione di Bessel del primo ordine. Dal punto di vista pratico, la stima avviene confrontando queste quantità su ampi intervalli di frequenza e velocità. La curva di dispersione è rappresentata dai valori di velocità e frequenza in cui il confronto presenta il minor scarto. I metodi basati sull'autocorrelazione spaziale si fondano sull'ipotesi di omnidirezionalità del rumore.

Dal processing si ottiene dunque una curva di dispersione del tutto simile a quella che si ricava dall'interpretazione dei dati delle indagini sismiche con onde superficiali col metodo attivo che però riguarda di norma le basse frequenze.

### 2.11.6. RE.MI. (REfraction Microtremor)

Il termine Refraction Microtremor non deriva dal principio fisico su cui è basato il metodo, ma dalla possibilità di utilizzare stendimenti lineari, normalmente utilizzati in indagini di sismica a rifrazione in onde P. Prima di passare alla descrizione delle modalità operative del metodo è necessario sottolineare che tale metodo è considerato in maniera molto controversa dalla comunità scientifica e che la sua adozione non è consigliata. Ciononostante tale metodo è talvolta divenuto prassi professionale soprattutto in ambiente urbano. Qualora tale approccio sia applicato, si raccomanda comunque fortemente di associarlo a misure attive.

Trattandosi di una tecnica passiva, quindi pensata per estendere la stima delle curve di dispersione a una frequenza più bassa, per le stesse ragioni di cui sopra, dovrebbe essere impiegata utilizzando sensori a frequenza propria inferiore o uguale a 4.5 Hz ed andrebbero adottati tempi di acquisizione lunghi con registrazioni ripetute (maggior tempo possibile consentito dal sismografo). Si sottolinea che ciò è in contrasto con le raccomandazioni tecniche indicate talvolta a livello commerciale.

A differenza delle tecniche basate sull'analisi dello spettro f-k, in questo caso è assolutamente necessario soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni. Tale assunzione è raramente verificata nella realtà.

Come per le prove per onde superficiali di tipo attivo, le metodologie più diffuse per l'elaborazione sono l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda) e  $\omega$ -p (frequenza angolare-lentezza)

per identificare gli eventi associabili alle onde di Rayleigh. La prassi prevede che in questi casi, anziché i massimi di energia, vengano identificati sullo spettro i punti di transizione tra l'area ad energia maggiore ed il rumore incoerente di fondo. Questo serve a mitigare l'effetto dei segnali che si propagano non in linea con lo stendimento di misura e che producono una sovrastima delle velocità.

Per questo motivo tale tecnica risulta più soggettiva rispetto alle misure attive e alle misure passive con array bidimensionali. Inoltre fornisce risultati errati qualora il rumore provenga da una direzione preferenziale.

Per essere sicuri dell'attendibilità della prova occorrerebbe realizzare contestualmente un array bidimensionale e verificare la direzionalità del rumore. Questo non è quasi mai possibile (per ragioni di spazio) ed è molto dispendioso in termini di tempo. In quest'ottica è buona norma eseguire contestualmente una prova di tipo attivo (ad esempio di tipo MASW) sfruttando l'analogia tra gli schemi di acquisizione (si tratta sostanzialmente dello stesso stendimento). In questo modo è possibile verificare l'attendibilità di una prova RE.MI. almeno per la banda di frequenze in cui la curva stimata con una prova attiva si sovrappone a quella stimata con il RE.MI.

### 2.11.7. Inversione

La curva di dispersione sperimentale (eventualmente costituita da più modi e combinata con le curve stimate utilizzando prove superficiali attive), viene utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale di  $V_S$ . La risoluzione del problema inverso implica la parametrizzazione del modello di sottosuolo assunto, che viene di norma schematizzato come un mezzo elastico a strati piano-paralleli, omogenei e isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. I parametri di modello sono  $V_S$ , spessore e densità di ogni strato. I parametri incogniti dell'inversione sono  $V_S$  ed eventualmente lo spessore degli strati, mentre  $\rho$  e la densità sono assunti a priori. Inoltre, l'utilizzo di un modello monodimensionale è un'ipotesi che deve essere in linea di massima soddisfatta dal sito per garantire la validità del risultato finale.

Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente delle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto (simulazione della curva di dispersione teorica) viene risolto diverse volte variando i parametri incogniti di modello in modo da minimizzare lo scarto fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata). Il processo termina quando viene individuato un insieme di parametri di modello che renda lo scarto accettabile. Il numero dei parametri di modello deve essere scelto come il minimo in grado di descrivere la curva di dispersione sperimentale (solitamente 2-3-4 strati). Una sovrapparametrizzazione rischia, infatti, di ridurre la risoluzione dei singoli parametri dovuta a problemi di equivalenza. In particolare, qualora si invertano solo curve di dispersione ottenute da prove passive, quindi povere in contenuto di alte frequenze, è bene non sovrapparametrizzare la parte più superficiale del profilo, in quanto la presenza di molti strati li renderebbe irrisolti.

La procedura di inversione può essere condotta con tecniche di ricerca locale (metodi linearizzati) o globale (metodi Monte Carlo) della soluzione.

### 2.11.8. Documentazione

La relazione in cui vengono riportate le metodologie di indagine, gli algoritmi impiegati, le analisi realizzate e i risultati ottenuti dovrà contenere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione possibilmente georeferenziata, data, nominativo dell'operatore, parametri di acquisizione e strumentazione utilizzata);
- \* sismogrammi originali su supporto magnetico;
- \* in caso di array di misura bidimensionali, immagini dello spettro tridimensionale ( $f-k_x-k_y$ ) con evidenziati i massimi spettrali;
- \* in caso di prove RE.MI., immagini dello spettro bidimensionale ( $f-k$ ,  $w-p$ ,  $f-v$ ) con evidenziati i punti individuati per la stima della curva di dispersione e considerazioni sull'attendibilità della prova (confronto con dati attivi);
- \* confronto tra la curva stimata e quella sintetica generata a partire dal modello finale di  $V_S$ ;
- \* confronto tra il profilo di  $V_S$  di primo tentativo e quello finale del processo di inversione;
- \* tabelle con i parametri calcolati e parametri assunti a priori (spessore degli strati,  $V_S$  e densità).



### **2.11.9. Rilievo topografico del piano completo di prospezione sismica**

Come descritto precedentemente, per l'interpretazione delle misure di campagna si assume come modello del terreno un mezzo elastico-lineare a strati omogenei. Tale modello implica la necessità di avere un piano campagna sostanzialmente libero da ostacoli e privo di marcate irregolarità topografiche. Inoltre, per ottenere risultati significativi, è necessario che le condizioni geologiche del sottosuolo siano tali da soddisfare il modello di stratificazione sub-orizzontale.

## **2.12. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA (HVSR)**

### **2.12.1. Generalità**

La metodologia, chiamata anche tecnica Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base di studi precedenti.

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito.

La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

### **2.12.2. Caratteristiche delle attrezzature**

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcun strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

1. trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (< 1-2 Hz);
2. amplificatori;
3. digitalizzatore;
4. frequenza di campionamento: > 50 Hz;
5. convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit;
6. durata registrazione: >15 minuti;
7. collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

### **2.12.3. Modalità esecutive**

Come accennato l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E e W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc., in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta di sito è consigliabile effettuare almeno tre misure ognuna di almeno 15-20 minuti per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

### **2.12.4. Elaborazione dei dati**

L'elaborazione dei dati raccolti deve impiegare un software in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200-400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata ( $>10$ );
5. media degli spettri H/V;
6. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sua deviazione standard.

### 2.12.5. Documentazione

Il certificato finale della prova presenta:

1. i criteri di attendibilità della misura;
2. i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
3. i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
4. l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alla frequenza del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
5. l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure HVSR offrono la possibilità di determinare:

1. valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alle frequenze di risonanza;
2. spessori della coltre di copertura.

### **3. PROSPEZIONI ELETTRICHE**

#### **3.1. SONDAGGIO ELETTRICO VERTICALE (SEV)**

##### **3.1.1. Generalità**

L'indagine geoelettrica consiste nell'immettere una corrente continua nel terreno tramite due elettrodi A e B (AB = dipolo di corrente o di intensità) e nel misurare la caduta di potenziale, dovuta alla resistenza del terreno al passaggio della corrente elettrica, in corrispondenza di due elettrodi M ed N (MN = dipolo di misura o di potenziale). Attraverso la determinazione della resistività del terreno, l'indagine consente di ricostruire indirettamente il profilo litostratigrafico del terreno.

Gli elettrodi saranno allineati (M ed N in posizione interna, A e B esterni) e simmetricamente disposti rispetto ad un centro, eccetto che nel caso di dispositivo dipolo-dipolo, in cui la coppia di elettrodi AB sarà esterna alla coppia MN. Il modello monodimensionale che si ricaverà dall'elaborazione dei dati è da intendersi affidabile in assenza di significative variazioni topografiche.

Nella configurazione Schlumberger, gli elettrodi di tensione M ed N dovranno essere mantenuti ad una distanza fissa, mentre gli elettrodi di corrente A e B dovranno essere allontanati progressivamente di una certa distanza dal centro geometrico dello stendimento.

Nella configurazione Wenner, i quattro elettrodi dovranno essere tra loro equidistanti; dopo ogni misura, l'equidistanza verrà aumentata.

Nella configurazione dipolo-dipolo gli elettrodi dovranno costituire due coppie separate (AB ed MN) che verranno reciprocamente allontanate tra loro.

##### **3.1.2. Caratteristiche delle attrezzature**

L'attrezzatura di prova dovrà essere costituita dai seguenti componenti:

- georesistivimetro con millivoltmetro (sensibilità massima 0.1 mV), circuito di azzeramento dei potenziali spontanei e milliamperometro con scala 1 mA - 2 A (sensibilità 0.1 mA);
- generatore di potenza sufficiente all'indagine;
- batteria di energizzazione con pile a secco e/o ricaricabile;
- cavi elettrici ad alto isolamento montati su rulli spalleggiabili;
- elettrodi di corrente in acciaio;
- elettrodi di tensione impolarizzabili, in rame o ceramica;
- apparecchi di ricetrasmissione;
- cavi di collegamento ed accessori.

##### **3.1.3. Modalità esecutive**

Le esatte modalità di configurazione in fase di prova saranno in ogni caso preventivamente concordate con la Direzione Lavori, comunque dovranno essere eseguite un minimo di 8 misure per modulo logaritmico.

In caso di acqua di falda affiorante o subaffiorante, se ne preleveranno alcuni campioni per la definizione in sito della conducibilità. Prima di ogni misura dovrà inoltre essere verificato il valore della resistenza di contatto con il terreno per gli elettrodi AB; si verificherà anche l'eventuale dispersione dei cavi, misurata applicando tensione agli stessi a circuito aperto.

Il valore della differenza di potenziale tra gli elettrodi MN prima della prova dovrà essere verificato e dovrà risultare pari a zero.

#### **3.1.4. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* cartografia di base in scala adeguata con ubicazione delle prove eseguite e dei centri di misura, con indicazione degli azimut e della quota dei centri di misura;
- \* tabulazione dei valori di resistività apparente misurati;
- \* curve di resistività apparente in grafici bilogarithmici;
- \* copia di tutti i dati raccolti in campagna;
- \* relazione riassuntiva con descrizione dettagliata delle attrezzature impiegate, delle modalità operative, dei metodi di interpretazione e comprensiva della resistività elettrica alle diverse profondità e delle unità elettrostratigrafiche evidenziate.

## 3.2. TOMOGRAFIA ELETTRICA

### 3.2.1. Generalità

La tomografia elettrica consiste nella caratterizzazione geoelettrica e dimensionale, con elevato dettaglio, delle strutture presenti lungo sezioni bidimensionali. Può essere quindi utilizzata, con le stesse modalità operative, sia per la risoluzione di problematiche legate al primo sottosuolo (presenza e definizione geometrica di manufatti) che per la definizione di strutture geologiche fino a diverse decine di metri di profondità.

Le misure sono effettuate con strumentazioni automatiche secondo le diverse configurazioni elettrodiche tradizionali (Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo, ecc). L'innovazione rispetto ai profili di resistività è rappresentata dalla possibilità di effettuare un grande numero di misure in tempi brevi e dalla successiva elaborazione con programmi di inversione bidimensionale. Tale tecnica consente inoltre di operare anche in presenza di terreni morfologicamente irregolari (topografia) previo rilievo delle quote relative tra gli elettrodi; tale informazione sarà poi presa in considerazione in fase di elaborazione dei dati.

### 3.2.2. Caratteristiche delle attrezzature

L'attrezzatura d'acquisizione dati dovrà essere costituita da:

georesistivimetro digitale in grado di eseguire, via software, le seguenti operazioni principali:  
misura e memorizzazione della resistenza di contatto degli elettrodi;  
misura, memorizzazione e azzeramento dei potenziali spontanei;  
esecuzione di ripetuti cicli di misura e calcolo della "deviazione standard";  
possibilità di impostare cicli di misura di durata diversa;  
risoluzione delle misure di 30 nV;  
memorizzazione delle misure costituite ognuna dai valori di: resistività, dV, I, dev. Stand. e geometria elettrodi;  
unità di controllo e gestione degli elettrodi (fino a 254);  
cavo multicanale dotato di elettrodi definiti "intelligenti" (smart electrodes) in quanto dotati di una elettronica interna che ne consente l'utilizzo sia come elettrodi di corrente che di potenziale, oppure cavo multicanale con elettrodi comuni in acciaio inox, rame o ottone per gli strumenti con elettronica totalmente interna alla macchina.

La potenza immessa dal trasmettitore dovrà essere commisurata alla profondità massima da raggiungere; a titolo di esempio si riportano di seguito alcune indicazioni di massima:

fino a 200 m => 18 W min, 0.5 mA min,  $\pm$  200 V min;

per stendimenti di lunghezza > di 200m => 100 W min, 1 mA min,  $\pm$  400 V min.

In ogni caso di norma l'errore tra gli stacks impostati (min 3) non dovrà superare l'1%.

Infine la strumentazione dovrà consentire l'impostazione di almeno 4 finestre temporali per la misura della caricabilità (PI).

### 3.2.3. Modalità esecutive

La tomografia elettrica potrà essere eseguita con una configurazione elettrodica adeguata agli scopi del lavoro (Wenner, dipolo-dipolo, Schlumberger, o altra): in particolare la scelta del dispositivo elettrodico da utilizzare dovrà essere operata da in funzione dell'obiettivo dell'indagine e del contesto di lavoro (ad es. urbano o aperta campagna); di norma i dispositivi Wenner e Wenner-Schlumberger sono più adatti ad evidenziare variazioni verticali, il dispositivo dipolo-dipolo è più adatto ad evidenziare variazioni laterali ma presenta un rapporto segnale/rumore più sfavorevole, il dispositivo polo-dipolo presenta un rapporto segnale/rumore migliore e consente inoltre di scendere più in profondità, il dispositivo del gradiente multiplo risulta un buon compromesso tra capacità risolutiva sia in senso laterale che verticale e rapporto segnale /rumore comparabile ai dispositivi Wenner e Schlumberger.

In ogni caso le resistenze di contatto agli elettrodi dovranno essere verificate prima di iniziare le misure e mantenute tra loro omogenee e le più basse possibili.





Dovranno comunque essere utilizzati stendimenti base composti da min. 32 elettrodi equispaziati regolarmente lungo il profilo da indagare, con passo che potrà essere compreso tra 0.5 e 40 metri in funzione del dettaglio e della profondità dell'indagine. E' chiaro che le dimensioni degli elettrodi dovranno variare in funzione delle distanze interelettrodiche in maniera tale da ricadere sempre nella condizione di sorgente puntiforme in relazione all'estensione dello stendimento. In particolare la profondità di indagine prevista sarà calcolata considerando un rapporto di circa 5 a 1 tra lunghezza stendimento e profondità.

Il ricoprimento tra due basi contigue verrà acquisito secondo la modalità del "roll along", ripetuta secondo passo regolare con spostamenti successivi di una porzione (1/3 o 1/4) dello stendimento iniziale.

Ove non sia disponibile adeguata cartografia di base (scala 1:1.000 o 1:2000), la posizione degli elettrodi dovrà essere oggetto di adeguato rilievo planoaltimetrico.

L'elaborazione dei dati procederà secondo due fasi successive:

ricostruzione di "pseudosezioni" di resistività / caricabilità, previo filtraggio / pulizia tramite l'utilizzo di software di "contouring";

calcolo dei valori di resistività reale tramite inversione bidimensionale e sviluppo di un adeguato modello di distribuzione della resistività del sottosuolo mediante software di inversione ad elementi finiti e/o distinti, che dovrà essere in grado di applicare l'eventuale correzione topografica.

Per quanto concerne infine altre possibilità di condurre indagini di tomografia elettrica, si menzionano le indagini in foro (*cross-hole*), la tomografia elettrica mista foro-superficie e la tomografia elettrica 3D che può essere condotta principalmente secondo le seguenti modalità:

- acquisizione di singole linee 2D tra loro parallele con successiva inversione 3D di tutti i dati acquisiti;
- acquisizione di dati con elettrodi disposti secondo geometrie irregolari e successiva inversione 3D;
- acquisizione dati con elettrodi in foro (*cross-hole*).

### 3.2.4. Documentazione

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- planimetrie in scala 1:2.000, 1:5.000 con ubicazione di tutte le stazioni e stese elettriche;
- listati di: voltaggio, corrente, deviazione standard e resistività apparente, per ogni singola misura;
- pseudosezioni di resistività per ogni base unitaria;
- copia dei rapporti giornalieri delle operazioni di campagna;
- risultati dell'inversione e modellizzazione dei dati unitamente al completo data base utilizzato per la valutazione geoelettrica e il calcolo della distribuzione della resistività;
- copia di tutti i dati di campagna e di elaborazione su CD per PC Windows.
- relazione riassuntiva con descrizione dettagliata delle attrezzature impiegate, delle modalità operative e dei metodi di interpretazione.

## 4. PROSPEZIONI CON GEORADAR

### 4.1. PROSPEZIONI CON GEORADAR DALLA SUPERFICIE

#### 4.1.1. Generalità

La metodologia detta Georadar o G.P.R. (Ground Penetrating Radar) è una tipologia di indagine di tipo geofisico indiretta che trova impiego in ambiti ingegneristici, geologici ed archeologici.

Il georadar basa il proprio principio sull'emissione di onde elettromagnetiche. Il sistema è costituito da una trasmittente (antenna), che genera le onde elettromagnetiche immesse nel terreno o in un qualsiasi materiale da investigare, e da un ricevitore.

Il sistema è detto monostatico se è presente una sola antenna, che funziona (alternativamente) sia da trasmittente che da ricevente o se si usano due antenne mantenute sempre alla stessa distanza. Invece è detto bistatico se si utilizzano due antenne, una trasmittente e l'altra ricevente, la cui distanza può essere cambiata durante l'acquisizione. È ovvio che in tal caso le due antenne devono essere caratterizzate dalla stessa frequenza principale.

Quando l'onda emessa, attraversando un mezzo, incontra una discontinuità (che può essere la superficie di separazione di due diversi materiali) parte delle onde continua a penetrare il mezzo e parte viene riflessa.

La quantità di energia che viene riflessa dipende dal coefficiente di riflessione e dalle impedenze dei mezzi attraversati.

L'impedenza è funzione della costante dielettrica, della conducibilità e della permittività magnetica, che sono pertanto i parametri che regolano la trasmissione di un'onda elettromagnetica in un qualsiasi mezzo.

#### – Costante dielettrica relativa $\epsilon_r$

E' un parametro adimensionale ed è quello che influisce maggiormente sulla velocità dell'onda.

$$\epsilon_r = \frac{c^2}{v^2}$$

Dove  $C$  è la velocità della luce nel vuoto e  $V$  è la velocità delle onde elettromagnetiche nel mezzo attraversato

#### – Conducibilità $\sigma$

E' il principale nemico del georadar. Maggiore è la conducibilità e maggiore è l'assorbimento. Quindi in un terreno con conducibilità alta c'è l'elevato rischio che la maggior parte del segnali immesso perda subito l'energia e venga completamente assorbito senza dare alcuna riflessione.

L'onda elettromagnetica passando in un qualsiasi materiale perde energia ed il segnale subisce pertanto un fenomeno di attenuazione, che dipende da una serie di fattori tra cui l'assorbimento e la divergenza sferica.

L'assorbimento è funzione del materiale attraversato ed in particolare della sua conducibilità. In terreni sabbiosi secchi si ha la massima penetrazione mentre in terreni fini argillosi o limosi la penetrazione è fortemente ostacolata poiché il segnale subisce un forte assorbimento. Anche l'acqua rappresenta un ostacolo che spesso impedisce di condurre analisi in profondità e per contro, rappresenta un elemento individuabile nell'indagine proprio perché genera un forte assorbimento delle onde emesse.

Le frequenze delle antenne georadar sono generalmente comprese tra circa 30 MHz e 3 GHz. In linea di principio, ad antenne di alta frequenza si associa un maggior assorbimento del segnale, una minore penetrazione nel materiale ma un maggior dettaglio. Ad antenne con frequenza più bassa si associa una maggiore penetrazione e un minor dettaglio rispetto alle alte frequenze.



Per la ricerca dei sottoservizi di solito si utilizzano frequenze comprese tra 200 a 900 MHz, privilegiando le frequenze di 400-500 MHz che consentono una buona penetrazione ed un discreto dettaglio. Per le analisi su strutture e nel campo delle indagini del cemento armato, si privilegiano le antenne ad alta frequenza, da 900 fino a 1500 MHz.

#### **4.1.2. Caratteristiche delle attrezzature**

Gli associati dovranno avere come dotazione di proprietà almeno le seguenti attrezzature:

- Unità di controllo del Georadar alimentata da batteria
- Antenna collegata all'unità di controllo
- Eventuale collegamento tra computer Notebook e unità di controllo, nel caso in cui questo non faccia parte della stessa unità

Le caratteristiche tecniche delle apparecchiature sopraindicate dovranno essere almeno quelle riportate di seguito:

##### Georadar:

- a) Unità di controllo georadar
- b) Antenna Trasmittente/Ricevente, con frequenza compresa fra 30 e 3000 MHz in funzione della profondità di investigazione e del dettaglio voluti.

Le dimensioni dell'antenna sono variabili in base alla frequenza.

Ciascuna antenna deve contenere un sistema di marcatura lungo la traccia in modo manuale o tramite encoder a rotella o GPS.

##### Eventuale computer:

- a) Notebook con sistema operativo Windows 98/2000/Me/XP
- b) Ethernet card 10/100BaseT

##### Alimentazione:

- a) batteria con voltaggio pari ad almeno 12 V

##### Cavi:

- a) Set di cavi di collegamento antenna-unità di controllo di lunghezza variabile a seconda del tipo di indagine da effettuare

Con tale apparecchiatura è possibile definire le variazioni di permittività elettrica all'interno del materiale indagato.

In particolare, si cita a titolo esemplificativo l'esecuzione delle seguenti tipologie di indagini:

- *Ricerca di sottoservizi di varia natura (reti fognarie, reti elettriche, reti idriche, cavi a fibra ottica)*
- *Individuazione di discontinuità nel sottosuolo o nei paramenti murari*
- *Controlli strutturali su manufatti (individuazione di zone di frattura o deteriorate)*
- *Ricerca di oggetti metallici, fondazioni in cemento, cavità*
- *Individuazione di perdite di liquidi di varia natura nel sottosuolo e loro delimitazione spaziale (ad esempio percolati di discarica o plume inquinanti)*
- *Ricerche di manufatti o strutture di interesse archeologico, sia nel sottosuolo che nei paramenti murari*

### **4.1.3. Modalità esecutive**

#### ***Calibrazione dello strumento***

Prima di iniziare l'acquisizione, è necessario procedere al settaggio dello strumento ed alla calibrazione del segnale elettromagnetico, in modo tale che quest'ultimo possa essere sufficientemente amplificato per la profondità che vogliamo raggiungere e per le eventuali stratificazioni del materiale. Il segnale che penetra nel terreno si attenua infatti con la profondità.

A questo scopo, va regolato il guadagno in volume del segnale, per non causare saturazione o eccessiva attenuazione del segnale. Il guadagno dell'amplificazione del segnale deve aumentare con la profondità stessa. Quindi alla fine della traccia il guadagno di segnale deve essere maggiore di quello iniziale.

Si mette in evidenza come deve essere cura dell'operatore scegliere, per la calibrazione del segnale, una zona il più possibile libera da anomalie di permittività. È inoltre opportuno, dopo la calibrazione, eseguire alcune linee di prova per verificare la bontà del segnale elettromagnetico in diversi punti dell'area da investigare.

Allo scopo di valutare in modo più corretto il valore di permittività del materiale che stiamo indagando, è opportuno eseguire una o più tarature del segnale su "bersagli noti" (ad esempio tubazioni in prossimità di tombini).

Nel caso non siano presenti elementi per poter tarare il segnale, si dovrà procedere ad una valutazione della permittività del materiale in modo che, nella fase di conversione tempi/profondità, le distanze delle anomalie riscontrate siano prossime alle profondità reali.

In presenza di disturbi elettromagnetici causati da sorgenti esterne note, è inoltre opportuno filtrare preliminarmente il segnale. Il filtro è un circuito che, ricevendo in ingresso segnali di frequenze diverse, è in grado di trasferire in uscita solo i segnali delle frequenze volute. La selezione avviene attenuando le frequenze non volute e lasciando inalterate le frequenze volute. Si possono distinguere vari tipi di filtro fra cui: filtro passa-basso (circuito che fa passare in uscita solo le frequenze più basse di un'altra prefissata; la frequenza prefissata, scelta a piacere, viene detta frequenza di taglio), filtro passa-alto (circuito che fa passare in uscita solo le frequenze più alte della frequenza di taglio), filtro passa-banda (dispositivo passivo che permette il passaggio di frequenze all'interno di un dato intervallo, la cosiddetta banda passante, ed attenua le frequenze al di fuori di esso).

#### ***Fase di acquisizione***

L'acquisizione avviene in genere eseguendo una griglia di linee con spaziatura definita in funzione del tipo di indagine da eseguire.

In pratica, l'antenna viene fatta scorrere sul terreno o sul materiale da indagare e l'acquisizione delle diverse tracce genera un profilo bidimensionale del sottosuolo detto radargramma.

#### ***Elaborazione dati***

Il risultato sono delle sezioni visualizzabili tramite software adatti che forniscono un modello monodimensionale in termini di profondità/lunghezza, definendo ed identificando le anomalie eventualmente presenti in termini di valori di permittività, il parametro caratteristico di uno specifico materiale.

L'obiettivo è quello di identificare le eventuali anomalie presenti nel sottosuolo, così da avere una loro mappatura nella griglia eseguita in modo tale da poter ricavare un collegamento tra quelle anomalie che si ripetono ad ogni sezione, alla stessa profondità e distanza da inizio linea.

#### ***Requisiti minimi per le funzioni di calibrazione del georadar***

Range (ns): Fondoscala variabile in funzione dell'antenna utilizzata.

Samples: numero di campioni in una traccia;



## Antenna Trasmittente/Ricevente – combinata o separata

Guadagno del segnale: poiché il segnale che penetra nel terreno si attenua con la profondità, il guadagno dell'amplificazione del segnale deve aumentare con la profondità stessa. Quindi alla fine della traccia il guadagno di segnale deve essere maggiore di quello iniziale. Il numero di punti per la calibrazione del guadagno deve essere superiore a 5.

Filtri: Il filtro è un circuito che ricevendo in ingresso segnali di frequenze diverse è in grado di trasferire in uscita solo i segnali delle frequenze volute, in pratica seleziona le frequenze che si vogliono. In un filtro la tensione di uscita è sempre inferiore a quella di ingresso, non è infatti un amplificatore, ma la selezione avviene attenuando le frequenze non volute e lasciando inalterate le frequenze volute. Distinguiamo tre tipi fondamentali di filtro: filtro passa-basso; filtro passa-alto, filtro passa-banda. Si dice filtro passa basso un circuito che fa passare in uscita solo le frequenze più basse di un'altra prefissata; la frequenza prefissata, che viene scelta a piacere, viene detta frequenza di taglio; si dice filtro passa alto un circuito che fa passare in uscita solo le frequenze più alte della frequenza di taglio. un filtro passa banda è un dispositivo passivo che permette il passaggio di frequenze all'interno di un dato intervallo (la cosiddetta banda passante) ed attenua le frequenze al di fuori di esso.

Stacking: contribuisce alla diminuzione del rumore e di interferenze e all'aumentare del range di profondità. Se lo stacking aumenta, si deve diminuire la velocità con cui si trascina l'antenna per avere una perdita minore di informazione.

Scan rate: tracce per secondo. Deve essere impostabile il valore.

Sounding mode – Continuo o a gradino: l'opzione a gradino è usata in alcuni casi in cui è impossibile mantenere l'antenna in continuità lungo la direzione o se è necessario acquisire segnali più profondi possibili.

Pulse delay: è un'opzione usata per immettere un segnale entro il range di tempo di risonanza. L'aggiustamento del segnale può venir eseguito sia automaticamente sia manualmente.

Mode – Sounding/Test: la prima opzione è il modo di ricezione del segnale; la seconda opzione è usata per testare l'unità di controllo per operatività senza antenne connesse.

## Encoder

Ciascuna antenna deve contenere un sistema di marcatura lungo la traccia o in modo manuale o tramite encoder a rotella o GPS.

### **Requisiti minimi per le funzioni di elaborazione dati:**

Il risultato sono delle sezioni visualizzabili tramite software adatti che forniscono un modello monodimensionale in termini di profondità/lunghezza, definendo ed identificando le anomalie eventualmente presenti in termini di valori permittività, parametro caratteristico di uno specifico materiale. L'obiettivo è quello di identificare delle anomalie presenti nel sottosuolo, così da avere una loro mappatura nella griglia eseguita in modo da ricavarne un collegamento tra anomalie che si ripetono ad ogni sezione, alla stessa profondità e distanza da inizio linea.

Point info: mostra i valori dei parametri Traccia, Posizione, Campione, Tempo di ritardo, Profondità, Ampiezza del punto specifico nel profilo, in considerazione della sua posizione tramite GPS.

Hyperbola: determina la profondità di fatto del target locale e la permittività del mezzo.

Average Spectrum: calcolo di un modulo medio di uno spettro di segnale nell'area selezionata.

Topografia: è una procedura usata per ristrutturare un profilo come una funzione di rilevamento della localizzazione del suono. Si immettono parametri nei punti di mark che dovranno essere espressi in metri per le quote.

Reverse: permette di rovesciare una traccia, trasponendo il punto di inizio e di fine.

Background removal: in alcuni casi, un segnale mostra un "background" che si traduce in un profilo nella presenza di linee orizzontali che non variano la loro intensità e la loro posizione tempo e che possono portare a mascherare i veri segnali riflessi.

Horizontal L-P filter: è un filtro passa basso che opera lungo il profilo nella direzione di movimento dell'antenna. Serve per sopprimere segnali veloci e variabili ma mette in evidenza quelli lenti.

Horizontal H-P filter: è un filtro passa alto che opera lungo il profilo nella direzione di movimento dell'antenna. Serve per mettere in evidenza segnali che variano rapidamente.

Filtro passabanda: agisce lungo una traccia e sopprime le interferenze a bassa frequenza e i componenti ad alta frequenza di un segnale.

Filtro Notch: è usato per eliminare le interferenze a banda ristretta rispetto background di segnale ad ampia banda.

Controllo automatico del guadagno: è usato per livellare tutti i segnali in una traccia.

Conversione tempi profondità: dovrebbe essere usata per convertire il profilo tempo iniziale in profilo profondità.

Flattering: è utilizzato per modificare il profilo iniziale in un profilo con un'interfaccia piatto orizzontale.

#### **4.1.4. Documentazione**

La documentazione di ciascuna indagine dovrà comprendere:

- \* informazioni generali (commessa, cantiere, ubicazione, data, nominativo dell'operatore);
- \* rilievo topografico della superficie indagata e degli estremi delle strisciate eseguite;
- \* planimetria in scala adeguata con ubicazione delle strisciate eseguite;
- \* radargramma di campagna, elaborato a diverse intensità cromatiche, con le distanze (m) in ascisse e i tempi di ascolto (ns) in ordinate;
- \* radargramma filtrato e interpretazione in funzione delle costanti dielettriche dei mezzi attraversati, con le distanze (m) in ascisse e le profondità (m) in ordinate;
- \* relazione riassuntiva con descrizione dettagliata delle attrezzature impiegate, delle modalità operative, dei metodi di interpretazione e dei risultati dell'indagine.

## **4.2. PROVE GEORADAR IN FORO**

### **4.2.1. Generalità**

Vengono acquisiti dati georadar nei fori di sondaggi dal diametro minimo di 4" possibilmente privi di acqua.

L'indagine è finalizzata a definire la natura fisica dei materiali indagati sia naturali che artificiali (iniezioni, ecc.).

### **4.2.2. Modalità del rilievo**

Il rilievo sarà eseguito utilizzando antenne da foro con frequenza di variabile a seconda dello scopo dell'indagine (generalmente da 100 a 1000 MHz) disposte sia in forma Down-Hole che Cross-Hole dipendente dalla disposizione spaziale dei fori.

Le due antenne Tx e Rx movimentate in modo simultaneo nei fori permettono la ricostruzione tomografica dell'area prospettata.

### **4.2.3. Rapporto finale**

Il Rapporto finale evidenzierà i risultati del rilievo unitamente ai relativi elaborati grafici.

## **5. PROSPEZIONI ELETTROMAGNETICHE**

### **5.1. MAPPE DI CONDUCIBILITÀ**

#### **5.1.1. Generalità**

La misura della conducibilità elettrica in modo areale può essere utilizzata in tutte le situazioni dove sia necessaria una caratterizzazione dei materiali costituenti il primo sottosuolo. I rilievi, realizzati sfruttando il fenomeno dell'“induzione elettromagnetica in configurazione “Slingram”, senza necessità di contatti con il terreno.

Le strumentazioni utilizzate, portatili e leggere, lavorano trasmettendo un campo primario a frequenza fissa e misurando le componenti (in fase e in quadratura) del campo secondario dalle quali si deducono i valori di conducibilità e della “componente ferrosa”. Le frequenze di lavoro e la configurazione a “loop” verticali o orizzontali consentono profondità di esplorazione diverse.

### **5.2. PROFILI DI CONDUCIBILITÀ**

#### **5.2.1. Generalità**

I dettagli sono analoghi a quanto descritto per le mappe con la sola differenza che l'elaborazione grafica si effettua per profili, dai quali è possibile ottenere una interpretazione dimensionale con particolare riferimento alla ricerca di corpi conduttori.

### **5.3. SONDAGGI MAGNETOTELLURICI**

#### **5.3.1. Generalità**

I sondaggi magnetotellurici rappresentano una modalità di indagine elettromagnetica di recente sviluppo che consente la ricostruzione della stratigrafia, in termini di resistività, del sottosuolo dalla superficie fino a grande profondità. Il metodo, che fa parte delle metodologie EM definite “nel dominio delle frequenze” è basato sulla misura dei segnali elettromagnetici naturali circolanti sulla crosta terrestre.

In pratica l'acquisizione dei dati si realizza per “stazioni” a cinque componenti costituite da 2 dipoli elettrici ortogonali (Ex-Ey) per la misura del campo elettrico e tre sensori magnetici ortogonali (Hx-Hy-Hz) per il campo magnetico. I valori (variabili e correlati) dei segnali relativi vengono campionati per un periodo sufficientemente lungo per garantire una buona statistica. La successiva analisi spettrale dei segnali misurati consente di ricostruire delle curve resistività/frequenza che possono essere interpretate come successione resistività/spessore.

#### **5.3.2. Modalità esecutive**

Esecuzione di profili continui AMT (Audiofrequency MagnetoTelluric) per la ricostruzione del modello strutturale, in funzione della resistività elettrica (imaging), della sezione indagata dalla superficie fino a profondità elevate.

I profili saranno costituiti da stazioni AMT contigue, in corrispondenza delle quali saranno registrati i valori del campo elettromagnetico naturale tramite l'utilizzo di opportuni sensori elettrici e magnetici.

La durata delle registrazioni sarà funzione della profondità di progetto e comunque non inferiore a XX ore allo scopo di ottenere un adeguato “stack” dei dati, necessario per il raggiungimento di un elevato rapporto segnale/rumore.





I parametri relativi al campo elettrico (E) e al campo magnetico (H), e quindi i valori di resistività apparente saranno calcolati per un intervallo di frequenza compreso tra 12000 Hz e una frequenza minima definita in funzione delle profondità di indagine.

### 5.3.3. Modalità di intervento

Per ogni singola stazione si misureranno cinque componenti del campo EM ( $E_x, E_y, H_x, H_y, H_z$ ) utilizzando dipoli elettrici e sensori magnetici disposti sul terreno secondo due direzioni dello spazio.

L'“imaging” del profilo sarà ottenuto tramite la registrazione continua del campo elettrico e quindi collocando i dipoli, registrati lungo la direzione del profilo (es.  $E_x$ ), in modo consecutivo. L'acquisizione simultanea sarà realizzata con una strumentazione multicanale in grado di acquisire più stazioni contigue e quindi ridurre i tempi di rilievo.

Per la ricostruzione continua delle curve resistività/frequenza, l'acquisizione del segnale avverrà secondo diverse frequenze di campionamento (Es. 48 Khz, 1000 Hz e 50 Hz) opportunamente definite in fase di programmazione.

Per i rilievi in aree caratterizzate da significativi livelli di “noise” antropico, l'elaborazione dei dati avverrà con l'utilizzo della procedura “remote reference”.

L'inquadramento plano-altimetrico dei profili registrati sarà desunto da adeguata cartografia ovvero, dove non disponibile, sarà oggetto di rilievo topografico.

### 5.3.4. Dotazione tecnica

L'unità di acquisizione sarà dotata di:

- Unità di controllo (gestione e filtraggio) e registrazione dei dati dotata di ricevitore GPS per la sincronizzazione;
- Unità di acquisizione dati elettrici e/o magnetici (convertitore A/D, amplificatore);
- Sensori magnetici di adeguata sensibilità: LF (0.001 - 1000 Hz); HF (1 – 100000 Hz);
- Dipoli elettrici con elettrodi impolarizzabili;
- Rete telemetrica di collegamento per la gestione contemporanea di più stazioni.

Elaborazione dei dati

L'elaborazione dei dati registrati seguirà i seguenti passaggi:

- analisi e selezione dei migliori segmenti registrati;
- analisi spettrale (FFT) per il calcolo dei parametri MT;
- analisi delle curve di resistività apparente e fase in funzione della frequenza;
- inversione 2D dei valori di resistività e fase (il software utilizzato dovrà essere in grado di applicare le opportune correzioni topografiche);
- ricostruzione del modello della sezione.

### 5.3.5. Rapporto finale

La descrizione del lavoro eseguito e dei risultati conseguiti sarà illustrata in un Rapporto Finale contenente:

- planimetria in scala adeguata (1:2000/1:5000) con l'ubicazione dei profili registrati;
- curve di resistività apparente e fase per ogni stazione AMT;
- sezione di resistività;
- modello strutturale;
- copia digitale dei dati registrati e di tutte le elaborazioni successive.

## **6. PROSPEZIONI GRAVIMETRICHE**

### **6.1. RILIEVO GRAVIMETRICO**

#### **6.1.1. Generalità**

Esecuzione di profili gravimetrici tramite l'acquisizione di stazioni intervallate in modo regolare lungo il profilo ed esternamente allo steso finalizzate alla definizione di unità geologiche caratterizzate da un contrasto di densità.

#### **6.1.2. Quantità delle misure**

Le stazioni saranno eseguite a maglia regolare ogni 50 metri lungo il profilo ed a intervalli ogni 100 metri ai lati del profilo stesso (per un profilo di 10 km si prevedono 220 stazioni sul profilo e 100+100 stazioni esterne al profilo stesso).

#### **6.1.3. Specifiche tecniche**

##### **Apparecchiature**

Gravimetro tipo Lacoste&Romberg mod. 4 e/o similari

Strumenti topografici quali GPS differenziali e/o stazioni distanziometriche con gradiometro

##### **Rilievo topografico**

Per ogni singola stazione la chiusura altimetrica sarà di +/- 0.15(L metri

La pendenza media per un raggio di centro metri sarà acquisita con sistema distanziometrico senza riflettore per cerchi concentrici

##### **Rilievo gravimetrico**

I poligoni di base, collegati alla rete nazionale avranno un errore di chiusura non superiore a 0,015 (N milligal).

Le stazioni di dettaglio avranno un errore di chiusura non superiore a 0,03 (N milligal).

Per ogni stesura sarà applicata la correzione lunisolare e della deriva strumentale.

#### **6.1.4. Rapporto Finale**

Il Rapporto comprende gli elaborati relativi a:

- Calcolo della gravità normale (somiglianza Silva)
- Riduzione di Faye
- Riduzione di Bouguer con densità predefinita
- Riduzione topografica (uso DEM)
- Calcolo anomalie di Bouguer
- Modellizzazione in 2, 5D e in 3D

Saranno parte integrante i commenti alle singole cartografie e l'interpretazione dei risultati.

## **7. CAROTAGGI GEOFISICI**

### **7.1.1. Generalità**

L'esecuzione di carotaggi geofisici in foro di sondaggio permette di definire alcuni specifici parametri fisici fondamentali per la ricostruzione stratigrafica e per la definizione delle caratteristiche fisiche dei litotipi campionati. I carotaggi geofisici consentono, nell'ambito dei pozzi per acqua ad esempio, l'individuazione sia dei livelli potenzialmente produttivi dal punto di vista idrico sia dei livelli impermeabili, che svolgono funzione di separazione delle diverse falde idriche sotterranee.

### **7.1.2. Caratteristiche delle attrezzature**

L'equipaggiamento per l'esecuzione dei logs geofisici appare complesso e molto vario in funzione delle varie tipologie di acquisizione ed in funzione della profondità da raggiungere. La strumentazione base, attualmente, si compone delle seguenti parti: una o più sonde da introdurre nel pozzo, un rullo con sistema di svolgimento/riavvolgimento del cavo (mono o pluricanale) di collegamento con la superficie con motore elettrico ed un PC portatile con software per l'acquisizione, registrazione ed interpretazione del segnale. Le sonde che generalmente vengono utilizzate sono così suddivise:

- A) – sonda gamma-ray/caliper
- B) – sonda PS-resistivity
- C) – sonda resistivity 16"/64"/Lateral
- D) – sonda temperatura/conducibilità
- E) – sonda sonic fullwave

### **7.1.3. Modalità esecutive**

I carotaggi geofisici sono solitamente svolti in condizioni di foro scoperto e colmato di fango, la presenza di tubazioni di rivestimento sia metalliche che in P.V.C. preclude l'esecuzione dei carotaggi elettrici convenzionali mentre consente l'esecuzione di rilevazione dell'emissione gamma naturale o indotta. I dati sono acquisiti in formato digitale con sistema di trasmissione dati sonda-superficie con doppio processore combinato con un sistema di modulazione, così da permettere la visualizzazione in continuo delle diagrafie con possibilità di variare sia il passo di campionamento sia la velocità di acquisizione dei dati.

Per la maggior parte dei parametri (resistività, gamma, caliper, sonico e televiewer), l'acquisizione avviene in fase di risalita mentre si è soliti utilizzare la discesa per i parametri relativi alle caratteristiche del fluido presente in foro (temperatura e resistività del fluido). Il passo di campionamento è generalmente di 10-20 cm ma può essere variato in funzione della lunghezza del tratto investigato con i carotaggi (50 cm per carotaggi di 800-1.000 m). La velocità di acquisizione dei dati dipende dal tipo di parametro che si sta misurando e dal tipo di strumentazione. In media la velocità di movimentazione della sonda varia da minimi di 3 m/min (per le sonde sonic fullwave) ad massimi di 7-9 m/min per tutte le altre sonde. Generalmente le sonde non devono essere provviste di centratori ad esclusione della sonda sonic fullwave che, in condizioni di foro rivestito, richiede una perfetta aderenza alla parete onde evitare la dispersione delle onde.

### **7.1.4. Elaborazione delle misure**

L'elaborazione dei dati avviene mediante software specifici che permettono la visualizzazione e l'interpretazione simultanea dei dati acquisiti. I moderni software di interpretazione forniscono direttamente i valori dei vari parametri acquisiti già corretti in funzione dell'effettivo diametro di perforazione. In linea generale, dai parametri gamma-ray, resistivity 16"/64"/Lateral, PS-resistivity e temperatura/conducibilità, attraverso un'interpretazione qualitativa si ricostruisce la successione stratigrafica attraversata dalla perforazione con un dettaglio corrispondente al passo di campionamento utilizzato nella fase di acquisizione. Attraverso dei sistemi di calcolo sperimentali,

utilizzando sempre i medesimi parametri sopra elencati, è peraltro possibile risalire alla stima dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero come la percentuale di argilla, la resistività dell'acqua di strato, la porosità di strato e l'indicazione della permeabilità. Dall'elaborazione qualitativa della curva caliper è possibile fare una stima del grado di fratturazione della roccia attraversata dalla perforazione o una stima volumetrica di eventuali scavamenti o restringimenti del foro, in caso di fori tubati l'analisi della curva caliper fornisce indicazioni circa la presenza di anomalie e/o lesioni lungo la colonna. Dall'interpretazione dei logs sonici (generalmente con modulo fullwave), è invece possibile risalire al valore della velocità delle onde P, S del materiale attraversato dalla perforazione, consentendo di ricavare informazioni sulla posizione, estensione e grado di fratturazione della roccia, sulla porosità, sulla qualità della cementazione delle pareti dei pozzi e di derivare i parametri elastici delle rocce (coeff. Poisson e modulo di Young).

#### **7.1.5. Documentazione**

Il Rapporto finale prevede la descrizione complessiva delle operazioni svolte, la definizione delle caratteristiche generali della strumentazione utilizzata (specifiche tecniche, range operativi ed incertezza delle misure) ed i risultati dell'interpretazione qualitativa e quantitativa dei dati acquisiti. Generalmente al rapporto è allegato un'elaborato grafico contenente le diagrafie dei vari parametri acquisiti affiancate, talvolta, dalla colonna stratigrafica interpretativa e, in caso di pozzi per acqua dallo schema di tubaggio. Unitamente al rapporto è fornito il tabulato delle misure effettuate con il relativo passo di campionamento..