

REGIONE TOSCANA



Giunta Regionale

DIREZIONE GENERALE POLITICHE  
TERRITORIALI E AMBIENTALI  
SETTORE- SERVIZIO SISMICO REGIONALE

Legge Regionale 30.7.97 n.56

## **PROGRAMMA VEL VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI**

---

### **ISTRUZIONI TECNICHE PER LE INDAGINI GEOLOGICHE, GEOFISICHE, GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE PER LA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI NEI COMUNI CLASSIFICATI SISMICI DELLA TOSCANA**

**VOLUME 1B**  
*Criteria, metodologie, modalità di presentazione delle indagini  
e degli elaborati*

---

**“PROGRAMMA VEL”**

**E**

**“PROGRAMMA DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI  
PUBBLICI E/O STRATEGICI IN MURATURA O IN CEMENTO ARMATO (VSM e VSCA)”  
IN GARFAGNANA, LUNIGIANA, VALTIBERINA, CASENTINO, MUGELLO ED AMIATA**

**REGIONE TOSCANA – SETTEMBRE 2007**

Legge Regionale 30.7.97 n.56

**PROGRAMMA VEL  
VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI**

---

**ISTRUZIONI TECNICHE  
PER LE INDAGINI GEOLOGICHE, GEOFISICHE,  
GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE PER LA  
VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI NEI COMUNI  
CLASSIFICATI SISMICI DELLA TOSCANA**

**VOLUME 1B**

*Criteria, metodologie, modalità di presentazione delle indagini  
e degli elaborati*

---

**"PROGRAMMA VEL"**

**E**

**"PROGRAMMA DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEGLI EDIFICI  
PUBBLICI E/O STRATEGICI IN MURATURA O IN CEMENTO ARMATO (VSM e VSCA)"  
IN GARFAGNANA, LUNIGIANA, VALTIBERINA, CASENTINO, MUGELLO ED AMIATA**

**REGIONE TOSCANA - SETTEMBRE 2007**

**Prima edizione: 15 Dicembre 1998- Delibera GRT n. 1629 del 28/12/98**  
**Seconda edizione: 15 Dicembre 2000- Delibera GRT n. 1343 del 18/12/00**  
**Terza edizione: 1 Luglio 2002- Decreto Dirigenziale n. 3273 del 2/7/02**  
**Terza edizione Bis: 2 Settembre 2002- Decreto Dirigenziale n. 4592 del 9/09/02**  
**Quarta edizione: 20 Novembre 2003 – Decreto Dirigenziale n. 6842 del 20/11/03**  
**Quinta edizione: Settembre 2007 - Decreto Dirigenziale n. 4753 del 05/10/07**

## INDICE

<b>INTRODUZIONE</b> .....	PAG. 5
<b>SEZIONE 1 - ASPETTI GENERALI E LINEE GUIDA PER IL RILIEVO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E LITOLOGICO - TECNICO A SCALA 1:2.000</b> .....	PAG. 7
<b>SEZIONE 2 - INDAGINI GEOFISICHE</b> .....	PAG. 44
<b>SEZIONE 3 - INDAGINI GEOTECNICHE</b> .....	PAG. 189
<b>SEZIONE 4 - CRITERI E METODI PER L'ANALISI NUMERICA DI AMPLIFICAZIONE SISMICA</b> .....	PAG. 295



## INTRODUZIONE

Nel volume 1B sono illustrate nel dettaglio le indagini geologiche, geotecniche e geofisiche, utilizzate ai fini della caratterizzazione dei terreni. In particolare sono illustrati:

- i criteri generali per la programmazione;
- il campo di applicazione e le metodologie operative;
- le modalità di presentazione delle indagini e degli elaborati.

Il volume 1B è articolato in cinque sezioni relative alle seguenti materie:

**Sezione 1:** Aspetti generali e linee guida per il rilievo geologico, geomorfologico e litologico tecnico a scala 1:2.000;

**Sezione 2:** Indagini geofisiche;

**Sezione 3:** Indagini geotecniche in sito e di laboratorio;

**Sezione 4:** Criteri e metodi per l'analisi numerica di amplificazione sismica;

**Sezione 5:** Aspetti generali della banca dati.

La sezione 1, illustra gli obiettivi e le finalità del rilievo geologico, geomorfologico e litologico tecnico a Scala 1:2000, i criteri per l'individuazione della sezione geologica significativa ed i contenuti della relazione geologica.

Le legende per la redazione della cartografia sono illustrate in specifici volumi, uno per ciascuna zona di rilievo: Lunigiana e Garfagnana (Volume n. 2), Valtiberina (Volume n. 3), Casentino (Volume n. 4), Mugello (Volume n. 5), Amiata (Volume n. 6).

Le sezioni 2 e 3 sono articolate al loro interno in diverse parti:

1. Aspetti generali;
2. Schede tecniche e descrittive delle prove;
3. Modalità di presentazione dei risultati.

La sezione 4 illustra gli aspetti relativi alla modellazione numerica: determinazione del moto di input, analisi mono e bidimensionali, estrapolabilità degli output (spettri di risposta, fattori di amplificazione).

La sezione 5 illustra come è al momento strutturata la banca dati della cartografia geologica e delle indagini geofisiche e geotecniche. Poiché la banca

dati è tuttora in fase sperimentale, si rimanda a successive edizioni la trattazione completa con le relative specifiche.

Nelle presenti Istruzioni Tecniche sono descritte dettagliatamente, nelle schede tecniche, le metodologie che sono adottate nell'ambito del Programma VEL, mentre per le altre metodologie indicate in letteratura è riportata, nella scheda tecnica, solo la descrizione sintetica rimandando per gli approfondimenti e le specifiche esecutive alla bibliografia di riferimento.

Le indagini che sono state ampiamente utilizzate nell'ambito del Programma VEL sono contrassegnate con il simbolo " ■ " all'inizio della scheda tecnica, mentre le altre sono contrassegnate con il simbolo " □ ".

Sono inoltre in fase di sperimentazione, per quanto attiene la loro applicabilità nell'ambito del Programma VEL, tecniche sperimentali di elaborazione dati, inerenti l'esplorazione geofisica del sottosuolo e relative alla possibilità di estensione delle conoscenze su particolari morfologie sepolte tramite particolari modalità di elaborazione dati (elaborazioni in tecnica VSP dei dataset relativi ad indagini down-hole, interpretazione di dati sismici a rifrazione in tecnica sismica a riflessione, etc...).

Inoltre sono in corso di sperimentazione e validazione tecniche basate su registrazioni di microtremiti.

## **SEZIONE 1**

ASPETTI GENERALI E LINEE GUIDA PER IL RILIEVO  
GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E LITOLOGICO  
TECNICO A SCALA 1:2.000

## **(1B1) GLI OBIETTIVI E LE FINALITÀ DEL RILIEVO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E LITOLOGICO TECNICO A SCALA 1:2000**

### **(1B1.1) GENERALITÀ**

Le carte geologiche e geomorfologiche in scala 1:2000 costituiscono la base di riferimento per la programmazione delle indagini geofisiche, geognostiche e geotecniche.

Nella cartografia saranno evidenziate le situazioni che presentano maggiore criticità nella variazione della risposta sismica locale, e che pertanto dovranno essere caratterizzate (geometria e parametri fisico-meccanici delle unità litostratigrafiche) al fine dell'analisi di amplificazione.

In particolare sulla carta geologica dovranno essere individuate le sezioni geologiche significative che meglio permettono di rappresentare l'assetto geologico-strutturale del sottosuolo in relazione alla risposta sismica secondo la distribuzione areale del centro urbano.

In questa sezione delle Istruzioni Tecniche sono forniti:

- I criteri per la delimitazione delle aree per la realizzazione della cartografia geologica, geomorfologica, litologico-tecnica in scala 1:2.000;
- I criteri generali per la stesura degli elaborati geologici, geomorfologici e litologico-tecnici;
- I criteri per l'individuazione della sezione geologica significativa;
- I contenuti della relazione geologica e dei dati di base acquisiti nell'ambito del Programma VEL (dati relativi alle indagini geofisiche, eventuali sondaggi e delle misure in sito).

## **(1B1.2) CRITERI PER LA DELIMITAZIONE DELLE AREE PER LA REALIZZAZIONE DELLA CARTOGRAFIA GEOLOGICA, GEOMORFOLOGICA, LITOLOGICO-TECNICA IN SCALA 1:2.000**

L'area da cartografare viene individuata e delimitata nell'ambito di riunioni tra i professionisti incaricati (geologi), i tecnici della Regione Toscana e i rappresentanti delle Convenzioni Regionali.

La delimitazione accordata è comunque da considerare un'indicazione di massima (viene definita attraverso i colloqui con i professionisti, facendo riferimento alla cartografia di tipo geologico esistente e con limitati sopralluoghi) ed in fase di rilevamento sono ammesse variazioni in relazione alle problematiche geologiche individuate, che devono essere preventivamente comunicate e concordate con la Regione Toscana.

Di seguito vengono illustrati gli elementi che devono essere considerati ai fini della delimitazione delle aree per la cartografia.

In ordine di priorità sono elencati gli elementi antropici da considerare:

1. Numero degli abitanti;
2. Edifici pubblici e strategici;
3. Centro storico;
4. Aree industriali;
5. Area urbana in espansione;
6. Viabilità.

Sulla base degli elementi antropici elencati possono essere individuate 4 zone ad importanza diversa per la cartografia VEL (in Fig. 1B1) è illustrato un esempio esplicativo)

Zona 1: area dove è concentrata la maggior parte della popolazione (1), comprende le aree dove sono presenti edifici pubblici e strategici (2), il centro storico (3), zone strategiche per la viabilità principale (6);

Zona 2: aree industriali di rilievo (4), aree urbanizzate recentemente ed in espansione (5), con popolazione rilevante (1) e zone che interessano la viabilità principale (6);

Zona 3: aree con attività industriali *minori* (4), aree urbane in espansione (5) e zone che interessano la viabilità secondaria (6);

Zona 4: frazioni e località con pochi abitanti (1).

Inoltre, oltre alla suddivisione della zone, devono essere identificati in planimetria (come riportato nell'esempio in Fig. 1B1) i seguenti tematismi che corrispondono agli elementi antropici di cui sopra:

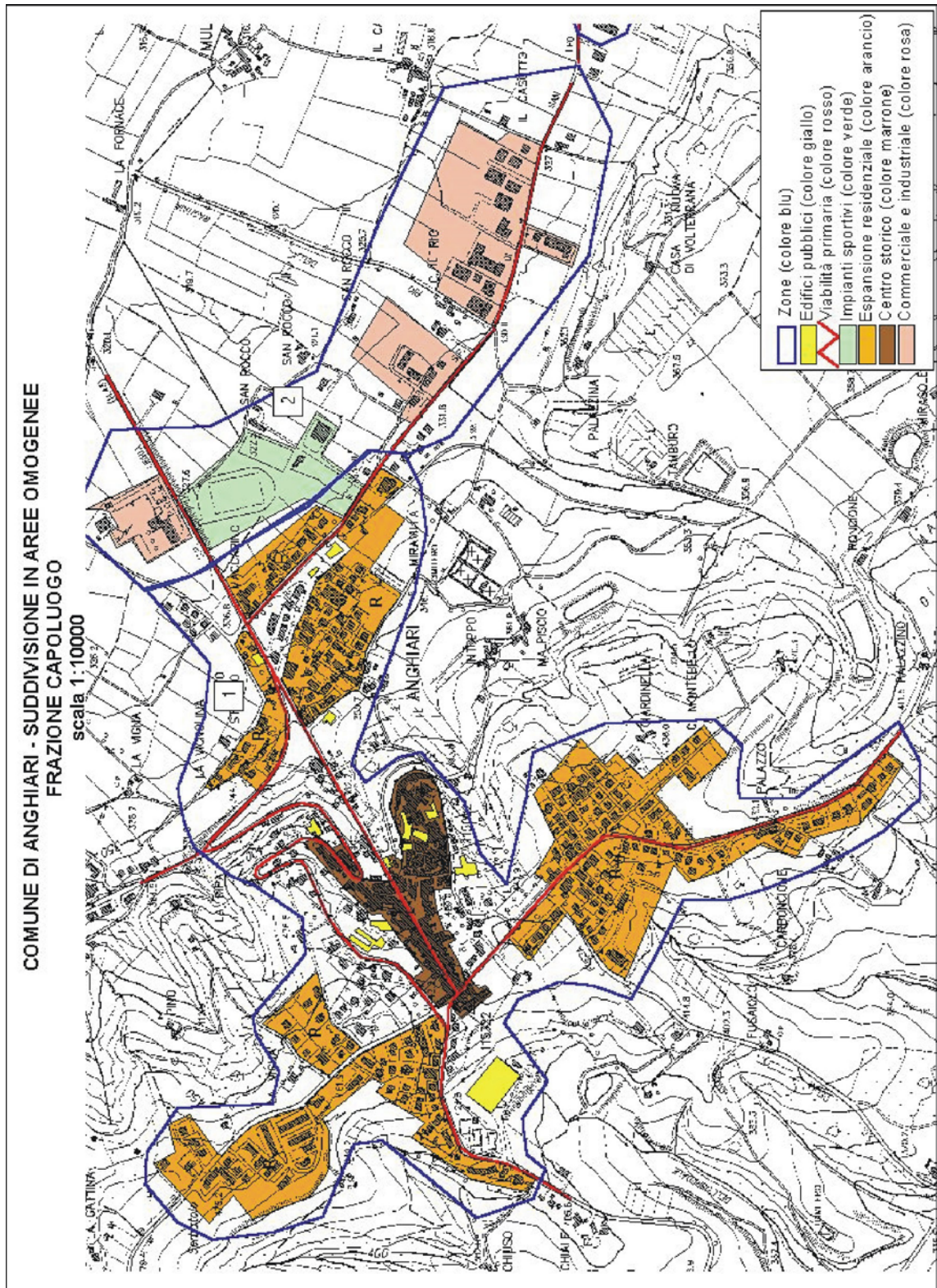
1. Edifici pubblici
2. Centro storico
3. Aree commerciali ed industriali
4. Aree residenziali
5. Impianti e attrezzature sportive
6. Aree di espansione suddivise ulteriormente in:
  - Aree di espansione di tipo industriale e commerciale (I)
  - Aree di espansione residenziale (R)
7. Viabilità primaria, secondaria e ferrovia

La distribuzione delle zone omogenee e l'ubicazione dei successivi tematismi possono essere anche riportate in planimetrie differenti.

Vengono descritte le situazioni morfologiche tipo e le informazioni geologiche da approfondire ai fini della valutazione degli effetti sismici locali.

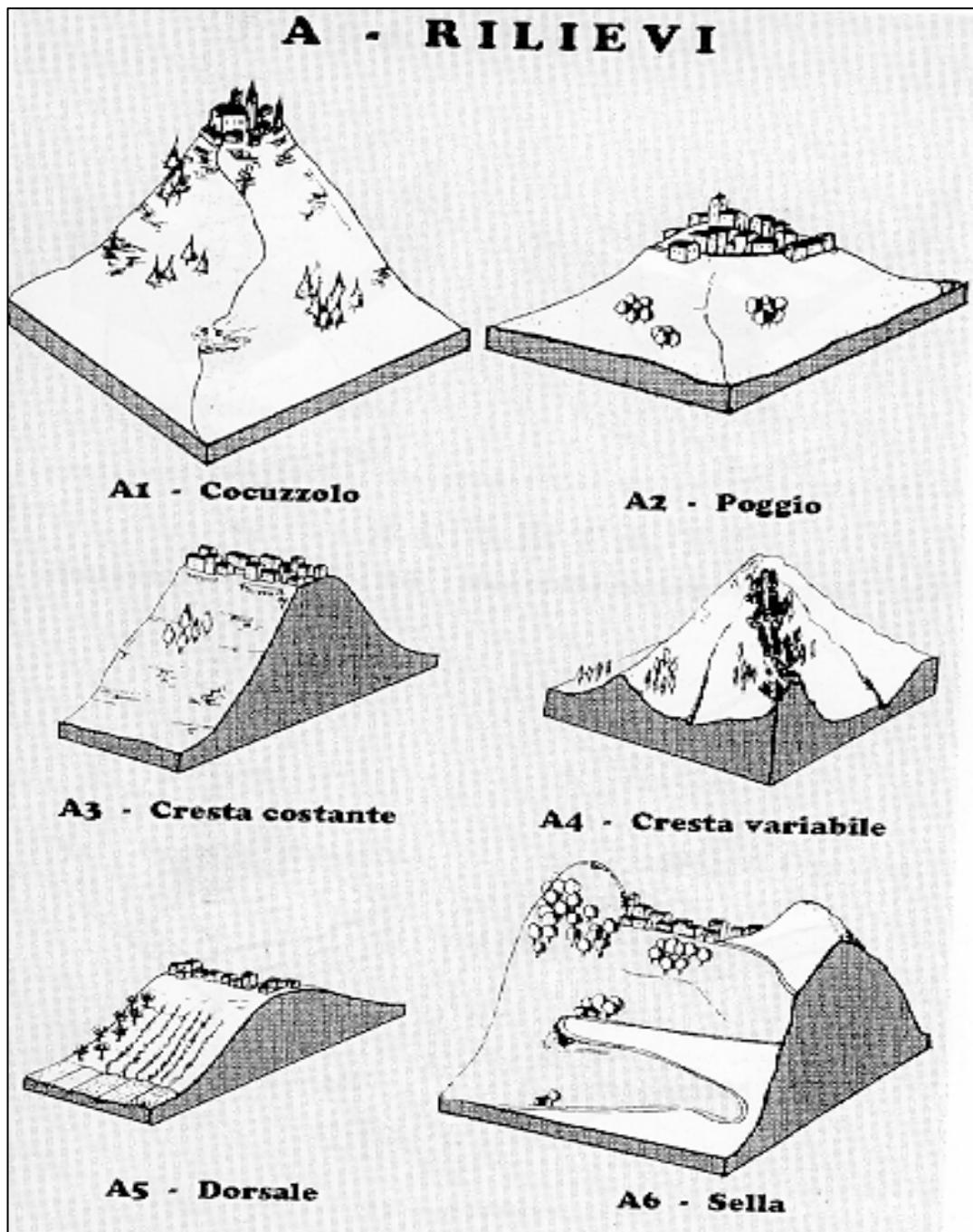
I centri urbani sono stati distinti in 3 classi morfologiche principali e in 13 sottoclassi.

Di seguito si riportano le classi morfologiche principali.



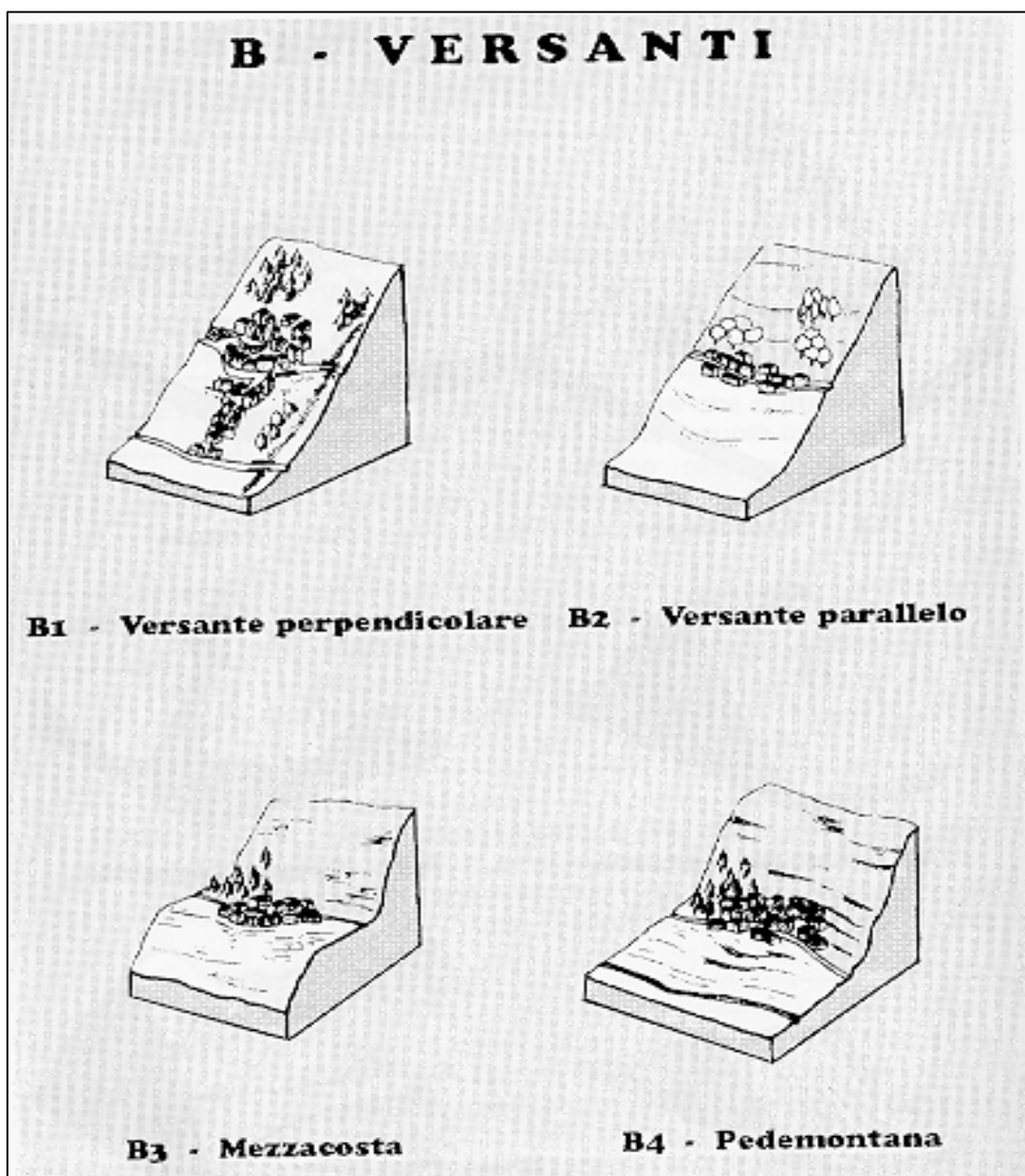
**Figura 1B1** – Individuazione delle aree di indagine per il centro urbano di Anghiari



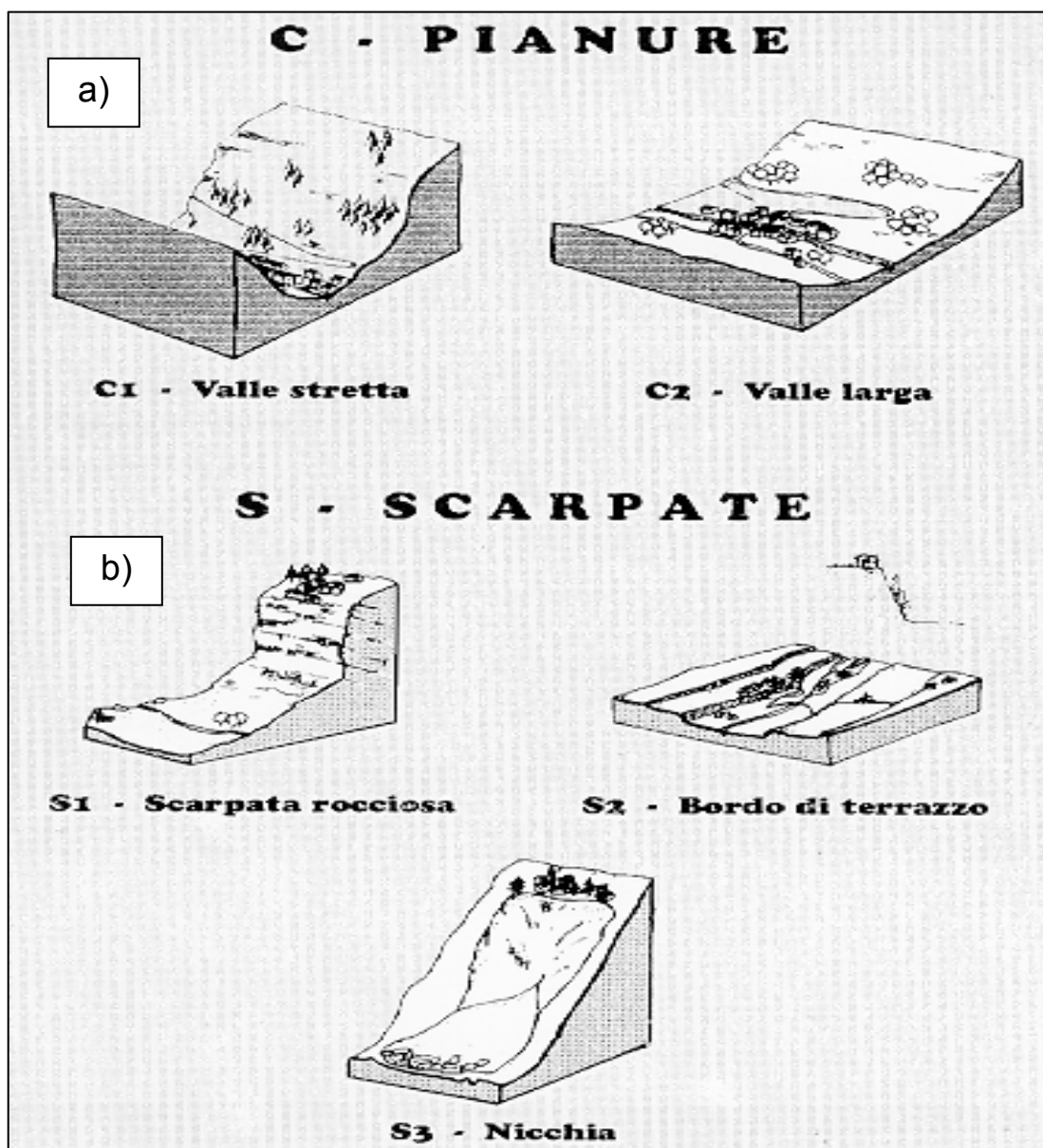


**Figura 1B2** – Centri urbani o parte di essi che si trovano su una superficie di terreno posta a quota maggiore rispetto ad un intorno relativo (una sezione trasversale del centro risulta approssimabile ad una curva convessa)





**Figura 1B3** – Versanti. Centri urbani o parte di essi che si trovano su una superficie di terreno inclinata posta a quota minore rispetto ad un rilievo (una sezione trasversale del centro risulta approssimabile ad una linea inclinata)



**Figura 1B4** – Pianure e Scarpate. a) Centri urbani o parte di essi che si trovano su una superficie di terreno posta a quota minore rispetto ad un intorno relativo (una sezione trasversale del centro risulta approssimabile ad una curva concava); b) Parte di centri urbani in prossimità di brusche e nette variazioni di quota del terreno, ad esempio: scarpate rocciose, bordi di terrazzo, nicchie di distacco, ecc. (una sezione trasversale del centro risulta caratterizzata da una linea ad inclinazione variabile con brusca variazione di quota).

Le carte geologiche, geomorfologiche e litologico-tecniche a scala 1:2.000 devono interessare un'area con un'estensione dipendente dalle diverse situazioni morfologiche e geologiche di seguito illustrate:

- Per rilievi (A)
  - determinare la geologia del rilievo estendendo il rilevamento ai piedi dei versanti delimitanti il rilievo.

- Per versanti (B) possono essere individuate due situazioni geologiche tipo:

Il versante è su roccia in posto:

- estendere il rilevamento in un'area che ha per limite verso monte lo spartiacque e verso valle la pianura.

Il versante è su copertura:

- il rilevamento deve essere finalizzato alla individuazione dello spessore delle coperture e dei processi che le hanno prodotte. Dove possibile occorre caratterizzare l'assetto geologico e strutturale del substrato.

- Per pianure alluvionali (C)

- individuare la stratigrafia e lo spessore dei depositi;
- identificare la profondità del substrato e l'assetto geologico-strutturale;
- definire la geologia dei versanti (distanza minima bordo valle 100 m) in modo tale da poter ipotizzare la loro continuazione nella pianura.

Per scarpate (S) possono essere individuate due situazioni geologiche tipo:

La scarpata è su roccia in posto:

- estendere il rilevamento fino ad una distanza pari a venti volte l'altezza della scarpata.

Il versante è su copertura:

- il rilevamento deve essere finalizzato alla individuazione dello spessore delle coperture e dei processi che le hanno prodotte. Dove possibile occorre caratterizzare l'assetto geologico - strutturale del substrato.

Per le aree caratterizzate dall'affioramento di un'unica unità litostratigrafica (ad esempio i depositi alluvionali terrazzati) e da depositi e forme derivati da un unico processo geomorfologico può essere deciso in accordo con la Regione Toscana di realizzare la sola carta litologico-tecnica a scala 1:5000, in quanto il dettaglio raggiunto a tale scala è ritenuto sufficiente, in queste situazioni, alla valutazione di effetti sismici locali.

Con la cartografia litologico-tecnica a scala 1:5000 devono essere individuate all'interno dei depositi alluvionali (coperture, secondo la legenda litologico-tecnica delle Istruzioni Tecniche Regionali) le unità litotecniche con diverse caratteristiche meccaniche a cui può corrispondere una diversa risposta sismica locale (le diverse unità litologico-tecniche saranno individuate sulla base del grado di cementazione o di consistenza e della composizione granulometrica, secondo quanto illustrato nelle Istruzioni Tecniche Regionali).

Tale cartografia deve fornire il quadro conoscitivo necessario per impostare la campagna geognostica, geofisica e geotecnica.

Nelle condizioni sopra descritte relativamente alla carta geologica e geomorfologica "semplificata" risulta infatti più efficace ai fini del VEL una campagna geognostica, geofisica e geotecnica con la quale sarà possibile caratterizzare più dettagliatamente i depositi alluvionali, ottenendo dei risultati (individuazione degli spessori, dei parametri geotecnici e dinamici delle diverse unità litologico-tecniche) che invece non potrebbero essere acquisiti utilizzando soltanto una cartografia geologica e geomorfologica anche se di dettaglio a scala 1:2000.

In Fig. 1B5 è riportata la scheda utilizzata per la sezione del centro urbano.

Progetto VEL - FASE

Scheda selezione centro urbano campione  
**Individuazione di località per la realizzazione della cartografia geologica, geomorfologica, litologico-tecnica in scala 1:2.000 e 1:5.000 e di indagini geognostiche e geotecniche**

Comune:			
Frazione di:			
Popolazione residente n° Abit.	% del totale		
Morfologia (per la classificazione vedi pag. seguenti)	A/	B/	C/ S/
<input type="checkbox"/> Con presenza rilevante di attività economica e produttiva e/o edifici pubblici strategici	<input type="checkbox"/>	in espansione	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> Prevalente residenziale	<input type="checkbox"/>	in espansione	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> No
Edifici strategici			
Scuole	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Centri ASL, Case di Riposo, Pubbliche assistenze, etc.	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Uffici Pubblici	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Caserme (VV.FF. - Carabinieri - VV.UU.)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Edifici di culto	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Centri di distrib. serv. tecnol. a rete (acqua, en.elettrica, gas, telefono)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Centri di ritrovo (ristoranti, discoteche, campi sportivi, etc.)	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Viabilità			
Strade statali	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Strade provinciali	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Strade che collegano al capoluogo	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Strade che collegano ad ospedali, VV.FF., Carabinieri	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Cartografia Aereofotogrammetrica disponibile			
1. C.T.R. scala 1:5.000	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
2. Cartografia scala 1:2.000	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
3. Cartografia Numerica scala 1:2.000	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
4. Catastale + Curve di livello scala 1:2.000	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
5. In fase di allestimento (indicare numero di riferimento)		n.	<input type="text"/>
Caratteristiche Geologiche			
Descrizione:			
.....			
.....			
.....			
.....			
Caratteristiche Geomorfologiche			
Descrizione:			
.....			
.....			
.....			
.....			
Costi presunti per la cartografia geologica, geomorfologica, litotecnica scala 1:2.000 e 1:5.000 (Delibera Ordine dei Geologi della Toscana n. 38/1998)			
			Euro
Descrizione:			
.....			
.....			
.....			
.....			
Costi presunti per le indagini geognostiche e geotecniche di base (Delibera Ordine dei Geologi della Toscana n. 38/1998)			
			Euro
Note:			
.....			
.....			
.....			
.....			

**Figura 1B5** – Scheda utilizzata per la sezione del centro urbano

### 1B1.2.1 ELEMENTI ANTROPICI

In ordine di priorità sono elencati gli elementi antropici da considerare:

1. Numero degli abitanti;
2. Edifici pubblici e strategici;
3. Centro storico;
4. Aree industriali;
5. Area urbana in espansione;
6. Viabilità.

Sulla base degli elementi antropici elencati possono essere individuate 4 Zone a diversa importanza ai fini della cartografia VEL:

Zona 1: area dove è concentrata la maggior parte della popolazione (1), comprende le aree dove sono presenti edifici pubblici e strategici (2), il centro storico (3), zone strategiche per la viabilità principale (6);

Zona 2: aree industriali di rilievo (4), aree urbanizzate recentemente ed in espansione (5), con popolazione rilevante (1) e zone che interessano la viabilità principale (6);

Zona 3: aree con attività industriali *minori* (4), aree urbane in espansione (5) e zone che interessano la viabilità secondaria (6);

Zona 4: frazioni e località con pochi abitanti (1).

### 1B1.2.2 ESTENSIONE

Le carte geologica, geomorfologica e litologico-tecnica a scala 1:2.000 e 1:5.000 devono interessare un'area con un'estensione che dipende dalle diverse situazioni morfologiche e geologiche di seguito illustrate:

- **Per rilievi (A)**

- determinare la caratterizzazione geologica dell'area, estendendo il rilevamento ai piedi dei versanti delimitanti il rilievo.

- **Per versanti (B)** possono essere individuate due situazioni geologiche tipo:

Il versante è su roccia in posto:

- estendere il rilevamento in un'area che ha per limite verso monte lo spartiacque e verso valle la pianura;

Il versante è su copertura:

- il rilevamento deve essere finalizzato alla individuazione dello spessore delle coperture e dei processi che le hanno prodotte. Dove possibile occorre caratterizzare l'assetto geologico e strutturale del substrato.

- **Per pianure alluvionali (C)**

- individuare la stratigrafia e lo spessore dei depositi;
- identificare la profondità del substrato e l'assetto geologico-strutturale;
- definire l'assetto geologico dei versanti (distanza minima bordo valle 100 m), in modo tale da poter ipotizzare la loro continuazione nella pianura.

- **Per scarpate (D)** possono essere individuate due situazioni geologiche tipo:

La scarpata è su roccia in posto:

- estendere il rilevamento fino ad una distanza pari a venti volte l'altezza della scarpata;

Il versante è su copertura:

- il rilevamento deve essere finalizzato alla individuazione dello spessore delle coperture e dei processi che le hanno prodotte. Dove possibile occorre caratterizzare l'assetto geologico - strutturale del substrato.

## **(1B1.3) CRITERI GENERALI PER LA STESURA DEGLI ELABORATI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E LITOLOGICO-TECNICI**

### 1B1.3.1 CARTA GEOLOGICA

La carta geologica è realizzata in scala 1:2000, per ottenere un adeguato dettaglio a scala del centro urbano, utile per il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

1. mappatura dei depositi di copertura con particolare riferimento a quelli con spessore > 2m;
2. ricostruzione dettagliata di tutte le forme geomorfologiche e dei fenomeni gravitativi di versante;
3. rilievo del substrato con indicazione delle unità affioranti.

La base di riferimento è la Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:2000, che nella maggior parte di casi è in formato numerico. Dove vi sono parte o interi centri urbani non coperti dalla CTR in Scala 1:2000, sarà utilizzata la carta in Scala 1:5000.

Il rilevamento geologico potrà essere effettuato in scala 1:5.000 anziché 1:2.000, nei siti ove affiora un'unica formazione. E' il caso di un centro urbano che si sviluppa e presenta per un discreto intorno lo stesso bedrock sismico, oppure che è ubicato su uno stesso deposito di copertura formatosi in condizioni morfoclimatiche e paleogeografiche simili (es. ampia conoide alluvionale).

Il rilievo in scala diversa da quella predefinita dal Programma VEL (1:2.000) dovrà comunque essere preventivamente concordato con la Regione Toscana-Settore Servizio Sismico Regionale.

Il rilevamento geologico si baserà su criteri di distinzione litostratigrafica per delimitare spazialmente tutte le formazioni geologiche sia riguardo ai depositi di copertura sia relativamente alle unità del substrato con l'individuazione anche dei membri all'interno delle varie formazioni geologiche.

L'unità di base è la formazione che sarà individuata su base litostratigrafica, secondo quanto indicato nella legenda geologica (volumi n. 2, 3, 4, 5 e 6).

Nel caso siano riconoscibili all'interno della formazione unità di ordine inferiore, diverse per caratteristiche litologiche, passibili di potenziale differente risposta sismica, dovranno essere cartografate (membro).



Dovranno, inoltre, essere indicate le informazioni di tipo strutturale (faglie, sovrascorrimenti, ecc.).

La carta geologica in scala 1:2.000, o dove previsto in scala 1:5.000, si baserà su un rilievo di campagna dettagliato, che nel centro urbano dovrà spingersi anche alla visione di eventuali cantine e all'acquisizione di ogni informazione utile per la corretta mappatura dei depositi di copertura anche in riferimento agli spessori. In particolare dovrà essere effettuata, ove possibile, una valutazione, anche se da stima qualitativa, degli spessori dei riporti al fine di individuare la profondità del piano di posa delle fondazioni (in relazione alla morfologia, alla presenza di lesioni sugli edifici legate a cedimenti delle fondazioni, ad indicazioni fornite dai residenti della zona etc.). Dovrà almeno essere fornita un'indicazione di massima sullo spessore (>2m oppure <2m) dei depositi di riporto.

Con il rilievo geologico dovranno essere forniti anche tutte le informazioni utili a definire in maniera dettagliata le caratteristiche tettonico-strutturali del substrato, lo spessore delle coperture e la loro tessitura, consistenza e granulometria prevalente.

Il deposito di copertura significativo ai fini del VEL è quello che presenta spessore superiore a 2m, tuttavia deve essere cartografato come tale anche il deposito con spessore minore di 2m che, per l'estensione e per le caratteristiche, può influenzare la stabilità degli edifici (es. riporti con spessori < di 2m ma che interessano il piano di fondazione dell'edificio).

E' necessario distinguere le aree dove affiora il substrato, rappresentando l'area ove la formazione risulta affiorante con colore più marcato, rispetto alla restante area dove la formazione viene interpretata come sub-affiorante, senza tracciare linee di delimitazione.

Nel caso di unità geologiche con simbologia di rappresentazione discontinua, sarà necessario indicare l'affioramento marcando il figurato di rappresentazione.

Inoltre, riguardo gli affioramenti più significativi, questi dovranno essere numerati progressivamente e per ognuno di essi dovranno essere compilati nella relazione tecnica allegata, delle descrizioni litologico-tecniche corredate da materiale fotografico dettagliato, commentato anche graficamente e con interpretazione formazionale e attribuzione della classe lito-tecnica.

Dovranno essere individuati e delimitati i fenomeni franosi indicando il loro stato di attività come di seguito specificato:

a) **Attivi:** legati a processi in atto o ricorrenti a ciclo breve;

- b) **Quiescenti:** con possibilità di riattivazione nell'attuale sistema morfoclimatico;
- c) **Inattivi:** cioè riferibili a condizioni climatiche diverse dalle attuali, oppure a condizioni morfologiche non più attivabili; ove possibile, si dovrà indicare (mediante opportuna sigla, vedi Legenda in *Volume 2 e succ., Sezione A*), se le attuali condizioni di stabilità siano state raggiunte a seguito di interventi di bonifica o risultino naturalmente stabilizzate.

Lo stato di attività dovrà essere determinato, oltre che mediante le evidenze morfologiche, sulla base di studi storico-archivistici e sulla testimonianza delle popolazioni locali.

La carta geologica farà inoltre riferimento ad eventuale cartografia esistente (Carta geologica del Progetto CARG, carte relative alle indagini geologiche di supporto agli strumenti urbanistici comunali) e dovrà contenere le informazioni acquisite dai indagini geofisiche, geognostiche e geotecniche esistenti, se considerate di buona qualità dai referenti scientifici regionali (prospezioni geofisiche, sondaggi, scavi, prove in sito recuperabili presso i database della Regione, delle Province, delle Comunità Montana, dei Comune e dei Consorzi di Bonifica).

Il rilievo dovrà inoltre essere supportato dall'esame stereoscopico di foto aeree.

La cartografia sarà continuamente aggiornata e controllata in relazione ai risultati delle indagini geotecniche e geofisiche effettuate nell'ambito del Programma VEL e nei progetti di adeguamento sismico e messa in sicurezza di edifici pubblici e/o strategici.

Le legende adottate per la carta geologica sono state realizzate con l'obiettivo di ottenere una omogeneità di rappresentazione sia riguardo alla metodologia di suddivisione delle unità litostratigrafiche, sia in termini di sigle, colori e codifiche delle stesse. Per raggiungere tale livello per l'impostazione delle legende sono state effettuate diverse riunioni collegiali con i referenti scientifici delle tre università Toscane coinvolte nel Progetto e le stesse legende hanno subito delle modifiche nel corso delle diverse edizioni.

Il riferimento base per la legenda del Programma VEL, soprattutto in termini di sigle e colori, è quella del Progetto CARG, adattata e modificata in relazione alla diversa scala di rilievo ed alle esigenze di uniformità.

Per i depositi di copertura (depositi alluvionali terrazzati e per i depositi lacustri) è stata effettuata una distinzione sulla base delle caratteristiche litologiche (probabilmente corrispondenti a caratteristiche fisico-meccaniche differenti), mantenendo comunque una codifica di riferimento che permetta una chiave di lettura comune (dal punto di vista litologico) tra le unità individuate nelle diverse zone rilevate (Lunigiana, Garfagnana, Valtiberina, Casentino, Mugello e Amiata).

Va puntualizzato che, per le aree della Lunigiana e Garfagnana, il rilievo era iniziato prima che si avviasse il Progetto CARG, pertanto le codifiche adottate in legenda hanno subito delle modifiche rispetto alla prima edizione.

Le legende della cartografia geologica illustrate nei volumi n. 2, 3, 4, 5 e 6 potranno, nel corso del Progetto, subire modifiche in relazione ad eventuali formazioni o litologie individuate durante il rilevamento e non previste in legenda.

Queste dovranno essere preventivamente concordate con la Regione Toscana- Direzione delle Politiche Territoriali e Ambientali - Settore- Servizio Sismico Regionale.

Nelle carte geologiche, sia in scala 1:5.000 sia in scala 1:2.000, dovranno essere ubicati gli eventuali sondaggi effettuati, le prove DH, le prove penetrometriche, le linee sismiche e altre prove previste e descritte nel Volume 2 e succ. – Sezione C-D.

E' opportuno inoltre che nelle carte geologiche siano riportate anche le indagini e le prospezioni geofisiche effettuate al di fuori del Programma VEL e fornite dagli Uffici Tecnici Comunali nonché dai liberi professionisti locali.

Queste indagini saranno nominate con sigle e numerazioni differenti rispetto a quelle realizzate nell'ambito del VEL e in maniera da essere identificate inequivocabilmente.

Il nome identificativo dell'indagine sarà costituito da un campo alfa- numerico:

- la prima parte è la sigla dell'indagine (in conformità a quanto indicato nel Volume 2 e succ.- Sezione C e D) con un codice progressivo tra tutte le indagini, univoco per ogni Comune;
- la seconda parte definirà la provenienza del dato e sarà:
  - “VEL” per le indagini effettuate nell'ambito del Programma Vel, con la sigla con cui l'indagine è identificata nel Programma Preliminare consegnato al Comune;
  - “pv” per i dati forniti dai liberi professionisti, con l'identificazione originaria dell'indagine;
  - “pb” per i dati forniti da Enti pubblici, con la sigla originaria dell'indagine;
  - “730” per le indagini relative alla L.R. 730/86;
  - “23” per le indagini relative alla L.23/96 (III° piano generale triennale di finanziamento delle opere di edilizia scolastica);
  - “289” per le indagini in attuazione della L. 289/02 (piano straordinario per la messa in sicurezza degli edifici scolastici).

## ESEMPI

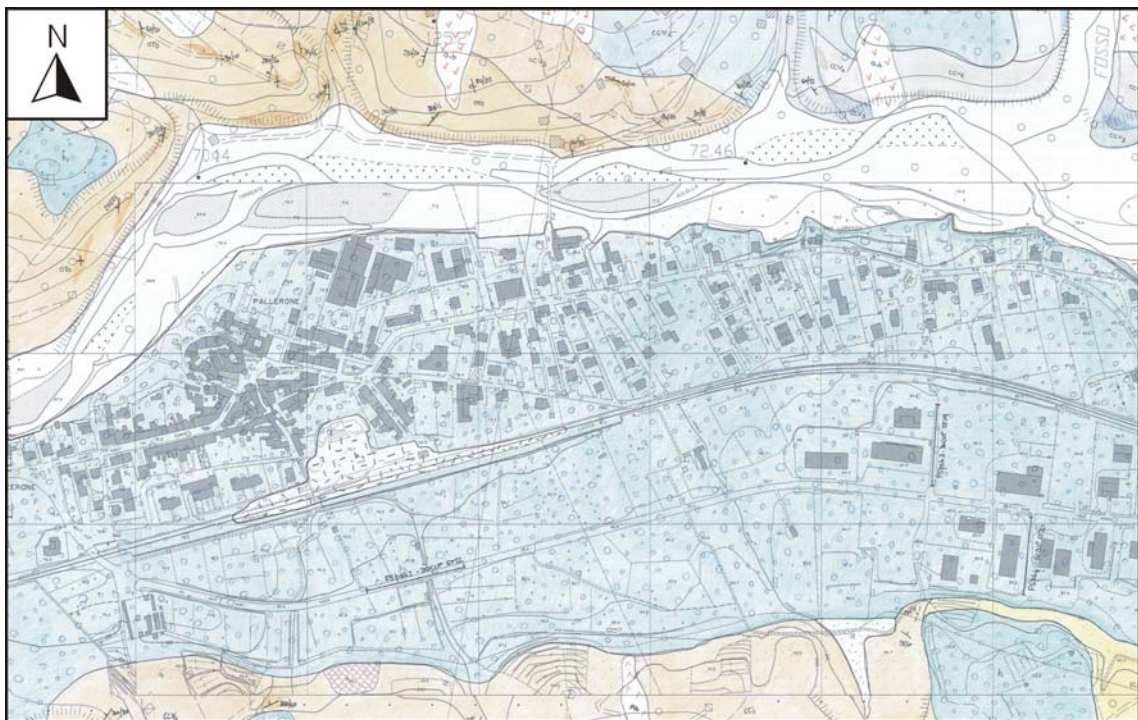
**Sg22\_VELS3** = **Sg**: Sondaggio geognostico **-22**: ventiduesimo dato a disposizione tra tutte le indagini di tipo puntuale effettuate nel Comune **-VEL**: indagine realizzata nell'ambito del Programma VEL **-S3**: indagine indicata come S3 nel Programma Preliminare predisposto dalla Regione Toscana e inviato al Comune.

**PSp49\_pvL1** = **PSp**: Prospezione di sismica a rifrazione con onde P **-49**: quarantanovesimo dato a disposizione tra tutte le indagini di tipo lineare effettuate nel Comune **-pv**: indagine realizzata da privato **-L1**: indagine indicata originariamente dal privato come L1.

Si illustra di seguito un esempio di carta geologica, completa delle informazioni richieste. La carta geologica è stata redatta in scala 1:2000, tuttavia la scala della figura qui riportata può non essere rispondente alla scala nominale per esigenze legate all'inserimento dell'immagine nel testo.

La carta geologica sarà inoltre corredata da un numero opportuno di sezioni geologiche, anche diversamente orientate, rappresentative di quelle situazioni che possono essere sede di potenziali effetti locali: nella carta geologica le tracce di tali sezioni geologiche saranno indicate con un tratto di colore nero e contraddistinte da una numerazione (es. 1-1'), come nell'esempio di carta geologica riportato di seguito.

<p><b>PROGETTO TERREMOTO IN GARFAGNANA E LUNIGIANA PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO</b></p> <p>Legge Regionale 30.7.97 n. 56</p> <p><b>PROGRAMMA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI (VEL) Subprogetto Garfageo (Fase 2)</b></p> <p>COMUNE DI _____</p> <p>FOGLI N.: _____</p>
<p>Professionista: _____; Studio in via _____ n. _____;          C.A.P. _____ Comune _____ Tel. _____; Fax _____;          e-mail: _____</p>
<p><b>CARTA GEOLOGICA</b>          Scala 1:2.000          Data _____</p>



**Figura 1B6** – Esempio di carta geologica realizzata nell’ambito del Progetto VEL da rilievo in scala 1:2000 (ai fini della rappresentazione nel presente documento la scala è stata ridotta). Le relative legende sono dettagliatamente riportate nei seguenti Volumi: Lunigiana e Garfagnana (Volume n. 2), Valtiberina (Volume n. 3), Casentino (Volume n. 4), Mugello (Volume n. 5), Amiata (Volume n. 6)

### 1B1.3.2 CARTA GEOMORFOLOGICA

La carta geomorfologica verrà realizzata utilizzando come base di riferimento la Carta Tecnica Regionale (CTR) in scala 1:2000, che nella maggior parte di casi è in formato numerico. Dove vi siano interi centri urbani o parte di essi non coperti dalla CTR in Scala 1:2000, sarà utilizzata la carta in Scala 1:5000.

La cartografia geomorfologica sarà realizzata attraverso diverse fasi di lavoro; una prima fase prevede l'esame stereoscopico di foto aeree, riferite a campagne di riprese aeree che, in date diverse, hanno interessato la zona di esame (analisi multitemporale), dalla quale si possa evincere non solo la presenza di particolari fenomenologie ma anche eventuali indicazioni riguardo allo stato di attività delle stesse.

La fase successiva prevede l'esecuzione del rilievo di campagna finalizzato alla verifica delle informazioni ottenute mediante osservazione di foto aeree, in particolare si dovranno verificare:

- ❑ le geometrie e le tipologie dei depositi nonché la congruenza delle forme individuate;
- ❑ lo stato di attività delle forme dei depositi e dei processi riscontrati;
- ❑ la corrispondenza con quanto emerso nel corso del rilievo geologico.

Il rilievo geomorfologico dovrà comunque essere condotto in stretta correlazione con quello geologico, ed entrambi, dovranno essere supportati dalla raccolta e dall'interpretazione critica dei dati esistenti (Carta geologica del Progetto Carg, carte relative alle indagini geologiche di supporto agli strumenti urbanistici comunali, sondaggi, scavi, prove in sito reperibili presso la Regione, la Provincia, la Comunità Montana, il Comune, i Consorzi di Bonifica).

Nel corso del rilievo di campagna, oltre alla verifica di quanto desunto dalla fotointerpretazione, si dovranno cartografare e perimetrare, con un grado di dettaglio consono alla scala della base cartografica adottata (CTR 1:2000), i seguenti elementi geomorfologici:

- ❑ dati strutturali;
- ❑ forme tettoniche;
- ❑ forme strutturali;
- ❑ depositi di alterazione superficiale;
- ❑ forme, processi e depositi gravitativi di versante;
- ❑ forme, processi e depositi per acque correnti superficiali;
- ❑ forme e depositi carsici;

- forme e depositi glaciali;
- forme, processi e depositi antropici e manufatti.

Nella carta geomorfologica dovranno essere riportati i dati strutturali indicati nella carta geologica (faglie, sovrascorrimenti, giaciture), le unità geologiche individuate ed eventuali lineazioni rilevate dall'analisi delle foto aeree.

Il deposito di copertura significativo ai fini del VEL è quello che presenta spessore superiore a 2m; tuttavia, al fine di ipotizzare (ove possibile) la profondità del piano di posa delle fondazioni degli edifici esistenti, dovrà essere stimata l'entità degli spessori dei riporti (in relazione alla morfologia, alla presenza di lesioni sugli edifici legate a cedimenti delle fondazioni, ad indicazioni fornite dai residenti della zona etc.). Pertanto, dovrà quantomeno essere fornita un'indicazione di massima sullo spessore (>2m oppure <2m) del riporto.

Dovranno essere delimitate le forme, ed in particolare le varie tipologie di depositi di copertura distinguendole in funzione dei processi di messa in posto e stabilendone lo stato di attività. In relazione alla scala di rilievo dovranno essere indicate le forme ed i depositi che, anche se non cartografabili in quanto di modesta estensione, possono influenzare la stabilità dell'edificio in condizioni statiche o per effetti indotti dal sisma.

Relativamente allo stato di attività, le forme sono distinte in:

“Forme attive” ⇒ legate a processi in atto o ricorrenti a ciclo breve.

“Forme quiescenti” ⇒ laddove esistano evidenze geomorfologiche o testimonianze (dirette, storiche, ecc.) che indichino una possibilità di attivazione del processo nell'attuale sistema morfoclimatico.

“Forme inattive” ⇒ riferibili a condizioni climatiche diverse da quelle attuali oppure a condizioni morfologiche non più attivabili. Nel caso dei corpi di frana si dovrà indicare, ove possibile, se le attuali condizioni di stabilità siano state raggiunte artificialmente o naturalmente.

Lo stato di attività dei fenomeni sarà dedotto da osservazioni di campagna, prestando particolare attenzione alla presenza o meno di indizi di evoluzione.

Per quanto riguarda le frane, oltre allo stato di attività, deve essere considerata anche la tipologia di movimento. Le frane complesse saranno cartografate distinguendo, dove possibile, le aree a diverso meccanismo di movimento, altrimenti l'intero fenomeno sarà rappresentato dalla tipologia di movimento prevalente.

Per le “scarpate” è stata proposta una legenda riferita sia alla genesi, che allo stato di attività e che tenga conto anche delle dimensioni delle scarpate stesse.

Lo stato di attività dei fenomeni sarà dedotto da osservazioni di campagna, prestando particolare attenzione alla presenza o meno di indizi di evoluzione.

La cartografia dovrà essere continuamente aggiornata e controllata in relazione ai risultati delle indagini geotecniche e geofisiche effettuate nell’ambito del Programma VEL e nei progetti di adeguamento sismico e messa in sicurezza di edifici pubblici e/o strategici.

Le legende della cartografia geomorfologica sono illustrate nei volumi n. 2,3, 4, 5,6. Queste potranno subire modifiche in relazione ad eventuali nuove forme o processi non previste in legenda ed individuate durante la fotointerpretazione o il rilevamento.

Le modifiche alle legende dovranno comunque essere preventivamente concordate con la Regione Toscana- Direzione delle Politiche Territoriali e Ambientali – Settore Servizio Sismico Regionale.

Nella carta geomorfologica andranno riportate anche le tracce delle sezioni geologiche presenti nella carta geologica, con un tratto di colore nero e contraddistinte da una numerazione (es. 1-1’, 2-2’).

Si illustra di seguito un esempio di carta geomorfologica. Quest’ultima è stata redatta in scala 1:2000, tuttavia la scala della figura qui riportata può non essere rispondente alla scala nominale per esigenze legate all’inserimento dell’immagine nel testo.



**PROGETTO TERREMOTO IN GARFAGNANA E LUNIGIANA  
PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO**

Legge Regionale 30.7.97 n. 56

**PROGRAMMA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI (VEL)  
Subprogetto Garfageo (Fase 2)**

COMUNE DI \_\_\_\_\_

FCGLI N.: \_\_\_\_\_

---

Professionista: \_\_\_\_\_; Studio in via \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_;  
 CAP: \_\_\_\_\_ Comune \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_; Fax: \_\_\_\_\_;  
 e-mail: \_\_\_\_\_

---

**CARTA GEOMORFOLOGICA**  
 Scala 1:2.000  
 Data \_\_\_\_\_



**Figura 1B7** – Esempio di carta geomorfologica realizzata nell’ambito del Progetto VEL da rilievo in scala 1:2000 (ai fini della rappresentazione nel presente documento la scala è stata ridotta). Le relative legende sono dettagliatamente riportate nei seguenti Volumi: Lunigiana e Garfagnana (Volume n. 2), Valtiberina (Volume n. 3), Casentino (Volume n. 4), Mugello (Volume n. 5), Amiata (Volume n. 6).

### 1B1.3.3 CARTA LITOLOGICO-TECNICA

La carta litologico-tecnica sarà realizzata sulla base del rilievo litologico-tecnico effettuato a scala 1:2.000 o dove previsto in scala 1:5.000, seguendo le specifiche per la classificazione litologica delle presenti IT (Volume 2 e succ.).

La classificazione delle unità litologiche sarà effettuata mediante:

- osservazioni e determinazioni effettuate sugli affioramenti;
- informazioni contenute nella carta geologica e in quella geomorfologia;
- i risultati delle prove geotecniche e geofisiche.

Lo scopo di tale cartografia è quello di raggruppare i litotipi individuati in Unità Litologico-tecniche sulla base delle loro caratteristiche fisico-meccaniche e di determinare la corrispondenza con i parametri che caratterizzano la litologia dal punto di vista della risposta sismica (velocità delle onde di taglio  $V_{sh}$ , Coefficiente di Poisson  $\nu$ , ...).

Tale cartografia sarà pertanto realizzata in due fasi:

- una fase preliminare durante il rilevamento geologico, in cui saranno effettuate le determinazioni sugli affioramenti ai fini della classificazione delle ULT (secondo le specifiche del Volume 2 e succ.) e saranno raccolti tutti i dati esistenti presso gli Enti Locali (sondaggi geotecnici, prove in sito, prospezioni geofisiche);
- una fase conclusiva, a seguito dell'acquisizione di una quantità di dati, rappresentativa per la definizione delle geometrie e per caratterizzare, in relazione al grado di omogeneità, le unità litologiche, derivanti dall'esecuzione di prospezioni sismiche a rifrazione in onde SH e sondaggi geotecnici con prove down-hole.

Va tenuto conto, alla luce dell'esperienza maturata in molti siti della Lunigiana e Garfagnana, come sia talora ipotizzabile un'estrema variabilità in termini di  $V_{SH}$ ,  $V_P/V_{SH}$ , Coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), all'interno di una stessa unità litologica, con variabilità talora elevata tra dati di superficie e dati acquisiti in foro. Ciò comporta maggiori difficoltà nella sintesi dei dati ai fini della redazione dell'elaborato litologico-tecnico.

A riguardo, essendo la procedura in corso di sperimentazione, sarà verificata la corrispondenza tra il rilevamento litologico-tecnico, i risultati delle indagini geofisiche e geotecniche e la successiva taratura delle unità litologiche in termini di  $V_{SH}$ ,  $V_P/V_{SH}$ , Coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), su alcuni siti campione.

La definizione accurata delle unità litologico tecniche permetterà, in relazione ai valori di  $V_{SH}$  ed agli spessori valutati, di estrapolare i parametri di amplificazione ottenuti dalla modellazione numerica delle sezioni geologiche indagate.

Le unità che costituiscono la struttura geologica dell'area sono raggruppate in relazione a caratteristiche tecniche omogenee (Unità Litologico Tecniche ULT). Per la definizione delle ULT dovrà essere fatto riferimento oltre che al rilievo e alla caratterizzazione degli affioramenti, ai parametri fisico-meccanici acquisiti con le indagini geofisiche e geotecniche.

Nell'individuazione delle ULT, i litotipi sono pertanto raggruppati in relazioni a caratteristiche fisico-strutturali ed a parametri geotecnici e geofisici, indipendentemente dalla loro posizione stratigrafica e dai relativi rapporti geometrici.

Per le determinazioni ed i rilievi da effettuare sugli affioramenti sono distinti:

- **litotipi lapidei:** dovranno essere acquisite le informazioni relative alla litologia, alla stratificazione, al grado di fratturazione e di alterazione, nonché tutti gli elementi, eventualmente anche strutturali, che possono determinarne il comportamento geomeccanico, principalmente mediante l'uso di prove manuali indicate nella Sezione D - Volume 2 e succ. e, laddove esistenti, integrando tali dati con i risultati di prove specifiche in sito e/o di laboratorio. Alla scala 1:2.000 sono richiesti parametri di caratterizzazione geotecnica-geomeccanica quantitativi ricavati da prove specifiche in sito e/o in laboratorio;
- **litotipi granulari e coesivi:** dovranno essere acquisite informazioni circa lo spessore, le dimensioni e la forma dei frammenti, la presenza di frazione fine (caratteristiche tessiturali) ed il grado di cementazione e/o di consistenza/addensamento.

Per la prima fase di realizzazione della carta litologico tecnica, individuazione delle ULT dagli affioramenti, dovrà essere fatto riferimento alle legende riportate nella sezione D del volume 2 e successivi.

Queste potranno nel corso del progetto subire modifiche in relazione a eventuali forme o processi individuate durante il rilevamento o fotointerpretazione e non previste in legenda.

Le modifiche alle legende dovranno essere preventivamente concordate con la Regione Toscana- Direzione delle Politiche Territoriali e Ambientali – Settore Servizio Sismico Regionale.

La fase di sintesi è ancora in sperimentazione, pertanto in relazione risultati forniti saranno definiti i criteri per la sintesi dei dati e l'eventuali leggi di correlazioni tra i parametri geofisici e geotecnici e la litologia.

Nella Carta litologico-tecnica dovrà essere individuato il tipo di substrato presente e la copertura, evidenziandone la geometria tramite la ricostruzione delle isopache della coltre, secondo le modalità riportate nel Volume 2 e succ.- Sezione D.

Nel caso di aree caratterizzate dall'affioramento di un'unica unità litostratigrafica (ad esempio depositi alluvionali terrazzati), la carta litologico tecnica potrà essere realizzata, sentito il parere della Regione Toscana e dei referenti scientifici in scala 1:5.000.

Nelle carte litologico-tecniche, sia in scala 1:5.000 sia in scala 1:2.000, dovranno essere ubicati gli eventuali sondaggi effettuati, le prove DH, le prove penetrometriche e le linee sismiche e altre prove previste e riportate nel Volume 2 e succ. – Sezione C-D.

E' opportuno inoltre che nelle carte litologico-tecniche siano riportate anche le indagini e le prospezioni geofisiche effettuate al di fuori del Programma VEL e fornite dagli Uffici Tecnici Comunali, nonché dai liberi professionisti locali.

Queste indagini saranno nominate con sigle e numerazioni differenti rispetto a quelle realizzate nell'ambito del VEL e in maniera da essere identificate inequivocabilmente. Per il nome identificativo dell'indagine si rimanda al paragrafo 1B1.3.1 (Carta Geologica) del presente Volume.

Nelle carte litologico-tecniche andranno riportate anche le tracce delle sezioni geologiche presenti nella carta geologica, con un tratto di colore nero e contraddistinte da una numerazione (es. 1-1', 2-2').

Si illustra di seguito un esempio di carta litologico-tecnica, completa delle informazioni richieste. La carta litologico-tecnica è stata redatta in scala 1:2000, tuttavia la scala della figura qui riportata può non essere rispondente alla scala nominale per esigenze legate all'inserimento dell'immagine nel testo.

**PROGETTO TERREMOTO IN GARFAGNANA E LUNIGIANA  
PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO**

Legge Regionale 30.7.97 n. 56

PROGRAMMA VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI LOCALI (VEL)  
Subprogetto Garfageo (Fase 2)

COMUNE DI \_\_\_\_\_

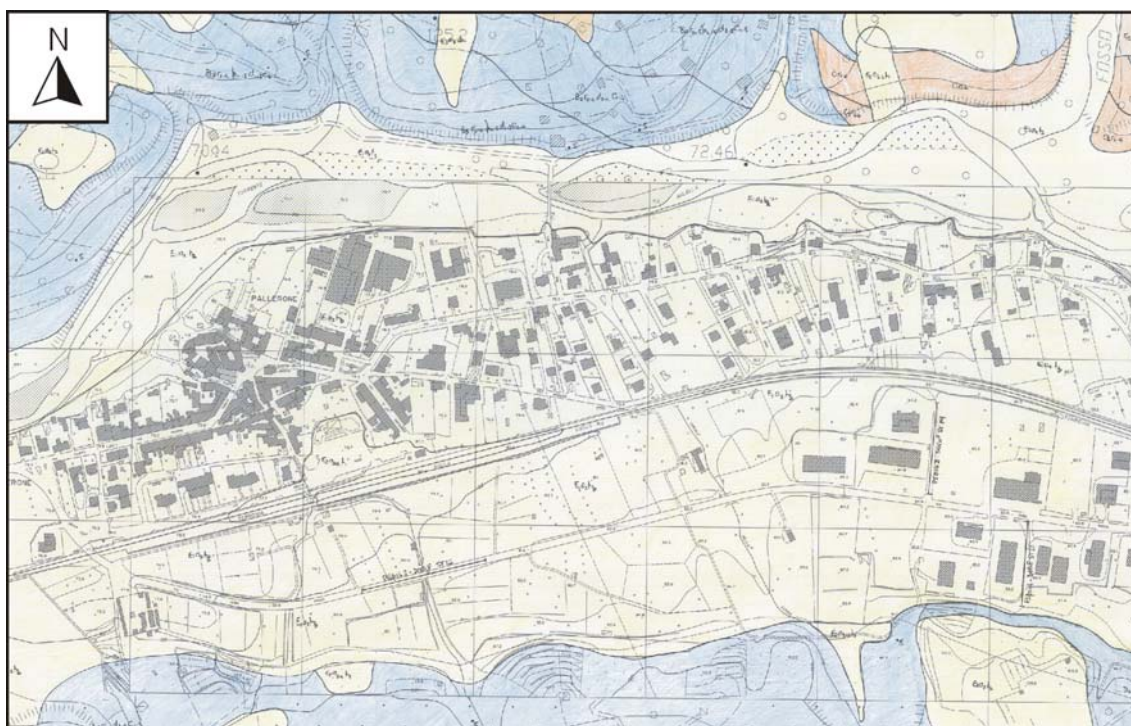
FOGLI N.: \_\_\_\_\_

---

Professionista: \_\_\_\_\_; Studio in via \_\_\_\_\_ n. \_\_\_\_\_;  
CAP: \_\_\_\_\_ Comune \_\_\_\_\_ Tel. \_\_\_\_\_; Fax: \_\_\_\_\_;  
e-mail: \_\_\_\_\_

---

**CARTA LITOLOGICO-TECNICA**  
Scala 1:2.000  
Data \_\_\_\_\_



**Figura 1B8** – Esempio di carta litologico-tecnica realizzata nell’ambito del Progetto VEL da rilievo in scala 1:2000 (ai fini della rappresentazione nel presente documento la scala è stata ridotta). Le relative legende sono dettagliatamente riportate nei seguenti Volumi: Lunigiana e Garfagnana (Volume n. 2), Valtiberina (Volume n. 3), Casentino (Volume n. 4), Mugello (Volume n. 5), Amiata (Volume n. 6)

#### 1B1.3.4 INFORMAZIONI DI NATURA IDROGEOLOGICA

Nei siti in cui si ritenga che la risposta sismica locale possa essere influenzata dalle condizioni idrogeologiche (ad esempio in aree nelle quali possono verificarsi fenomeni di liquefazione o zone soggette a movimenti gravitativi di versante) dovranno essere rilevate le informazioni necessarie, da riportare nell'elaborato geomorfologico.

In tale cartografia sarà illustrato lo schema di circolazione delle acque sotterranee e superficiale con indicato:

- pozzi e piezometri di misura;
- linee di flusso;
- la superficie piezometrica;
- indicazioni sul grado di permeabilità delle unità litologiche;

Nella relazione allegata dovranno essere indicate, inoltre, le caratteristiche dell'acquifero, la quota e l'ampiezza delle escursione della falda freatica e l'eventuale presenza di terreni saturi.

Le aree su cui sarà richiesta l'implementazione della cartografia geomorfologica con dati di natura idrogeologica, saranno individuate dalla Regione Toscana, Direzione delle Politiche Territoriali e Ambientali - Settore Servizio Sismico e dai Referenti Scientifici regionali.

## 1B1.4 CRITERI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLA SEZIONE GEOLOGICA SIGNIFICATIVA

In relazione alle caratteristiche geologiche e strutturali, alla distribuzione areale del centro urbano, alla morfologia, ai rapporti tra depositi di copertura e substrato, sono ricostruite sezioni geologico-tecniche su cui eseguire analisi numerica di amplificazione.

In particolare, saranno analizzate le situazioni (potenziale causa di amplificazione sismica) alle quali è necessario porre attenzione per l'individuazione della sezione da sottoporre a modellazione numerica.

In relazione agli effetti che possono produrre a seguito di una sollecitazione sismica, gli aspetti geologici e geomorfologici principali, sono così sintetizzabili:

a) Amplificazione per effetti morfologici: sono discontinuità morfologiche che possono comportare l'amplificazione del moto del suolo connessa con la focalizzazione delle onde sismiche e/o fenomeni di collasso:

- pendii con inclinazione  $> 15^\circ$  e dislivello superiore a circa 30 m (O.P.C.M. n.3274/03 e s.m.);
- bordi di terrazzo o zone di ciglio ( $H > 10$  m);
- creste rocciose sottili (larghezza in cresta molto inferiore alla larghezza alla base e pendenza media  $> 30^\circ$ ).

b) Amplificazione per effetti litologici: l'amplificazione è legata in primo luogo a differenze in termini di rigidità sismica tra substrato e copertura e secondariamente alla conformazione geometrica con conseguenti fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche: valli fluviali, conoidi, falde di detrito, ammassi rocciosi molto fratturati, nei quali la velocità delle onde S calcolata su uno spessore di 30m ( $V_{s30}$ ) risulti compresa tra 180 e 360 m/s o tra 360 e 800 m/s (profili tipo B, C, D, E ai sensi dell'EC8 e O.P.C.M. n.3274/03 e s.m.);

c) Amplificazione per morfologie sepolte: in questo caso il fenomeno di amplificazione è generato a causa di un substrato roccioso con morfologia sepolta molto accidentata (per es. presenza di paleoalvei). Ciò può produrre fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche;

d) Instabilità dinamica per cedimenti e cedimenti differenziali: può ricorrere nelle seguenti situazioni:

- presenza di litologie con caratteristiche fisico-meccaniche scadenti (profili tipo S1 e S2 ai sensi dell'EC8 ed O.P.C.M. n.3274/03 e s.m.);
- presenza di un contatto tra due litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche diverse. In quest'ultimo caso possano verificarsi vibrazioni del terreno con ampiezze e frequenze diverse;



□ terreni suscettibili di densificazione.

e) Instabilità dinamica per fenomeni franosi: è legata alla presenza di fenomeni di instabilità in atto o potenziali, che possono subire un'accentuazione in seguito al verificarsi di eventi sismici, o zone in cui è possibile l'instaurarsi di cedimenti diffusi:

- Frane continue stagionali (attive);
- Frane intermittenti (quiescenti);
- Zone potenzialmente franose o esposte a rischio di frana.

f) Instabilità dinamica per liquefazione: denota una diminuzione di resistenza a taglio e/o di rigidità causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno. Deve essere verificata la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limo-argillosa (O.P.C.M. n.3274/03 e s.m.).

Ciò premesso, dalla sezione significativa sono valutati solo gli effetti indicati ai punti (a), (b) e (c); gli altri fenomeni sono individuati e descritti in relazione, ma per l'analisi, verifica e valutazione dell'intervento di stabilizzazione si rimanda ad una fase successiva di approfondimento, almeno che tali fenomeni non interessino la messa in sicurezza e l'adeguamento sismico di edifici pubblici, strategici o rilevanti.

Per costruire la sezione geologica ed in particolare per verificare le geometrie sepolte dei contatti litostratigrafici, il rilevamento geologico è supportato dalle indagini geofisiche di superficie (sismica a rifrazione con onde P ed SH, sismica a riflessione ad alta risoluzione etc.), indagini geognostiche e geotecniche (sondaggi geognostici e prove geotecniche), indagini sismiche in foro (down-hole).

Sulla base dei suddetti dati, la sezione geologica viene inserita (opportunamente adattata) come input in un codice numerico di calcolo bidimensionale, in cui sono attribuiti ai differenti litotipi individuati, i parametri fisico-meccanici necessari per l'analisi numerica di amplificazione sismica (peso di volume  $\gamma$ , velocità onde P, velocità onde SH, Coefficiente di Poisson  $\nu$ , curve  $G/G_0$  e  $\xi$  in funzione della deformazione tangenziale  $\gamma$ ).

Per i siti in cui l'effetto di amplificazione è legato esclusivamente all'assetto sismostratigrafico, possono essere effettuate analisi di amplificazione monodimensionali in cui il modello fisico-meccanico è ricostruito su una



verticale. In entrambi i casi (modellazione mono o bidimensionale) va definito parallelamente un terremoto di input significativo.

Dalle sezioni così ricostruite sono emanate le informazioni utili per la modellazione numerica 1D e 2D, più dettagliatamente illustrate nella sezione 4 del presente volume.

## **1B1.5 LA RELAZIONE GEOLOGICA E MODALITÀ DI PRESENTAZIONE DEI DATI DI BASE ACQUISITI NELL'AMBITO DEL PROGRAMMA VEL (DATI RELATIVI ALLE INDAGINI GEOFISICHE, EVENTUALI SONDAGGI E DELLE MISURE IN SITO)**

La Relazione geologico-tecnica illustrerà gli aspetti relativi:

- agli elaborati cartografici (carta geologica, geomorfologica, litologico-tecnica);
- alla verifica delle caratteristiche litologiche e delle geometrie sepolte sulla base dei risultati delle indagini geofisiche e geotecniche.

Per i dati di base sono indicate tutte le informazioni da recuperare al fine di un'univoca individuazione all'interno del centro urbano.

### 1B1.5.1 SOMMARIO DEI CONTENUTI

Nella relazione dovrà essere fornita una descrizione della cartografia prodotta (carta geologica, carta geomorfologica, carta litologico-tecnica) e dovranno essere confrontati e verificati il rilievo di superficie e le relative sezioni geologiche con i risultati delle indagini geofisiche e geotecniche di esplorazione del sottosuolo.

I contenuti dovranno essere conformi alla normativa vigente (*DM 11.03.88 e DM 16.01.96, Delib. G.R.T. 94/85*) ed integrati rispetto ad essa secondo le presenti istruzioni tecniche.

Nella relazione dovranno essere decritti con documentazione fotografica gli affioramenti geologici ritenuti più rappresentativi (per estensione dell'affioramento e per caratteristiche lito-strutturali) e tutte le altre informazioni ritenute utili al fine di chiarire aspetti e processi non chiaramente o difficilmente rappresentabili in carta (ad esempio classificazione di un evento franoso complesso o definizione dello stato di attività laddove permangono dubbi). In particolare, riguardo agli affioramenti più significativi, dovranno essere compilate nella relazione tecnica allegata, singole descrizioni litologico-tecniche, corredate da materiale fotografico dettagliato (commentato anche graficamente) e con interpretazione formazionale e attribuzione della classe lito-tecnica.

Dovranno inoltre essere riportate tutte le informazioni e considerazioni ritenute utili per l'analisi della risposta sismica locale (es. notizie storiche su aree lesionate a seguito di eventi sismici passati, interventi di stabilizzazione effettuati in aree in frana o in aree caratterizzate da litologie con caratteristiche geotecniche scadenti).

La relazione dovrà inoltre contenere un sommario degli argomenti trattati e dei dati ed elaborati contenuti.

#### 1B1.5.2 DESCRIZIONE DEGLI ELABORATI CARTOGRAFICI

La relazione geologica sarà articolata in più parti, una per ogni elaborato cartografico prodotto (carta geologica, la carta geomorfologica, la carta litologico-tecnica) e da una serie di allegati contenenti:

- sezioni geologiche, schemi strutturali, colonne stratigrafiche e quant'altro ritenuto necessario per l'analisi della risposta sismica locale;
- la documentazione fotografica e la descrizione degli affioramenti geologici ritenuti più rappresentativi (per estensione dell'affioramento e per caratteristiche lito-strutturali);
- ogni altra informazione ritenuta utile per l'analisi di risposta sismica locale.

Per la descrizione degli elaborati dovranno essere descritti nel dettaglio gli elementi che da essi emergono e che possono rappresentare situazioni critiche per problemi di stabilità o amplificazione sismica.

Saranno indicati anche eventuali dubbi e incertezze (posizioni di contatti, spessori coperture) che permangono, al fine di indirizzare la successiva pianificazione di indagini geofisiche e geotecniche di approfondimento e verifica.

La cartografia geologica, geomorfologica, litologico-tecnica sarà redatta alla scala 1:2.000 per le aree urbanizzate (centri storici, nuclei abitativi, viabilità e infrastrutture in genere) e per quelle di espansione.

Per le aree caratterizzate dall'affioramento di un'unica unità litostratigrafica e da depositi e forme derivati da un unico processo geomorfologico la cartografia può essere redatta in scala 1: 5.000 previo consenso della Regione Toscana Settore- Servizio Sismico Regionale.

Alla cartografia (geologica, geomorfologica, litologico-tecnica) in scala 1:2000, dovrà essere affiancata una carta geologica in scala 1:10.000 d'inquadramento (estratto della cartografia del progetto CARG o quelle prodotte dal Settore Servizio Sismico Regionale) con evidenziato il perimetro delle carte realizzate in scala 1:2.000.

La perimetrazione delle aree da rilevare è effettuata dalla Regione Toscana-Direzione Politiche Territoriali e Ambientali – Settore Servizio Sismico Regionale in accordo con i Comuni interessati sulla base di criteri indicati al

paragrafo 1B1.2. L'area d'interesse è comunque quella urbanizzata compreso un congruo intorno in funzione della complessità dei fenomeni presenti.

### 1B1.5.3 ILLUSTRAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI GEOFISICHE E GEOTECNICHE IN RELAZIONE AGLI ELABORATI CARTOGRAFICI REDATTI

Nella relazione geologica, oltre alla descrizione degli elaborati cartografici prodotti, dovranno essere illustrate le note esplicative relative alle operazioni di confronto e verifica del rilievo di superficie e le relative sezioni geologiche con i risultati delle indagini geofisiche e geotecniche.

A tal fine tutti i siti d'indagine dovranno essere rappresentati nella cartografia geologica e litologico-tecnica con codifica univoca (come indicato nelle legende del Volume n.2 e succ.).

Tali siti saranno richiamati nella relazione al fine di evidenziare:

- gli spessori delle unità litologiche con relativa descrizione sommaria (sia in termini formazionali che di Unità Litologico Tecniche individuate);
- profondità degli acquiferi rilevati in fase di perforazione, o da eventuale monitoraggio in piezometri;
- indicazione del range di parametri sismici rappresentativi dell'unità litologico-tecnica (ove identificabile in relazione al grado di omogeneità della litologia).

I professionisti geologi, incaricati per il rilievo geologico e/o per la direzione dei lavori nell'ambito della realizzazione dei sondaggi geognostici, dovranno predisporre una relazione sulle indagini come indicato nelle presenti IT ed a quanto indicato nelle *"Raccomandazioni sulla Programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche"* (AGI, 1977), nella *"Normativa e linee guida per le relazioni geologiche e geotecniche"* (Ordine dei Geologi della Toscana, 1996) ed alla *Delibera C.R. n. 94 del 1985*.

La relazione geologica sulle indagini deve contenere:

1. la cartografia geologica di riferimento in scala 1:2000 con l'ubicazione dei siti d'indagini;
2. la descrizione delle indagini svolte (numero sondaggi e prove in sito geofisiche e geotecniche, stratigrafie, elaborati grafici, documentazione fotografica) , come indicato nei paragrafi successivi e la motivazione sulle scelte programmatiche effettuate;

3. l'attrezzatura posta in foro e la sua tipologia, la frequenza temporale ed in profondità delle misurazioni effettuate;
4. il numero dei campioni prelevati e la profondità di prelievo;
5. i risultati delle prove di laboratorio effettuate sui campioni (certificato di laboratorio abilitato) e delle prove in sito;
6. le sezioni litostratigrafiche di correlazione con la scala ritenuta opportuna (di maggior dettaglio di quella 1:2.000) riportanti le informazioni litostratigrafiche, strutturali, idrauliche e geotecniche. Esse terranno conto delle eventuali informazioni ricavate dai sondaggi, prove e/o scavi eseguiti.

Per eventuali modifiche o problemi nell'applicazione delle presenti istruzioni tecniche occorrerà rivolgersi direttamente alla Regione Toscana- Direzione Politiche Territoriali e Ambientali – Settore Servizio Sismico Regionale per concordare con esso quanto necessario alla soluzione della problematica rilevata.

#### INFORMAZIONI STANDARD RELATIVE ALLE PROVE IN SITO E IN LABORATORIO DA INDICARE NELLA RELAZIONE GEOLOGICA

Per le indagini in sito e di laboratorio dovrà essere indicata una serie di informazioni standard, che ne permetta l'univoca identificazione, fornisca le caratteristiche salienti dell'esecuzione, sintetizzando i risultati.

Per le prove in sito la relazione illustrativa dell'indagine dovrà contenere :

- la descrizione e la caratterizzazione dell'attrezzatura utilizzata;
- le modalità esecutive della prova;
- le tabelle dei dati ricavati in campagna e le tabelle dei dati/parametri desunti con la prova e/o i diagrammi illustranti i dati forniti dall'indagine in relazione alla natura e alla profondità del terreno. Per quanto riguarda i parametri rilevati dovranno essere distinti quelli direttamente ricavati mediante l'utilizzo dell'attrezzatura di prova da quelli indirettamente stimati mediante le correlazioni di letteratura, delle quali deve essere sempre citata la fonte.

Per le prove di laboratorio la relazione illustrativa dell'indagine dovrà contenere:

- la descrizione e la caratterizzazione dell'attrezzatura utilizzata;
- le modalità esecutive della prova;
- le caratteristiche e la provenienza del campione;

- le tabelle dei dati/parametri desunti con la prova in relazione alle condizioni di esecuzione della prova. Per quanto riguarda i parametri rilevati dovranno essere distinti quelli direttamente ricavati mediante l'utilizzo dell'attrezzatura di prova da quelli indirettamente stimati mediante le correlazioni di letteratura, delle quali deve essere sempre citata la fonte.

Per le informazioni che devono essere riportate nella relazione sulle indagini relativamente alle prove in sito e di laboratorio di più largo utilizzo nell'ambito degli studi connessi alla valutazione degli effetti locali, si rimanda comunque alle medesime IT (**Volume 1B – Sezioni 2 e 3**), alle **“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche” (AGI, 1977)** e alle **“Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio” (AGI, 1990)**.

#### INFORMAZIONI STANDARD RELATIVE AI SONDAGGI DA INDICARE NELLA RELAZIONE GEOLOGICA

I dati relativi ai sondaggi geognostici e geotecnici da indicare nella relazione geologica sono :

##### **1) identificazione:**

- ubicazione del sondaggio (posizione planimetrica e altimetrica riferita ad un sistema di riferimento noto);
- data di inizio e fine della perforazione;
- denominazione del cantiere;
- ditta esecutrice e nome del sondatore;
- località ed edificio di deposito delle cassette catalogatrici, persona o ente al quale sono state consegnate e date di consegna;
- fotografie relative alle cassette catalogatrici.

##### **2) tecniche esecutive:**

- quota della testa foro;
- diametro di perforazione;
- diametro degli eventuali rivestimenti e tipo di carotiere utilizzato;
- profondità raggiunta dai rivestimenti;
- modalità di perforazione ed accorgimenti tecnici impiegati;

- profondità di prelievo di campioni e loro qualità ai fini delle indagini previste;
- tipi di campionatori;
- operazioni speciali eseguite (cementazione, etc.);
- eventuali prove in sito effettuate;
- recupero percentuale e RQD, dove significativo;
- variazione della velocità di avanzamento;
- profondità della falda acquifera incontrata e quota di stabilizzazione dell'acqua in foro, con misure giornaliere ad inizio e fine perforazione;
- tipologia delle attrezzature installate nel foro (inclinometri, estensimetri, assestimetri, piezometri, etc.);
- test effettuati sulla carota;
- descrizione geotecnica dei singoli strati attraversati (stratigrafia del sondaggio).

La stratigrafia del sondaggio deve essere conforme a quanto riportato nella nel Paragrafo 3B2.1.7 (Stratigrafia del sondaggio: modulo per la compilazione, simbologie e specifiche tecniche).

La stratigrafia di ciascun sondaggio dovrà essere compilata utilizzando per ciascun terreno incontrato la simbologia prevista nelle *“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”* (AGI, 1977) e secondo il modulo riportato in figura 3B2.

L'ubicazione del sondaggio dovrà essere riportata con precisione sugli elaborati grafici, resa evidente e riconoscibile in sito e documentata da fotografie.

Per ulteriori approfondimenti sugli aspetti relativi alla compilazione della stratigrafia, metodi di perforazione, conservazione del carotaggio in cassette catalogatrici, prelievo campioni indisturbati, si rimanda al Volume 1B – Sezione 3 (Indagini geotecniche).

**SEZIONE 2**  
INDAGINI GEOFISICHE



## **(2B1) GENERALITA'**

Le indagini geofisiche oggetto delle presenti IT, utilizzate nell'ambito di problematiche di rischio sismico e più in particolare negli studi per la valutazione della Risposta Sismica Locale, hanno due scopi principali:

- ricostruire la geometria delle unità oggetto d'indagine (definire gli spessori delle coperture e delle principali unità litotecniche, ricostruire le geometrie degli eventuali corpi interessati da fenomeni gravitativi);
- caratterizzazione dinamica per bassi livelli di deformazione delle unità litostratigrafiche presenti nelle aree di indagine; computo della Vs e dei moduli elasto-dinamici e del coefficiente di Poisson.

In particolare, le indagini sismiche in sito permettono di determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (*onde P*), di taglio (*onde S*) e/o delle onde di superficie (*onde di Rayleigh, Love*) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisiti, alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

Altre tipologie di indagini geofisiche, quali ad esempio prospezioni geoelettriche e georadar, pur non fornendo indicazioni sul parametro velocità delle onde sismiche, possono all'occasione integrare le metodologie sismiche per una migliore definizione delle morfologie sepolte, dei rapporti tra coperture e substrato, di eventuali discontinuità (faglie, fratture).

Una caratteristica generale di tutte le metodologie di prospezione indiretta del sottosuolo, e di quelle geofisiche in particolare, è di essere comunque condizionate sia dai limiti propri di ciascuna tecnica, sia dalle caratteristiche del contesto geologico in cui si opera. Non è pertanto raro ed infrequente ottenere, successivamente all'elaborazione di dati geofisici, molteplici soluzioni, ovvero differenti modelli litostratigrafici, corretti sotto il profilo del processo matematico-fisico utilizzato, ma talvolta scarsamente coerenti con le situazioni reali.

Da qui la necessità che i risultati delle indagini geofisiche vengano tarati e verificati, attraverso il confronto con altre metodologie dirette ed indirette, nell'ambito di campagne multidisciplinari di esplorazione del sottosuolo, e che i suddetti risultati vengano sottoposti a controllo di qualità da parte dei Consulenti Scientifici afferenti al Programma VEL, secondo le modalità esposte nelle pagine seguenti per ogni singola tipologia d'indagine.

Una delle principali finalità di queste Istruzioni Tecniche è pertanto quella di fornire precise indicazioni sulle modalità di esecuzione, elaborazione e presentazione delle prospezioni geofisiche, al fine di minimizzare le suddette ambiguità.

Più in generale, le presenti Istruzioni Tecniche per le indagini geofisiche, hanno lo scopo di perseguire i seguenti obiettivi:

- a) indicare i criteri per la programmazione delle indagini geofisiche;
- b) definire le procedure standard per l'esecuzione di tali indagini;
- c) stabilire le modalità di presentazione dei risultati.

Le indagini geofisiche di cui alle presenti IT saranno preferibilmente effettuate in corrispondenza di aree in cui si prevede uno sviluppo urbanistico e/o in cui sono previsti interventi di adeguamento delle costruzioni a seguito di analisi di vulnerabilità e dove siano presenti le coperture di seguito specificate.

Le prove geofisiche devono essere in generale spinte fino ad incontrare il bedrock sismico, attraversandolo per uno spessore significativo. A tal fine per le indagini di superficie (sismica a rifrazione), potranno prevedersi schemi geometrici comprendenti tiri esterni lontani e stese di lunghezza maggiore allo standard. Per le indagini in foro di sondaggio, nel caso in cui il bedrock sismico sia a profondità maggiore del fondo foro, la profondità del bedrock potrà essere determinata con tecniche complementari, ad esempio attraverso l'elaborazione dei dataset sismici relativi a prove down-hole secondo la metodologia VSP (Vertical Seismic Profiling). A tal fine deriva la scelta, esplicitata negli specifici paragrafi, di utilizzare particolari e specifiche modalità di acquisizione nonché differenti metodi di interpretazione.

Tali situazioni devono, in ogni caso, essere analizzate congiuntamente alla Regione Toscana - Direzione delle Politiche Territoriali e Ambientali - Settore-Servizio Sismico Regionale.

Sempre in quest'ottica, in fase di interpretazione sia delle indagini sismiche a rifrazione sia per le prospezioni in foro con tecnica down-hole (le più diffuse nell'ambito delle attività VEL), come meglio approfondito nei paragrafi successivi, vengono richieste modalità di interpretazione meno discretizzate e/o automatizzate, tali da consentire, nel rispetto della filosofia operativa del VEL, una ottimale taratura e un confronto con i risultati ottenuti dalle indagini geognostiche e geotecniche. Ciò per consentire, conseguentemente, la ricostruzione di un modello geologico di sottosuolo significativo e rappresentativo dell'area in esame.

## **(2B1.1) LA CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI A BASSI LIVELLI DI DEFORMAZIONE**

La parametrizzazione dinamica dei terreni costituisce, com'è noto, un aspetto fondamentale nell'ambito degli studi per la risposta sismica locale. Più in particolare, la misura della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), consente la determinazione di un'importante caratteristica meccanica del terreno: la c.d. rigidità iniziale ( $G_0$  o  $G_{max}$ ), in altre parole la rigidità a livelli di deformazione molto bassi. Tale parametrizzazione può essere ottenuta attraverso differenti tecniche: misure delle onde di corpo dalla superficie, delle onde superficiali, attraverso prove in foro tipo down-hole e cross-hole, mediante metodi passivi basati sul rumore ambientale, mediante misure di laboratorio su campioni prelevati durante l'esecuzione di sondaggi meccanici, tramite prove geotecniche in situ. Essendo la  $V_s$  un parametro molto complesso e funzione di numerosi fattori, molta cura deve essere impiegata nella sua misura, scegliendo, in base al contesto geologico, la metodologia più adatta e considerandone applicabilità e limiti

Per quanto riguarda le principali proprietà dinamiche dei terreni, è opportuno premettere che la complessa natura e geometria dei meccanismi di generazione e propagazione di onde sismiche nel sottosuolo e l'altrettanto complessa risposta del terreno alle sollecitazioni dinamiche derivanti, sembrerebbero pregiudicare la trattabilità del problema della c.d. risposta sismica locale. Il problema va affrontato, quindi, operando una serie di necessarie riduzioni e semplificazioni, in termini sia di azioni sia di risposta del materiale. Tenuto conto che per sottosuoli naturali, a causa della rapidità delle azioni e del fatto che essi si trovano per gran parte sotto falda, ci si trova in condizioni di drenaggio impedito, il fenomeno sismico produce deformazioni volumetriche trascurabili, rispetto a quelle distorsionali. Per questo appare giustificato ricondurre la modellazione meccanica di un fenomeno sismico all'analisi degli effetti prodotti da un insieme di onde S, che si propagano dal substrato alla superficie, con un campo di spostamenti del terreno praticamente orizzontale. L'assunzione è oltretutto validata dal fatto che, da un punto di vista ingegneristico, il moto più significativo ai fini della verifica sismica dei manufatti è quello orizzontale.

In tal senso, a livelli di deformazione bassi, è assunta l'ipotesi che il terreno in esame presenti un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare (deformazioni inferiori a  $10^{-3}$  %).

In base ai valori di velocità di propagazione delle onde P ( $V_P$ ) delle onde S ( $V_S$ ) e delle onde di Rayleigh ( $V_R$ ) si determinano, in base alla teoria di elasticità, alcune delle proprietà meccaniche del mezzo attraversato quali:

- il modulo di deformazione a taglio  $G_{max}$ ;
- il modulo di Young  $E$ ;
- il coefficiente di Poisson  $\nu$ ;
- il modulo di compressibilità volumetrica  $E_v$ .

Le relazioni da utilizzare sono di seguito elencate:

$$G = \rho \cdot V_S^2 \quad (2B.1)$$

$$E_v = \rho \cdot \left( V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \quad (2B.2)$$

$$\nu = \frac{0.5 \cdot \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} \quad (2B.3)$$

$$E = 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu) \quad (2B.4)$$

dove  $\rho$  rappresenta la densità del mezzo,  $\gamma = \rho g$  è il peso di volume e  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ( $S_r = 100\%$ ) dipende talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione secondo le relazioni precedenti (B1 – B.4); invece le velocità delle onde S e delle onde di superficie, sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidezza del terreno sono quelle di taglio e, subordinatamente, le onde di superficie.

Delle numerose tecniche sopracitate utilizzabili per la determinazione della  $V_s$ , verranno nei paragrafi successivi analizzate le modalità di esecuzione, le apparecchiature e le modalità interpretative e di restituzione dei dati delle seguenti tecniche:

- prove sismiche a rifrazione con onde P ed SH;

- prove sismiche a riflessione con onde P ed SH;
- prove down -hole;
- prove cross -hole;
- tecniche sismiche tomografiche;
- prove SASW e multicanale FK.

Tale scelta è motivata dalla considerazione che le altre tecniche (Misure passive, Cono Sismico, Prove P-S logging, Dilatometro Sismico) risultano avere evidenti limiti di applicabilità, di univocità dei risultati o una non ancora sufficiente validazione scientifica e tecnica.

Nella Tabella 2B1 sono riportati alcuni termini operativi di confronto tra le tecniche maggiormente utilizzate nell'ambito del Programma VEL per la definizione del parametro  $V_s$ , ovvero sismica a rifrazione con onde SH, down -hole, cross -hole e SASW.

La tabella sopraindicata fornisce un quadro di riferimento molto semplificato e talora insufficiente delle problematiche relative alla determinazione della velocità  $V_s$ .

In particolare è infatti opportuno ricordare che, in linea di massima, in un terreno stratificato valgono le seguenti regole:

- Le onde SH in un mezzo stratificato orizzontalmente non trasmutano a differenza delle onde SV e P. Ciò significa che se si generano inizialmente onde SH, si avranno unicamente onde rifratte e riflesse SH.
- D'altra parte se si generano onde SV, al ricevitore si possono ottenere sia onde SV che onde P di compressione; così come generando onde P si possono ottenere al ricevitore onde SV.
- La trasmutazione avviene in tutte le situazioni in cui esiste una differenza di impedenza-rigidità sismica; essa dipende in particolare dal contrasto di impedenza-rigidità e dall'angolo di incidenza.
- L'ampiezza delle onde trasmutate può essere calcolata, in prima approssimazione, con le equazioni di Zoepritz (Fowler, 1990). In pratica l'attenuazione che le onde di compressione subiscono in un mezzo, può essere maggiore o minore delle onde SV a seconda della litologia del mezzo e dipende da una serie di parametri tra cui la porosità, il grado di saturazione, etc. Un'ottima trattazione del problema si può ritrovare in (Bourbie et al., 1986).
- Si deve anche tenere presente che in un mezzo poroso omogeneo ed isotropo si propagano due tipi di onde compressionali P1 e P2 analogamente a quanto previsto dal modello di Biot e dimostrato sperimentalmente da Ploona (Bourbie et al., 1986).

- Inoltre, all'interno di un foro tubato, così come accade nelle prospezioni "di superficie", possono essere rilevate oltre alle onde di corpo (dirette, riflesse, rifratte, diffratte, trasmutate, etc.) anche onde analoghe a quelle superficiali denominate onde di Stoneley e che talora possono essere fortemente energetiche.

Va rilevato, infine, che in talune condizioni, la capacità di risoluzione indicata in tabella dalle differenti tecniche, può non essere verificata.

**Tabella 2B1** – Confronto tra le procedure sperimentali di sismica a rifrazione, CH, DH e SASW. Da Mancuso (1996, mod.)

	INDAGINI IN SUPERFICIE		INDAGINI IN FORO	
	sis. rifl. in onde P ed SH	SASW	CH	DH
Numero di fori necessari	Nessuno	Nessuno	2/3	1
Misure inclinometriche	NO	NO	SI	NO
Disturbo terreno per installazione fori	-	-	Modesto	Molto modesto
Massima profondità investigabile	Limitata	Limitata	Illimitata	Limitata
Sensibilità a disturbi ambientali	Medio-alta	Medio-alta	Medio-bassa	Medio-bassa
Onde indagate	P, SH	R	P, SV	P, SH
Necessità di orientazione dei ricevitori	SI	NO	NO	SI
Attenuazione vibrazioni con profondità	SI	SI	NO	SI
Rifrazione delle onde	-	Inevitabile	Inevitabile	Possibile
Capacità di risoluzione	Medio-bassa	Medio-bassa	Alta	Media
Costo di esecuzione	Molto bassa	Medio	Alto	Medio
1) Registrazione primi arrivi 2) Difficoltà d'interpretazione	Medio-alta	Alta	Media	Media

## **(2B2) INDAGINI SISMICHE**

### **(2B2.1) INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE IN ONDE P ED SH (■)**

L'utilizzo di prospezioni sismiche a rifrazione (per mezzo soprattutto di energizzazione in onde P) ha riscontrato nel corso degli anni una crescente applicabilità negli studi geologico-tecnici (ricerche idrogeologiche, geotecniche, ingegneristiche, etc..). Di contro, la sismica a rifrazione con onde di taglio (SH) è tutt'ora meno utilizzata e meno standardizzata (soprattutto per ciò che riguarda le sue fasi esecutive), pur avendo dimostrato una buona applicabilità (Barsanti et alii, 2000) e presentando costi di esecuzione contenuti rispetto ad altre tecniche sismiche.

Lo scopo della prova, come è noto, consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito tramite la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di compressione ( $V_P$ ) e/o di taglio polarizzate orizzontalmente ( $V_{SH}$ ), secondo fasi di acquisizione differenti e determinare le geometrie sepolte (spessori e superfici di contatto) dei sismostrati individuati.

La caratterizzazione in termini di velocità di propagazione sia delle onde di compressione sia di taglio consente il computo, per ogni livello sismico individuato, dei principali moduli elasto-dinamici e del coefficiente di Poisson (Formule B1 - B5).

La prova trova un'ottima applicabilità con profondità delle coperture da esplorare inferiore ai 30-40 m. Qualora siano necessarie maggiori profondità d'indagine si può provvedere all'organizzazione di stese sismiche a rifrazione caratterizzate da maggiore lunghezza (poiché la profondità d'investigazione è funzione della distanza tra gli scoppi estremi); per basi sismiche di elevata estensione lineare (ad esempio di 480m) è preferibile l'utilizzo di sistemi sorgente mediante l'uso di esplosivo (utilizzato per prospezioni in onde P), ovvero caratterizzati da energia sufficiente a coprire le enormi distanze.

Indagini sismiche a rifrazione si rendono necessarie soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione discrete e quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno. Come è noto, si suppone che, nell'ambito della porzione di sottosuolo indagata, la distribuzione delle velocità sismiche sia crescente con la profondità; questa infatti è la condizione necessaria affinché si verifichi il fenomeno della doppia rifrazione, attraverso il quale, il treno d'onde sismico generato è in grado di essere registrato dai geofoni posti in superficie. Altrimenti, si potrà incorrere nel fenomeno cosiddetto dell'"orizzonte muto", ovvero nell'impossibilità di poter distinguere ed individuare strati con velocità di propagazione delle onde sismiche inferiori rispetto ai livelli sovrastanti.

Malgrado le limitazioni intrinseche nella metodologia ed il grado di dettaglio sicuramente inferiore rispetto alle altre tipologie di prospezione sismica, l'indagine a rifrazione consente di acquisire informazioni distribuite in un contesto bidimensionale con costi complessivi d'esecuzione contenuti. A tal fine, nell'ambito VEL, la fase di caratterizzazione del terreno tramite indagini sismiche a rifrazione (Volume 1A - Par A3.3) evidenziando, se presenti, particolari condizioni in grado di indurre potenzialmente fenomeni d'amplificazione locale, è utile per la successiva pianificazione delle indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche in foro, finalizzate all'approfondimento del quadro conoscitivo sulle conoscenze dei caratteri fisico-meccanici dei litotipi in un intorno più limitato.

#### 2B2.1.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e orizzontali per la generazione delle onde SH e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori rispettivamente a componente verticale ed orizzontale.

Va rilevato che le onde SH dirette e rifratte costituiscono sempre un primo arrivo rispetto alle onde di superficie (nella fattispecie le onde di Love) e che per brevi stendimenti risultano sufficientemente energetiche da poter essere registrate nonostante la loro attenuazione sia maggiore perché proporzionale a  $1/r$  in luogo di  $1/\sqrt{r}$  come accade per le onde di superficie ( $r$  è la distanza dal punto di energizzazione). Non esistono d'altra parte le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati proprie delle tecniche che utilizzano le onde superficiali.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- Sistema energizzante;
- Sistema di ricezione;
- Trigger;
- Sistema di acquisizione dati.

I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde SH) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.

Per la generazione in onde P, la sorgente è generalmente costituita da un grave in caduta libera (massa da 150 kg o superiore), secondariamente se la logistica



non lo consente, può essere utilizzato il cannoncino industriale (tipo “minibang” o similari) ed eventualmente la mazza sismica. Dovranno comunque essere evitati sistemi in grado di generare vibrazioni e/o rimbalzi durante la generazione del segnale, in grado di inficiare la lettura del segnale per l'intero sismogramma richiesto. Per l'energizzazione relativa a basi sismiche in onde P ad elevata estensione lineare (ad esempio stese sismiche di 480m con distanza intergeofonica di 20 metri), si potrà ricorrere all'utilizzo di esplosivo in quantità sufficiente da generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili.

Il sistema sorgente per le onde SH è generalmente costituito da un parallelepipedo di forma tale da poter essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa pesante. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.

L'accoppiamento parallelepipedo-terreno deve essere per “contatto” e non per “infissione”. Un buon accoppiamento tra parallelepipedo e terreno si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine (normalmente con dimensioni inferiori al limite superiore delle sabbie); nel caso, invece, di presenza di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole costituendo uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo energizzante.

Eventuali altri sistemi di energizzazione dovranno essere preventivamente comunicati e sottoposti a valutazione dalla Regione Toscana Settore Servizio Sismico Regionale Servizio Sismico Regionale prima del loro utilizzo.

Sono da evitare come punti di energizzazione, qualora possibile, zone in cui affiorino rocce compatte o asfalti.

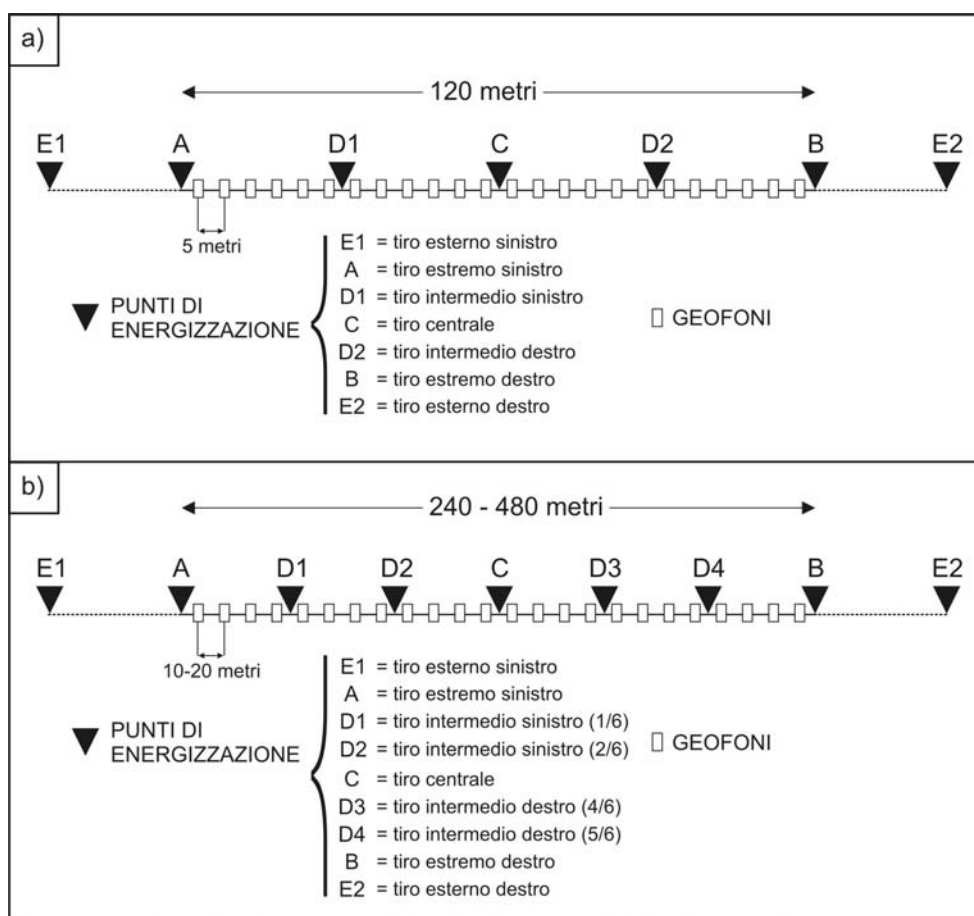
Per ogni base sismica per il Programma VEL si richiede un minimo di 7 registrazioni (“scoppi” o “tiri”), secondo il seguente schema:

Esterno sinistro	Estremo sinistro	Intermedio sinistro	Centrale	Intermedio destro	Estremo destro	Esterno destro
------------------	------------------	---------------------	----------	-------------------	----------------	----------------

Per le linee di lunghezza pari a 240 m verranno eseguiti ulteriori due scoppi per un totale complessivo di 9 scoppi. Tali tiri dovranno essere effettuati nelle posizioni intermedie secondo il seguente schema:

Est. sx	Estr. sx	Interm. a 1/6	Interm. a 2/6	Centr.	Interm. a 4/6	Interm. a 5/6	Estr. dx	Est. dx
---------	----------	---------------	---------------	--------	---------------	---------------	----------	---------

I "tiri" estremi (A e B) dovranno essere ubicati ad una distanza dal primo e dall'ultimo geofono pari alla metà della distanza intergeofonica utilizzata. Per quanto riguarda i "tiri" esterni alla base sismica (E1 ed E2) saranno posizionati, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, ad una distanza pari alla semilunghezza della base stessa. E' ovvio che a seconda delle diverse problematiche logistiche e delle finalità specifiche di ogni singola prospezione, per gli scoppi esterni verranno stabiliti dagli Uffici Regionali delle distanze minime dai geofoni 1 e 24.



**Figura 2B1** – Esempio di array sismico per una base di 120 m (a) e 240 m (b) con sistema ricevente composto da 24 geofoni

I geofoni vengono posizionati in genere ad una distanza intergeofonica di 5m sulla stesa di 120m (Figura 2B1a) e di 10m sulla stesa di 240m come indicato in Figura 2B1b.

I punti di energizzazione per le onde P e SH devono essere coincidenti. Le acquisizioni in onde P e SH dovranno essere effettuate nel corso della medesima giornata, a meno di condizioni particolari, autorizzate dalla Regione

Toscana. Di norma, la pratica comune prevede che l'acquisizione in onde P (generalmente meno problematica in contesti urbanizzati e logisticamente difficoltosi come i siti indagati dal Programma Regionale VEL) debba precedere l'omologa acquisizione in onde SH. Il sistema di ricezione è costituito da 24 geofoni verticali per le onde P con frequenza propria variabile tra 4 e 14 HZ e 24 geofoni orizzontali per le onde SH con frequenza variabile tra 4,5 Hz e 15 Hz.

Eventuali modifiche della geometria di acquisizione potranno essere previste dalla Regione Toscana Settore Servizio Sismico Regionale, previa comunicazione.

Per l'acquisizione in onde P i geofoni devono essere ben accoppiati sul terreno e posizionati verticalmente; l'acquisizione in SH prevede, invece, che i geofoni debbano essere ben accoppiati sul terreno, posizionati verticalmente e con l'asse di oscillazione parallelo al parallelepipedo energizzante. Il parallelepipedo energizzante sarà posto con l'asse maggiore perpendicolare alla direzione di stendimento.

Eventuali basi sismiche consecutive dovranno essere sovrapposte, verificata la fattibilità logistica per distanza pari ad almeno 3 spaziature intergeofoniche.

Il Trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e la produzione di un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Nel caso di sistemi d'energizzazione che prevedano l'utilizzo dell'esplosivo, il Trigger consisterà in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la microcarica di esplosivo, posizionata in tubi di ABS o PVC collocati in fori opportunamente predisposti, viene fatta brillare mediante detonatori elettrici antistatici istantanei (IPS). L'attivazione avviene mediante un esploditore collegato alla strumentazione di acquisizione e registrazione (sismografo). In ogni caso, l'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve, all'atto delle sollecitazioni ripetute, consentire una differenza di chiusura non superiore a 1 msec.

Il sistema di acquisizione dati deve essere di tipo multicanale (24 canali) in grado di registrare su ciascuno di essi in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minimo a 16 bit.

Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità al trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger.

Il sistema deve avere anche le seguenti caratteristiche:

- lunghezza di registrazione pari a 1 sec. con passo di campionamento non inferiore a 0.500 msec;
- filtri per l'eliminazione delle interferenze derivanti da linee di tensione;
- filtri in acquisizione ed in uscita;
- essere dotato di un display in grado di visualizzare simultaneamente le 24 tracce o tracce selezionate;
- possibilità di registrazione su CD o su HD;
- sistema per l'effettuazione dell'inversione di inversione di polarità nell'acquisizione in onde SH.
- essere strumentato per la stampa istantanea delle registrazioni.

Le registrazioni dovranno essere stampate in campagna subito dopo l'acquisizione. Qualora il sismografo non sia dotato di stampante incorporata sarà possibile avvalersi di una stampante esterna. In qualunque caso la stampa dei sismogrammi dovrà essere effettuata direttamente in campagna al momento successivamente all'acquisizione. Sarà necessario, inoltre, accertare che la strumentazione sia settata correttamente per quanto riguarda l'ora e la data della registrazione.

Nel caso in cui la stampa di campagna non permetta di risalire correttamente alla data e all'ora dell'acquisizione, la Regione Toscana procederà all'annullamento del pagamento alla Ditta esecutrice.

Per i sismografi che non indicano nel film di stampa delle registrazioni il numero di stacks effettuati, dovrà essere fornita nella relazione una tabella che indichi per ogni acquisizione tale informazione.

L'esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengano realizzate le piazzole per il posizionamento dei sistemi energizzanti e vengano preparati gli strumenti di registrazione.

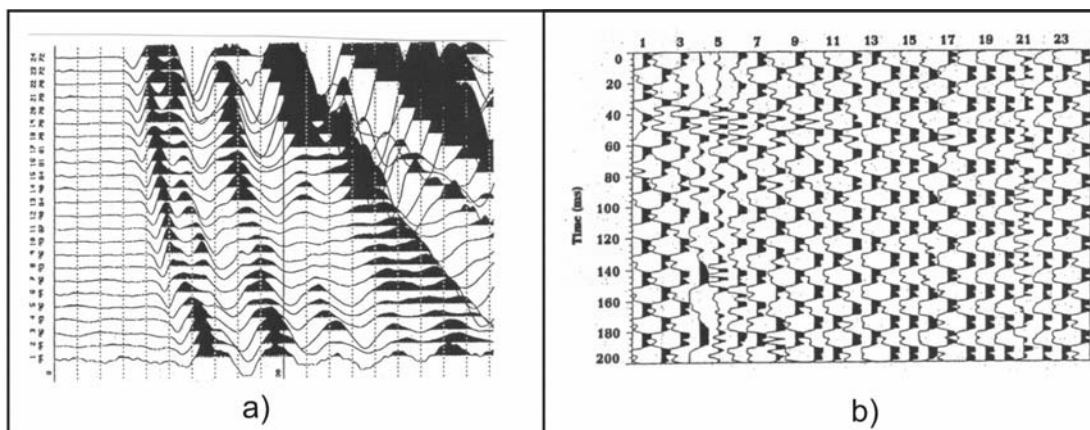
La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Dopo aver predisposto un'area per il sistema energizzante in onde P e collocati i geofoni verticali (secondo lo schema in Figura 2B1), viene attivata la sorgente (attivando parallelamente il trigger) facendo cadere il grave sul terreno, e permettendo la propagazione dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo compressionale.
2. terminate le operazioni in onde P, viene installato il sistema energizzante per le onde SH (dopo aver predisposto un opportuno piano di appoggio) e vengono collocati i geofoni orizzontali secondo lo schema in Figura 2B1.

3. Nel caso di energizzazioni con esplosivo, l'esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengono realizzati i fori per il posizionamento e brillamento delle cariche. Tali fori devono avere una profondità non inferiore ad 1.5 metri ed in essi vengono collocati tubi in ABS o PVC di diametro non inferiore ai 5 cm. Le cariche ed i relativi inneschi (detonatori elettrici) sono posizionate nella parte inferiore del tubo e opportunamente borrate con argilla, sabbia o altro materiale inerte in maniera da ridurre al minimo, in superficie, gli effetti dello scoppio. Dopo aver predisposto i fori per l'esplosivo vengono collocati i geofoni verticali secondo le modalità sopra descritte e successivamente vengono fatte brillare le cariche ed eseguite, per ciascun punto di scoppio, le relative registrazioni.
4. La sorgente viene attivata producendo, su un lato del parallelepipedo, una sollecitazione che attiva il trigger e si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo SH, dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Poiché si devono ricavare onde SH, per consentire la registrazione di dati caratterizzati da buona qualità, è necessario produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sottrarre battuta sinistra e battuta destra, in modo da individuare meglio l'istante di primo arrivo (metodo cross - over). E' preferibile che questa operazione venga eseguita direttamente in campagna, ovvero in fase di acquisizione, ed è per tale motivo che la strumentazione utilizzata deve essere in grado di eseguire l'inversione di polarità.
5. Il tempo di registrazione deve essere pari ad 1 sec, mantenendo il miglior passo di campionamento possibile. Tale esigenza deriva dalla possibilità di utilizzare i dataset sismici acquisiti per estensioni delle indagini attraverso differenti modalità interpretative.

Le registrazioni devono risultare chiare e tali da consentire univoche individuazioni dei primi arrivi, pertanto devono essere privilegiate registrazioni ad un solo stack, evitando la sommatoria (signal enhancement) che "sporca" il segnale in quanto somma il rumore di fondo. Tuttavia, in ambito VEL le prospezioni saranno realizzate prevalentemente in zone urbanizzate con elevato rumore di fondo (acquedotti, fognature, cavi per l'energia elettrica, caldaie, traffico veicolare, particolari attività lavorative con macchinari ed utensili). Il Comune provvederà a limitare il traffico, possibilmente a ridurre gli altri rumori. L'impresa al fine di consentire la chiara individuazione dei primi arrivi, dovrà eseguire più battute. Nel caso, nonostante le attenzioni per la limitazione del rumore di fondo e l'effettuazione di un numero adeguato di stacks (di norma non inferiore a 50 battute), questo fosse comunque elevato e tale da non consentire una registrazione di qualità, l'impresa deve sospendere i lavori e comunicare le difficoltà alla Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale per concordare le possibili soluzioni.

In Figura 2B2 sono rappresentate registrazioni in P di buona qualità (a) e registrazioni in P di pessima qualità (b).



**Figura 2B2** – Esempio di registrazioni di buona (a) e pessima qualità (b), relative ad indagini sismiche a rifrazione

### 2B2.1.2 ELABORAZIONE DATI

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 con particolare riferimento al caso di morfologie ondulate sia della superficie topografica sia dei rifrattori, come ad esempio il “metodo reciproco” ed il “metodo reciproco generalizzato”.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P e SH – può scomporsi in quattro fasi fondamentali:

- Individuazione del primo arrivo in P;
- Individuazione del primo arrivo in SH;
- Ricostruzione delle dromocrona e relativa interpretazione in P;
- Ricostruzione delle dromocrona e relativa interpretazione in SH;
- Definizione dei moduli dinamici.

Sebbene la letteratura scientifica preveda, per le indagini sismiche a rifrazione, molteplici modalità interpretative, nell'ambito del Progetto VEL verrà richiesta un'elaborazione “classica” dei dataset di campagna, secondo metodologie quali il metodo dei tempi intercetti, del Delay-time e GRM.

Attraverso questo approccio sarà possibile ottenere sezioni sismostratigrafiche in cui vengono definite distribuzioni discrete delle velocità e dei relativi rifrattori.

I risultati delle suddette indagini potranno essere, quindi, tarati con i dati di ulteriori e successive indagini geofisiche di dettaglio e confrontate con i risultati ottenuti dall'esecuzione delle indagini geognostiche e geotecniche, al fine di

verificarne l'attendibilità ed il grado d'errore intrinseco, e, conseguentemente, di giungere ad un coerente modello geologico-tecnico del sottosuolo.

### 2B2.1.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Per le indagini svolte dovrà essere fornita:

*1. Una relazione generale (Appendice 2B1a) in cui sono specificati:*

- a) obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto dalla Regione Toscana e fornito al Committente;
- b) Piano di sicurezza dell'Impresa (se richiesto dalla vigente normativa) e Piano di controllo di qualità qualora l'Impresa è certificata;
- c) risultati delle indagini ed eventuali osservazioni.

La relazione generale deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n.3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n.2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

*2. Una relazione tecnica per ciascuna linea sismica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti:*

- a) la descrizione delle procedure eseguite e della strumentazione utilizzata;
- b) la planimetria CTR in scala 1:5000, ove esistente, per un inquadramento di massima e per una visione più generale del sito di indagine e dello stendimento. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1:10.000 (Appendice 2B1b);
- c) la planimetria su base CTR 1:2000 ingrandita in scala 1:1000 con l'ubicazione della linea sismica, il posizionamento dei geofoni e delle energizzazioni interne ed esterne alla linea per visualizzare su carta la geometria di acquisizione. Per quanto riguarda le sette energizzazioni occorrerà identificarle in modo univoco nella maniera indicata negli esempi in Appendice 2B1c;
- d) uno schema dettagliato della linea sismica al fine di caratterizzare la geometria di acquisizione (Appendice 2B1d): dovranno essere indicate le posizioni relative dei geofoni, dei punti di scoppio e le relative distanze e quote; inoltre andranno esplicitati chiaramente i nomi dei files di campagna relativi ad ogni energizzazione. Per ogni linea, al fine di agevolare la georeferenziazione, andranno fornite le coordinate in Gauss-Boaga del primo

e dell'ultimo geofono. Qualora lo stendimento sia una spezzata dovranno essere fornite le coordinate degli estremi della spezzata;

- e) la stampa istantanea delle registrazioni di campagna corredata del numero di stack; per le onde SH la stampa relativa alla differenza battuta destra- battuta sinistra (Appendice 2B1e). Per i sismografi che non indicano nel film di stampa delle registrazioni il numero di stacks effettuati, dovrà essere fornita nella relazione una tabella che indichi per ogni acquisizione tale informazione. Sebbene sia richiesta una lunghezza di registrazione pari ad 1 secondo, il sismografo dovrà essere settato in visualizzazione con una lunghezza tale da permettere il chiaro riconoscimento del trend dei primi arrivi; la lunghezza di registrazione, nonché le caratteristiche tecniche di acquisizione, andranno chiaramente espresse in relazione;
- f) i tempi di propagazione delle onde P ed SH osservati ai geofoni relativi ai vari scoppi (Appendice 2B1f);
- g) il diagramma tempi di arrivo-distanze ("dromocrone sismiche") relativamente alle onde P ed SH distinguendo con simboli diversi ciascun set di registrazioni (Appendice 2B1g);
- h) le profondità dei vari rifrattori individuati (Appendice 2B1h) e le relative velocità sismiche (Appendice 2B1i) sia per le onde P che per le SH. Al fine di valutare le modalità di realizzazione delle sezioni sismostratigrafiche i valori di velocità e di profondità dovranno essere definiti e/ o rappresentati in riferimento ai valori di ascissa in corrispondenza dei quali sono stati calcolati dal programma e comunque almeno relativamente alle posizioni dei punti di scoppio ;
- i) la sezione sismostratigrafica relativa sia alle dromocrone in P che in SH. In essa dovranno essere indicati i valori di velocità, la topografia e lo spessore dei sismostrati individuati (Appendice 2B1j);
- j) la sezione litostratigrafica interpretativa finale con una legenda in cui sono indicati i diversi litotipi individuati sulla base della cartografia geologica e geomorfologica fornita dal Committente (Appendice 2B1l). Il passaggio dal dato sismostratigrafico (punto 2.i) alla sezione litostratigrafica dovrà essere realizzato a cura di un geologo, in grado di seguire, alla luce delle sue conoscenze specifiche, l'interpretazione del dato geofisico in funzione della natura geologico-tecnica dei terreni indagati, presunta dalla realizzazione dei rilievi di superficie. La sezione litostratigrafica fornita dovrà essere campita per tutta l'area corrispondente alla massima profondità indagata e dovrà contenere dei riferimenti topografici (corsi d'acqua, toponimi, edifici, strutture) che siano finalizzati alla corretta localizzazione della sezione nella zona in oggetto; tale allegato andrà redatto ad una scala adeguata a rappresentare i risultati ottenuti con sufficiente dettaglio. Nell'eventualità che non risultassero coincidenti le geometrie e le profondità dei rifrattori le sezioni litostratigrafiche dovranno essere fornite separatamente per le prospezioni in P e in SH;
- k) una relazione relativa ai risultati e alle conclusioni raggiunte;



- l) la documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione di ciascuna linea sismica. Dovrà essere fornita una foto per ogni base sismica in cui è indicata la progressione dei geofoni e le energizzazioni, laddove le condizioni logistico-morfologiche lo consentano, altrimenti saranno effettuate più foto. Sarà opportuno che risulti visibile l'intera linea, gli strumenti di energizzazione, il contesto ambientale e la congruenza tra l'ubicazione della linea nelle planimetrie e la stesa in campagna.

La relazione tecnica di cui al punto 2. deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

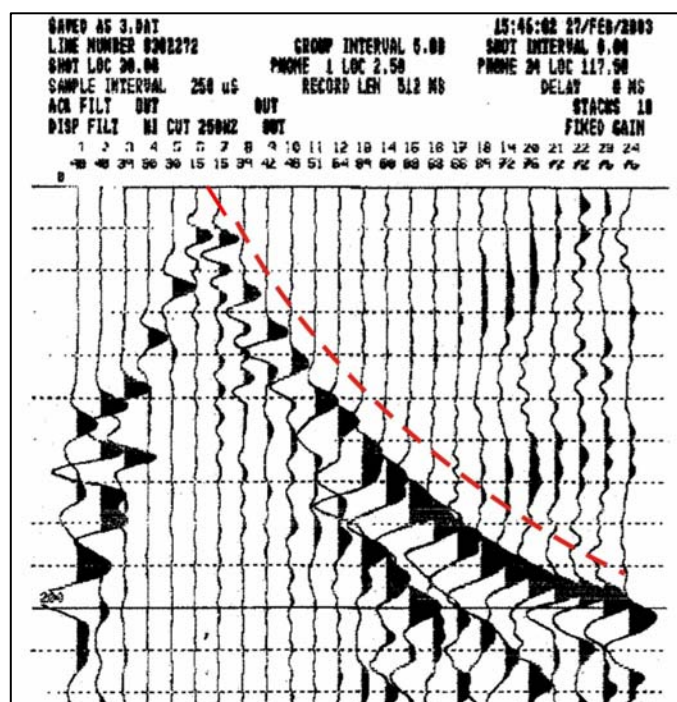
La documentazione fotografica di cui al punto l) deve essere consegnata in triplice copia in originale o in digitale su supporto CD.

### 3. Le registrazioni di campagna

Si richiede, in triplice copia, la consegna dei dati di registrazione su supporto CD.

#### 2B2.1.4 INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE MEDIANTE TECNICA TOMOGRAFICA

Qualora si riscontrasse, a seguito del picking dei primi arrivi delle onde sismiche, una forma curvilinea delle dromocrone, come visibile in Figura 2B3, verrà richiesta, dopo una valutazione preliminare da parte della Regione Toscana in collaborazione con i Consulenti Scientifici, un'interpretazione della prospezione sismica in tecnica tomografica.



**Fig. 2B3** – Andamento curvilineo dei primi arrivi in onde SH (linea tratteggiata rossa) ascrivibile all'aumento progressivo delle velocità sismiche

Infatti, in tali contesti, generalmente ascrivibili ad assetti sepolti caratterizzati da un punto di vista sismostratigrafico dall'assenza di grandi contrasti in termini di velocità sismiche e conseguente aumento progressivo delle velocità sismiche con la profondità, il classico approccio in fase di elaborazione dati (par. 2B2.1.2) porta inevitabilmente alla presenza di forti ambiguità interpretative e quindi al verificarsi di molteplici soluzioni egualmente coerenti.

Le caratteristiche di acquisizione di campagna rimarranno invariate rispetto alle configurazioni geometriche previste secondo l'approccio classico (vedi par. 2B2.1.1).

Dovrà essere utilizzato come input di prima iterazione il modello desunto dall'interpretazione sismostratigrafica classica (sia in termini di geometrie che di distribuzione delle velocità sismiche nel sottosuolo).

Per quanto riguarda la modalità di elaborazione e di presentazione dei risultati, mediante l'utilizzo della tecnica tomografica, si rimanda al par. 2B2.6.

#### 2B2.1.5 STANDARD DI VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Per il Programma VEL sono state predisposte una serie di definizioni per valutare la qualità dei dati acquisiti ai fini di una loro possibile utilizzazione per un'attendibile interpretazione ai fini geologici. La valutazione dei risultati sarà effettuata da referenti scientifici incaricati dalla Regione Toscana, i quali dovranno rispettare, nelle loro valutazioni, i seguenti parametri:

*Valutazione delle registrazioni:* la chiara lettura del segnale costituisce l'elemento essenziale per procedere alle successive operazioni di interpretazione ed elaborazione, pertanto il segnale di tutte le registrazioni si deve leggere per tutte le tracce e per tutti i punti di misura.

*Valutazione della congruenza tra dromocrone ed i dati di registrazione:* il presupposto della congruenza è la buona individuazione del primo arrivo, pertanto le dromocrone devono essere perfettamente congruenti con i dati di registrazione.

*Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone:* nella fase di interpretazione devono essere rispettati il numero degli strati evidenziati nelle dromocrone ed analizzate le eventuali variazioni di velocità e profondità dei singoli sismostrati, pertanto l'interpretazione

sismostratigrafica deve essere perfettamente congruente con le dromocrone.

*Valutazione della congruenza tra l'interpretazione litostratigrafica e le conoscenze geologiche della zona indagata:* Le sezioni geologiche interpretative eseguite dall'impresa dovranno essere ispirate a conoscenze geologico-strutturali di dettaglio delle aree indagate; sarà quindi necessario utilizzare per una corretta interpretazione delle sezioni sismostratigrafiche non solo una cartografia a grande scala, ma anche una cartografia a scala minore che possa consentire di inquadrare le problematiche geologiche locali in un contesto regionale. In particolare devono essere valutati gli spessori, le attribuzioni formazionali ed eventuali discontinuità rilevate.

Le seguenti definizioni, sono state predisposte dal Prof. P. Signanini e dal Prof. M.L. Rainone del DIGAT dell'Università di Chieti, sulla base di una specifica richiesta dei tecnici regionali e degli esperti del Dip. di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, per una possibile utilizzazione dei dati consegnati dall'Impresa ai fini di un'attendibile interpretazione ai fini geologici. Finalità per la quale sono state previste le indagini di sismica a rifrazione.

#### 1. Valutazione delle registrazioni

La chiara lettura del segnale costituisce l'elemento essenziale per procedere alle successive operazioni d'interpretazione ed elaborazione. A tal fine si individuano quattro classi di valutazione:

- ⇒ **A:** il segnale di tutte le registrazioni si legge fino in fondo, ivi compreso quello degli ultimi geofoni. Si può procedere alla ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica è possibile;
- ⇒ **B:** il segnale di quasi tutte le registrazioni, si legge fino in fondo e solo talora appaiono disturbati i segnali degli ultimi geofoni per mancanza di energia. Si può procedere alla ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica è possibile con qualche approssimazione;
- ⇒ **C:** il segnale di gran parte delle registrazioni, si riesce a leggere facilmente solo per circa 2/3 delle tracce. Risulta difficoltosa la ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica non è possibile, se non con molte approssimazioni; è necessario ripetere l'acquisizione;
- ⇒ **D:** il segnale nella maggior parte delle registrazioni, si riesce a leggere per meno della metà delle tracce. Risulta impossibile la ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica non è accettabile, perché le approssimazioni sarebbero elevate; è necessario ripetere l'acquisizione.

## 2. Valutazione della congruenza tra dromocrone ed i dati di registrazione

Il presupposto della congruenza è la buona individuazione del primo arrivo, a tal fine s'individuano due possibili classi di valutazione:

- ⇒ **A**: le dromocrone sono perfettamente congruenti con i dati di registrazione;
- ⇒ **B**: le dromocrone non sono perfettamente congruenti, tale incongruenza porta a richiedere il rifacimento delle operazioni d'elaborazione e d'interpretazione.

## 3. Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone

Nella fase d'interpretazione, devono essere rispettati il numero degli strati evidenziati nelle dromocrone ed analizzate le eventuali variazioni di velocità e profondità dei singoli sismostrati.

Vengono in tal senso individuate tre classi di valutazione:

- ⇒ **A**: l'interpretazione sismostratigrafica è perfettamente congruente con le dromocrone.
- ⇒ **B**: l'interpretazione sismostratigrafica è parzialmente congruente con le dromocrone. E' necessario affinare l'interpretazione.
- ⇒ **C**: l'interpretazione sismostratigrafica è incongruente con le dromocrone. E' necessario rieseguire l'interpretazione

## 4. Valutazione della congruenza tra l'interpretazione litostratigrafica e le conoscenze geologiche della zona indagata.

Le sezioni geologiche interpretative eseguite dall'impresa dovranno essere ispirate a conoscenze geologico-strutturali di dettaglio delle aree indagate; sarà quindi necessario utilizzare per una corretta interpretazione delle sezioni sismostratigrafiche non solo una cartografia a grande scala, ma anche una cartografia a scala minore che possa consentire di inquadrare le problematiche geologiche locali in un contesto regionale. In particolare devono essere valutati gli spessori, le attribuzioni formazionali ed eventuali discontinuità rilevate.

In presenza di sondaggi di taratura, precedenti alle indagini geofisiche, dovranno essere effettuate le relative correlazioni.

Vengono in tal senso individuati i seguenti criteri di valutazione:

- ⇒ **A**: piena congruenza tra il dato geofisico ed interpretazione geologica;
- ⇒ **B**: parziale congruenza tra il dato geofisico e l'interpretazione geologica;

⇒C: incongruenza tra il dato geofisico e l'interpretazione geologica.

Nel caso in cui vengano eseguiti sondaggi a carotaggio continuo nelle vicinanze delle linee sismiche, le interpretazioni geologiche delle sezioni sismostratigrafiche dovranno essere riviste e opportunamente tarate, alla luce della taratura fornita a seguito delle indagini puntuali.

La Regione Toscana autorizzerà il pagamento delle indagini solo se per ciascuna stesa i requisiti di qualità sopra specificati saranno soddisfatti contestualmente per i risultati della sismica a rifrazione in P e in SH.

Nel caso in cui non si verificano le suddette condizioni verranno richieste ulteriori elaborazioni e, se il dato non è in nessun modo utilizzabile, la nuova acquisizione.

## **APPENDICE 2B1a**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Esempio di copertina della Relazione a corredo dell'indagine sismica a rifrazione*

“logo e intestazione dell’Impresa”

**COMUNE DI .....**

*PROVINCIA DI .....*

**PROGRAMMA VEL-REGIONE TOSCANA**

**PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE CON ONDE P  
ED SH**

**RELAZIONE GENERALE**

**RELAZIONE TECNICA E  
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**

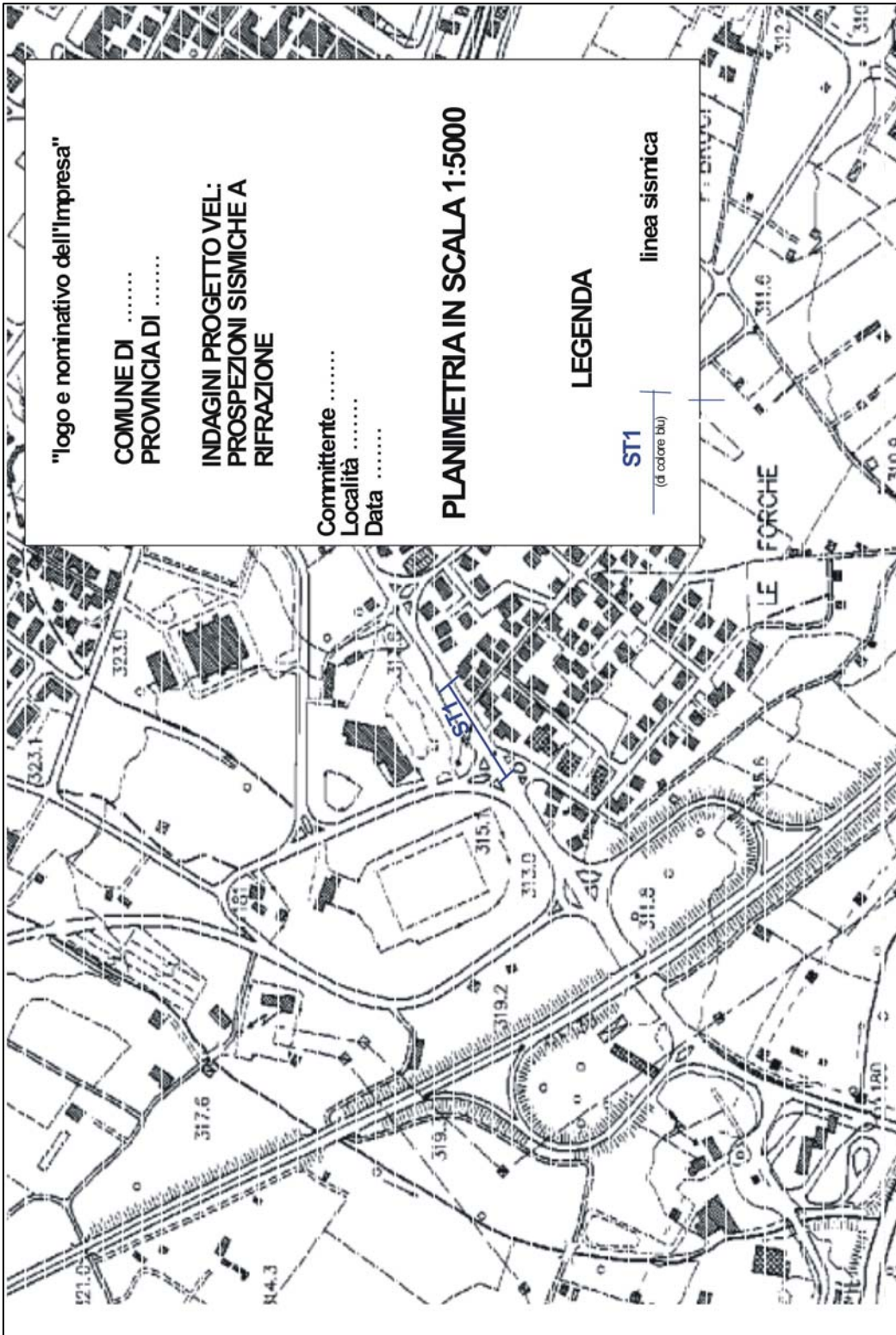
DATA.....

## **APPENDICE 2B1b**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Planimetria con ubicazione della base sismica (scala 1:5000)*

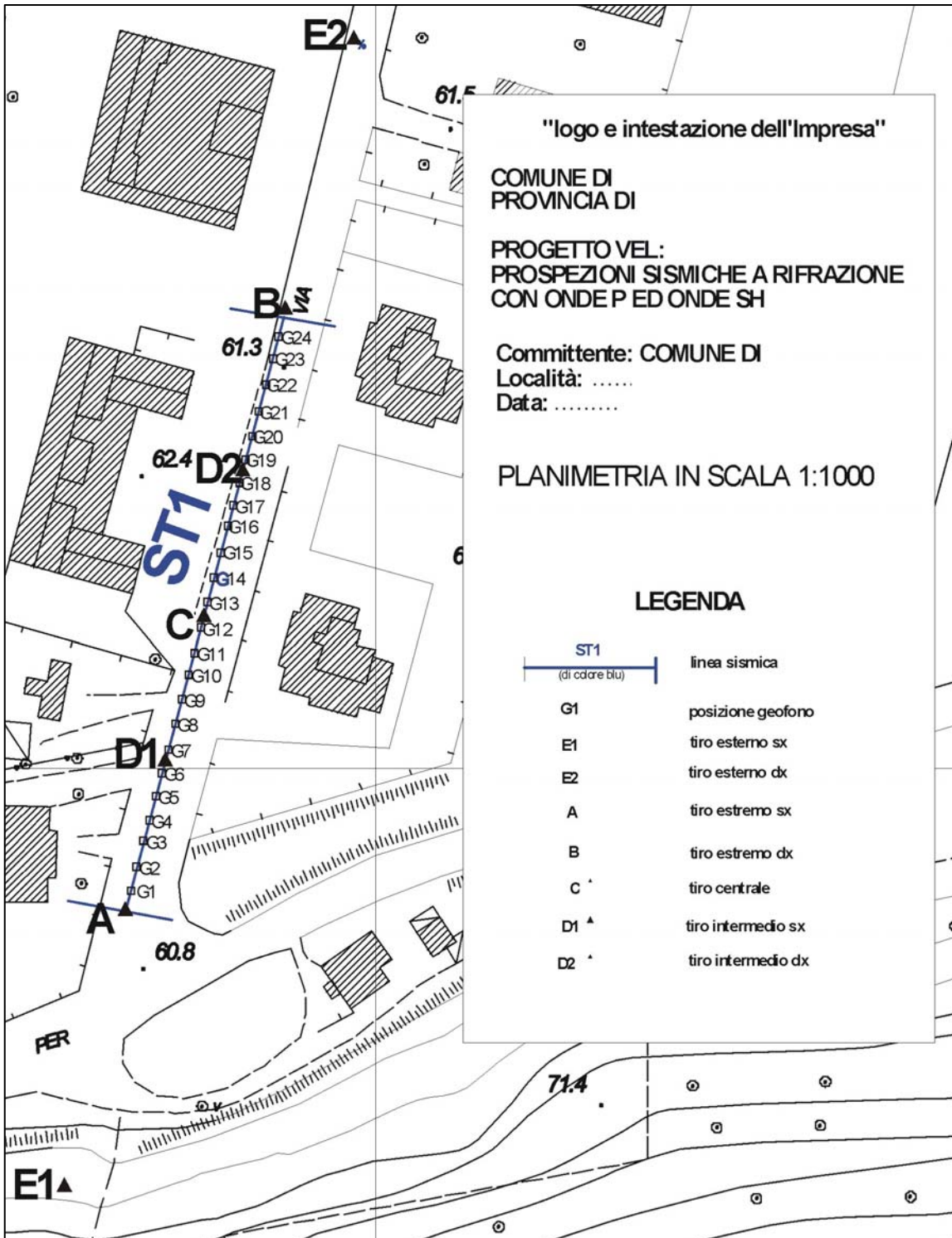




## **APPENDICE 2B1c**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Planimetria di dettaglio con ubicazione della base sismica (scala 1:1000)*



## **APPENDICE 2B1d**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Schema dettagliato della linea sismica*

LINEA SISMICA ST1

SCHEMA DETTAGLIATO DELLA LINEA DI ACQUISIZIONE

Geofoni n.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Distanza progressiva (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
Distanza parziale (m)	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Quota (m)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

COORDINATE GAUSS BOAGA DI G1 E G24

	<b>GEOFONO N.1 (G1)</b>	<b>GEOFONO N. 2 ( G24)</b>
X (m)	1.577.551,76	1.577.580,86
Y (m)	4.896.575,76	4.896.683,93

PUNTI DI ENERGIZZAZIONE

	<b>E1 ESTERNO SX</b>	<b>A ESTREMO SX</b>	<b>D1 INTERMEDIO SX</b>	<b>C CENTRALE</b>	<b>D2 INTERMEDIO DX</b>	<b>B ESTREMO DX</b>	<b>E2 ESTERNO DX</b>
ONDE P	Dir.1 File 1.dat	Dir.1 File2.dat	Dir.1 File3.dat	Dir.1 File4.dat	Dir.1 File5.dat	Dir.1 File6.dat	Dir.1 File7.dat
ONDE SH	Dir.2 File 1.dat	Dir.2 File2.dat	Dir.2 File3.dat	Dir.2 File4.dat	Dir.2 File5.dat	Dir.2 File6.dat	Dir.2 File7.dat
POSIZ. DAL GEOF. N.1 (m)	-60	-2.5	27.5	57.5	87.5	117.5	175
QUOTA (m)	50	50	50	50	50	50	50

Intestazione dell'Impresa

## **APPENDICE 2B1e**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Stampa istantanea delle registrazioni di campagna*

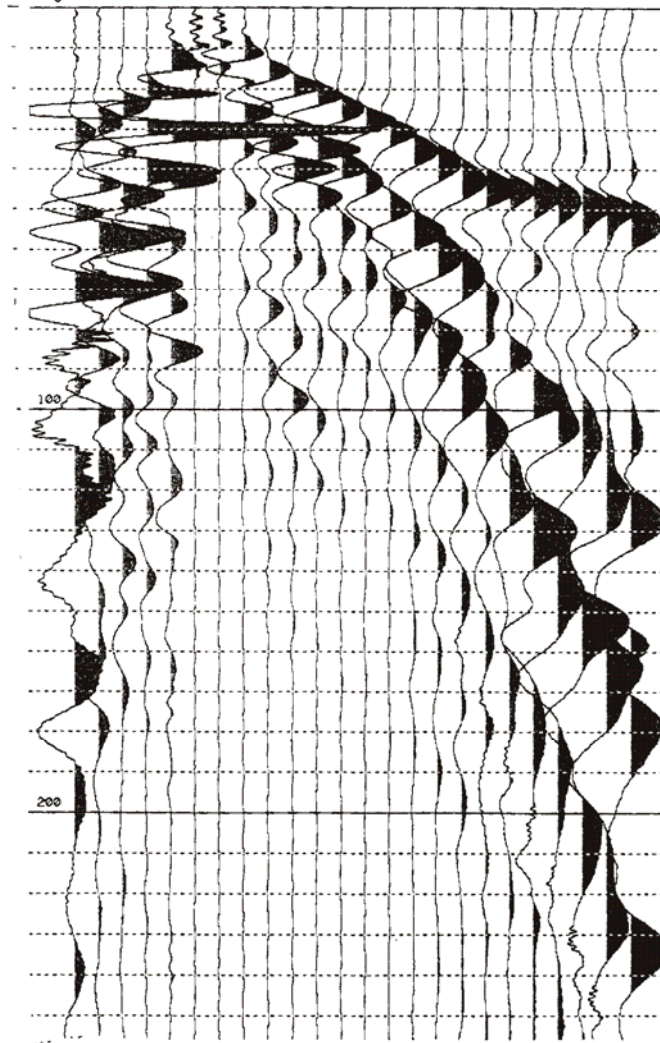
# LINEA SISMICA ST1

ONDE P  
STAMPA ISTANTANEA DELLE REGISTRAZIONI DI CAMPAGNA

## TIRO INTERMEDIO SINISTRO D1

LINE NUMBER 0102121      GROUP INTERVAL 5.00  
SHOT LOC 27.50      PHONE 1 LOC 0.00      PHONE 24 LOC 115.00  
SAMPLE INTERVAL 125 uS      RECORD LEN 256 MS      DELAY 8 MS  
ACQ FILT OUT      OUT      STACKS 5  
DISP FILT OUT      HI CUT 250HZ      FIXED GAIN

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
75	69	63	57	54	21	27	48	51	57	63	66	69	69	72	75	78	81	81	87	87	90	90	93





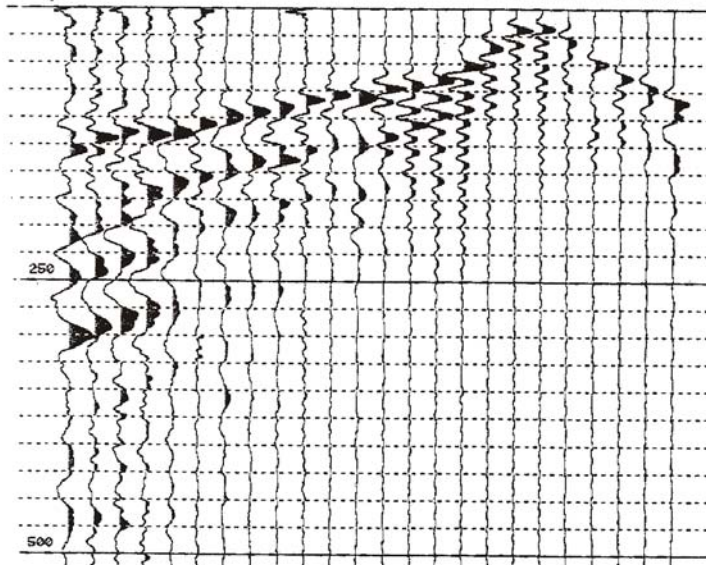
# LINEA SISMICA ST1

ONDE SH  
STAMPA ISTANTANEA DELLE REGISTRAZIONI DI CAMPAGNA

## TIRO INTERMEDIO DESTRO D2

SAVED AS S.DAT 14:33:12 12/FEB/2001  
LINE NUMBER 0102122 GROUP INTERVAL 5.00  
SHOT LOC 07.50 PHONE 1 LOC 0.00 PHONE 24 LOC 115.00  
SAMPLE INTERVAL 250 uS RECORD LEN 512 MS DELAY 0 MS  
ACQ FILT OUT OUT STACKS 36  
DISP FILT OUT HI CUT 250HZ FIXED GAIN

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
84	81	81	78	75	66	72	69	69	66	63	60	54	45	33	36	27	12	12	30	36	36	45	51





## **APPENDICE 2B1f**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Tempi di propagazione delle onde P ed SH osservati ai geofoni relativi ai vari scoppi*

## LINEA SISMICA ST1

### TEMPI DI PROPAGAZIONE: ONDE "P"

SCOPPIO (E2) - X (m) 142.00 QUOTA 100.00 PROF: .00

POSIZIONE	TEMPO	
	DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	41.300000	100.000000
5.000000	48.500000	100.000000
10.000000	56.000000	100.000000
15.000000	62.750000	100.000000
20.000000	68.750000	100.000000
25.000000	76.750000	100.000000
30.000000	81.250000	100.000000
35.000000	87.250000	100.000000
40.000000	92.500000	100.000000
45.000000	100.700000	100.000000
50.000000	102.700000	100.000000
55.000000	104.000000	100.000000
60.000000	107.200000	100.000000
65.000000	108.200000	100.000000
70.000000	107.000000	100.000000
75.000000	108.000000	100.000000
80.000000	109.000000	100.000000
85.000000	114.000000	100.000000
90.000000	117.000000	100.000000
95.000000	120.000000	100.000000
100.000000	123.000000	100.000000
105.000000	126.700000	100.000000
110.000000	128.200000	100.000000
115.000000	130.200000	100.000000

SCOPPIO (B) - X (m) 117.5 QUOTA 100.00 PROF: .00

POSIZIONE	TEMPO	
	DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	3.500000	100.000000
5.000000	7.000000	100.000000
10.000000	14.000000	100.000000
15.000000	20.250000	100.000000
20.000000	27.250000	100.000000
25.000000	33.250000	100.000000
30.000000	43.000000	100.000000
35.000000	50.250000	100.000000
40.000000	56.000000	100.000000
45.000000	61.000000	100.000000
50.000000	69.750000	100.000000
55.000000	73.500000	100.000000
60.000000	77.250000	100.000000
65.000000	81.500000	100.000000

70.000000	88.000000	100.000000
75.000000	95.750000	100.000000
80.000000	98.500000	100.000000
85.000000	101.000000	100.000000
90.000000	104.000000	100.000000
95.000000	107.200000	100.000000
100.000000	110.000000	100.000000
105.000000	113.200000	100.000000
110.000000	115.000000	100.000000
115.000000	117.250000	100.000000

**SCOPPIO (D2) - X (m) 87.50 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	39.000000	100.000000
5.000000	32.000000	100.000000
10.000000	22.500000	100.000000
15.000000	17.750000	100.000000
20.000000	12.000000	100.000000
25.000000	4.000000	100.000000
30.000000	4.000000	100.000000
35.000000	10.250000	100.000000
40.000000	16.250000	100.000000
45.000000	23.500000	100.000000
50.000000	30.500000	100.000000
55.000000	34.250000	100.000000
60.000000	42.000000	100.000000
65.000000	44.250000	100.000000
70.000000	53.750000	100.000000
75.000000	60.750000	100.000000
80.000000	66.250000	100.000000
85.000000	72.000000	100.000000
90.000000	79.000000	100.000000
95.000000	81.500000	100.000000
100.000000	91.000000	100.000000
105.000000	96.500000	100.000000
110.000000	103.000000	100.000000
115.000000	105.250000	100.000000

**SCOPPIO (C) - X (m) 57.50 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	74.250000	100.000000
5.000000	66.500000	100.000000
10.000000	59.000000	100.000000
15.000000	53.750000	100.000000
20.000000	49.000000	100.000000
25.000000	42.000000	100.000000
30.000000	35.000000	100.000000

35.000000	27.000000	100.000000
40.000000	20.000000	100.000000
45.000000	12.000000	100.000000
50.000000	6.800000	100.000000
55.000000	3.300000	100.000000
60.000000	3.300000	100.000000
65.000000	6.500000	100.000000
70.000000	12.800000	100.000000
75.000000	20.000000	100.000000
80.000000	26.250000	100.000000
85.000000	33.750000	100.000000
90.000000	41.000000	100.000000
95.000000	48.000000	100.000000
100.000000	55.000000	100.000000
105.000000	61.750000	100.000000
110.000000	68.750000	100.000000
115.000000	75.500000	100.000000

**SCOPPIO (D1) - X (m) 27.5 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	100.800000	100.000000
5.000000	98.000000	100.000000
10.000000	96.750000	100.000000
15.000000	91.000000	100.000000
20.000000	84.000000	100.000000
25.000000	78.500000	100.000000
30.000000	73.800000	100.000000
35.000000	66.500000	100.000000
40.000000	59.500000	100.000000
45.000000	53.300000	100.000000
50.000000	45.500000	100.000000
55.000000	39.800000	100.000000
60.000000	34.300000	100.000000
65.000000	29.500000	100.000000
70.000000	23.800000	100.000000
75.000000	17.800000	100.000000
80.000000	12.500000	100.000000
85.000000	4.000000	100.000000
90.000000	4.500000	100.000000
95.000000	14.000000	100.000000
100.000000	20.800000	100.000000
105.000000	25.500000	100.000000
110.000000	30.000000	100.000000
115.000000	35.300000	100.000000

**SCOPPIO (A) - X (m) -2.25 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
-----------	--------------------	-------

0.000000	124.250000	100.000000
5.000000	122.500000	100.000000
10.000000	120.000000	100.000000
15.000000	117.750000	100.000000
20.000000	118.250000	100.000000
25.000000	117.750000	100.000000
30.000000	113.200000	100.000000
35.000000	106.700000	100.000000
40.000000	99.000000	100.000000
45.000000	90.750000	100.000000
50.000000	81.500000	100.000000
55.000000	74.250000	100.000000
60.000000	65.750000	100.000000
65.000000	62.750000	100.000000
70.000000	57.750000	100.000000
75.000000	52.250000	100.000000
80.000000	47.750000	100.000000
85.000000	40.000000	100.000000
90.000000	33.250000	100.000000
95.000000	24.000000	100.000000
100.000000	19.000000	100.000000
105.000000	15.500000	100.000000
110.000000	7.250000	100.000000
115.000000	3.750000	100.000000

**SCOPPIO E2 - X (m) -30 QUOTA 100.00 PROF: .00**

	TEMPO	
POSIZIONE	DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	129.250000	100.000000
5.000000	127.500000	100.000000
10.000000	125.500000	100.000000
15.000000	123.000000	100.000000
20.000000	124.000000	100.000000
25.000000	123.500000	100.000000
30.000000	121.700000	100.000000
35.000000	120.200000	100.000000
40.000000	118.500000	100.000000
45.000000	116.200000	100.000000
50.000000	113.200000	100.000000
55.000000	112.000000	100.000000
60.000000	110.500000	100.000000
65.000000	107.500000	100.000000
70.000000	100.000000	100.000000
75.000000	95.500000	100.000000
80.000000	91.750000	100.000000
85.000000	84.750000	100.000000
90.000000	79.500000	100.000000
95.000000	75.250000	100.000000
100.000000	69.750000	100.000000
105.000000	61.000000	100.000000
110.000000	53.750000	100.000000
115.000000	45.500000	100.000000

## LINEA SISMICA ST1

### TEMPI DI PROPAGAZIONE: ONDE "SH"

SCOPPIO (E2) - X (m)	142.00 QUOTA	100.00 PROF:	.00
POSIZIONE	TEMPO	DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	58.500000	100.000000	
5.000000	69.500000	100.000000	
10.000000	78.000000	100.000000	
15.000000	87.750000	100.000000	
20.000000	94.750000	100.000000	
25.000000	103.500000	100.000000	
30.000000	110.500000	100.000000	
35.000000	117.000000	100.000000	
40.000000	127.000000	100.000000	
45.000000	140.500000	100.000000	
50.000000	157.000000	100.000000	
55.000000	159.200000	100.000000	
60.000000	170.200000	100.000000	
65.000000	176.000000	100.000000	
70.000000	187.500000	100.000000	
75.000000	196.700000	100.000000	
80.000000	204.200000	100.000000	
85.000000	214.200000	100.000000	
90.000000	235.500000	100.000000	
95.000000	243.200000	100.000000	
100.000000	252.000000	100.000000	
105.000000	255.200000	100.000000	
110.000000	260.000000	100.000000	
115.000000	262.200000	100.000000	

SCOPPIO (B) - X (m)	117.5 QUOTA	100.00 PROF:	.00
POSIZIONE	TEMPO	DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	5.250000	100.000000	
5.000000	10.250000	100.000000	
10.000000	20.750000	100.000000	
15.000000	34.000000	100.000000	
20.000000	45.000000	100.000000	
25.000000	54.500000	100.000000	
30.000000	63.250000	100.000000	
35.000000	71.000000	100.000000	
40.000000	80.500000	100.000000	
45.000000	89.750000	100.000000	
50.000000	101.500000	100.000000	
55.000000	113.000000	100.000000	
60.000000	128.200000	100.000000	
65.000000	137.700000	100.000000	
70.000000	145.700000	100.000000	
75.000000	155.000000	100.000000	
80.000000	164.700000	100.000000	
85.000000	173.000000	100.000000	

90.000000	183.700000	100.000000
95.000000	187.200000	100.000000
100.000000	213.200000	100.000000
105.000000	217.200000	100.000000
110.000000	220.500000	100.000000
115.000000	224.200000	100.000000

**SCOPPIO (D2) - X (m) 87.50 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	59.000000	100.000000
5.000000	47.500000	100.000000
10.000000	37.500000	100.000000
15.000000	26.800000	100.000000
20.000000	16.800000	100.000000
25.000000	6.800000	100.000000
30.000000	6.750000	100.000000
35.000000	17.000000	100.000000
40.000000	27.500000	100.000000
45.000000	41.300000	100.000000
50.000000	53.500000	100.000000
55.000000	57.800000	100.000000
60.000000	71.000000	100.000000
65.000000	77.500000	100.000000
70.000000	86.500000	100.000000
75.000000	96.500000	100.000000
80.000000	111.200000	100.000000
85.000000	122.200000	100.000000
90.000000	132.000000	100.000000
95.000000	137.500000	100.000000
100.000000	146.000000	100.000000
105.000000	160.500000	100.000000
110.000000	168.500000	100.000000
115.000000	176.700000	100.000000

**SCOPPIO (C) - X (m) 57.50 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	121.200000	100.000000
5.000000	116.500000	100.000000
10.000000	109.000000	100.000000
15.000000	96.000000	100.000000
20.000000	84.000000	100.000000
25.000000	71.250000	100.000000
30.000000	61.000000	100.000000
35.000000	47.500000	100.000000
40.000000	34.750000	100.000000
45.000000	22.500000	100.000000
50.000000	11.500000	100.000000
55.000000	5.750000	100.000000
60.000000	5.250000	100.000000
65.000000	10.500000	100.000000

70.000000	22.750000	100.000000
75.000000	38.000000	100.000000
80.000000	50.000000	100.000000
85.000000	62.250000	100.000000
90.000000	72.750000	100.000000
95.000000	80.250000	100.000000
100.000000	91.250000	100.000000
105.000000	101.200000	100.000000
110.000000	111.500000	100.000000
115.000000	122.200000	100.000000

**SCOPPIO (D1) - X (m) 27.5 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	176.000000	100.000000
5.000000	169.200000	100.000000
10.000000	161.200000	100.000000
15.000000	153.500000	100.000000
20.000000	141.500000	100.000000
25.000000	131.200000	100.000000
30.000000	121.500000	100.000000
35.000000	107.700000	100.000000
40.000000	95.000000	100.000000
45.000000	88.750000	100.000000
50.000000	78.250000	100.000000
55.000000	72.000000	100.000000
60.000000	60.250000	100.000000
65.000000	56.750000	100.000000
70.000000	44.000000	100.000000
75.000000	31.500000	100.000000
80.000000	16.500000	100.000000
85.000000	5.750000	100.000000
90.000000	5.750000	100.000000
95.000000	16.500000	100.000000
100.000000	29.500000	100.000000
105.000000	46.500000	100.000000
110.000000	58.000000	100.000000
115.000000	71.500000	100.000000

**SCOPPIO (A) - X (m) -2.25 QUOTA 100.00 PROF: .00**

POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	226.000000	100.000000
5.000000	218.200000	100.000000
10.000000	210.700000	100.000000
15.000000	201.500000	100.000000
20.000000	190.000000	100.000000
25.000000	181.200000	100.000000



30.000000	170.500000	100.000000
35.000000	158.500000	100.000000
40.000000	145.500000	100.000000
45.000000	137.000000	100.000000
50.000000	130.700000	100.000000
55.000000	124.000000	100.000000
60.000000	115.200000	100.000000
65.000000	109.500000	100.000000
70.000000	99.500000	100.000000
75.000000	95.250000	100.000000
80.000000	83.250000	100.000000
85.000000	76.250000	100.000000
90.000000	66.500000	100.000000
95.000000	54.250000	100.000000
100.000000	42.750000	100.000000
105.000000	32.500000	100.000000
110.000000	13.250000	100.000000
115.000000	6.500000	100.000000

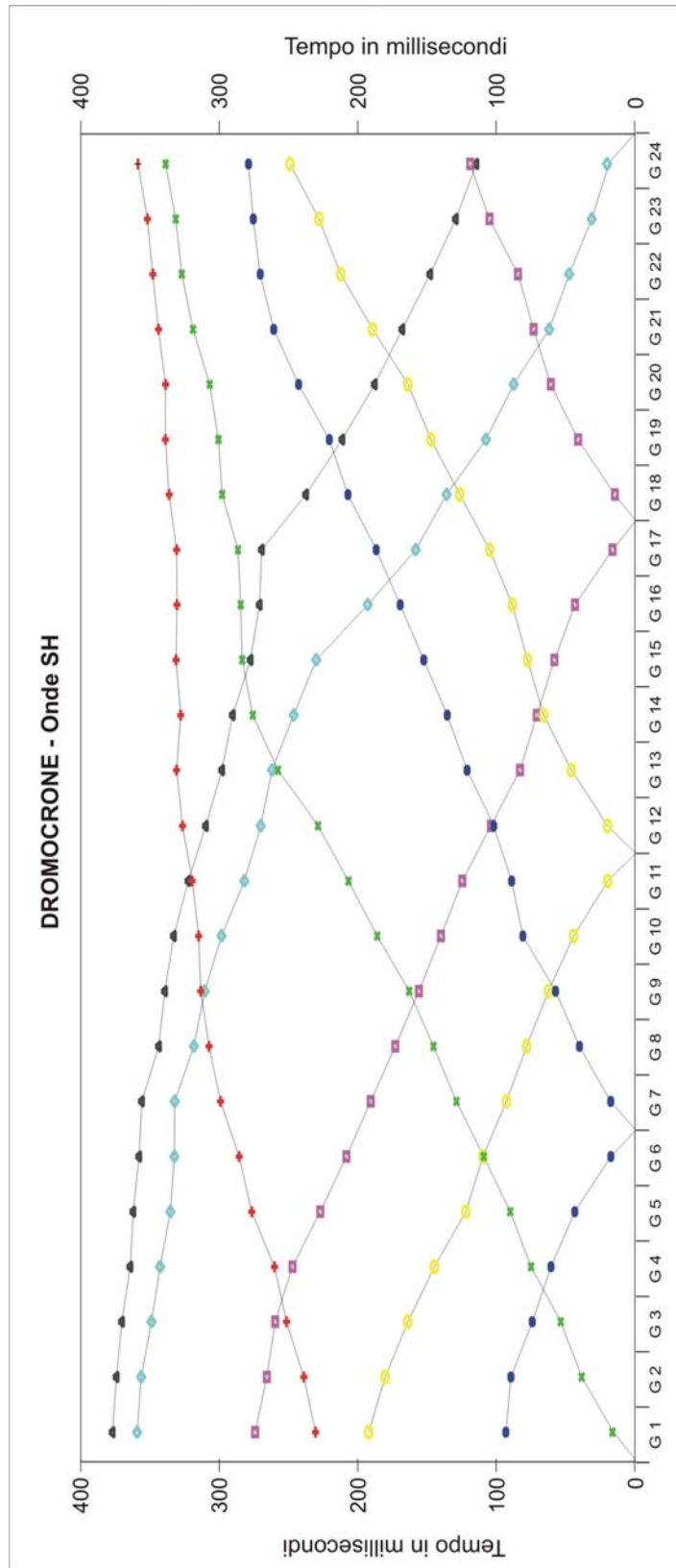
**SCOPPIO E2 - X (m) -30 QUOTA 100.00 PROF: .00**

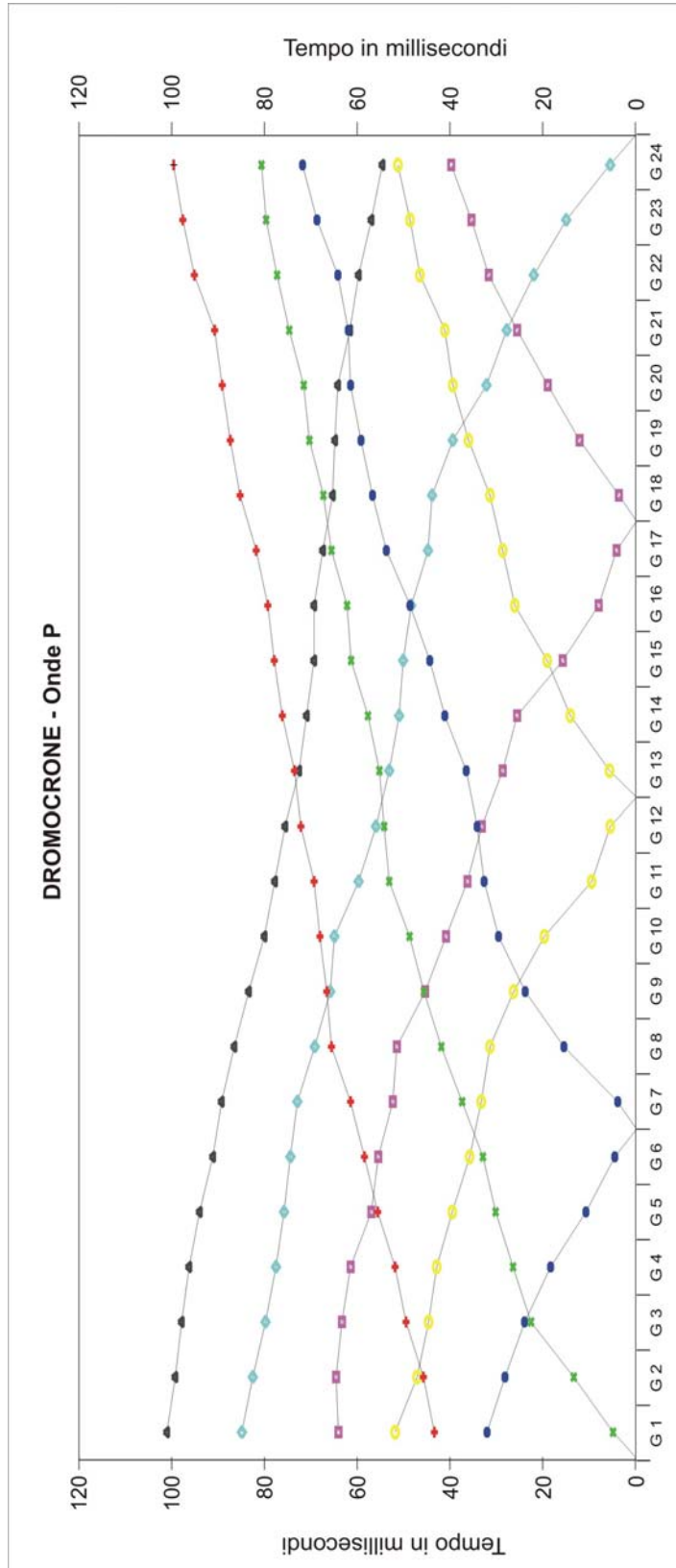
POSIZIONE	TEMPO DI ARRIVO	QUOTA
0.000000	253.700000	100.000000
5.000000	249.700000	100.000000
10.000000	247.000000	100.000000
15.000000	243.200000	100.000000
20.000000	240.000000	100.000000
25.000000	224.200000	100.000000
30.000000	209.500000	100.000000
35.000000	207.000000	100.000000
40.000000	203.200000	100.000000
45.000000	197.000000	100.000000
50.000000	186.000000	100.000000
55.000000	181.200000	100.000000
60.000000	174.200000	100.000000
65.000000	166.200000	100.000000
70.000000	158.000000	100.000000
75.000000	152.200000	100.000000
80.000000	138.500000	100.000000
85.000000	122.000000	100.000000
90.000000	114.200000	100.000000
95.000000	109.200000	100.000000
100.000000	102.500000	100.000000
105.000000	97.300000	100.000000
110.000000	83.000000	100.000000
115.000000	77.750000	100.000000

## **APPENDICE 2B1g**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Diagramma tempi di arrivo-distanze (“dromocrone sismiche”)*





## **APPENDICE 2B1h**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Tabella delle profondità dei rifrattori individuati*

## LINEA SISMICA ST1

### PROFONDITA' CALCOLATE PER I RIFRATTORI INDIVIDUATI: ONDE "P"

STRATO # 2

ASCISSA	PROFONDITÀ
0.000000	23.798430
2.600000	23.890900
5.100000	24.463140
7.600000	24.745140
10.100000	25.276920
12.600000	25.508470
15.100000	25.475930
17.600000	25.757030
20.100000	26.781770
22.600000	27.246280
25.100000	27.612870
27.600000	27.728830
30.100000	28.050590
32.600000	27.864830
35.100000	27.786030
37.600000	28.028760
40.100000	28.479990
42.600000	28.526790
45.100000	28.697950
47.600000	28.493210
50.100000	28.390480
52.600000	28.384760
55.100000	28.852800
57.600000	29.015930
60.100000	28.761810
62.600000	28.310560
65.100000	27.962040
67.600000	27.616120
70.100000	27.372660
72.600000	26.931550
75.100000	26.792690
77.600000	26.769810
80.100000	26.948980
82.600000	27.192500
85.100000	27.535990
87.600000	28.193360
90.100000	28.950790
92.600000	29.194470
95.100000	29.952120
97.600000	30.709930
100.100000	31.154070
102.600000	31.398420
105.100000	31.743030
107.600000	31.987800

## LINEA SISMICA ST1

### PROFONDITA' CALCOLATE PER I RIFRATTORI INDIVIDUATI: ONDE "SH"

STRATO # 2

ASCISSA	PROFONDITÀ
0.000000	34.951670
2.600000	35.020430
5.100000	35.089230
7.600000	35.158070
10.100000	35.226960
12.600000	35.295890
15.100000	35.364870
17.600000	35.433890
20.100000	35.502950
22.600000	35.572060
25.100000	35.641200
27.600000	35.488260
30.100000	35.335110
32.600000	35.181730
35.100000	35.028150
37.600000	34.874350
40.100000	34.720330
42.600000	34.566100
45.100000	34.411640
47.600000	34.256970
50.100000	34.102060
52.600000	33.946930
55.100000	33.872980
57.600000	33.798790
60.100000	33.724370
62.600000	33.649710
65.100000	33.574810
67.600000	33.499670
70.100000	33.424300
72.600000	33.348690
75.100000	33.272850
77.600000	33.196760
80.100000	33.120440
82.600000	33.663350
85.100000	34.209980
87.600000	34.760410
90.100000	35.314670
92.600000	35.872850
95.100000	36.434990
97.600000	37.001140
100.100000	37.571390
102.600000	38.145810
105.100000	38.724430
107.600000	39.307350

Intestazione dell'Impresa

## **APPENDICE 2B1i**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Tabella delle velocità sismiche individuate per i diversi rifrattori*



## LINEA SISMICA ST1

### VELOCITA' SISMICHE CALCOLATE PER I RIFRATTORI INDIVIDUATI: ONDE "P"

I.T. paragrafo B.1.2.1.: "Modalità di presentazione dei risultati" - punto  
2.h<sub>3</sub>)

STRATO # 1		STRATO # 2	
ASCISSA	VELOCITÀ	ASCISSA	VELOCITÀ
2.600000	728.045800	2.600000	2228.191000
5.100000	727.782700	5.100000	2224.206000
7.600000	727.519500	7.600000	2220.220000
10.100000	727.256400	10.100000	2245.800000
12.600000	726.993300	12.600000	2241.814000
15.100000	726.730200	15.100000	2237.829000
17.600000	726.467100	17.600000	2233.844000
20.100000	726.204000	20.100000	2229.858000
22.600000	725.940900	22.600000	2225.873000
25.100000	725.677700	25.100000	2221.887000
27.600000	726.535300	27.600000	2230.663000
30.100000	727.392800	30.100000	2239.438000
32.600000	728.250300	32.600000	2238.649000
35.100000	729.107800	35.100000	2237.424000
37.600000	729.965300	37.600000	2232.861000
40.100000	730.822900	40.100000	2238.297000
42.600000	731.680400	42.600000	2240.847000
45.100000	732.537900	45.100000	2249.622000
47.600000	733.395400	47.600000	2249.622000
50.100000	734.252900	50.100000	2249.622000
52.600000	735.110500	52.600000	2249.622000
55.100000	734.958300	55.100000	2249.622000
57.600000	734.806000	57.600000	2249.622000
60.100000	734.653900	60.100000	2246.057000
62.600000	734.501600	62.600000	2246.493000
65.100000	734.349400	65.100000	2249.928000
67.600000	734.197200	67.600000	2246.702000
70.100000	734.045000	70.100000	2243.477000
72.600000	733.892800	72.600000	2243.138000
75.100000	733.740600	75.100000	2249.912000
77.600000	733.588400	77.600000	2249.573000
80.100000	733.436200	80.100000	2243.009000
82.600000	733.779900	82.600000	2248.130000
85.100000	734.123700	85.100000	2243.252000
87.600000	734.467500	87.600000	2247.938000
90.100000	734.811200	90.100000	2243.060000
92.600000	735.155000	92.600000	2248.182000
95.100000	735.498800	95.100000	2253.304000
97.600000	735.842500	97.600000	2258.426000
100.100000	736.186300	100.100000	2253.548000
102.600000	736.530000	102.600000	2258.669000
105.100000	736.873800	105.100000	2253.791000
107.600000	737.217600	107.600000	2258.913000

Intestazione dell'Impresa

## LINEA SISMICA ST1

### VELOCITA' SISMICHE CALCOLATE PER I RIFRATTORI INDIVIDUATI: ONDE "SH"

I.T. paragrafo B.1.2.1.: "Modalità di presentazione dei risultati" - punto 2.h4)

STRATO # 1		ASCISSA	VELOCITÀ
ASCISSA	VELOCITÀ		
		2.600000	1322.099000
2.600000	459.069700	5.100000	1322.099000
5.100000	459.222000	7.600000	1322.099000
7.600000	459.374300	10.100000	1322.099000
10.100000	459.526600	12.600000	1322.099000
12.600000	459.678800	15.100000	1322.099000
15.100000	459.831100	17.600000	1322.099000
17.600000	459.983400	20.100000	1322.099000
20.100000	460.135700	22.600000	1322.099000
22.600000	460.288000	25.100000	1322.099000
25.100000	460.440200	27.600000	1322.099000
27.600000	458.072200	30.100000	1322.099000
30.100000	455.704200	32.600000	1322.099000
32.600000	453.336200	35.100000	1322.099000
35.100000	450.968200	37.600000	1322.099000
37.600000	448.600200	40.100000	1322.099000
40.100000	446.232200	42.600000	1322.099000
42.600000	443.864200	45.100000	1322.099000
45.100000	441.496200	47.600000	1322.099000
47.600000	439.128200	50.100000	1322.099000
50.100000	436.760200	52.600000	1322.099000
52.600000	434.392200	55.100000	1322.099000
55.100000	432.953400	57.600000	1322.099000
57.600000	431.514600	60.100000	1322.099000
60.100000	430.075900	62.600000	1322.099000
62.600000	428.637100	65.100000	1322.099000
65.100000	427.198400	67.600000	1322.099000
67.600000	425.759600	70.100000	1322.099000
70.100000	424.320900	72.600000	1322.099000
72.600000	422.882100	75.100000	1322.099000
75.100000	421.443400	77.600000	1322.099000
77.600000	420.004600	80.100000	1322.099000
80.100000	418.565900	82.600000	1322.099000
82.600000	424.148700	85.100000	1322.099000
85.100000	429.731500	87.600000	1322.099000
87.600000	435.314300	90.100000	1322.099000
90.100000	440.897200	92.600000	1322.099000
92.600000	446.480000	95.100000	1322.099000
95.100000	452.062800	97.600000	1322.099000
97.600000	457.645600	100.100000	1322.099000
100.100000	463.228400	102.600000	1322.099000
102.600000	468.811200	105.100000	1322.099000
105.100000	474.394100	107.600000	1322.099000

Intestazione dell'Impresa

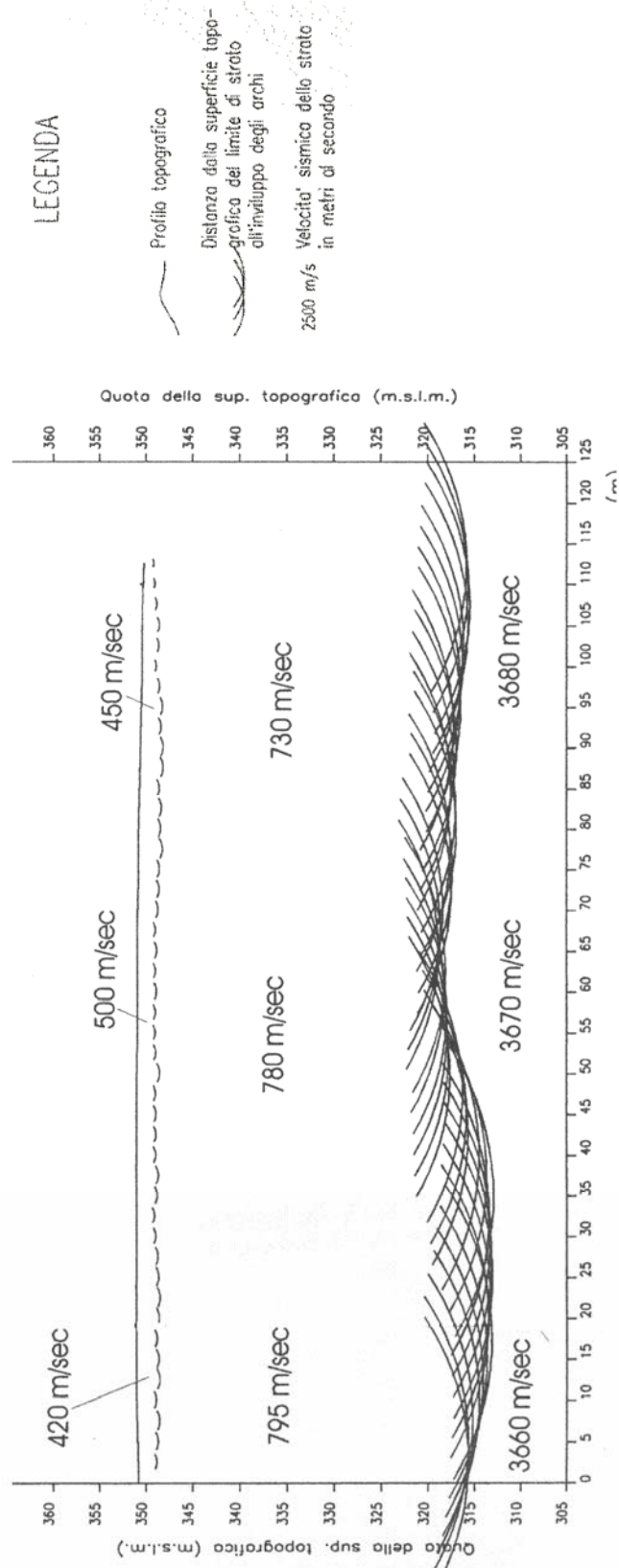
## **APPENDICE 2B1j**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Sezioni sismostratigrafiche*

## LINEA SISMICA ST1

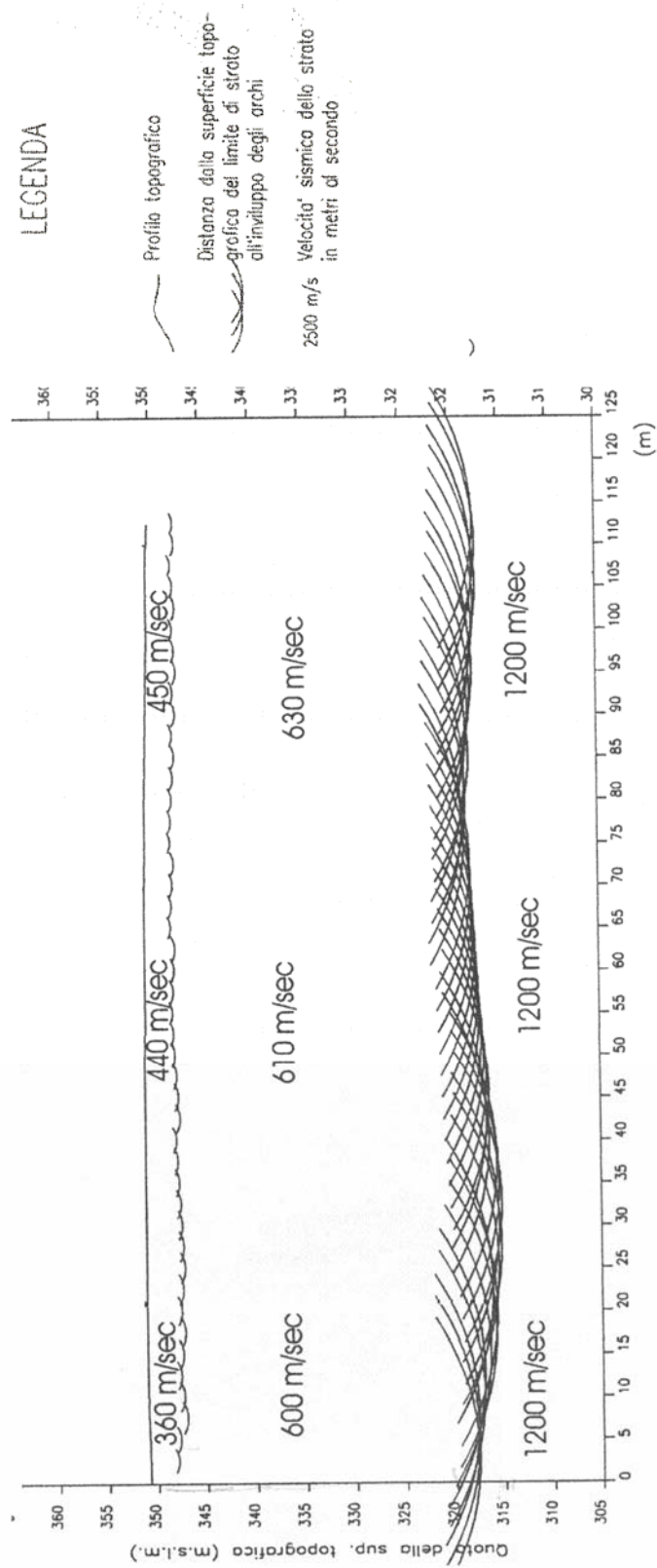
### SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA: ONDE P



Intestazione dell'Impresa

## LINEA SISMICA ST1

### SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA: ONDE SH



Intestazione dell'Impresa

## **APPENDICE 2B1**

### **INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE**

*Sezioni litostratigrafiche*

COMUNE DI .....  
PROVINCIA DI .....

**VALUTAZIONE VULNERABILITA'  
EDIFICI SCOLASTICI  
PROGETTO V.E.L.  
SUBPROGETTO GARFAGEO**

**PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE  
CON ONDE P ED ONDE SH**

**SEZIONE LITOSTRATIGRAFICA INTERPRETATIVA**

Basi sismiche: **ST...**

Località: .....

Data: .....

**LEGENDA**

1150 m/s

Velocità sismica onde P in metri al secondo

285 m/s

Velocità sismica onde SH in metri al secondo



Massicciata stradale; riporto; copertura detritica mediamente addensata/addensata, sopra falda (**dt**)



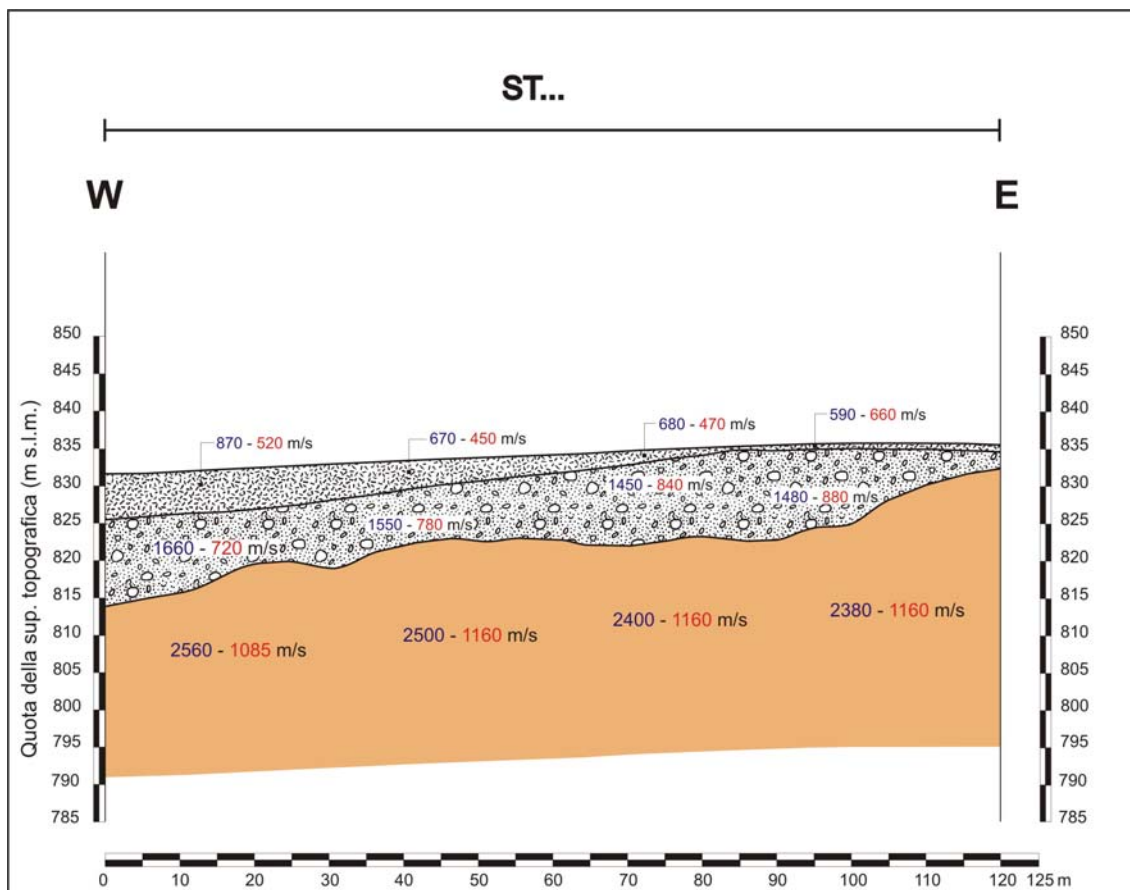
Copertura detritica molto addensata (**dt**); arenarie con intercalazioni siltitiche molto alterate e fratturate ("Arenaria macigno" - **mg**)



Arenarie con intercalazioni siltitiche mediamente fratturate ("Arenaria macigno" - **mg**)

**ST...**

**Scala 1:.....**





## **(2B2.2) INDAGINI SISMICHE A RIFLESSIONE IN ONDE P ED SH (■)**

La sismica a riflessione è una metodologia che, seppur largamente utilizzata per l'esplorazione geologica del sottosuolo (ad esempio nella ricerca petrolifera), trova, nella prospezione "a piccola profondità", un impiego ancora molto limitato soprattutto considerandone le grandi potenzialità. E' pur vero che in taluni contesti geologici, questa metodologia, almeno nella casistica nota, ha fornito risultati non sempre soddisfacenti, ma il poter superare quei limiti propri della tecnica a rifrazione, soprattutto per quanto riguarda la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo, la rende di estremo interesse soprattutto se eseguita con modalità che consentono una risoluzione molto alta.

Lo scopo delle indagini sismiche a riflessione consiste nel determinare con un grande dettaglio le geometrie del sottosuolo.

Come è noto, a differenza della metodologia sismica a rifrazione, nella prospezione sismica a riflessione si utilizza tutta la registrazione e per quanto attiene la metodologia "multicanale", l'elemento caratterizzante è rappresentato, in sintesi, dalla correzione e somma di tutte le tracce che convergono in un unico punto (CDP).

Mediante un opportuno processing vengono raccolte varie tracce dei sismogrammi che convergono sul medesimo CDP (famiglia). Successivamente viene individuata la velocità di propagazione dei singoli livelli riflettori e si apporta così una correzione temporale alle tracce di ogni singola famiglia (correzione di move out) in modo da poterle poi sommare aumentando il rapporto segnale – rumore (stacking) e creando una sezione stack in cui visualmente è possibile riconoscere i singoli riflettori.

In fase di processing vengono effettuate una serie di operazioni quali filtraggi in frequenza, filtraggi F–K, deconvoluzione, correzioni statiche, etc., che rendono tale metodologia piuttosto complessa. Un'ulteriore difficoltà è che più è superficiale la prospezione, più difficoltoso è il processing, sia per problemi legati alla risolutività del metodo, sia per la presenza di onde superficiali che mascherano le onde di corpo riflesse, sia soprattutto per l'eterogeneità delle coltri e il differente grado di saturazione di questi materiali. La ricostruzione di una sezione stack leggibile dipende dalla qualità dell'analisi di velocità effettuata, che varia in funzione del rapporto profondità/lunghezza dello stendimento.

Va rilevato che le onde superficiali (Rayleigh) vengono evidenziate e in qualche modo filtrate, nel caso di prospezione con onde di compressione (arrays, filtri di frequenza e F - K). Per le onde SH, per la particolare disposizione dei geofoni e per il sistema di energizzazione adottato, questo tipo di onde superficiali non è

presente; sono talora presenti, viceversa, le onde di Love che possono essere eliminate o ridotte sia in fase di acquisizione sia in fase di processing. Va rilevato che, le onde SH riflesse possono costituire un secondo arrivo rispetto alle onde di superficie (nella fattispecie onde di Love) e che, per stendimenti lunghi, la loro attenuazione è maggiore perché proporzionale a  $1/r$  in luogo di  $1/l$  come accade per le onde di superficie. Non esistono, d'altra parte, le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati proprie delle tecniche utilizzando le onde superficiali.

Per i motivi sopra citati la metodologia a riflessione ad alta risoluzione finalizzata alla prospezione a "piccola profondità", richiede modalità di esecuzione particolari, sia nella fase di acquisizione dati, (stendimenti corti e distanze intergeofoniche ridotte (1-2, max 5 m), sia in quella di processing.

Come per la sismica a rifrazione, anche la sismica a riflessione può essere eseguita utilizzando sia le onde di compressione (P), sia quelle di taglio S. In quest'ultimo caso è opportuno sottolineare che quando si parla di onde S ci si vuol riferire alle onde SH (onde di taglio polarizzate orizzontalmente) perché, in condizioni normali, a differenza delle SV, non trasmutano e questo è importante soprattutto perché in mezzi eterogenei come in genere quelli superficiali risulta il più delle volte impossibile riconoscere le SV dalle P. In generale, ma soprattutto per formazioni non lapidee, il metodo in SH è da preferire alla riflessione in P, specificatamente per ciò che riguarda le indagini di rischio sismico per i seguenti motivi:

- Evidenzia livelli a contrasto di rigidità sismica;
- Permette di evidenziare livelli di inversione di velocità delle onde di taglio e conseguentemente contraddistinti da differente rigidità sismica e modulo di taglio dinamico;
- Non è disturbata dalla presenza di livelli a differente grado di saturazione;
- Consente di acquisire un quadro conoscitivo, relativamente alle geometrie del sottosuolo migliore rispetto a quello ottenibile dalle perforazioni;
- Fornisce, in particolare per i primi metri dal piano di campagna, i valori di velocità delle onde di taglio SH per quanto riguarda la propagazione in senso verticale;
- Ha una risoluzione (a parità di frequenza) migliore dalle onde di compressione;
- Ha una attenuazione (nei mezzi insaturi) minore delle onde di compressione.

Gli svantaggi sono inerenti soprattutto al costo relativamente alto rispetto alle altre prospezioni di superficie; ciò è dovuto sia alla necessità di effettuare un

processing piuttosto complesso e non standardizzabile in ogni sua fase. L'alto costo è dovuto altresì al fatto che spesso, in fase di processing, si devono analizzare ed isolare le onde superficiali (registrazione per registrazione o famiglia per famiglia).

Non è necessario, al contrario di quanto avviene nella prospezione sismica a rifrazione, che le velocità di propagazione aumentino con la profondità.

#### 2B2.2.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche di compressione (onde P) e sollecitazioni dinamiche orizzontali di direzioni opposte (onde SH) e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori a componente verticale nel primo caso ed orizzontali nel secondo.

L'interpretazione dei segnali rilevati necessita, come è noto, di una complessa fase di processing per ottenere una sezione stack finale.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- Sistema sorgente;
- Sistema di ricezione;
- Sistema di acquisizione dati;
- Trigger.

La sorgente deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali. Per generare onde di compressione (P), si utilizzeranno i metodi classici quali caduta di un grave, mazza, cannoncino, esplosivo, etc. Dovranno comunque essere evitati sistemi in grado di generare vibrazioni e/o rimbalzi durante la generazione del segnale, in grado di inficiare la lettura del segnale per l'intero sismogramma richiesto.

La sorgente per la generazione di onde SH è generalmente costituita da un parallelepipedo tale da poter essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa pesante. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate

orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.

L'accoppiamento parallelepipedo-terreno deve essere per "contatto" e non per "infissione". Un buon accoppiamento tra parallelepipedo e terreno si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine; nel caso viceversa di presenza di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole costituendo uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo. Sono da evitare come punti di energizzazione zone in cui affiorano rocce compatte o asfalti.

Il sistema di ricezione deve essere costituito da gruppi di almeno 12 gruppi di 3 geofoni verticali (in onde P) e da almeno 12 gruppi di 5 geofoni orizzontali (in onde SH) con frequenza non inferiore a 15 Hz, collegati tra loro.

Detti geofoni devono essere ben accoppiati sul terreno, posizionati verticalmente e con l'asse di oscillazione parallelo alla direzione di percussione del parallelepipedo del sistema energizzante che, nel caso di indagini in onde SH sarà posto con l'asse maggiore perpendicolare alla direzione di stendimento.

Il Trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il martello colpisce la trave, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e la produzione di un impulso a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. L'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve avvenire attraverso un sistema (interruttore, geofoni starter, etc.) che all'atto delle sollecitazioni ripetute consenta differenza di chiusura non superiore a 0.5 msec.

Il sismografo deve essere costituito da un sistema multicanale in grado di registrare su ciascun canale digitale le forme d'onda e di conservarle in memoria. La dinamica strumentale deve essere minimo di 24 bit lineari.

Inoltre la strumentazione deve possedere in acquisizione filtri notch, filtri di frequenza antialiasing e la funzione di inversione di polarità (necessaria per indagini a riflessione in onde SH).

La tecnica di acquisizione da utilizzare è la multichannel standard per sismica a riflessione "high resolution".

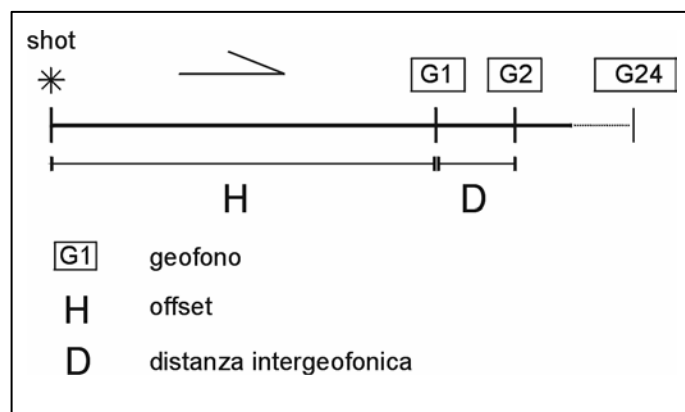
In generale, sono previste in fase di acquisizione:

- interspaziatura geofonica compresa tra 1 e 5 metri;

- interspaziatura tra i punti di energizzazione pari alla distanza intergeofonica;
- offset compresi tra i 3 ed i 15 metri;
- avanzamento push-increase (Figura 2B4) o drag-decrease;
- copertura minima del 600%;
- stampa delle registrazioni;
- stampa delle shot-gather;
- lunghezze di registrazione non inferiori ai 1024 ms e passi di campionamento tali da avere 2048 punti per traccia (ad es. 1024 ms di lunghezza con passo di 0.5 ms).

La scelta delle geometrie d'acquisizione e di ulteriori dettagli tecnici vengono, in genere, definiti in relazione alle problematiche logistiche e geologiche del sito e sono contenute in maniera dettagliata nel Programma preliminare delle attività.

L'esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengano realizzate le piazzole sulle quali posizionare il sistema energizzante e vengono preparati gli strumenti di registrazione.



**Fig. 2B4** – Schema semplificato di esecuzione di una prospezione sismica a riflessione, secondo una geometria di tipo off-end push increase

### 2B2.2.2 Modalità di esecuzione della prova

La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Dopo aver predisposto un opportuno piano di appoggio viene installato il sistema energizzante e vengono collocati i geofoni secondo quanto esposto precedentemente;
2. Viene attivata la sorgente e registrate le sollecitazioni prodotte; nel caso di prospezioni in onde SH devono essere prodotte vibrazioni di polarità opposta, percuotendo il parallelepipedo energizzante da entrambi i lati e procedendo (direttamente in campagna, sfruttando la condizione necessaria di un sismografo dotato di inversione di polarità) alla sottrazione tra battuta sinistra e battuta destra, in modo da evidenziare le componenti in SH a svantaggio di eventuali contenuti spuri in onde P.

### 2B2.2.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Per le indagini svolte dovrà essere fornita:

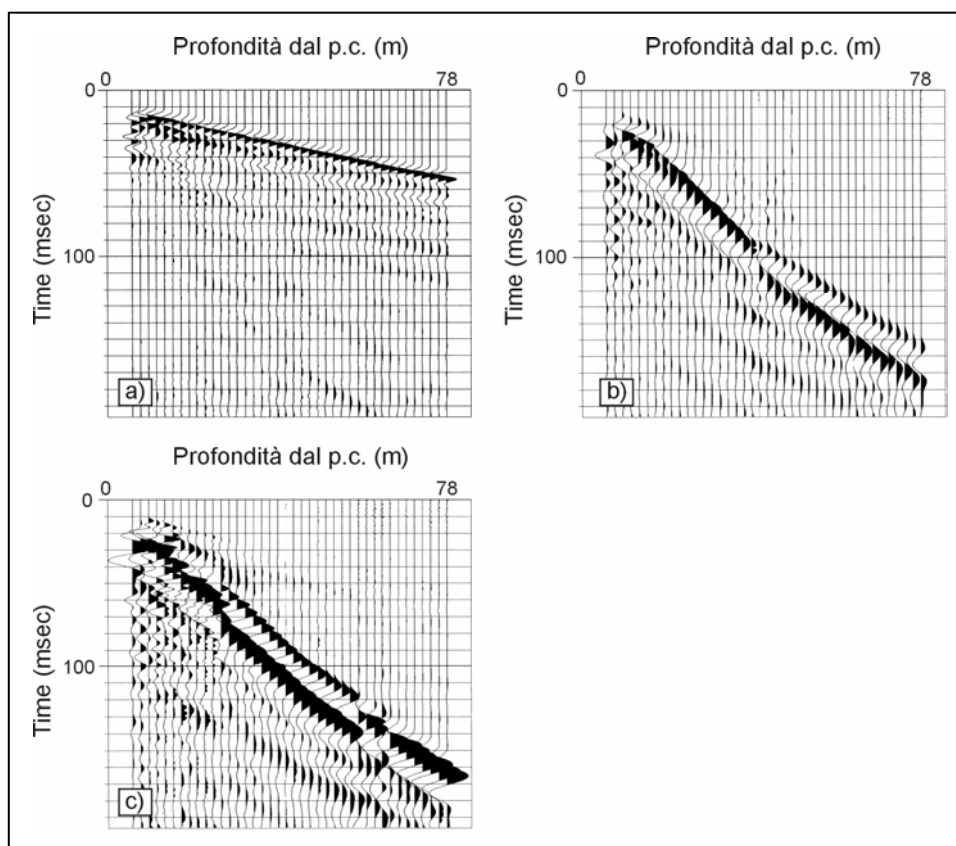
- una relazione tecnica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna linea sismica;
- la descrizione delle procedure seguite;
- la planimetria in scala 1:1000 con l'ubicazione delle linee sismiche ed il posizionamento dei geofoni;
- uno schema dettagliato della linea di acquisizione con le posizioni relative dei geofoni e dei punti di scoppio (distanze e quote);
- le impostazioni strumentali impiegate in fase di acquisizione;
- la stampa istantanea delle registrazioni di campagna, ossia la stampa "battuta destra-battuta sinistra" per le acquisizioni in onde di taglio;
- la documentazione fotografica in originale relativa alle fasi di esecuzione di ciascuna linea sismica; le foto dovranno essere realizzate per ogni sezione sismica in modo che risulti visibile l'intera linea, la posizione dei singoli geofoni, i punti e gli strumenti di energizzazione ed il contesto ambientale;
- registrazioni di campagna su supporto CD e, più esattamente battuta destra e battuta destra-battuta sinistra per le indagini in onde SH, in formato SEG2 e SEG-Y standard. (E' inoltre necessaria la verifica della compatibilità di lettura di tale formato, da parte della Amministrazione Appaltante, prima di procedere con la fase di acquisizione).
- sezione finale stack e/o migrata;
- sezione interpretata;
- sequenza di processing.

### (2B2.3) PROVA DOWN-HOLE (DH) (■)

Il metodo down-hole rappresenta una delle più accurate misure sismiche per la determinazione delle proprietà fisico-meccaniche dinamiche dei terreni (Gasperini & Signanini, 1983).

Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), calcolando il tempo ad esse necessario per spostarsi dalla sorgente ai ricevitori, di cui è nota la distanza.

La prova down-hole per gli obiettivi di cui alle presenti IT dovrebbe essere effettuata quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori a qualche metro e si rende necessaria soprattutto quando non si voglia ricorrere a delle indagini eccessivamente costose, ma si richiedano dei risultati di qualità e precisione da media a buona.



**Figura 2B5** – Sismogrammi relativi ad prova down-hole profonda 78 metri: a) componente Z dell'indagine in onde P; b) componente X e c) componente Y della prova in onde di taglio polarizzate orizzontalmente. Da Rainone et al. (2003)

È opportuno spingere la prova fino ad incontrare il bedrock sismico attraversandolo per uno spessore significativo, tenendo comunque presente che in taluni contesti geologici l'affidabilità della prova con tecniche di interpretazione convenzionali oltre i 40 m di profondità è generalmente scarsa, l'energia generata dalla sorgente potrebbe non essere sufficiente all'univoca individuazione dei primi arrivi. In altri contesti, invece, si è verificata la fattibilità di indagini down-hole fino ed oltre la profondità di 80m dal piano campagna (Figura 2B5).

Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo. Qualora queste caratteristiche non siano verificate è necessario operare con più punti di energizzazione.

#### 2B2.3.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova (Figura 2B6) consiste nel produrre, sulla superficie del terreno, sollecitazioni verticali (per la generazione di onde di compressione P) ed orizzontali (per onde di taglio polarizzate orizzontalmente SH) mediante una sorgente meccanica, e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto di una coppia di geofoni tridimensionali, alloggiati a profondità note nel foro di sondaggio appositamente strumentato. Conosciuta la distanza tra sorgente e ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P ed SH) in corrispondenza della verticale di misura.

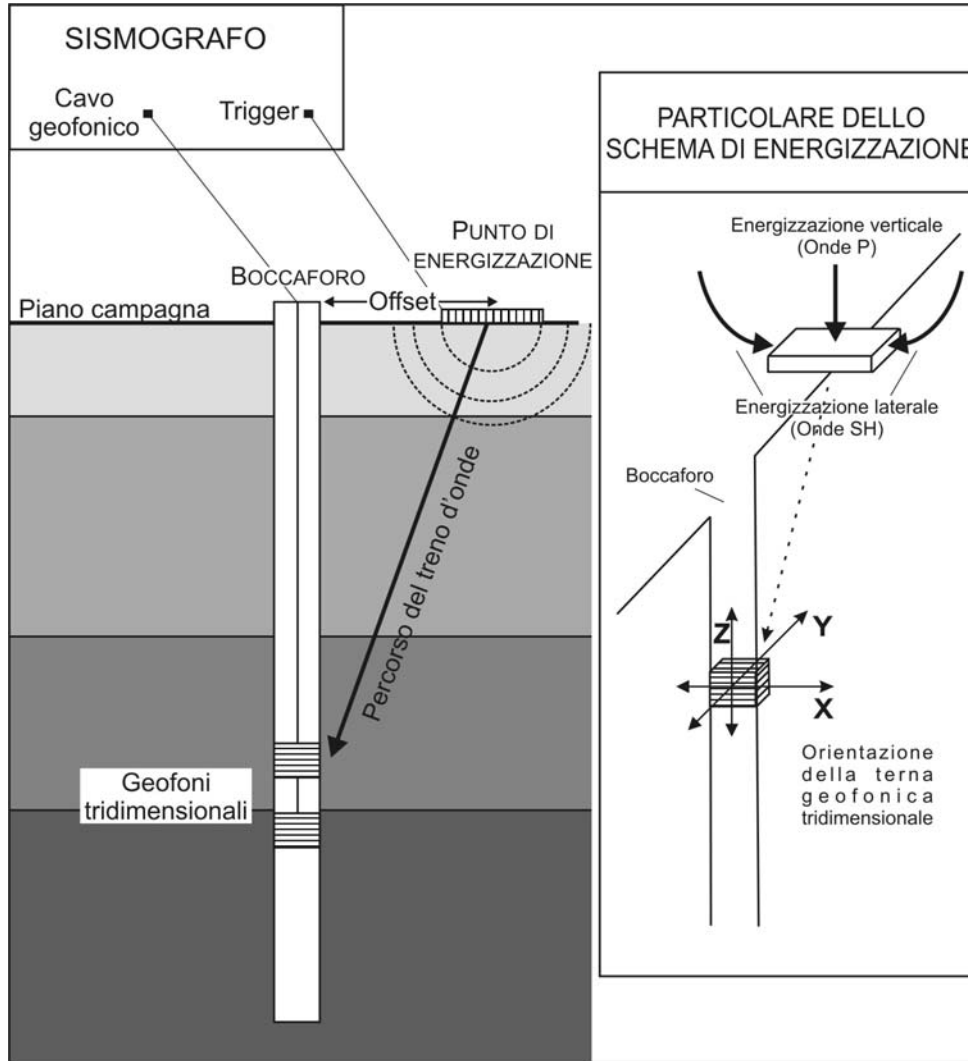
L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde SH) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali, ovvero con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali (ed eventualmente anche verticali).



Per generare le onde di compressione P, si utilizzeranno i metodi classici quali caduta di un grave, cannoncino, mazza, etc.. Dovranno comunque essere evitati sistemi in grado di generare vibrazioni e/o rimbalzi durante la generazione del segnale, in grado di inficiare la lettura del segnale per l'intero sismogramma richiesto.



**Figura 2B6** – Schema semplificato di un'indagine down-hole

Per generare le onde SH la sorgente è generalmente costituita da un parallelepipedo di legno e di forma tale da potere essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità nella polarizzazione e con una generazione di onde P anch'esso trascurabile. Inoltre, data l'entità di energia generalmente

prodotta, le deformazioni indotte nel terreno in prossimità della superficie sono inferiori a 10-2 % e decrescono con la profondità.

E' necessario un buon accoppiamento fra parallelepipedo e terreno cosa che si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine, nel caso viceversa di presenza di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole realizzando uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo energizzante. Sono da evitare come punti di energizzazione zone in cui affiorano rocce compatte e superfici bitumate.

Va tenuto conto che minore è la superficie di accoppiamento parallelepipedo - terreno, più pulito e ricco in alte frequenze sarà il segnale, d'altra parte soprattutto con superfici di contatto ridotte è necessario verificare che il parallelepipedo non si infossi nel terreno poiché in tal caso si produrrebbero onde di compressione.

Il sistema di ricezione si deve comporre di due (o più) ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità orientato secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale e collocati all'interno di un unico contenitore (preferibilmente di forma cilindrica) di lunghezza non superiore ai 450 mm, in modo che uno dei tre trasduttori sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali). I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del 5% su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde che si propaga all'interno del mezzo.

I ricevitori devono essere collegati, secondo la loro lunghezza, in modo di fissarne la distanza verticale (compresa tra 1 e 3 m) e l'orientazione relativa (in modo che i trasduttori orizzontali siano paralleli e concordi a due a due) e in modo tale da potere anche controllare dalla superficie l'orientazione assoluta.

Bisogna porre particolare attenzione al fatto che i sistemi previsti per mantenere costanti le distanze e per garantire l'isorientazione dei geofoni non producono interazione sismica tra i due sensori.

E' necessario adottare un adeguato sistema di ancoraggio per garantire un buon accoppiamento in foro tra i ricevitori e le pareti di rivestimento.

Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile

individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

L'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve, all'atto delle sollecitazioni ripetute, consentire una differenza di chiusura non superiore a 0.5 msec.

Il sistema di acquisizione dati deve essere di tipo multicanale in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minima a 16 bit. Esso è collegato a ciascuno dei geofoni tridimensionali in foro ed al sensore del trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger. Poiché è necessario eseguire la differenza tra traccia relativa alla battuta destra e quella alla battuta sinistra, è necessaria una strumentazione che preveda la funzione "inversione di polarità".

L'esecuzione della prova down-hole deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale viene realizzato il foro in cui alloggiare i ricevitori e vengono preparati gli strumenti di energizzazione e di registrazione.

Per quanto riguarda la realizzazione del foro di sondaggio, durante la fase di perforazione, ogni cura deve essere posta per ridurre al minimo il disturbo sulle pareti e nelle zone di terreno circostanti il foro. La perforazione deve essere eseguita a rotazione ed è opportuno sostenere le pareti con fango bentonitico. Successivamente il foro deve essere rivestito con una tubazione in materiale ad alta impedenza alle vibrazioni. Si devono utilizzare tubi a sezione circolare in ABS o PVC, di spessore maggiore o uguale a 3.0 mm, lunghezza minima degli spezzoni di 3 metri, assemblati mediante filettatura a vite ed eventuali manicotti di giunzione e muniti di tappi di testa e fondo foro. Infine il foro deve essere cementato in corrispondenza dello spazio anulare compreso tra le pareti e il tubo di rivestimento.

La cementazione deve essere eseguita in modo da garantire la continuità del contatto terreno-tubazione. E' possibile, prima ancora di collocare il rivestimento, chiudere il fondo del foro con un cappello (packer) dotato di valvola di controllo sferica one-way, in grado di accogliere un tubo del diametro di 38 mm; dopodiché, una volta posizionata la tubazione di rivestimento e centrata rispetto alle pareti del foro con l'ausilio di appositi distanziatori montati sul fondo, viene calato all'interno del foro, fino a raggiungere la valvola, un tubo in ABS o PVC del diametro di 38 mm, collegato in superficie ad una pompa convenzionale per mezzo della quale viene iniettata la miscela cementizia, che, una volta raggiunto il fondo del foro, inizia a riempire dal basso verso l'alto in

maniera uniforme l'intercapedine tra foro e rivestimento, spazzando via il fango e i detriti eventualmente presenti (normativa ASTM).

E' possibile, altresì, calare direttamente il tubo per l'iniezione nell'intercapedine fino al fondo del foro e quindi procedere alla cementazione dal basso verso l'alto, con tutti quegli accorgimenti necessari, in modo da potere garantire la continuità del contatto terreno-tubazione.

La miscela da utilizzare per la cementazione, in linea di massima, è costituita da una malta a ritiro controllato (acqua + cemento + bentonite), in particolare per la parte del foro che penetra nella roccia si consiglia il cemento di Portland convenzionale di densità pari a 2.2. mg/m<sup>3</sup>, mentre per la parte a contatto con terreni, sabbie e ghiaie si sceglie una miscela con una densità prossima a quella del terreno circostante (da 1.8 mg/m<sup>3</sup> a 1.9 mg/m<sup>3</sup>), ottenuta mescolando 450 g di cemento di Portland, 450 g di bentonite a 2.8 kg di acqua. La pressione di iniezione non deve essere superiore a 2 atm (normativa ASTM).

Questo in condizioni normali; qualora la situazione incontrata presentasse forti venute di acqua, fratturazione, scavamenti, etc., la composizione della miscela e pressione d'iniezione potranno essere opportunamente variate sentita la Direzione Lavori e tenuto conto che l'obiettivo è un contatto solidale tra terreno e tubo di rivestimento.

L'Impresa esecutrice della prova down-hole, prima dell'avvio della fase di acquisizione, è tenuta ad effettuare un controllo sull'accessibilità del foro per tutta la profondità e, qualora vengano rilevate difformità con la profondità segnalata dalla Direzione lavori a conclusione della perforazione, è tenuta a segnalare tale problematica all'Amministrazione appaltante.

Questo tipo di prova è poco sensibile alla deviazione dell'asse del foro dalla verticale, per cui non si rendono necessari controlli di verticalità. Una volta terminata le operazioni di rivestimento e cementazione l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Dopo avere predisposto un opportuno piano d'appoggio la sorgente viene collocata sulla superficie in prossimità del foro ad una distanza dal centro in genere compresa tra 3 m e 7 m, da stabilire in proporzione alla profondità di acquisizione (offset in Figura 2B6) e orientata perpendicolarmente al raggio uscente dal foro. Per la produzione di onde P si energizza con massa battente ed impatto verticale; per la produzione di onde SH la sorgente (parallelepipedo, trave) viene fissata al terreno applicando sulla sua superficie un carico statico;

2. Il sistema, costituito dai due ricevitori (geofoni tridimensionali) equidistanti e con costante orientamento relativo viene calato alla profondità desiderata ( $1\ m$ ) collegandolo alla superficie mediante un sistema che ne consente l'orientamento assoluto dalla superficie;
3. Il sistema dei ricevitori viene orientato dalla superficie in modo tale che uno dei trasduttori orizzontali di ciascun ricevitore sia orientato parallelamente all'asse della sorgente e quindi alla direzione di polarizzazione delle onde  $S$  in modo da massimizzarne l'ampiezza di ricezione ai ricevitori. Quindi i ricevitori vengono fissati alle pareti del tubo;
4. Viene attivata la registrazione (pre-trigger) delle vibrazioni rilevate e dai trasduttori che costituiscono i ricevitori con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente. Tale fase può essere evitata nel caso che la strumentazione consenta la registrazione del segnale all'istante di time-break cioè all'attivazione del segnale;
5. Viene attivata la sorgente, producendo una sollecitazione che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo  $P$ ; in seguito (con energizzazione separata e distinta) si generano vibrazioni di tipo  $SH$ , dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Poichè si debbono ricavare onde  $SH$ , per l'ottenimento di una buona qualità dei dati, si debbono produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sommare le registrazioni di ogni singolo ricevitore, in modo da individuare meglio l'istante di primo arrivo (*metodo cross-over*). Detta operazione deve essere eseguita in campagna, in fase di acquisizione, se lo strumento prevede l'inversione di polarità. Può essere eseguita registrando separatamente i files battuta destra - battuta sinistra, ma in questo caso sarà necessario un bilanciamento spettrale prima di procedere alla differenza delle tracce;
6. Il tempo di registrazione deve essere pari ad  $1\ sec$ , mantenendo il miglior passo di campionamento possibile. Tale esigenza deriva dalla possibilità di utilizzare i dataset sismici acquisiti in assetto down-hole per estensioni delle indagini attraverso differenti modalità interpretative, come la tecnica sperimentale VSP (Vertical Seismic Profiling);
7. Viene riprodotta la sollecitazione e quindi ripetuta la prova ad una profondità inferiore (o superiore se si procede dal basso verso l'alto) di non più di  $1\ m$ , e comunque non meno di  $40-50\ cm$ , abbassando (o sollevando) i ricevitori;
8. Raggiunto il fondo (o la sommità) del foro, la prova viene ripetuta questa volta procedendo nel verso opposto ad intervalli di  $4-5\ m$ ;

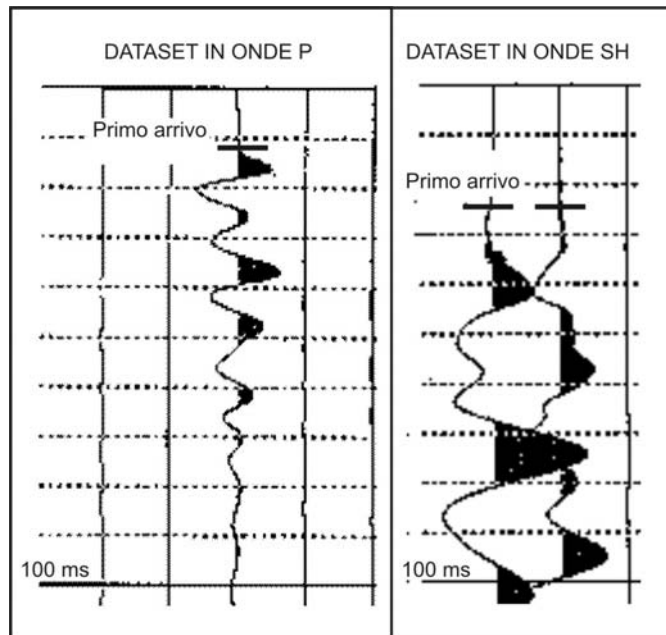
Relativamente ai punti 6 e 7 potranno essere indicate eventuali variazioni dalla Regione Toscana sentiti i referenti scientifici.

### 2B2.3.2 ELABORAZIONE DATI

Per quanto riguarda l'interpretazione dei tracciati registrati durante la prova per la determinazione della velocità di propagazione delle onde sismiche, pur esistendo varie tecniche nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza, in ambito VEL viene preferita la modalità di elaborazione più semplice ed immediata, basata sulla ricostruzione delle dromocrone (in onde P ed SH) nel diagramma spazio-tempo e conseguente computo delle velocità mediate.

Questa scelta, in linea con la filosofia multidisciplinare del Programma VEL, è dovuta alla necessità di confronto con altre metodologie sismiche impiegate nelle campagne di esplorazione del sottosuolo (ad esempio prospezioni sismiche a rifrazione) e di taratura con indagini geognostiche e geotecniche al fine di giungere al passaggio dal dato sismostratigrafico a quello litostratigrafico.

Per determinare il tempo di arrivo delle onde P ed SH ai ricevitori, si procede ad un'analisi visuale (i risultati sono analoghi a quelli riportati in Figura 2B7) delle registrazioni delle vibrazioni rilevate dai trasduttori del ricevitore confrontate con il segnale di trigger ( $t_0$ ) o inizio registrazione.



**Figura 2B7** – Primi arrivi in sismogrammi relativi ad una prova down-hole

Pur essendo possibile operare con il sistema di pre-triggering, analogamente a quanto previsto per la prova cross-hole (paragrafo 2B2.4), nell'ambito del

progetto VEL si deve operare con il doppio sistema di energizzazione (percussione verticale per le onde P, percussione orizzontale per le SH).

Naturalmente, nelle registrazioni energizzate in verticale si valuterà il primo arrivo in onde P; nelle registrazioni energizzate con percussione orizzontale, sottratte le registrazioni “battuta destra-battuta sinistra”, il primo arrivo sarà costituito dalle onde di taglio SH poiché eventuali onde di compressione provocate durante l’energizzazione tenderanno, con la differenza “battuta destra-battuta sinistra” a ridursi in ampiezza laddove le SH (che invertono in polarità a seconda della direzione di battuta) tenderanno a sommarsi aumentando così d’ampiezza (figura 2B7).

Si ipotizza che il percorso delle onde tra sorgente e ricevitori sia rettilineo, trascurando i fenomeni di rifrazione che ne modificano il percorso.

In linea di massima, il criterio di elaborazione dati si articola nelle seguenti fasi:

1. picking dei primi arrivi;
2. misura dei tempi di ricezione dei primi impulsi rilevati ( $t$ );
3. calcolo dei tempi verticali ( $t^*$ ).

Il percorso delle onde sismiche dovrebbe essere verticale dalla sorgente al ricevitore, per cui l’energizzazione dovrebbe essere fatta il più vicino possibile al pozzo; questa necessità si scontra, comunque, con l’esigenza di allontanare la sorgente dal boccaforo per far in modo che i primi arrivi registrati nel sismogramma non siano dovuti al percorso fatto lungo la cementazione del foro alla velocità del cemento (rifrazione sul casing).

La distanza sorgente-boccaforo va valutata caso per caso anche in relazione alla quantità di cemento utilizzata. Se, infatti, la quantità di boiaccia è più del doppio dell’interspazio foro-tubo, essa va aumentata. In genere tale distanza non è maggiore di tre metri, considerando anche il fatto che all’aumentare di questa aumenta la possibilità di avere primi arrivi rifratti e non diretti e di misurare, quindi una velocità orizzontale. I dati possono essere attendibili quando la profondità del geofono P è maggiore della distanza boccaforo-punto energizzante D.

Poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente non si propagano esattamente in direzione verticale rispetto ai ricevitori, data la posizione della sorgente, è necessario correggere i tempi di arrivo stimati per tenere conto dell’inclinazione del percorso effettivo.

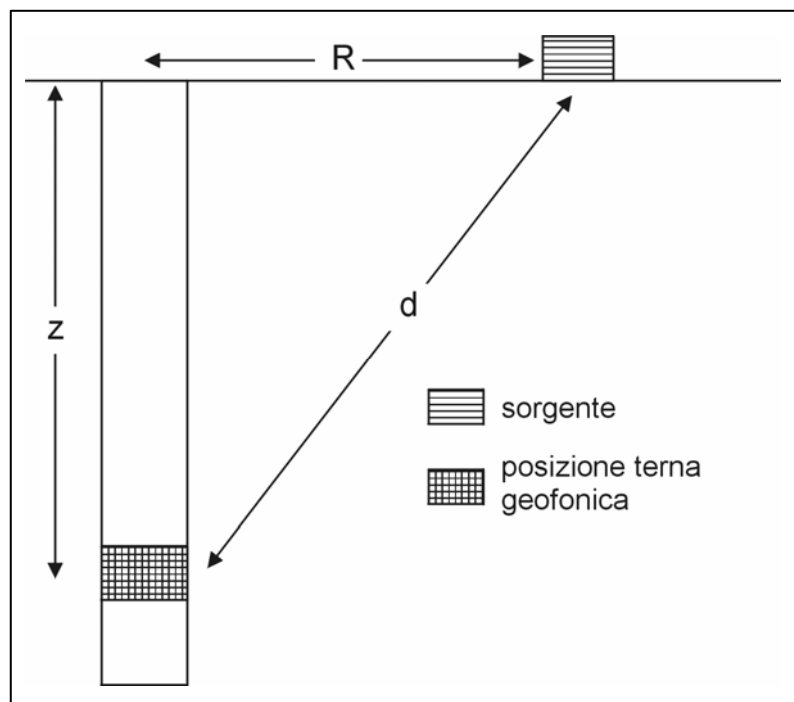
Indicata con  $z$  la profondità del ricevitore, con  $d$  la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore e con  $R$  la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro

(Figura 2B8), con  $t$  il tempo determinato dalle tracce di registrazione, il tempo corretto risulta:

$$t^* = \frac{z}{d} t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} t \quad (2B.6)$$

Dividendo la profondità a cui viene collocato il ricevitore per il tempo corretto si ricavano i valori di velocità per ciascuno dei ricevitori, in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate.

E' anche possibile ricavare le velocità (limitando quest'operazione alla definizione di intervalli caratterizzati da basse velocità di propagazione delle onde sismiche e spessori limitati a qualche metro e quindi difficilmente identificabili nel diagramma spazio-tempo) dividendo la differenza tra due profondità successive per la differenza tra i tempi determinati in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate e possono corrispondere allo stesso impulso (in tal caso le profondità corrispondono a quelle dei due o più ricevitori rigidamente collegati tra di loro e le velocità si definiscono velocità d'intervallo).



**Figura 2B8** – Primi arrivi in un sismogramma relativo ad una prova down-hole.

Va rilevato che non sempre i tracciati registrati dai ricevitori sono chiari e univocamente interpretabili sia per l'eventuale presenza di rifratte di ampiezze



non trascurabili che precedendo quelle dirette ingannano sui reali tempi d'arrivo indicando velocità intervallari anomale.

Talora, in profondità, l'istante di primo arrivo delle onde non è facilmente individuabile; sfruttando il fatto di disporre di più ricevitori, si può far riferimento ai tracciati registrati da ciascuno di essi ricercando dei punti caratteristici (picchi o valli) successivi al primo arrivo ritrovabili in entrambi i segnali e stimandone il ritardo e quindi ricavando la velocità d'intervallo (in tal caso affinché ad ogni picco dell'una registrazione corrispondano rispettivamente i picchi o le valli dell'altra è necessario che sia stata precedentemente stimato l'effetto dell'orientazione dei trasduttori rispetto alla direzione di propagazione delle onde e che sia noto se i trasduttori siano orientati in maniera concorde o discorde).

### 2B2.3.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, cioè la velocità di propagazione delle onde SH e P al variare della profondità, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione e interpretazione adottato.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

#### *1. Una relazione generale in cui sono specificati:*

- a) obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto dalla Regione Toscana e fornito al Committente;
- b) Piano di sicurezza dell'Impresa (se richiesto dalla vigente normativa) e Piano di controllo di qualità qualora l'Impresa sia certificata;
- c) risultati delle indagini ed eventuali osservazioni. Devono essere riportate in particolare:
  - note in merito alla modalità di esecuzione della cementazione del foro e alla qualità della stessa in relazione alla prova DH;
  - rispondenza delle caratteristiche tecniche della prova DH a quelle previste dalle Istruzioni Tecniche; la lunghezza di registrazione, nonché tutte le altre caratteristiche tecniche di acquisizione, andranno chiaramente espresse in relazione.

La relazione generale (Appendice 2B2a) deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n.3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e

una copia non rilegata e n.2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana, ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

2. *Una relazione tecnica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna prova:*

- a) la descrizione delle procedure eseguite e della strumentazione utilizzata;
- b) le modalità di esecuzione, di rivestimento e di cementazione adottate, ed in particolare le dimensioni geometriche del rivestimento, la composizione della miscela iniettata, la massima pressione di iniezione, la portata e l'attrezzatura utilizzata e soprattutto la quantità di miscela adoperata.
- c) la strumentazione adottata;
- d) le profondità a cui sono state effettuate le prove e la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro;
- e) la planimetria CTR in scala 1:5000, ove esistente, per un inquadramento di massima e per una visione più generale del sito di indagine e della prova down-hole. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1:10000 (Appendice 2B2b);
- f) la planimetria su base CTR 1:2000 ingrandita in scala 1:1000 con l'ubicazione della prova down-hole fornendo anche le coordinate Gauss-Boaga del foro, al fine di agevolarne la georeferenziazione. Inoltre si richiede sulla planimetria anche il posizionamento del punto di energizzazione in superficie (Appendice 2B2c);
- g) i segnali registrati dai trasduttori dei ricevitori e il corrispondente segnale di trigger, specificando per ciascuno di essi la profondità di prova, la direzione relativa e assoluta dei trasduttori dei ricevitori e il ricevitore d'appartenenza; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull'asse delle ascisse sia riportato il tempo (in *ms*) e sull'asse delle ordinate il segnale (in *mV*), sia in forma numerica su supporto CD; in alternativa alla stampa di tutti i sismogrammi relativi alle diverse profondità di misura sarà possibile allegare la stampa delle tracce assemblate attraverso apposito software di elaborazione geofisica (Appendice 2B2d), di cui andrà fornita una accurata descrizione delle caratteristiche in relazione; l'opzione di fornire il dato in forma aggregata è vivamente consigliata poiché permette la visualizzazione globale dell'andamento dei segnali in funzione della profondità, agevolando l'interpretazione ed elaborazione dati ed il relativo controllo di qualità; Sebbene sia richiesta una lunghezza di registrazione pari ad 1 secondo, il sismografo dovrà essere settato in visualizzazione con una lunghezza tale da permettere il chiaro riconoscimento del trend dei primi arrivi;

- h) una tabella che riporti i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità di misura (Appendice 2B2e);
- i) un diagramma (Appendice 2B2f) che riporti le dromocrone ricavate, dove sull'asse delle ascisse è riportato il tempo di arrivo corretto (in  $s$ ) e sull'asse delle ordinate la profondità di misura in funzione della profondità (in  $m$ ), con indicazione dei segmenti interpolanti i punti di misura, dalla cui pendenza si ricava la velocità di propagazione (da riportare chiaramente);
- j) un diagramma ad istogrammi (Appendice 2B2g) in cui vanno riportate le velocità calcolate (in  $m/s$ ) in funzione della profondità (in  $m$ );
- k) la documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione della prova down-hole. Sarà opportuno che risultino visibili gli strumenti di energizzazione e il contesto ambientale.

Nell'Appendice 2B2 si riportano degli esempi relativi ai punti e), f), g), h), i) e j) sopra elencati.

La relazione tecnica di cui al punto 2. deve essere consegnata al Servizio Sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n.2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

La documentazione fotografica di cui al punto j) deve essere consegnata in triplice copia in originale o in digitale su supporto CD.

### *3. Le registrazioni di campagna*

Si richiede, in triplice copia, la consegna dei dati di registrazione su supporto CD.

#### 2B2.3.4 CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE IN FORO TIPO DOWN-HOLE

##### Standard di valutazione dei risultati

Sono state predisposte una serie di definizioni per valutare la qualità dei dati acquisiti ai fini di una loro possibile utilizzazione per un'attendibile interpretazione ai fini geologici. La valutazione dei risultati sarà effettuata dai componenti della Commissione di Collaudo nominata dalla Regione Toscana, la quale dovrà rispettare, nella sua valutazione, i seguenti parametri:

- a) *Valutazione delle registrazioni*: la chiara lettura del segnale costituisce l'elemento essenziale per procedere alle successive operazioni di interpretazione ed elaborazione, pertanto il segnale di tutte le registrazioni si

deve leggere per tutte le tracce e per tutti i punti di misura.

- b) *Valutazione della congruenza tra dromocrone ed i dati di registrazione*: il presupposto della congruenza è la buona individuazione del primo arrivo, pertanto le dromocrone devono essere perfettamente congruenti con i dati di registrazione, a seguito della correzione da tempi obliqui a tempi verticali.
- c) *Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone*: nella fase di interpretazione devono essere rispettati il numero degli strati evidenziati nelle dromocrone, pertanto l'interpretazione sismostratigrafica deve essere perfettamente congruente con le dromocrone.

Le seguenti definizioni, sono state predisposte dai consulenti scientifici del DIGAT dell'Università di Chieti e del Dip.to di Scienze della Terra dell'Università di Pisa, sulla base di una specifica richiesta dei tecnici regionali, per una possibile utilizzazione dei dati consegnati dall'Impresa ai fini di un'attendibile interpretazione ai fini geologici. Finalità per la quale sono state previste le indagini di sismica in foro.

## 1. Valutazione delle registrazioni

La chiara lettura del segnale costituisce l'elemento essenziale per procedere alle successive operazioni d'interpretazione ed elaborazione. A tal fine si individuano quattro classi di valutazione:

- ⇒ **A:** il segnale di tutte le registrazioni si legge fino in fondo, compreso quello relativo ai punti di misura più profondi. Si può procedere alla ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica è possibile.
- ⇒ **B:** il segnale di quasi tutte le registrazioni, si legge fino in fondo e solo talora appaiono disturbati i segnali dei punti di misura più profondi. Si può procedere alla ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica è possibile con qualche approssimazione.
- ⇒ **C:** il segnale di gran parte delle registrazioni, si riesce a leggere facilmente solo per circa 2/3 delle misure. Risulta difficoltosa la ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica non è possibile, se non con molte approssimazioni.
- ⇒ **D:** il segnale nella maggior parte delle registrazioni, si riesce a leggere per meno della metà delle misure. Risulta impossibile la ricostruzione delle dromocrone e l'interpretazione geologica non è accettabile, perché le approssimazioni sarebbero elevate.

## 2. Valutazione della congruenza tra dromocrone ed i dati di registrazione

Il presupposto della congruenza è la buona individuazione del primo arrivo, a tal fine s'individuano due possibili classi di valutazione:

- ⇒ **A:** le dromocrone sono perfettamente congruenti con i dati di registrazione corretti secondo la formula B.8.
- ⇒ **B:** le dromocrone non sono perfettamente congruenti, tale incongruenza può variare fino a risultare tale da richiedere il rifacimento delle operazioni d'elaborazione e d'interpretazione.

## 3. Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone

Nella fase d'interpretazione, devono essere rispettati il numero degli strati evidenziati nelle dromocrone ed analizzate le eventuali variazioni di velocità e profondità dei singoli sismostrati.

Vengono in tal senso individuate tre classi di valutazione:

- ⇒ **A:** l'interpretazione sismostratigrafica è perfettamente congruente con le dromocrone.
- ⇒ **B:** l'interpretazione sismostratigrafica è parzialmente congruente con le dromocrone. E' necessario affinare l'interpretazione.
- ⇒ **C:** l'interpretazione sismostratigrafica è incongruente con le dromocrone. E' necessario rifare l'interpretazione

La Regione Toscana autorizzerà il pagamento delle indagini solo se i requisiti di qualità sopra specificati saranno soddisfatti contestualmente per i risultati in P e in SH.

Nello specifico si procederà al pagamento solo con le seguenti valutazioni:

- 1) Valutazione delle registrazioni: **A oppure B**. Negli altri casi verrà richiesta la riacquisizione dell'indagine in questione;
- 2) Valutazione della congruenza tra dromocrone ed i dati di registrazione: **A**. Nel caso in cui tale condizione non venga verificata, verrà richiesto un nuovo picking dei primi arrivi;
- 3) Valutazione della congruenza tra l'interpretazione sismostratigrafica e le dromocrone: **A**. Nel caso in cui tale condizione non venga verificata, verrà richiesta una nuova rielaborazione totale o parziale dell'indagine;

Nel caso in cui non si verificano le suddette condizioni verranno richieste ulteriori elaborazioni e, se il dato non è in nessun modo utilizzabile, la nuova acquisizione.

## **APPENDICE 2B2a**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Esempio di copertina della Relazione a corredo dell'indagine down-hole*

“logo e intestazione dell’Impresa”

**COMUNE DI .....**  
**PROVINCIA DI .....**

**PROGRAMMA VEL- REGIONE TOSCANA**

**INDAGINI GEOFISICHE IN FORO (DOWN-HOLE)  
CON ONDE P ED SH**

**RELAZIONE GENERALE**

**RELAZIONE TECNICA E  
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**

**DATA.....**

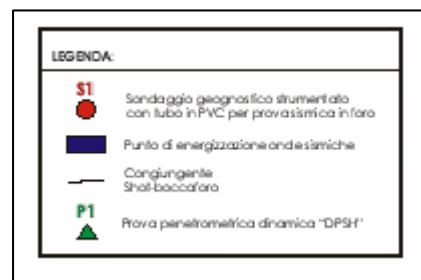
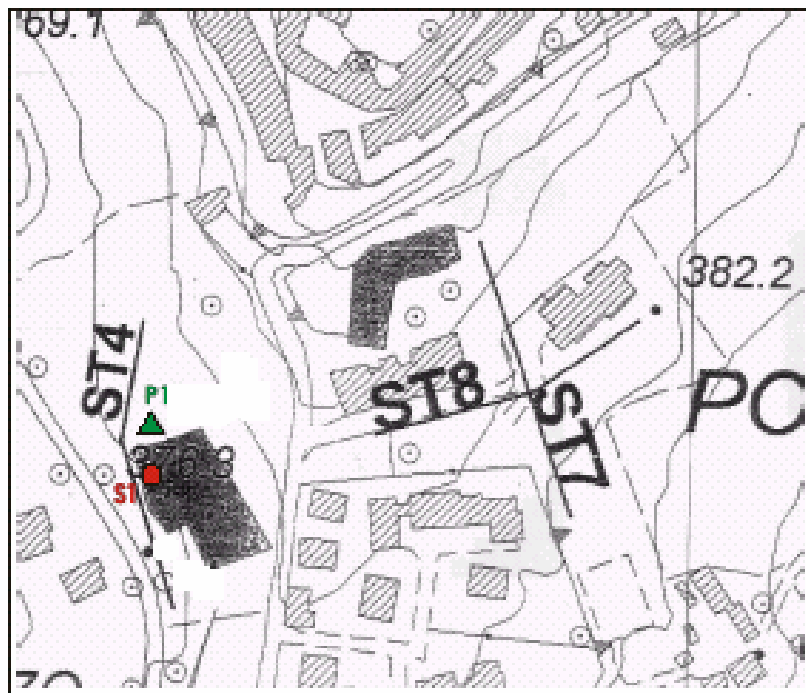


## **APPENDICE 2B2b**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Planimetria con ubicazione dell'indagine (scala 1:5000)*

## PLANIMETRIA CON UBICAZIONE INDAGINI



## **APPENDICE 2B2c**




### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Planimetria di dettaglio con ubicazione dell'indagine (scala 1:1000)*

PLANIMETRIA CON UBICAZIONE  
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE  
Scala 1:1000



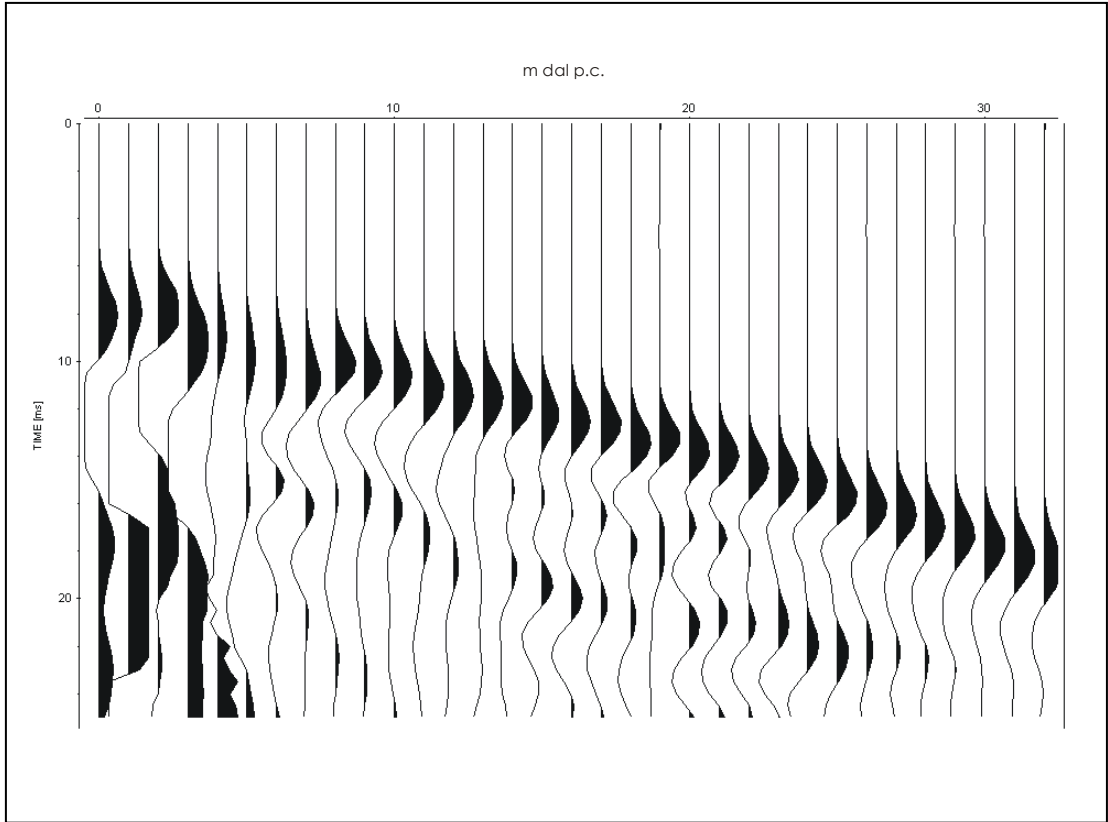
LEGENDA:

- |   |   |
|---|---|
| <b>S1</b>   | Sondaggio geognostico strumentato con tubo in PVC per prova sismica in foro |
|  |   |
|  | Punto di energizzazione onde sismiche                                       |
|  | Congiungente Shot-boccaforo   |

## **APPENDICE 2B2d**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Tracce assemblate in funzione della profondità relative  
ad un'indagine down-hole*



## **APPENDICE 2B2e**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Tabella con indicazione dei tempi d'arrivo originali e quelli corretti  
in funzione della profondità di misura*

## Tempi di arrivo

Località: .....

DOWN-HOLE **DH2**

distanza shot - bocca foro: **3,2 m**

m dal p.c.	ONDE P		ONDE SH	
	tempi obliqui (m/sec)	tempi verticali (m/sec)	tempi obliqui (m/sec)	tempi verticali (m/sec)
0	3,9	0,0	4,2	0,0
1	2,1	0,6	5,2	1,6
2	1,5	0,8	6,4	3,4
3	1,9	1,3	6,8	4,7
4	4,2	3,3	14,1	11,0
5	4,9	4,1	15,0	12,6
6	5,7	5,0	21,6	19,1
7	6,2	5,6	19,3	17,6
8	6,4	5,9	12,7	11,8
9	6,5	6,1	14,1	13,3
10	5,9	5,6	15,6	14,9
11	6,0	5,8	16,7	16,0
12	6,1	5,9	17,1	16,5
13	5,0	4,9	17,9	17,4
14	6,6	6,4	18,5	18,0
15	7,0	6,8	19,7	19,3
16	7,4	7,2	20,7	20,3
17	7,6	7,5	21,0	20,6
18	8,1	8,0	21,7	21,4
19	8,8	8,7	23,1	22,8
20	8,3	8,2	23,2	22,9
21	8,9	8,8	23,5	23,2
22	7,6	7,5	25,5	25,2
23	9,6	9,5	25,3	25,1



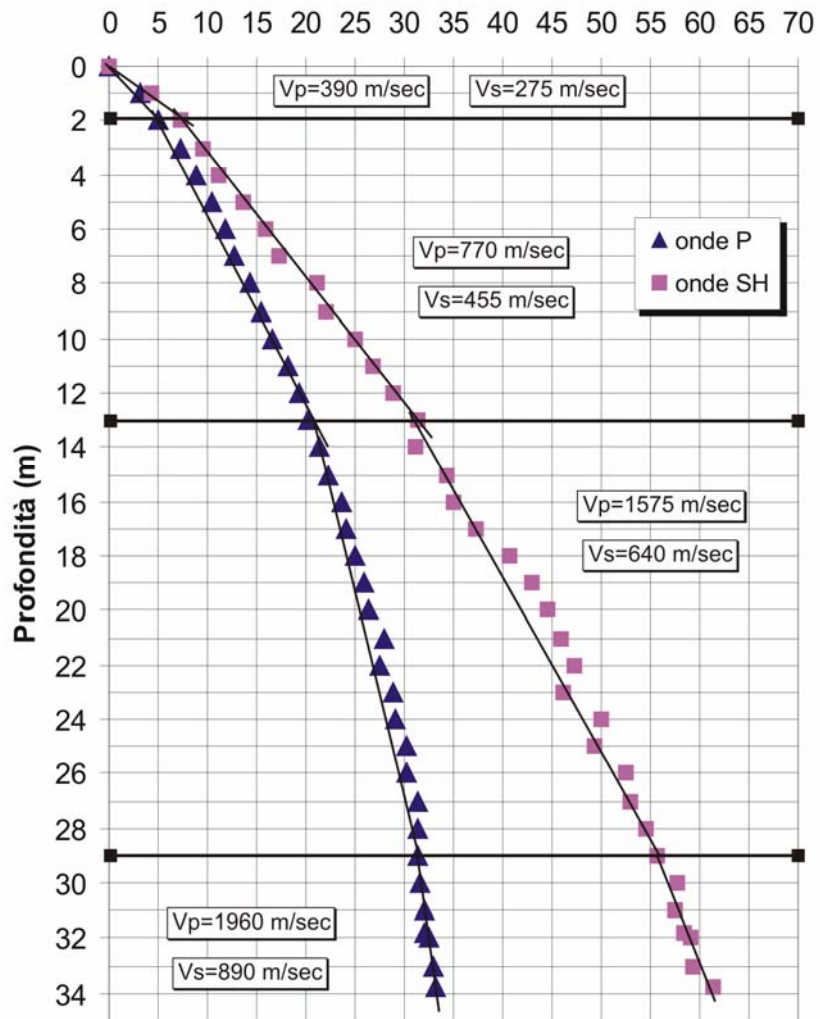
## **APPENDICE 2B2f**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Dromocrone sismiche in onde P ed SH*

# DROMOCRONE

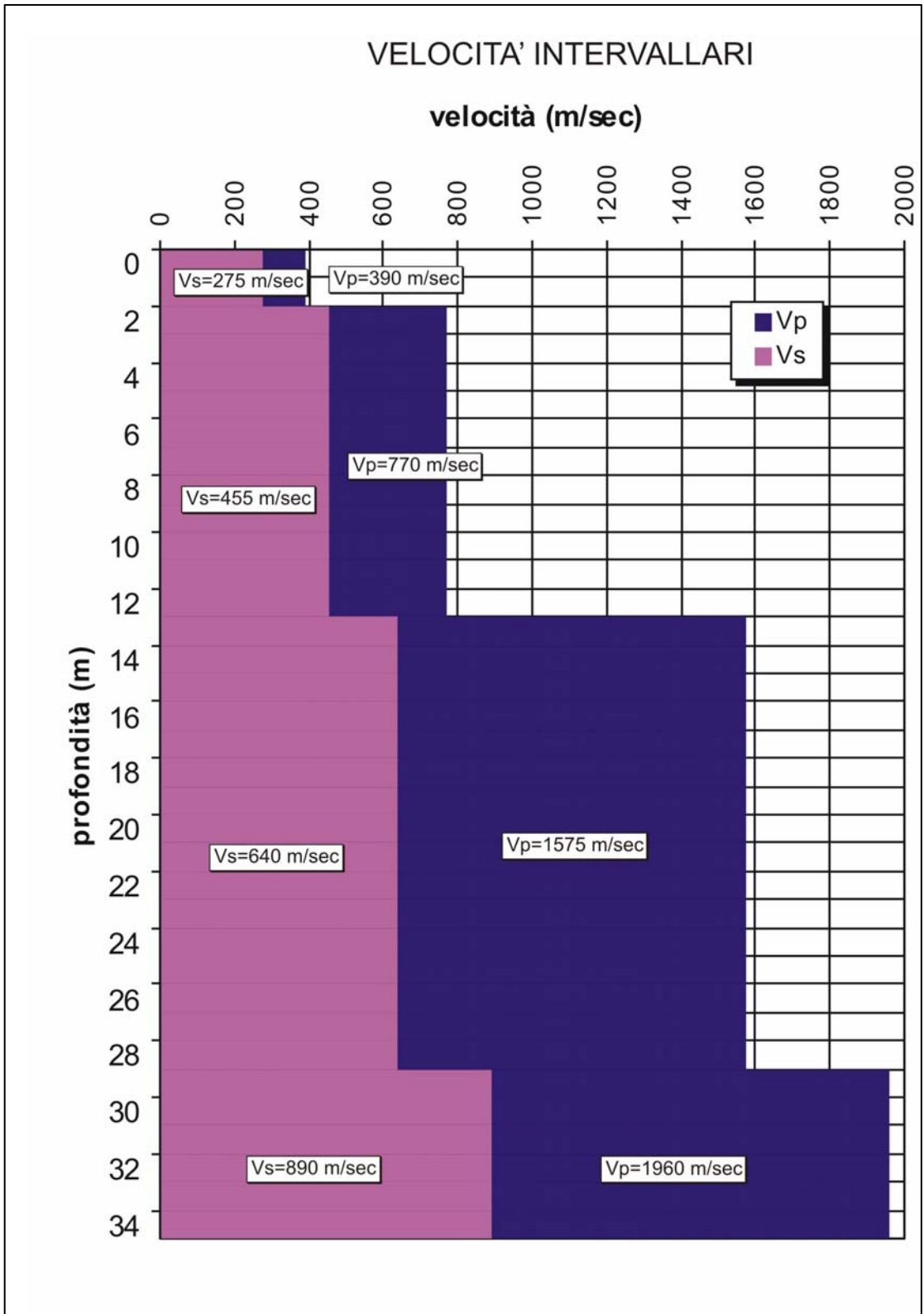
Tempi (msec)



## **APPENDICE 2B2g**

### **INDAGINI DOWN-HOLE**

*Istogrammi di distribuzione delle velocità sismiche*



## **(2B2.4) PROVA CROSS-HOLE (□)**

La finalità dell'indagine è quella di determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde  $P$ ) e di taglio (onde  $S$ ), calcolando il tempo ad esse necessario per spostarsi tra due o più punti (sorgente e ricevitori), nella porzione di terreno compresa tra due o più sondaggi (uno in cui è alloggiato il sistema energizzante e l'altro, o gli altri, in cui sono ospitati i sistemi riceventi) di cui è nota la distanza.

Tale prova in foro viene descritta nei suoi dettagli esecutivi dalla normativa ASTM D4428M-91, a cui viene fatto riferimento, fermo restando l'assoluta validità delle seguenti specifiche.

La prova Cross-hole, per le finalità delle presenti Istruzioni Tecniche, dovrebbe essere effettuata quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori ai 25-30 m e si rende necessaria soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione elevate soprattutto in profondità, anche in considerazione degli elevati costi esecutivi (necessità di realizzazione di fori di sondaggio e di energizzazione in foro), in confronto con altre tipologie di indagine sismica, sia di superficie sia in foro.

È opportuno, nella pianificazione e successiva esecuzione dell'indagine, spingere la prova fino ad incontrare il bedrock sismico attraversandolo per uno spessore significativo.

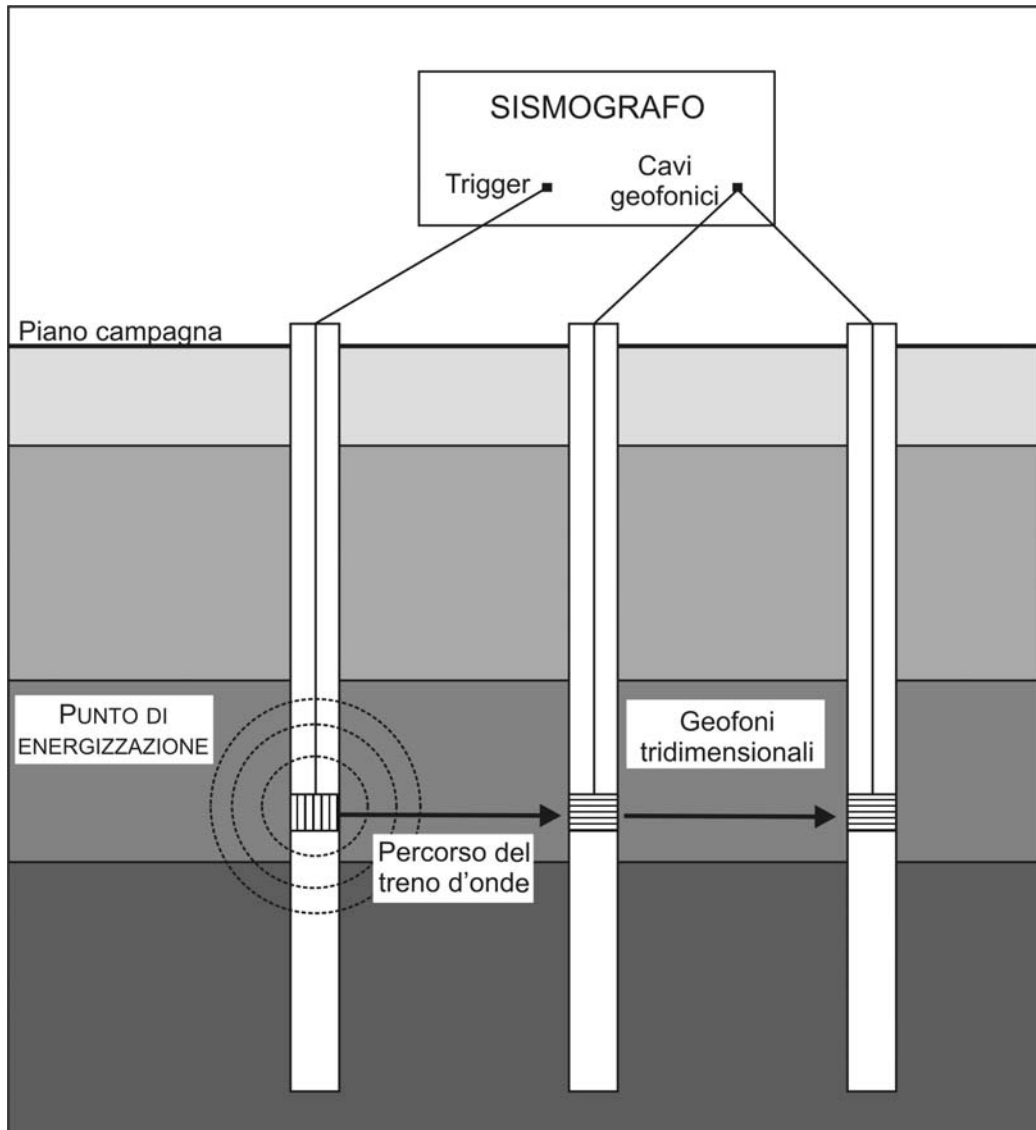
Nell' ipotesi alla base della prova, si suppone che il volume di terreno, compreso tra la sorgente e i ricevitori, si comporti come un semispazio di materiale elastico, omogeneo ed isotropo.

### **2B2.4.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA**

La prova (Figura 2B9) consiste nel produrre all'interno del terreno, ad una profondità nota, una sollecitazione verticale mediante una sorgente meccanica, e nello studiare il treno d'onde di compressione (onde  $P$ ) e di taglio (onde  $S$ ), che si propagano all'interno del terreno con direzione di propagazione orizzontale, con vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione (onde  $P$ ), e dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione, polarizzate su un piano verticale (onde  $SV$ ).

In particolare viene calcolato, mediante uno o più ricevitori (geofoni tridimensionali) disposti sempre nel terreno alla medesima profondità, l'istante di arrivo del treno di onde  $P$  e  $S$ , rispetto all'istante in cui vengono indotte le

sollecitazioni alla sorgente, in modo che dividendo tali valori per la distanza (supposta nota) tra sorgente e ricevitori, si possa ricavare il parametro velocità.



**Figura 2B9** – Schema semplificato di un'indagine cross-hole

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;

- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

La sorgente può essere di varia natura (sorgenti meccaniche con pistone ad aria a doppia azione, sorgenti elettromagnetiche, ecc.) e deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda direzionali, ovvero con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani verticali (ed eventualmente anche orizzontali tenendo però conto che generare onde di taglio SH pure in foro è estremamente complesso, mentre molte tecniche utilizzate prevedono una generazione di onde torsionali con componente compressionale); la quantità di energia prodotta deve essere possibilmente regolabile, quantificabile e soprattutto ripetibile.

Il sistema di ricezione si deve comporre di uno (o più) ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da una terna di trasduttori di velocità orientati secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale e collocati all'interno di un unico contenitore (preferibilmente di forma cilindrica) di lunghezza non superiore ai 450 mm, in modo che uno dei tre trasduttori sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali). I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del 5% su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde di corpo che si propaga all'interno del mezzo. E' necessario inoltre adottare un adeguato sistema di ancoraggio dei trasduttori.

Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata ed in cui parte la sollecitazione dinamica.

L'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve, all'atto delle sollecitazioni ripetute, consentire una differenza di chiusura non superiore a 0.5 msec.

Il sistema di acquisizione dati deve essere di tipo multicanale in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa con formato in uscita minimo a 16 bit.. Esso è collegato a ciascuno dei tre trasduttori di velocità di ciascuno dei ricevitori e al sensore del trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come

forme d'onda su un apposito monitor le vibrazioni così come rilevate dai trasduttori dei ricevitori e l'impulso inviato dal trigger.

L'esecuzione della prova cross-hole deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengono realizzati i fori in cui alloggiare la sorgente e i ricevitori e vengono preparati gli strumenti di energizzazione e di registrazione.

La prova cross-hole, nella sua versione ottimale, prevede in corrispondenza del sito da investigare tre (o più) fori, uno per la sorgente e gli altri due (o più) per i ricevitori; tali fori devono essere allineati e ad uguale distanza (proiettando in superficie la distanza tra i centri dei fori di sondaggio) compresa tra 3 e 5 m e comunque non superiore per evitare di rilevare onde rifratte piuttosto che impulsi diretti, soprattutto nel caso in cui gli spessori degli strati siano piccoli e il contrasto di velocità tra loro sia alto. In generale, se le velocità delle alluvioni sciolte risultano superiori a 450 m/sec è molto probabile che le misure cross-hole, per le motivazioni suddette, siano errate.

Durante la fase di perforazione dei fori, per ridurre al minimo possibili scavamenti sulle pareti, è opportuno sostenere le pareti con fango bentonitico.

Successivamente i fori devono essere rivestiti con tubazioni in materiale ad alta impedenza alle vibrazioni (ad es. ABS o PVC, in quest'ultimo caso occorrono tubi rigidi provvisti esternamente di rigature longitudinali); il diametro interno di tali tubi deve essere compreso tra 95 e 125 mm e lo spessore tra 5 e 10 mm.

Infine i fori devono essere cementati in corrispondenza dello spazio anulare compreso tra le pareti del foro e il tubo di rivestimento.

La cementazione deve essere eseguita in modo da garantire la continuità del contatto terreno-tubazione. E' possibile, prima ancora di collocare il rivestimento, chiudere il fondo del foro con un cappello (packer) dotato di valvola di controllo sferica one-way, in grado di accogliere un tubo del diametro di 38 mm; dopodiché, una volta posizionata la tubazione di rivestimento e centrata rispetto alle pareti del foro con l'ausilio di appositi distanziatori montati sul fondo, viene calato all'interno del foro, fino a raggiungere la valvola, un tubo in ABS o PVC del diametro di 38 mm, collegato in superficie ad una pompa convenzionale per mezzo della quale viene iniettata la miscela cementizia, che, una volta raggiunto il fondo del foro, inizia a riempire dal basso verso l'alto in maniera uniforme l'intercapedine tra foro e rivestimento, spazzando via il fango e i detriti eventualmente presenti (normativa ASTM).

E' possibile altresì calare direttamente il tubo per l'iniezione nell'intercapedine fino al fondo del foro e quindi procedere alla cementazione dal basso verso



l'alto in modo da poter garantire al massimo la continuità del terreno – tubazione, con tutti quegli accorgimenti necessari.

La miscela da utilizzare, in linea di massima, per la cementazione è costituita da una malta a ritiro controllato (acqua + cemento + bentonite), in particolare per la parte del foro che penetra nella roccia si consiglia il cemento di Portland convenzionale di densità pari a 2.2. mg/m<sup>3</sup>, mentre per la parte a contatto con terreni, sabbie e ghiaie si sceglie una miscela con una densità prossima a quella del terreno circostante (da 1.8 mg/m<sup>3</sup> a 1.9 mg/m<sup>3</sup>), ottenuta mescolando 450 g di cemento di Portland, 450 g di bentonite a 2.8 kg di acqua. La pressione di iniezione non deve essere superiore a 2 atm (Normativa ASTM). Questo in condizioni normali; qualora la situazione incontrata presentasse forti venute di acqua, fatturazione, scavernamenti, etc., la composizione della miscela e pressione d'iniezione potranno essere opportunamente variate sentita la Regione Toscana- Settore- Servizio Sismico Regionale e tenuto conto che l'obiettivo è un contatto solidale tra terreno e tubo di rivestimento.

L'Impresa esecutrice della prova cross-hole, prima dell'avvio della fase di acquisizione, è tenuta ad effettuare un controllo sull'accessibilità del foro per tutta la profondità e, qualora vengano rilevate difformità con la profondità segnalata dalla Direzione lavori a conclusione della perforazione, è tenuta a segnalare tale problematica all'Amministrazione appaltante.

Per potere conoscere con esattezza al variare della profondità la distanza orizzontale tra sorgente e ricevitore è necessario controllare la deviazione dei fori dalla verticale. Lo strumento generalmente utilizzato è l'inclinometro e deve essere in grado di rilevare, al variare della profondità procedendo lungo l'asse del foro, la deviazione, x, di ciascun punto dalla verticale ideale misurata lungo la direttrice N-S, positivamente verso N, e la deviazione, y, lungo la direttrice E-W, misurata positivamente verso E. In questo modo si può ricavare l'inclinazione dell'asse in un range compreso tra 0 e 30°, con una sensibilità di 0.1°, determinando quindi la distanza effettiva entro il ± 2 % ad una profondità di circa 30 m.

Nota la quota assoluta, E<sub>S</sub>, del centro del foro-sorgente in superficie e del centro del foro-ricevitore, E<sub>R</sub>, la distanza relativa, L, e l'angolo di azimuth, misurato positivamente rispetto a N, φ, la profondità del ricevitore, D<sub>R</sub>, e della sorgente, D<sub>S</sub>, le deviazioni della sorgente, x<sub>S</sub>, y<sub>S</sub>, e del ricevitore, x<sub>R</sub> e y<sub>R</sub>, si può ricavare la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore alla profondità desiderata:

$$l = \sqrt{[(E_s - D_s) - (E_r - D_r)]^2 + (L \cos \phi + x_r - x_s)^2 + (L \sin \phi + y_r - y_s)^2} \quad (2B.7)$$

Tale controllo deve essere effettuato per ciascun foro ad intervalli non superiori ai 3 m procedendo dall'alto verso il basso e poi dal basso verso l'alto a intervalli non superiori ai 6 m.

Nel caso di fori di profondità non superiori ai 15 m si può utilizzare un filo a piombo da calare nell'intercapedine tra rivestimento e pareti (prima della cementazione) e controllare ogni 3 m, correggendone l'inclinazione ogni qual volta il filo tocchi le pareti del foro.

Una volta terminate le operazioni di rivestimento e cementazione l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Viene preparato il sistema di acquisizione dei dati, collegando separatamente ai canali del sistema i trasduttori di ogni singolo ricevitore e il sensore del trigger, alloggiato nella sorgente.
2. La sorgente viene calata all'interno di uno dei fori più esterni dell'allineamento ad una profondità iniziale non superiore a 1.5 m, in corrispondenza della quale viene bloccata alle pareti del rivestimento.
3. I ricevitori vengono posizionati nei rimanenti fori alla medesima profondità della sorgente, in modo tale che uno dei tre trasduttori sia orientato in direzione verticale (quello che capta nella loro massima ampiezza le onde SV) e gli altri orizzontali; anche in questo caso è necessario assicurare lo strumento alle pareti del rivestimento. I ricevitori devono essere dotati di un sistema di collegamento al terreno affidabile e ripetibile, mediante il quale sia possibile individuare e modificare l'orientazione dei trasduttori dalla superficie.
4. Viene attivata la registrazione delle vibrazioni con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente. Questa fase di pretriggering può essere evitata se la strumentazione garantisce la partenza della registrazione nell'istante di time-break all'attivazione del trigger.
5. Viene innescata la sorgente producendo una sollecitazione verticale che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i ricevitori orizzontalmente con vibrazioni di tipo P, quindi polarizzate nella direzione di propagazione, e vibrazioni, di tipo S, dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione e polarizzate sul piano verticale. Il tempo di registrazione deve essere tale da consentire la rappresentazione dei treni d'onda nella loro interezza.
6. Viene riprodotta la sollecitazione e quindi ripetuta la prova ad una profondità inferiore di non più di 1 m, abbassando la sorgente e i ricevitori.

7. Raggiunto il fondo dei fori la prova viene iterata questa volta procedendo dal basso verso l'alto ad intervalli di 2 m.

#### 2B2.4.2 ELABORAZIONE DATI

Per quanto riguarda l'interpretazione dei tracciati registrati durante la prova per la determinazione della velocità di propagazione delle onde sismiche, esistono varie tecniche nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza; di seguito verrà illustrata quella più semplice ed immediata, non escludendo però la possibilità di ricorrere ad altre tecniche purché già collaudate e sperimentate. In tal caso è necessario che insieme ai risultati della prova venga esplicitamente dichiarato il metodo adottato per la determinazione delle velocità, nonché i passi successivi secondo cui è stato applicato e le registrazioni delle vibrazioni, accoppiate con quella del segnale di trigger, a partire dalle quali sono stati ricavati i valori di velocità.

Per determinare il tempo di arrivo delle onde P e S ai ricevitori, si procede ad un'analisi visuale delle registrazioni delle vibrazioni rilevate dai trasduttori del ricevitore (o dei ricevitori, disponendo di più verticali di ricezione), confrontate con il segnale rilevato dal sensore collegato al trigger.

In particolare (Fig. 2B10) il sensore collegato al pre-trigger inizia a registrare nell'istante  $t = 0$ , prima dell'applicazione della sollecitazione che avviene nell'istante  $t = T$ , detto zero dei tempi, che è facilmente individuabile sul tracciato per effetto dell'impulso inviato dal trigger; il segnale così registrato si suddivide in due parti che si possono facilmente distinguere: la parte compresa tra gli istanti  $t = 0$  e  $t = T$ , rappresentativa di quanto avviene nel terreno in corrispondenza della sorgente prima dell'applicazione della sollecitazione, utile per rilevare e eliminare eventuali disturbi ambientali preesistenti, e la parte successiva all'istante  $t = T$ . Si consideri comunque la possibilità di operare anche senza pre-trigger.

Una volta riportato l'istante  $t = T$  anche sulle tracce rilevate dai ricevitori, che iniziano a registrare simultaneamente col sensore collegato al trigger nell'istante  $t = 0$ , si può individuare (Mancuso, 1996):

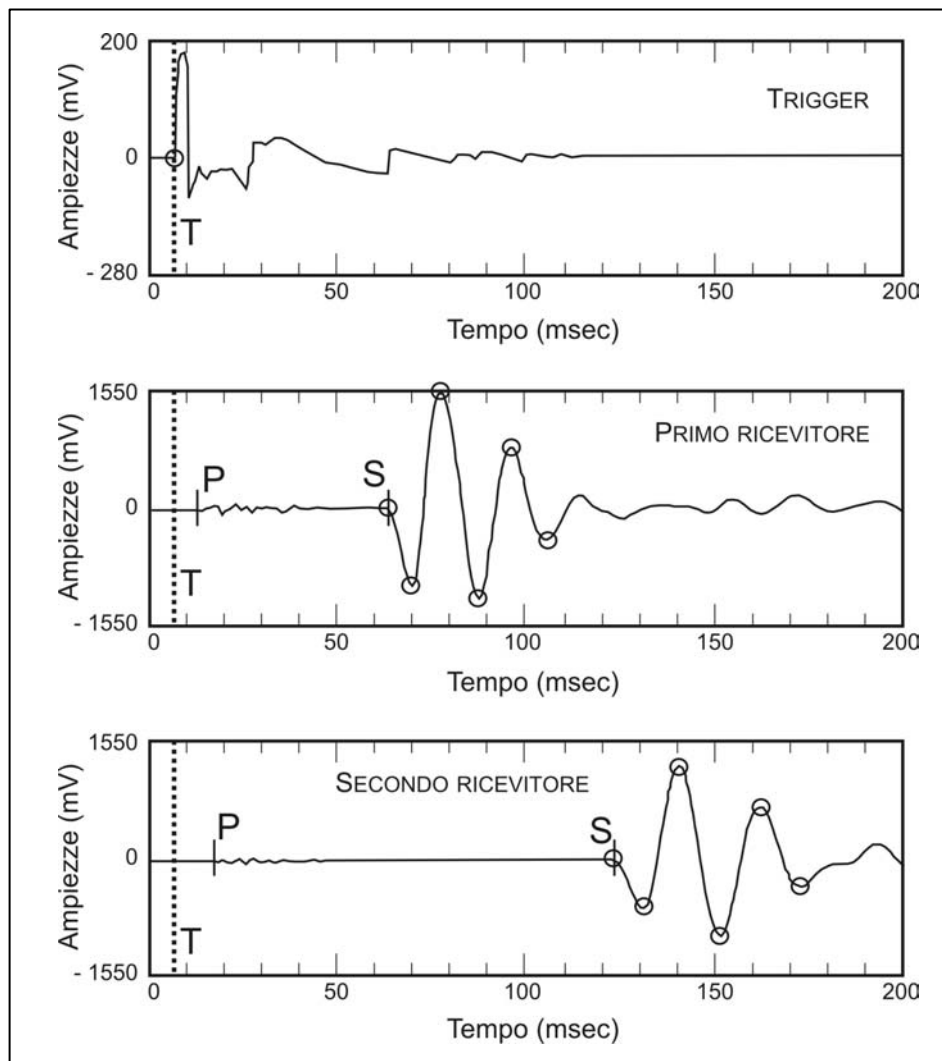
- un intervallo [ $t = T$ ;  $t = P$ ] in cui il tracciato è completamente piatto o itera l'andamento rilevato nell'intervallo precedente dovuto ad eventuali disturbi, rappresentativo del tempo impiegato delle prime onde ( $P$ ) per arrivare dalla sorgente al ricevitore considerato
- un intervallo [ $t = P$ ;  $t = S$ ], in cui si rilevano oscillazioni generalmente di modesta ampiezza inizialmente crescente e poi decrescente, rappresentativo dell'arrivo e del successivo smorzamento delle onde P

– un intervallo  $[t = S; t = F]$ , dove  $F$  è l'istante di fine registrazione, caratterizzato da vibrazione di ampiezza e periodo almeno due volte quella dell'intervallo precedente, rappresentativo dell'arrivo e del successivo smorzamento delle onde  $S$ .

E' possibile operare senza pretriggering, calcolando i tempi di partenza della registrazione che avviene al time-break.

E' possibile operare con energizzazioni separate  $P$  ed  $S$ ; in questo caso risulta più facile la determinazione del primo arrivo in  $S$ .

E' possibile che in presenza di brusche variazioni di rigidità con la profondità le onde  $P$  e  $S$  vengano rifratte in corrispondenza delle superfici di discontinuità giungendo ai ricevitori ancor prima di quelle dirette della stessa natura. Le onde riflesse  $P$  possono, viceversa, arrivare ai ricevitori sia prima, sia allo stesso tempo, sia successivamente le dirette in  $S$  ma mai prima delle dirette in  $P$ .



**Figura 2B10** – Registrazioni relative a prova cross-hole (Mancuso, 1996, mod.)

La differenza tra i tempi **T** e **P**, **T** e **S** ai due ricevitori, rappresentano quindi i tempi di viaggio delle onde dirette **P** e **S** dalla sorgente ai due (o più) ricevitori.

Si suppone che le onde si propaghino orizzontalmente senza subire deviazioni, trascurando quindi l'effetto di curvatura legato al loro percorso, che è comunque modesto essendo limitate le distanze in gioco in questo tipo di prova.

Dividendo perciò per i tempi d'arrivo la distanza orizzontale tra sorgente e ricevitore (o più ricevitori), eventualmente depurata dalle deviazioni di verticalità dei fori) si ricavano uno (o più) valori di velocità diretta delle onde S e P.

Dividendo la distanza orizzontale (eventualmente corretta) tra i ricevitori per la differenza tra i tempi d'arrivo delle onde *S* e *P* per ogni singola terna geofonica, si ricavano ulteriori valori di velocità delle onde *P* e *S*, utili per la determinazione delle velocità intervallari.

Non sempre i tracciati registrati dai ricevitori sono chiari e univocamente interpretabili sia per l'eventuale presenza di onde rifratte *P* ed *S* di ampiezze non trascurabili che precedendo quelle dirette ingannano sui reali tempi d'arrivo. La presenza di eventuali disturbi di origine meccanica o elettrica deve essere evitata perché disturba il picking dei primi arrivi. Solo qualora tali disturbi risultino di ampiezza contenuta e rappresentino rumore casuale, è possibile operare ripetendo più volte le registrazioni e mediando i tracciati (stacking).

Quando l'istante di primo arrivo delle onde non è facilmente individuabile, sfruttando il fatto di disporre di più ricevitori, si può far riferimento ai tracciati registrati da ciascuno di essi ricercando dei punti caratteristici (picchi o valli) successivi al primo arrivo ritrovabili in entrambi i segnali e stimandone il ritardo e quindi ricavando la velocità d'intervallo; in tal caso affinché ad ogni picco dell'una registrazione corrispondano rispettivamente i picchi o le valli dell'altra è necessario che sia stato precedentemente stimato l'effetto dell'orientazione dei trasduttori rispetto alla direzione di propagazione delle onde e che sia noto se i trasduttori siano orientati in maniera concorde o discorde. Lo stesso ritardo può anche essere stimato ricorrendo al metodo della cross-correlazione, nel dominio del tempo o della frequenza. Va comunque rivolta molta attenzione al fatto che non sempre, nei casi reali, tali operazioni automatiche forniscono risultati certi.

Il problema del significato delle velocità intervallari ricavabili dalle variazioni di velocità dirette tra un punto e quello immediatamente seguente, presenta diverse soluzioni e può essere risolto al meglio solamente utilizzando quelle

metodologie che prevedono l'analisi completa del sismogramma e non, come nel cross-hole e nel down-hole, dove ci si limita a tecniche di analisi del primo arrivo. In generale l'interpretazione dello "scattering" nel diagramma tempo-profondità può dipendere principalmente dai seguenti fattori: a) ritardo o anticipo del trigger; b) differenze di spessore della cementazione nei vari punti a causa di scavarnamenti di differente entità; c) perdita della prima fase; d) presenza di orizzonti rifrangenti di spessore ridotto ed intercalati che determinano arrivi diretti successivi ai first-break P ed S.

Nel caso in cui le velocità di propagazione sorgente-geofoni siano fortemente differenti da quelle geofoni-geofoni, possono essere stati commessi degli errori d'interpretazione. Ad esempio, se è stato fatto riferimento anziché all'istante di arrivo a punti caratteristici del segnale, si può avere nel passare dal ricevitore ad un altro un distendimento del segnale che allontana tali punti caratteristici fornendo dei valori di velocità più bassi, falsati in misura tanto maggiore quanto più elevate sono le distanze tra i ricevitori.

#### 2B2.4.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, cioè la velocità di propagazione delle onde *S* e *P* al variare della profondità, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione e interpretazione adottato.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

- il numero, l'interasse, il diametro, la profondità dei fori in cui viene effettuata la prova, la loro ubicazione (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un'apposita Carta in scala 1:2.000);
- le modalità di esecuzione, di rivestimento e di cementazione adottate;
- eventuali deviazioni dalla verticale dell'asse dei fori;
- la strumentazione adottata;
- le profondità a cui sono state effettuate le prove;
- i segnali registrati dai trasduttori dei ricevitori e il corrispondente segnale di trigger, specificando per ciascuno di essi la profondità di prova, la direzione del trasduttore (verticale o orizzontale) e il ricevitore d'appartenenza; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull'asse delle ascisse sia riportato il tempo (in ms) e sull'asse delle ordinate il segnale (in mV), sia in forma numerica su supporto CD-ROM;
- il criterio di elaborazione adottato per il calcolo delle velocità;

- il diagramma che riporti la distribuzione delle velocità calcolate (in m/s) sull'asse delle ascisse in funzione della profondità (in m) sull'asse delle ordinate.

## **(2B2.5) INDAGINI SASW (SPECTRAL ANALYSIS SURFACE WAVE) (□)**

Lo scopo della prova SASW consiste nel determinare il profilo di rigidezza del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh ( $V_R$ ) ed un successivo processo di inversione, attraverso il quale viene fornita una stima indiretta della distribuzione delle  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova si applica quando la profondità delle coperture da esplorare è compresa tra i 10 ed i 50 m, presentando una maggiore attendibilità per profondità indagate inferiori ai 20 m. Si rende necessaria soprattutto quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno e quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione buone. Per l'esecuzione della prova è necessaria una superficie pianeggiante più o meno ampia in relazione alla profondità di indagine.

Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo.

### 2B2.5.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale in un determinato campo di frequenze, opportunamente regolabile, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di rigidezza può scomporsi in due fasi fondamentali:

- Deduzione della curva di dispersione (velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza) caratteristica del sito in esame;
- Processo di inversione, finalizzato ad ottenere partendo dalla curva suddetta una stima del profilo di rigidezza ad essa associato.

Ai fini di questa prova, di tutte le componenti di moto prodotte nel terreno dalla sorgente, interessano quelle che si trasmettono lungo la superficie (onde

superficiali) e di queste quelle di *Rayleigh*, polarizzate sul piano verticale e caratterizzate sia da componenti longitudinali che trasversali. Tali onde si propagano lungo fronti d'onda cilindrici, coassiali rispetto alla sorgente, con attenuazione proporzionale all'inverso della radice di  $r$  (dove  $r$  è la distanza dalla sorgente) inferiore all'attenuazione delle onde di volume (proporzionale invece a  $1/r$ ) e perciò già a distanze non molto grandi le onde di superficie tendono a prevalere nettamente su quelle di volume.

La componente verticale del moto indotta dalle onde di Rayleigh è predominante su quella orizzontale e si attenua con la profondità rapidamente fino a diventare insignificante ad una quota di poco superiore alla lunghezza d'onda  $\lambda$  della sollecitazione indotta. Perciò per indagare profondità sempre maggiori e ricavare la velocità caratteristica delle onde di Rayleigh è opportuno aumentare progressivamente la lunghezza d'onda della sollecitazione prodotta dalla sorgente, costruendo così una curva in cui sia riportata al variare della lunghezza d'onda  $\lambda$ , e quindi della profondità investigata, la velocità delle onde di Rayleigh calcolata (curva di dispersione).

La velocità  $V_R$  risulta sperimentalmente assai prossima a quella delle onde di taglio  $V_S$  (variando in funzione del coefficiente di Poisson tra 0.86 e 0.95), tramite la quale si possono ricavare le caratteristiche meccaniche del terreno per mezzo delle relazioni precedentemente citate.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- sistema sorgente
- sistema di ricezione
- sistema di acquisizione dati

La sorgente sismica deve essere di tipo meccanico, a impulsi transitori e varia a seconda del campo di lunghezze d'onda da generare e quindi delle profondità da investigare: si passa da martelli di massa modesta (compresa tra 50 e 500 g), in grado di produrre onde di lunghezza ridotta e quindi con elevato contenuto in frequenza, a elementi di massa notevole (compresi tra 2 e 3 t) fatti cadere da un camion o da una benna da altezze comprese tra 2 e 3 m.

In ogni caso è opportuno verificare ogni volta sperimentalmente il tipo di sorgente da adottare in funzione della quantità di energia da produrre, del campo di frequenze da eccitare e delle condizioni della superficie del deposito.

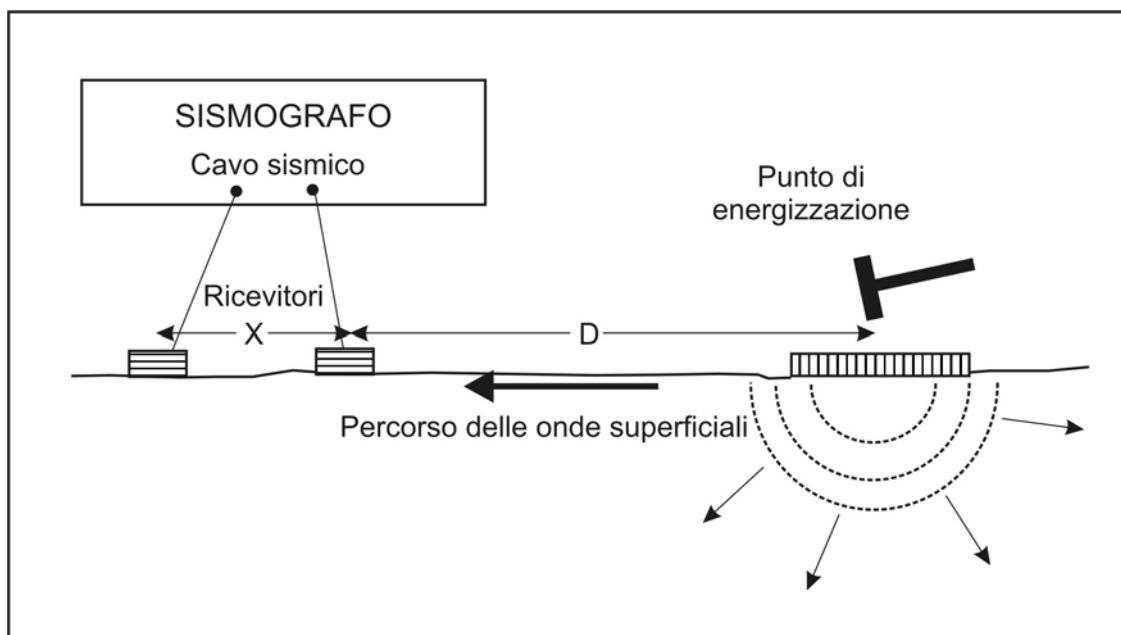
Il sistema di ricezione si compone di almeno due ricevitori verticali (trasduttori di velocità). I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto



dalla sorgente e vanno quindi selezionati in funzione della banda di frequenza che si intende acquisire (generalmente compresa tra 1 Hz e 10 Hz). La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del 5% su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde che si propaga all'interno del mezzo.

Il sistema di acquisizione dati dev'essere di tipo multicanale in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa. Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come forme d'onda su un apposito monitor le vibrazioni così come rilevate ai trasduttori dei ricevitori.

Per una migliore e più corretta acquisizione dei dati la configurazione geometrica più vantaggiosa consiste nel disporre la sorgente e i ricevitori in modo che risultino allineati ed equidistanti tra loro, con i due ricevitori dalla stessa parte rispetto alla sorgente (common receivers midpoint geometry).



**Figura 2B11** – Schema semplificato di una prova SASW

Una volta fissata la posizione della verticale da investigare la prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Viene preparato il sistema di acquisizione dei dati, collegando separatamente ai canali del sistema i trasduttori di ogni singolo ricevitore.
2. I due ricevitori vengono collocati ad asse verticale simmetricamente rispetto

alla verticale d'indagine e a breve distanza ( $X = 1$  m).

3. Viene attivata la registrazione delle vibrazioni rilevate dai trasduttori che costituiscono i ricevitori con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente.
4. Viene attivata la sorgente, allineata e da una parte rispetto ai ricevitori e ad una distanza pari a quella esistente tra i ricevitori,  $X$ .
5. Le vibrazioni prodotte vengono registrate dai trasduttori e la prova viene ripetuta più volte in modo da disporre di più registrazioni, che mediate consentono di ridurre i rumori di fondo eventualmente presenti.
6. La sorgente viene spostata in posizione diametralmente opposta rispetto ai ricevitori, che invece rimangono fissi (inversione della sorgente) e la prova viene ripetuta (punti 3-4-5).
7. L'intera procedura sperimentale viene ripetuta cambiando la sorgente in modo da produrre onde di lunghezza maggiore e adeguando alla ricezione i ricevitori, i quali devono essere allontanati (aumentando l'interasse  $X$ ) per migliorare la ricezione e ridurre l'eventuale interferenza tra le diverse onde trasmesse.

#### 2B2.5.2 ELABORAZIONE DATI

Per determinare la velocità di propagazione delle onde sismiche con la tecnica *SASW* si ricorre al metodo della cross-correlazione nel dominio della frequenza, sfruttando quindi la presenza di due ricevitori.

La funzione di cross-correlazione, associata a due segnali  $h(t)$  e  $g(t)$  registrati dai due ricevitori relativamente allo stesso impulso-sorgente, è una funzione del ritardo  $\tau$ , ottenuta integrando, nel dominio del tempo, il prodotto tra il segnale registrato dal ricevitore più lontano,  $h(t)$ , e il segnale registrato dal ricevitore più vicino, ritardato però di un tempo  $\tau$ .

$$CC(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \cdot g(t - \tau) \cdot dt \quad (2B.8)$$

Il valore di  $\tau$  per cui tale integrale assume valore massimo rappresenta anche il valore per cui le funzioni  $h(t)$  e  $G(t-\tau)$  sono più simili e perciò si assume come tempo di ritardo esistente tra i due ricevitori nella registrazione dello stesso impulso sorgente, nonché tempo di propagazione delle onde sismiche tra i due ricevitori.

Anziché ricavare direttamente tale funzione, si preferisce calcolare la sua trasformata di Fourier nel dominio della frequenza  $f$ ,  $CS(f)$ , detta anche spettro

di cross-correlazione e dato dal prodotto della trasformata del segnale registrato dal ricevitore più vicino,  $\mathbf{G}(\mathbf{f})$ , e dal complesso coniugato della trasformata del segnale registrato dal ricevitore più lontano,  $\mathbf{H}(\mathbf{f})$ :

$$CS(f) = G(f) \cdot \overline{H}(f) \quad (2B.9)$$

Quindi si considera l'angolo di fase  $\Phi(\mathbf{f})$ , espresso in gradi, dello spettro di cross-correlazione e si ricava, come funzione della frequenza  $\mathbf{f}$ , il tempo di viaggio delle onde sismiche tra i due ricevitori,  $\mathbf{t}(\mathbf{f})$ , e, nota la distanza  $d$ , anche la velocità:

$$t(f) = \frac{\Phi(f)}{360 \cdot f} \quad (2B.10)$$

$$v(f) = \frac{d}{t(f)} \quad (2B.11)$$

Quindi si considera l'intervallo di frequenza all'interno del quale la coerenza dello spettro di correlazione è assai prossima ad 1, e si assumono come valori accettabili della velocità  $\mathbf{v}(\mathbf{f})$  quelli corrispondenti a tale campo di frequenza, considerandone una media.

La velocità delle onde di Rayleigh  $V_R$  può anche essere rappresentata in termini di lunghezza d'onda  $L_R$ :

$$L_R = \frac{V_R(f)}{f} \quad (2B.12)$$

ottenendo la cosiddetta curva di dispersione.

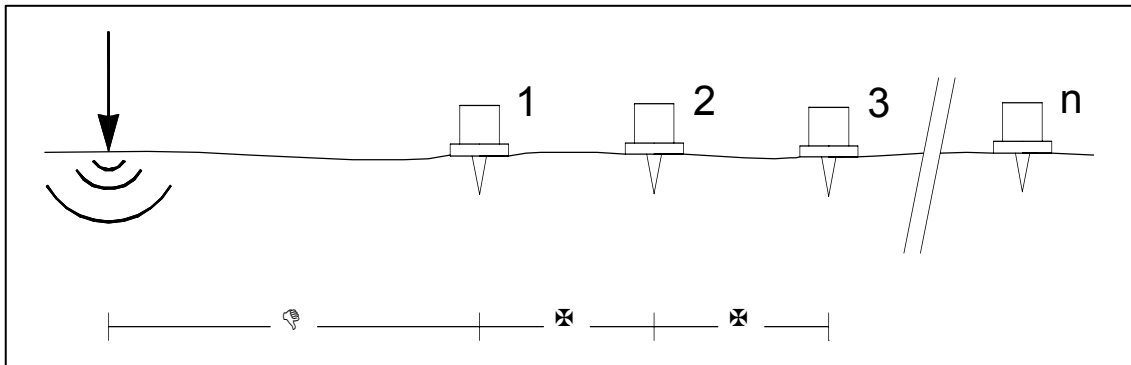
Una stima approssimata del profilo delle velocità delle onde S,  $V_S$  può essere ottenuta assumendo che  $V_R/V_S \cong 0.92$  e che la profondità corrispondente a ciascuna valore di velocità  $V_R(L_R)$  sia pari a  $1/2 \div 1/3$  la corrispondente lunghezza d'onda. Tale stima può considerarsi valida nel caso di mezzi stratificati aventi rigidità crescente con la profondità, ma in generale è richiesto un processo di inversione più accurato, basato su metodi di simulazione della propagazione delle onde superficiali.

### 2B2.5.3 PROVA MULTICANALE FK

Il procedimento di rilevazione ed interpretazione dei segnali generati dall'azione di una sorgente di tipo stazionario agente in superficie per ottenere la curva di dispersione caratteristica del sito sopra delineato, può essere indicato come metodo a due stazioni perché basato sull'uso di due soli ricevitori.

Fermo restando il criterio di base della caratterizzazione basata sulla propagazione di onde superficiali, tecniche alternative possono essere utilizzate per rilevare la propagazione delle onde in sito ed elaborare i relativi segnali per giungere alla curva di dispersione caratteristica del sito.

Un esempio in tal senso può essere costituito dall'elaborazione simultanea di più tracce provenienti da un'acquisizione multicanale.



**Figura 2B12** – Schema di acquisizione multicanale

Trasformando le tracce nel dominio frequenza  $f$  - numero d'onda  $k$ , le coppie  $f$ - $k$  cui corrispondono i massimi spettrali di energia permettono di risalire alla curva di dispersione mediante la relazione:

$$V_R(f) = \frac{f}{k} \quad (2B.13)$$

La prova viene eventualmente ripetuta considerando diverse spaziature tra i ricevitori.

Il procedimento da seguire per l'inversione finalizzata ad ottenere dalla curva di dispersione la stima del profilo di rigidità caratteristico del sito è esattamente identico a quello indicato per la prova SASW.

L'utilizzo di tecniche di analisi multicanale presenta diversi vantaggi rispetto alla elaborazione dei segnali a coppie, come usualmente avviene nel metodo SASW, derivanti essenzialmente dall'utilizzo contestuale di dati rilevati in diversi punti sulla superficie conferisce alla tecnica una notevole robustezza e fornisce garanzie nei confronti di possibili effetti locali. Proprio tali proprietà consentono l'abbandono della configurazione di prova basata sulla geometria common receivers midpoint.

#### 2B2.5.4 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, la velocità delle onde S, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione e interpretazione adottato.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

- l'ubicazione della verticale d'esplorazione (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un'apposita Carta in scala 1:2.000);
- la posizione, rispetto alla verticale, dei ricevitori e della sorgente, specificando i successivi interassi adottati tra i ricevitori durante la prova;
- la descrizione della strumentazione adottata;
- i segnali registrati dai ricevitori, specificando l'interasse corrispondente tra i ricevitori e la posizione della sorgente; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull'asse delle ascisse sia riportato il tempo (in *ms*) e sull'asse delle ordinate il segnale (in *mV*), sia in forma numerica su CD-ROM;
- il criterio di elaborazione adottato per il calcolo delle velocità;
- la curva di dispersione;
- il diagramma che riporta le velocità delle onde di taglio calcolate (in *m/s*) sull'asse delle ascisse in funzione della profondità (in *m*) sull'asse delle ordinate.

## **(2B2.6) TOMOGRAFIA SISMICA (■)**

Lo scopo della prova consiste nella dettagliata esplorazione della velocità di propagazione delle onde di volume (onde P) e di taglio (onde S), calcolando il tempo ad esse necessario per spostarsi da un set di sorgenti a uno o più set di ricevitori di cui è nota la geometria.

La prova tomografica, per gli obiettivi di cui alle presenti IT, dovrebbe essere effettuata quando è necessaria un'ottima conoscenza della velocità delle onde sismiche anche a profondità superiori ai 25-30 m.

### **2B2.6.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA**

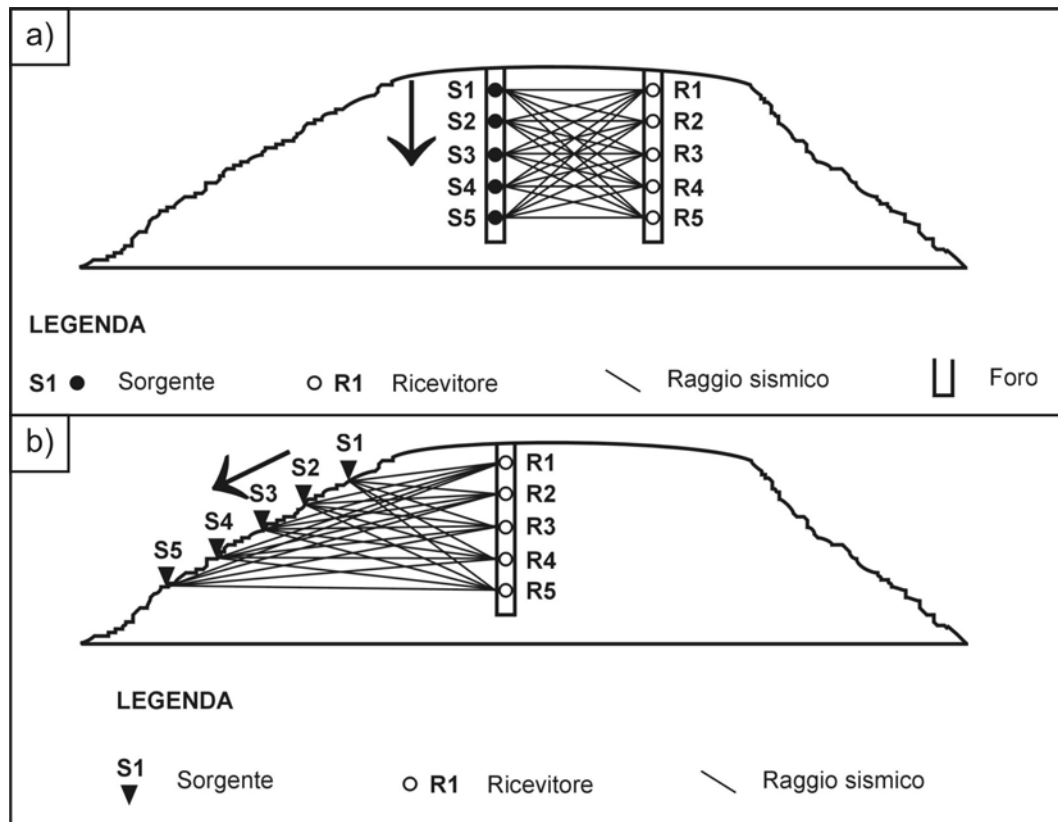
La prova, di difficile standardizzazione, può essere eseguita in foro o in superficie. La geometria d'acquisizione va programmata in funzione del contesto in cui si opera.

Per quanto riguarda lo schema relativo a prove tomografiche in foro (Fig. 2B13), esse consistono nel produrre all'interno di un foro di sondaggio, mediante un set di sorgenti, una sollecitazione verticale e registrare mediante uno o più set di ricevitori posti in un altro foro, i primi arrivi del treno d'onde P o S che si propagano all'interno del terreno. I raggi sismici devono formare una fitta rete in modo tale che idealmente ogni punto del mezzo sia attraversato dai raggi sismici in ogni direzione. La fase di elaborazione che consiste in un'inversione che può partire dalla specificazione di un iniziale modello di velocità, è costituita da due fasi principali:

1. risoluzione del problema diretto che consiste nella discretizzazione della regione studiata in una maglia (il numero totale delle celle dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza del numero dei dati) e nel calcolare il primo arrivo dei raggi sismici e le corrispondenti traiettorie di questi;
2. risoluzione del problema inverso che consiste nel cercare per ogni cella le perturbazioni del modello iniziale rispetto ai tempi misurati: sommando queste perturbazioni al modello iniziale si ottiene il depurato come risultato finale dell'inversione tomografica.

Un'indagine tomografica può essere eseguita anche in assenza di fori sfruttando una morfologia rilevata posizionando i ricevitori sul pendio ed energizzando sulla sommità o sul pendio opposto (Fig. 2B14). I ricevitori possono essere posizionati anche all'interno di un foro. La prova può comunque anche essere effettuata in assenza di una morfologia rilevata utilizzando la propagazione di onde rifratte (Fig. 2B15), in contesti caratterizzati da un

progressivo aumento di velocità con la profondità e tenendo conto che la tomografia a rifrazione non bypassa i limiti intrinseci del metodo a rifrazione.



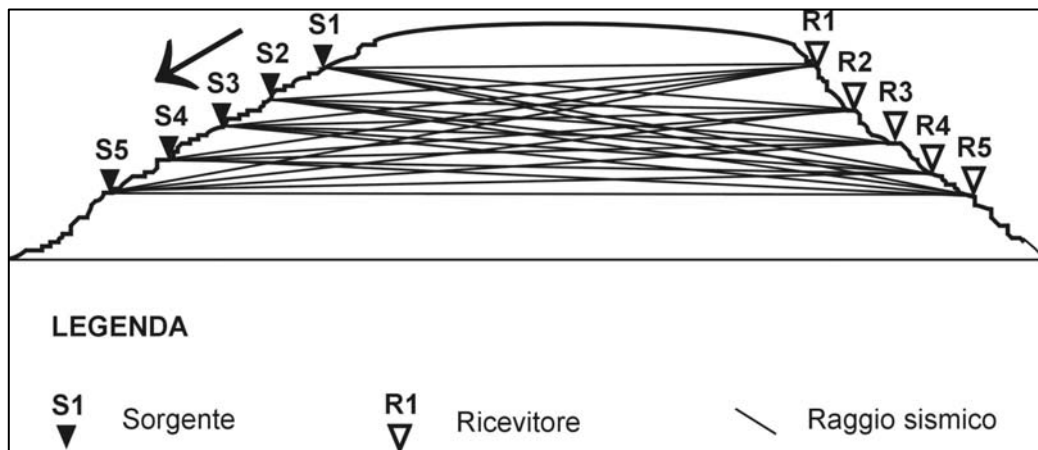
**Figura 2B13** – Schema della prova tomografia in pozzo: a) con due pozzi; b) con singolo pozzo

Nel caso in cui non vi sia un aumento progressivo di velocità con la profondità, i normali sistemi di trattamento dei dati sismici a rifrazione sono da preferirsi.

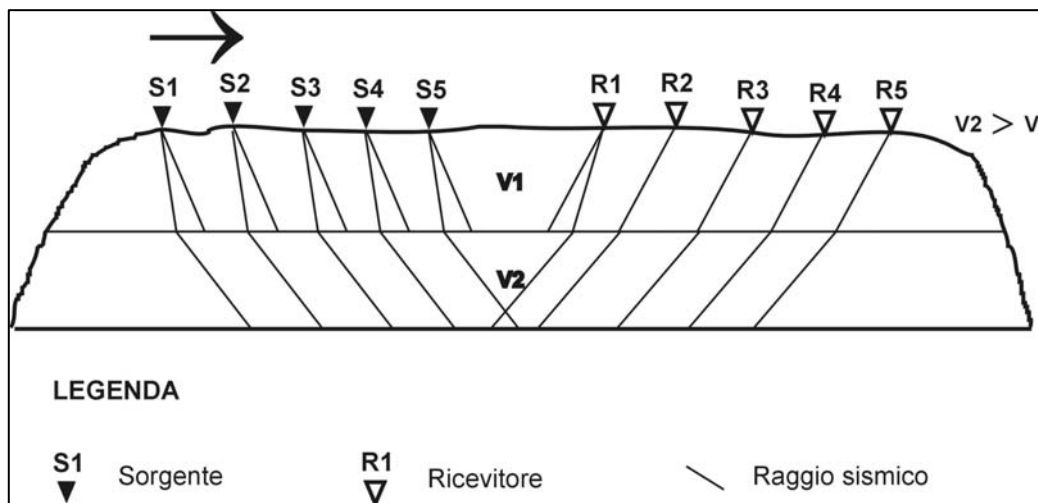
Energizzando in superficie, è possibile produrre sia sollecitazioni verticali che orizzontali e registrare mediante uno o più set di ricevitori posti in un superficie o in foro, i primi arrivi del treno d'onde P o S che si propagano all'interno del terreno. Valgono le stesse considerazioni fatte per la prova in foro.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- sorgente;
- sistema di ricezione;
- sistema di acquisizione dati;
- trigger.



**Figura 2B14** – Schema della prova tomografia in superficie



**Figura 2B15** – Schema della prova tomografia a rifrazione di superficie

La sorgente può essere di varia natura (sorgenti meccaniche con pistone ad aria a doppia azione, sorgenti elettromagnetiche, ecc.) e deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda direzionali, cioè con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani verticali (ed eventualmente anche orizzontali tenendo altresì conto che generare onde di taglio SH pure, in foro è estremamente complesso, mentre molte tecniche utilizzate generano onde torsionali che contengono una componente P); la quantità di energia prodotta deve essere possibilmente regolabile, quantificabile e soprattutto ripetibile.



Il sistema di ricezione deve essere costituito da una terna di trasduttori di velocità orientati secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale e collocati all'interno di un unico contenitore (preferibilmente di forma cilindrica) di lunghezza non superiore ai *450 mm*, in modo che uno dei tre trasduttori sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali). I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del *5%* su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde di corpo che si propaga all'interno del mezzo. E' necessario inoltre adottare un adeguato sistema di ancoraggio dei trasduttori.

Il trigger, in genere, consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

L'attivazione del circuito per individuare l'istante di energizzazione deve, all'atto delle sollecitazioni ripetute, consentire una differenza di chiusura non superiore a *0.5 msec*.

Il sistema di acquisizione dati deve essere di tipo multicanale in grado di registrare su ciascuno di essi in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minimo a *16 bit*. Esso è collegato a ciascuno dei tre trasduttori di velocità di ciascuno dei ricevitori e al sensore del trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come forme d'onda su un apposito monitor le vibrazioni così come rilevate dai trasduttori dei ricevitori e l'impulso inviato dal trigger.

Nel caso in cui la tomografia venga effettuata utilizzando almeno un foro di sondaggio, la fase di esecuzione della prova deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale vengono realizzati i fori in cui alloggiare la sorgente e i ricevitori.

La tecnica tomografica, nella sua versione ottimale prevede, in corrispondenza del sito da investigare due (o più) fori, uno per la sorgente e l'altro (o più) per i ricevitori.

Durante la fase di perforazione dei fori, per ridurre al minimo la possibilità di avere scavarnamenti sulle pareti, è opportuno sostenerle con fango bentonitico.

Operando esclusivamente con onde di compressione è possibile lavorare con catene di idrofoni immessi nel fango o nell'acqua. Dovendo operare, viceversa, con onde di taglio, è necessario provvedere al rivestimento ed alla cementazione dei fori.

Successivamente i fori devono essere rivestiti con tubazioni in materiale ad alta impedenza alle vibrazioni (ad es. ABS o PVC, in quest'ultimo caso occorrono tubi rigidi provvisti esternamente di rigature longitudinali); il diametro interno di tali tubi deve essere compreso tra 95 e 125 mm e lo spessore tra 5 e 10 mm.

Infine i fori devono essere cementati in corrispondenza dello spazio anulare compreso tra le pareti del foro e il tubo di rivestimento.

La cementazione deve essere eseguita in modo da garantire la continuità del contatto terreno-tubazione. E' possibile, prima ancora di collocare il rivestimento, chiudere il fondo del foro con un cappello (packer) dotato di valvola di controllo sferica *one-way*, in grado di accogliere un tubo del diametro di 38 mm; dopodiché, una volta posizionata la tubazione di rivestimento e centrata rispetto alle pareti del foro con l'ausilio di appositi distanziatori montati sul fondo, viene calato all'interno del foro, fino a raggiungere la valvola, un tubo in ABS o PVC del diametro di 38 mm, collegato in superficie ad una pompa convenzionale per mezzo della quale viene iniettata la miscela cementizia, che, una volta raggiunto il fondo del foro, inizia a riempire dal basso verso l'alto in maniera uniforme l'intercapedine tra foro e rivestimento, spazzando via il fango e i detriti eventualmente presenti (normativa ASTM).

E' possibile altresì calare direttamente il tubo per l'iniezione nell'intercapedine fino al fondo del foro e quindi procedere alla cementazione dal basso verso l'alto in modo da poter garantire al massimo la continuità del terreno – tubazione, con tutti quegli accorgimenti necessari.

La miscela da utilizzare, in linea di massima, per la cementazione è costituita da una malta a ritiro controllato (acqua + cemento + bentonite), in particolare per la parte del foro che penetra nella roccia si consiglia il cemento di Portland convenzionale di densità pari a  $2.2 \text{ mg/m}^3$ , mentre per la parte a contatto con terreni, sabbie e ghiaie si sceglie una miscela con una densità prossima a quella del terreno circostante (da  $1.8 \text{ mg/m}^3$  a  $1.9 \text{ mg/m}^3$ ), ottenuta mescolando 450 g di cemento di Portland, 450 g di bentonite a 2.8 kg di acqua. La pressione di iniezione non deve essere superiore a 2 atm (Norma ASTM). Questo in condizioni normali; qualora la situazione incontrata presentasse forti venute di acqua, fatturazione, scavarnamenti, etc., la composizione della miscela e pressione d'iniezione potranno essere opportunamente variate sentita la Regione Toscana Settore Servizio Sismico Regionale e tenuto conto che l'obiettivo è un contatto solidale tra terreno e tubo di rivestimento.

Nel caso in cui la tomografia venga eseguita in foro, per potere conoscere con esattezza al variare della profondità la distanza orizzontale tra sorgente e ricevitore è necessario controllare la deviazione dei fori dalla verticale. Lo strumento generalmente utilizzato è un sistema inclinometrico e deve essere in grado di rilevare, al variare della profondità procedendo lungo l'asse del foro, la deviazione (x) di ciascun punto dalla verticale ideale misurata lungo la direttrice N-S, positivamente verso N, e la deviazione (y) lungo la direttrice E-W, misurata positivamente verso E. In questo modo si può ricavare l'inclinazione dell'asse in un range compreso tra 0 e 30°, con una sensibilità di 0.1°, determinando quindi la distanza effettiva entro il  $\pm 2\%$  ad una profondità di circa 30 m.

Nota la quota assoluta,  $E_S$  del centro del foro-sorgente in superficie e del centro del foro-ricevitore,  $E_R$ , la distanza relativa, L, e l'angolo di azimuth, misurato positivamente rispetto a N,  $\phi$ , la profondità del ricevitore,  $D_R$ , e della sorgente,  $D_S$ , le deviazioni della sorgente,  $x_S$ ,  $y_S$ , e del ricevitore,  $x_R$  e  $y_R$ , si può ricavare la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore alla profondità desiderata. Tale controllo deve essere effettuato per ciascun foro ad intervalli non superiori ai 3 m procedendo dall'alto verso il basso e poi dal basso verso l'alto a intervalli non superiori ai 6 m.

Nel caso di fori di profondità non superiori ai 15 m si può utilizzare un filo a piombo da calare nell'intercapedine tra rivestimento e pareti (prima della cementazione) e controllare ogni 3 m, correggendone l'inclinazione ogni qual volta il filo tocchi le pareti del foro.

Una volta terminate le operazioni di rivestimento e cementazione l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

La prova, la cui geometria di acquisizione può variare da caso a caso e può essere eseguita posizionando i ricevitori o anche le sorgenti in foro, oppure entrambe in superficie sfruttando la presenza di un pendio, si sviluppa secondo le seguenti fasi:

#### PROVA IN FORO

1. Viene preparato il sistema di acquisizione dei dati, collegando separatamente ai canali del sistema i trasduttori di ogni singolo ricevitore e il sensore del trigger, alloggiato nella sorgente.
2. La sorgente viene calata all'interno di uno dei fori ad una profondità iniziale non superiore a 1.5 m, in corrispondenza della quale viene bloccata alle pareti del rivestimento.
3. I ricevitori vengono posizionati nei rimanenti fori e progressivamente calati così che ad ogni energizzazione corrisponda una serie di sensori ed in modo tale che uno dei tre trasduttori sia orientato in direzione verticale

(quello che capta nella loro massima ampiezza le onde SV) e gli altri orizzontali; anche in questo caso è necessario assicurare lo strumento alle pareti del rivestimento. I ricevitori devono essere dotati di un sistema di collegamento al terreno affidabile, mediante il quale sia possibile individuare e modificare l'orientazione dei trasduttori dalla superficie.

4. Viene attivata la registrazione delle vibrazioni con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente. Questa fase di pretriggering può essere evitata se la strumentazione garantisce la partenza della registrazione nell'istante di time-break all'attivazione del trigger.
5. Viene innescata la sorgente producendo una sollecitazione verticale che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i ricevitori orizzontalmente con vibrazioni di tipo P, quindi polarizzate nella direzione di propagazione, e vibrazioni, di tipo S, dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione e polarizzate sul piano verticale. Se l'energizzazione è fatta in onde SV è importante registrare il segnale mediante un trasduttore orientato in direzione verticale ed un altro orientato orizzontalmente lungo la congiungente i due pozzi in modo tale da registrare entrambi le componenti dell'onda. Il tempo di registrazione deve essere tale da consentire la rappresentazione dei treni d'onda nella loro interezza.
6. Viene quindi ripetuta la prova riproducendo la sollecitazione ad una profondità superiore di non più di 1 m.
7. Utilizzando una catena di idrofoni si procede spostando la sorgente in foro, altrimenti anche i ricevitori vanno spostati in modo che i raggi sismici formino un'intensa rete nell'area compresa tra sorgenti e ricevitori.

#### PROVA IN SUPERFICIE

1. Viene preparato il sistema di acquisizione dei dati, collegando separatamente ai canali del sistema i trasduttori di ogni singolo ricevitore e il sensore del trigger, alloggiato nella sorgente.
2. I ricevitori vengono posizionati lungo il pendio così che ad ogni energizzazione corrisponda una serie di sensori ed in modo tale che uno dei tre trasduttori sia orientato in direzione verticale (quello che capta nella loro massima ampiezza le onde SV) e gli altri orizzontali.
3. Viene attivata la registrazione delle vibrazioni con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente. Questa fase di pretriggering può essere evitata se la strumentazione garantisce la partenza della registrazione nell'istante di time-break all'attivazione del trigger.
4. Viene innescata la sorgente producendo una sollecitazione verticale o orizzontale che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i

ricevitori orizzontalmente con vibrazioni di tipo P, quindi polarizzate nella direzione di propagazione, e vibrazioni, di tipo S, dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione e polarizzate sul piano orizzontale. Il tempo di registrazione deve essere tale da consentire la rappresentazione dei treni d'onda nella loro interezza.

5. Viene quindi ripetuta la prova riproducendo la sollecitazione ad una profondità maggiore.
6. Si può procedere altresì posizionando i ricevitori in pozzo ed effettuando l'energizzazione in superficie. In questo caso, operando con onde di compressione (P) e potendo utilizzare una catena di idrofoni che copra l'intero pozzo, si procede spostando la sorgente superficie. Altrimenti, lavorando con onde di taglio, anche i ricevitori vanno spostati in modo che i raggi sismici formino una densa rete nell'area compresa tra sorgenti e ricevitori. Va rilevato che così operando, è possibile, analogamente a quanto visto per il down-hole, utilizzare onde SH.

#### 2B2.6.2 ELABORAZIONE DATI

Le informazioni in input sono:

1. Geometria delle sorgenti e dei ricevitori;
2. Tempi di primo arrivo per differenti paia di sorgenti e ricevitori;
3. Modello iniziale di velocità:
  - mezzo omogeneo;
  - 1D: le velocità sono costanti o variabili linearmente in ogni strato;
  - 2D: le velocità non sono costanti.

Le informazioni di output sono:

1. Traiettorie dei raggi;
2. Istogrammi dei residui;
3. Modello definito di velocità.

La risoluzione del problema diretto per un raggio dato nello specificato modello, si esplica attraverso la seguente sequenza:

1. calcolo dei primi tempi di arrivo da una sorgente a tutti i nodi della griglia (tempo di campo);
2. calcolo dei raggi;

3. inversione dei raggi: l'algoritmo richiede il tempo di campo per tutti i nodi; a questo scopo viene utilizzata un'interpolazione (lineare, parabolica).

Una volta risolto il problema diretto si può costruire l'istogramma dei relativi residui per valutare la bontà dei risultati:

$$(T_{\text{obs}} - T_{\text{calc}}) / T_{\text{calc}} \quad (2B.14)$$

dove  $T_{\text{obs}}$  è il tempo osservato e  $T_{\text{calc}}$  è il tempo calcolato.

Può essere specificata una soglia dei residui: i dati con i rispettivi residui che eccedono in valore assoluto la soglia non sono considerati nella fase successiva.

Per la risoluzione del problema inverso vari metodi possono essere usati:

- **ricerca del minimo della funzione media:** l'essenza di questo metodo è la contemporanea minimizzazione dei tempi di viaggio calcolati da un lato, e dall'altro delle velocità per le celle; il minimo è trovato attraverso il metodo del gradiente coniugato. Il principale inconveniente del metodo è connesso al fatto che le soluzioni nelle celle adiacenti sono indipendenti;
- **ricerca della più piccola funzione:** la caratteristica di questo metodo è la mutua minimizzazione dei tempi di viaggio calcolati da un lato, e dall'altro delle differenze tra velocità per tutte le coppie di celle adiacenti; il minimo è trovato attraverso il metodo del gradiente coniugato; questa tecnica, che offre migliori risultati rispetto alla precedente, prende in considerazione il fatto che, i valori di velocità per celle adiacenti sono più facilmente simili.

La precisione di calcolo può essere aumentata mediante un processo iterativo. Infatti il risultato del problema inverso (modello di velocità calcolato) può essere preso come un nuovo modello iniziale; quindi l'elaborazione può continuare risolvendo un nuovo problema diretto.

### 2B2.6.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, cioè il modello di velocità definito velocità, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

- la geometria d’acquisizione, l’ubicazione della prova (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un’apposita Carta in scala 1:2.000);
- il numero, l’interasse, il diametro, la profondità dei fori (se presenti) in cui viene effettuata la prova, la loro ubicazione (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un’apposita Carta in scala 1:2.000);
- le modalità di esecuzione, di rivestimento e di cementazione adottate;
- eventuali deviazioni dalla verticale dell’asse dei fori;
- la strumentazione adottata;
- le profondità a cui sono state effettuate le prove;
- i segnali registrati dai trasduttori dei ricevitori e il corrispondente segnale di trigger, specificando per ciascuno di essi la posizione o la profondità di prova, la direzione del trasduttore (verticale o orizzontale) e il ricevitore d’appartenenza; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull’asse delle ascisse sia riportato il tempo (in *ms*) e sull’asse delle ordinate il segnale (in *mV*), sia in forma numerica su supporto CD-ROM;
- il criterio di elaborazione adottato per il calcolo;
- l’istogramma dei relativi residui

$$(T_{\text{obs}} - T_{\text{calc}}) / T_{\text{calc}}$$

$T_{\text{obs}}$  = tempo osservato

$T_{\text{calc}}$  = tempo calcolato

- percorso dei raggi calcolati.

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, la velocità delle onde S, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione e interpretazione adottato.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

- l’ubicazione della verticale d’esplorazione (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un’apposita Carta in scala 1:2.000);
- la posizione, rispetto alla verticale, dei ricevitori e della sorgente, specificando i successivi interassi adottati tra i ricevitori durante la prova;
- la descrizione della strumentazione adottata;

- i segnali registrati dai ricevitori, specificando l'interasse corrispondente tra i ricevitori e la posizione della sorgente; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull'asse delle ascisse sia riportato il tempo (in *ms*) e sull'asse delle ordinate il segnale (in *mV*), sia in forma numerica su supporto CD-ROM;
- il criterio di elaborazione adottato per il calcolo delle velocità;
- la curva di dispersione;
- il diagramma che riporta le velocità delle onde di taglio calcolate (in *m/s*) sull'asse delle ascisse in funzione della profondità (in *m*) sull'asse delle ordinate.

### **(2B2.7) PROVA DEL CONO SISMICO (Seismic Cone Penetration Test) (□)**

Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde *P*) e di taglio (onde *S*), calcolandone il tempo ad esse necessario per spostarsi tra due o più punti (sorgente e ricevitori) di cui è nota la distanza.

La prova del cono sismico si applica quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori a qualche metro ed è raccomandabile soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione da medie a buone e non si vuole ricorrere a delle indagini eccessivamente costose.

I limiti applicativi dell'indagine sono sostanzialmente i medesimi di una prova CPT standard (si faccia riferimento al paragrafo 3B2.6).

#### **2B2.7.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA**

La prova può essere condotta secondo la procedura Down-hole o secondo la procedura cross-hole, in entrambi i casi viene utilizzato un penetrometro a punta conica, sulla quale viene installato un geofono, che può essere così condotto all'interno del terreno alle profondità desiderate, senza l'esecuzione e la preparazione preliminare di uno o più fori.

A seconda che la sorgente venga posizionata sulla superficie del deposito da investigare o venga condotta alla medesima profondità del ricevitore, utilizzando sempre un penetrometro a punta conica che proceda nel terreno parallelamente al penetrometro su cui è installato il ricevitore, la prova SCPT sarà rispettivamente del tipo down-hole o cross-hole.



Le modalità esecutive dell'indagine e le modalità di elaborazione dati, quindi, saranno le medesime descritte nei paragrafi 2B2.3 per le indagini down-hole e 3B2.4 per le prove cross-hole. L'unica differenza è relativa al sistema di ricezione dati che, nell'indagine SCPT secondo un assetto down-hole, prevede una sola terna geofonica, invece della coppia di ricevitori prevista nell'indagine down-hole standard.

#### 2B2.7.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

In questo tipo di prova è fondamentale fornire non solo il risultato finale, cioè la velocità di propagazione delle onde *S* e *P* al variare della profondità, ma anche il dato grezzo che è stato misurato dai trasduttori dei ricevitori e il criterio di elaborazione e interpretazione adottato.

Quindi questo tipo di prova deve essere accompagnato da una relazione comprendente:

*1. Una relazione generale in cui sono specificati:*

- a) obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto dalla Regione Toscana e fornito al Committente;
- b) Piano di sicurezza dell'Impresa (se richiesto dalla vigente normativa) e Piano di controllo di qualità qualora l'Impresa sia certificata;
- c) risultati delle indagini ed eventuali osservazioni.

La relazione generale deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n.3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n.2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

*2. Una relazione tecnica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna prova:*

- l'interasse adottato tra l'asta-sorgente e l'asta-ricevitore nel caso di prova Cross-hole, la distanza superficiale tra sorgente e asta-ricevitore nel caso di prova Down-hole, le profondità raggiunte progressivamente durante la prova, l'ubicazione della verticale d'esplorazione (espressa in termini di coordinate planimetriche e altimetriche e riportata su un'apposita Carta in scala 1:2.000);
- l'attrezzatura e le modalità d'avanzamento adottate per la penetrazione;

- eventuali deviazioni dalla verticale dell'asse dei fori, nel caso di procedura Cross-hole;
- la strumentazione adottata;
- i segnali registrati dai trasduttori dei ricevitori e il corrispondente segnale di trigger, specificando per ciascuno di essi la profondità di prova, la direzione relativa e assoluta dei trasduttori dei ricevitori e il ricevitore d'appartenenza; i segnali dovranno essere disponibili sia in forma cartacea, come grafici in cui sull'asse delle ascisse sia riportato il tempo (in ms) e sull'asse delle ordinate il segnale (in mV), sia in forma numerica su supporto CD; in alternativa alla stampa di tutti i sismogrammi relativi alle diverse profondità di misura sarà possibile allegare la stampa delle tracce assemblate attraverso apposito software di elaborazione geofisica, di cui andrà fornita un'accurata descrizione delle caratteristiche in relazione; l'opzione di fornire il dato in forma aggregata è vivamente consigliata poiché permette la visualizzazione globale dell'andamento dei segnali in funzione della profondità, agevolando l'interpretazione ed elaborazione dati ed il relativo controllo di qualità;
- il criterio di elaborazione adottato per il calcolo delle velocità, riportando, nel caso di prova in assetto down-hole, sia i tempi d'arrivo originali che quelli corretti;
- una tabella che riporti i tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità di misura, nel caso di prove SCPT – down-hole;
- un diagramma che riporti le dromocrone ricavate, dove sull'asse delle ascisse è riportato il tempo di arrivo corretto (in s) e sull'asse delle ordinate la profondità di misura in funzione della profondità (in m), con indicazione dei segmenti interpolanti i punti di misura, dalla cui pendenza si ricava la velocità di propagazione (da riportare chiaramente);
- un diagramma ad istogrammi in cui vanno riportate le velocità calcolate (in m/s) in funzione della profondità (in m); in questo diagramma andrà indicato, in base ai valori di velocità intervallari ricavati, il valore del Vs30 e la relativa categoria di suolo di fondazione, secondo le indicazioni dell'O.P.C.M. 3274/03 e successive modifiche;
- la documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione della prova. Sarà opportuno che risultino visibili gli strumenti di energizzazione e il contesto ambientale.

La relazione tecnica di cui al punto 2. deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

La documentazione fotografica deve essere consegnata in triplice copia in originale o in digitale su supporto CD.

### 3. *Le registrazioni di campagna*

Si richiede, in triplice copia, la consegna dei dati di registrazione su supporto CD.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Astier J.L. (1971) – *Geophysique appliquee a l'hydrogeologie*. MASSON & CIE, Parigi.

Barsanti P., D'Intinosante V., Ferrini M. & Signanini P. (2000) – *Note sulla sismica a rifrazione con onde di taglio per la caratterizzazione sismica dei terreni*. Atti del XIX Convegno Nazionale GNGTS, Roma.

Bourbie, T., Coussy, O., and Zinszner., B. (1987) – *Acoustics of Porous Media*. Gulf Publishing Co, Houston.

Fowler C.M.R. (1990) – *The Solid Earth: an introduction to global geophysics*. Cambridge University Press.

Foti S., Lo Presti D., Pallata O., Rainone M.L. & Signanini P. (2001) – *Indagini geotecniche e geofisiche per la caratterizzazione del sito di Castelnuovo G.na (Lucca)*. Rivista Italiana di Geotecnica.

Gasperini M. & Signanini P. (1983) – *Il metodo "down-hole" per la misura delle onde sismiche delle terre*. Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia, n°4,35-37.

Mancuso C. (1996) – *Misure dinamiche in sito. Applicazioni geotecniche*. Argomenti di Ingegneria Geotecnica. Hevelius Edizioni.

Rainone M.L., Signanini P. & D'Intinosante V. (2002) – *Application of P and SH waves high resolution seismic reflection prospecting to investigation of unstable areas*. Proceedings of the 1st European Conference on Landslides, IAEG, Prague, Czech Republic, June 24-26. pp.673-677.

Rainone M.L., Signanini P. & D'Intinosante V. (2003) – *Metodi geofisici integrati per la ricostruzione del sottosuolo e per la caratterizzazione dinamica dei terreni negli studi di microzonazione sismica: l'esempio di Pieve Fosciana (LU)*. Quaderni di Geologia Applicata, **10** (1). pp. 75-88.

## **(2B3) INDAGINI GEOELETTRICHE**

I metodi di prospezione elettrica possono essere divisi tra quelli che utilizzano correnti naturali (metodo dei Potenziali Spontanei, metodo Tellurico) e metodi che utilizzano correnti artificiali (Metodo della polarizzazione indotta, Metodo della Resistività). Di seguito verrà descritto solo il Metodo della Resistività che risulta essere il più utilizzato.

La prova trova il suo fondamento sul fatto che le rocce sono in grado di condurre corrente; tale capacità viene espressa dalla conducibilità elettrica o dal suo inverso la resistività ( $\rho$ ) espressa in ohm·m. Lo scopo della prova consiste quindi nel caratterizzare dal punto di vista elettrico, tramite la misura della resistività  $\rho$ , le unità litologiche presenti nel sito di indagine e la ricostruzione delle loro geometrie nel sottosuolo (profondità e spessori). A causa del fatto che il terreno solo in prima approssimazione può essere considerato omogeneo ed isotropo, il parametro che in realtà viene ricavato è la Resistività Apparente  $\rho_a$  legata da relazioni complesse alla resistività vera e agli spessori degli strati interessati dall'indagine. Nell'ambito del Metodo della Resistività, tale parametro può essere misurato attraverso le seguenti tecniche principali: Sondaggio Elettrico Verticale (S.E.V.), Profilo di Resistività (P.R.) nonché mediante tecniche pseudotomografiche.

La prova trova applicazione nella ricostruzione di successioni stratigrafiche in cui siano presenti terreni molto differenti con contrasti di resistività elevati (ghiaie – argille; argilliti – calcari; ecc.). Mentre il S.E.V, risulta particolarmente utile nella determinazione di successioni elettro-stratigrafiche fino a notevoli profondità, il P.R. viene generalmente utilizzato nella determinazione di variazioni laterali di resistività apparente. Le tecniche pseudotomografiche teoricamente possono risolvere sia le elettrostratigrafie che le variazioni laterali di resistività. Nella tabella seguente (Tab. 1) è riportato l'ordine di grandezza delle Resistività reali per alcuni tipi di acqua e alcuni tipi di rocce.

Mentre i limiti metodologici sono sufficientemente noti sia per i S.E.V. che per i P.R., meno lo sono per la tomografia elettrica. In ogni caso quest'ultima presenta limiti dovuti alla eterogeneità dei materiali da cui deriva l'aliasing spaziale che condiziona le soluzioni date dai modelli di inversione.

Estrema cautela ed opportuni accorgimenti devono essere prestati nell'applicazione delle prove in aree urbanizzate per la presenza di sottoservizi, condutture metalliche interrato, linee elettriche di corrente continua, reti ferroviarie, reti elettriche di alta tensione, disturbi questi che possono influire significativamente sulla qualità delle misure e sull'attendibilità dei risultati.

**Tabella 2B2** – Resistività reale per alcuni tipi di acque e rocce (da Astier, 1971)

ACQUA - ROCCE	RESISTIVITA' (ohm·m)
Acqua di mare	0.2
Acqua di depositi alluvionali	10 – 30
Acqua di sorgente	50 – 100
Sabbia e Ghiaia asciutta	1000 – 10000
Sabbia e Ghiaia imbibita di acqua dolce	50 – 500
Sabbia e Ghiaia imbibita di acqua salata	0.5 -5
Argilla	2 – 20
Marna	20 – 100
Calcere	300 – 10000
Quarzite	300 – 10000
Cineriti e tufi vulcanici	20 – 100
Lave	300 – 10000
Scisti grafitici	0.5 -5
Scisti argillosi o alterati	100 – 300
Scisti intatti	300 -3000
Gneiss e Granito alterato	100 -1000
Gneiss e Granito intatto	1000 -10000

### (2B3.1) SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nell'immettere, in un terreno di Resistività apparente  $\rho_a$ , mediante dei cavi elettrici collegati ad un elettrodo puntuale A, una corrente continua di intensità  $i$ ; considerando un elettrodo di ritorno B ad una distanza da A, attraverso la legge di Ohm è possibile calcolare il potenziale VM in un punto generico M:

$$V_M = \rho i / 2\pi (1/AM - 1/BM) \quad (2B.15)$$

Più in generale, se consideriamo un quadripolo AMNB la differenza di potenziale che risulta ai capi degli elettrodi di potenziale M ed N sarà:

$$\Delta V = V_M - V_N \quad (2B.16)$$

$$\Delta V = 1/2\pi (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)\rho i \quad (2B.17)$$

e quindi:

$$\rho = K (\Delta V/I) \quad (2B.18)$$

dove K, costante geometrica del dispositivo, è pari a:

$$K = 2\pi(1/AM-1/AN-1/BM+1/BN) \quad (2B.19)$$

e dipende esclusivamente dalle posizioni relative dei quattro elettrodi di misura.

La strumentazione utilizzata per questo tipo di prove si deve comporre delle seguenti parti:

- Sistema sorgente
- Sistema ricezione
- Sistema di misura
- Sistema di comunicazione
- Sistema di posizionamento

La potenza del sistema di energizzazione, di tipo meccanico (generatore) o a batterie in serie, deve essere proporzionata alle profondità di indagine ed al contesto di lavoro; in contesti caratterizzati da bassi valori di potenziale spontaneo, si può operare con piccola potenza; nel caso contrario si renderà necessario utilizzare sistemi con gruppi elettrogeni ed elevatori di tensione. A titolo indicativo si può indicare il limite di 1.0 mV come segnale accettabile agli elettrodi MN, mentre segnali più piccoli devono essere confermati da più serie di letture ripetute ed in ogni caso univocamente determinati.

La corrente immessa deve essere continua o ad onda quadra; l'eventuale utilizzo di corrente alternata, presentando i noti problemi legati a stazionarietà, induzione, skin-effect, potrà essere previsto dalla Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale previa autorizzazione.

Per ciò che riguarda il sistema di ricezione, i cavi devono essere in rame-acciaio (il rame per le sue ottime proprietà conduttive, l'acciaio per la sua resistenza alla trazione) perfettamente isolati, evitando il più possibile le giunture e con una sezione proporzionale alla lunghezza dello stendimento. Gli elettrodi AB possono essere realizzati in qualsiasi materiale conduttivo (ferro, acciaio, ecc). Per migliorare il passaggio della corrente nel terreno è necessario realizzare anche delle rose di picchetti ed imbibire il terreno di acqua salata. In presenza di rocce particolarmente resistive, si renderà inoltre necessario l'utilizzo di elettrodi di corrente anche delle dimensioni di un metro di altezza con diametri di 2-3 centimetri. Gli elettrodi di potenziale MN devono essere di rame elettrolitico. Sono ammesse le Sonde impolarizzabili Cu-Cu<sub>SO4</sub> in casi particolari.

Riguardo le geometrie d'indagine, è buona norma che il programma sia impostato in modo che per i S.E.V. la loro distanza ( $D$ ) non sia superiore alla profondità ( $H$ ), ma rimanendo entro valori di  $D/H$  pari a circa 0.5. Per le dimensioni delle stese in rapporto alle profondità di indagine viene indicato un rapporto pari ad  $1/6$ . Per quanto riguarda le geometrie di acquisizione (Fig. 2B16), per i S.E.V. i dispositivi di misura che possono essere utilizzati sono il dispositivo Wenner, Schlumberger (sia in versione quadripolare che tripolare) e subordinatamente il Dipolo-Dipolo; in particolare nel dispositivo Schlumberger il rapporto  $AB/MN$  deve essere mantenuto grande e comunque compreso tra 4 e 20; a questo proposito le misure di resistività dovranno essere eseguite con progressione quasi-logartimica dei valori di  $AB/2$  a partire da distanze non superiori a 3 m ed incremento tale da portare ad almeno 7 punti per decade.

Per i P.R., il valore della resistività apparente viene misurata con l'aiuto di un quadripolo AMNB di lunghezza costante su stazioni di misura allineate e regolarmente spaziate. Le metodologie più comunemente utilizzate sono con  $AB$  mobile ed  $AB$  fisso. Nel primo caso verrà utilizzato il quadripolo AMNB rettilineo simmetrico o asimmetrico. Nel secondo caso le misure saranno eseguite su dei profili paralleli ad  $AB$  fisso; un utilizzo di questa metodologia potrà essere previsto dalla Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale previa autorizzazione.

Il sistema di misura di tipo analogico o digitale deve permettere la compensazione dei potenziali spontanei e lettura dei valori dopo un sufficiente numero di stacking. Lo strumento deve poter sostenere una tensione di 500 V in corrente continua e permettere misure di corrente di oltre 1A. L'impedenza d'ingresso sul circuito di potenziale MN deve essere maggiore di 1 M $\Omega$  e il millivoltmetro deve essere in grado di misurare differenze di potenziale da qualche volt a qualche centesimo di millivolt.

Per ciò che riguarda il circuito di corrente  $AB$ , il milliamperometro, di buona qualità, deve essere in grado di misurare correnti che vanno dal milliampere a qualche ampere. I sistemi di comunicazione radio-telefonici si rendono necessari per ovvi motivi di sicurezza nel caso di stendimenti molto lunghi o in generale quando la visibilità tra operatore e componenti della squadra è difficile.

Per un corretto allineamento e posizionamento dei punti di immissione corrente e di ricezione è necessario specificare il tipo di strumentazione utilizzata (bussola, GPS, ecc.) e/o il tipo di tecnica adottata.

Dopo aver individuato un'area sufficientemente idonea per l'esecuzione della prova, vengono ben infissi nel terreno gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale secondo la tipologia di prova ed il dispositivo ritenuto più idoneo allo scopo dell'indagine. Si predispongono quindi i cavi di collegamento e si invia

corrente ai capi del circuito AB misurando la differenza di potenziale ai capi del circuito MN. In funzione della costante geometrica K viene ricavata la Resistività Apparente  $\rho_a$  relativa a quella determinata posizione degli elettrodi.

I valori di resistività apparente così ottenuti (riferiti al centro O del sondaggio) vengono riportati in tempo reale su di un grafico di campagna a scala bilogarithmica in funzione della lunghezza AB/2.

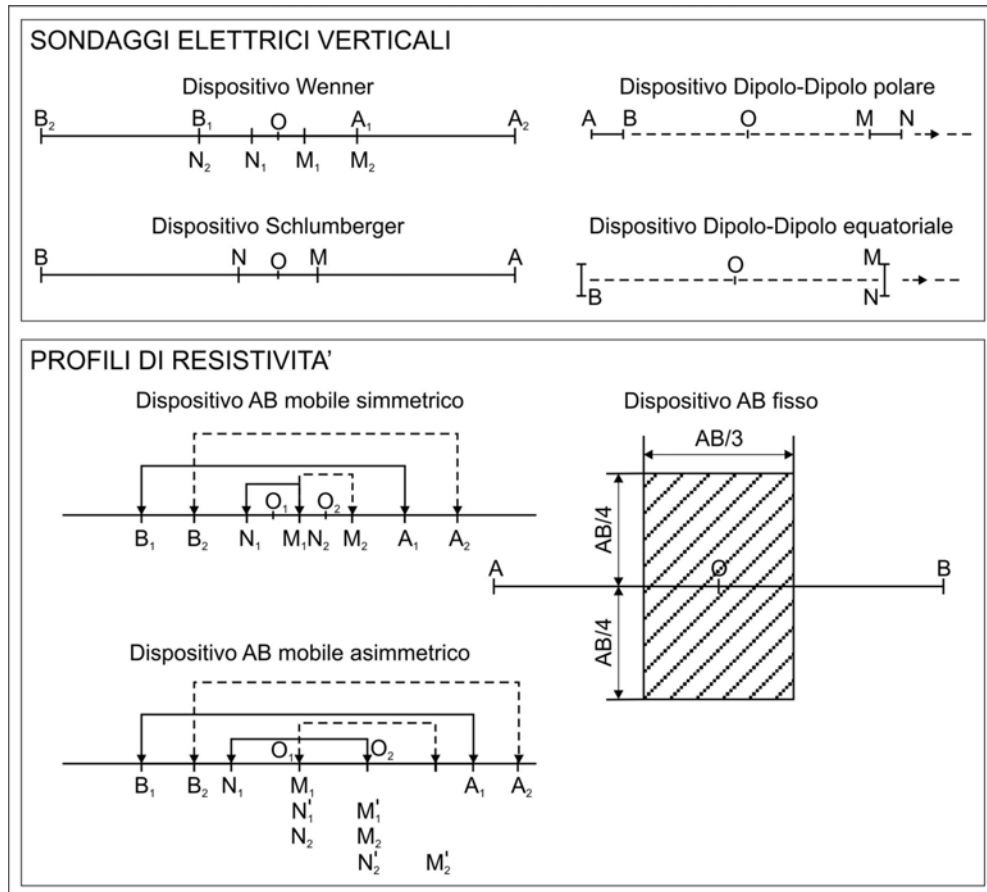


Figura 2B16 – Esempi di dispositivi di misura. Da Astier, 1971 (mod.)

### (2B3.2) ELABORAZIONE DATI

Per l'elaborazione, è consentito operare sia in maniera indiretta che diretta. Nel caso di interpretazione di tipo indiretto, dopo opportuno lisciaggio della curva di campagna e confronto, mediante abachi, con sondaggi e profili teorici, sarà cura dell'operatore produrre una curva di campagna, una curva lisciata ed una curva relativa al modello di best-fitting (il che implica l'utilizzo di un software appropriato).



La discrepanza tra queste due ultime curve dovrà essere contenuta entro il 4% e l'errore relativo al singolo punto non potrà superare l'8%. Nel caso di interpretazione diretta, questa è consentita solo quando è conosciuto in modo abbastanza dettagliato il contesto litologico della zona di studio; l'utilizzo di software di elaborazione, ad elevata valenza diagnostica, dovrà essere comunque sottoposto a controllo e autorizzazione da parte della Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale.

Anche nel caso di sezioni pseudotomografiche l'utilizzo di software di elaborazione, ad elevata valenza diagnostica, dovrà essere comunque sottoposto a controllo ed autorizzazione da parte della Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale. Il risultato finale è quello della realizzazione di sezioni elettrostratigrafiche mediante l'interpolazione dei valori di resistività e spessore ottenuti.

### **(2B3.3) PRESENTAZIONE DEI RISULTATI**

Per le indagini svolte dovrà essere fornita:

#### *1. Una Relazione generale in cui sono specificati:*

- a) obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto dalla Regione Toscana e fornito al committente;
- b) piano di sicurezza dell'impresa (se richiesto dalla vigente normativa) che per questo tipo di indagine si rende necessario soprattutto quando correnti e tensioni in gioco sono elevate, e piano di controllo qualità qualora l'impresa è certificata;
- c) risultati delle indagini ed eventuali osservazioni.

#### *2. Una relazione tecnica con documentazione relativa alla strumentazione e alla geometria di acquisizione utilizzata:*

- a) caratteristiche tecniche del sistema sorgente in riferimento all'utilizzo di batterie, generatore o elevatore di tensione.
- b) caratteristiche tecniche dello strumento di misura, in cui compaiano marca, modello, anno di fabbrica, revisioni e tarature effettuate, se di tipo analogico o digitale, voltaggio e amperaggio massimo sostenuto, l'impedenza di ingresso al circuito MN;
- c) caratteristiche tecniche del sistema di ricezione in riferimento agli elettrodi, indicandone il materiale e le dimensioni, e ai cavi utilizzati (sui

quali la R.T. si riserva di poter eseguire un controllo diretto durante le fasi di acquisizione in campo) indicandone la resistenza.

*3. Una relazione tecnica con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna prova:*

- a) descrizione delle procedure eseguite;
- b) la planimetria su base CTR in scala 1:5000, ove esistente, per un inquadramento di massima e per una visione più generale del sito di indagine e della ubicazione delle prove. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1:10000;
- c) la planimetria su base CTR 1:2000 ingrandita in scala 1:1000 con l'ubicazione dell'area di indagine e delle prove eseguite;
- d) uno schema dettagliato delle prove al fine di caratterizzare la geometria di acquisizione adottata: per i S.E.V. dovranno essere indicati, il tipo di dispositivo utilizzato, il centro del dispositivo, la lunghezza totale dello stendimento (lunghezza massima di AB raggiunta), le distanze delle posizioni relative degli elettrodi di corrente AB e di potenziale MN (scansioni di misura), orientazione; per il Dipolo-Dipolo andrà indicato il tipo di dipolo (se generico, indicare gli angoli e tutte le distanze necessarie per caratterizzarlo), la lunghezza di AB ed MN, le posizioni relative dei centri di AB ed MN (scansioni di misura), orientazione e verso di movimento. Per i P.R. andranno riportate le scansioni dei punti centrali dei dispositivi AB ed MN, azimut e verso di movimento. Per ogni prova andranno fornite le coordinate in Gauss-Boaga; per i SEV del centro del dispositivo, per i P.R. punto di inizio e di fine del profilo;
- e) In ogni caso andrà fornito il quaderno di campagna, completo di giorno, mese ed anno dell'acquisizione, dove sarà riportato, per ogni punto di misura, oltre alla resistività, differenza di potenziale in MN e corrente in AB, la tensione applicata agli elettrodi AB, il tipo di sorgente utilizzato (generatore, tipo di batterie, ecc.) e la curva di campagna;
- f) caratteristiche del software utilizzato per l'elaborazione diretta o, nel caso di interpretazione indiretta, indicazione degli abachi e del programma di ottimizzazione delle curve utilizzati; in questo secondo caso deve essere fornita la stampa della curva di campagna, della curva lisciata e della curva relativa al modello di best-fitting;
- g) nel caso di sezioni pseudotomografiche, le caratteristiche del software utilizzato per l'elaborazione;
- h) la profondità e relative resistività degli strati;
- i) la sezione elettrostratigrafica. In essa dovranno essere indicati i valori di resistività, la topografia, lo spessore degli elettrostrati individuati;
- j) la sezione litostratigrafia interpretativa finale con una legenda in cui sono indicati i diversi litotipi individuati sulla base della cartografia geologica e

geomorfologia fornita dal committente. La sezione litostratigrafia dovrà essere eseguita per tutta l'area corrispondente alla profondità indagata e dovrà contenere dei riferimenti topografici (corsi d'acqua, toponimi, edifici, strutture) che siano finalizzati alla corretta localizzazione della sezione nella zona in oggetto;

- k) Restituzione di mappe di resistività a varie profondità; queste ultime da decidere in accordo con la Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale;
- l) Una relazione relativa ai risultati e alle conclusioni raggiunte;
- m) La documentazione fotografica relativa alle fasi di esecuzione della prova.

La relazione generale di cui al punto 1 e le relazioni tecniche di cui ai punti 2 e 3, devono essere consegnate al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

## **2B.4. METODOLOGIE DI MISURA PASSIVA CONNESSE ALL'UTILIZZO DI RUMORE AMBIENTALE**

### **2.B.4.1. Premessa**

Tra le metodologie speditive finalizzate alla determinazione della funzione di amplificazione utilizzando rumore ambientale anziché terremoti (Lermo & Chavez-Garcia, 1994), vi è il metodo Nakamura (Nakamura, 1989). Questo è basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente verticale e quella orizzontale del segnale registrato (rapporto H/V), e consente di determinare la frequenza di risonanza di un sito utilizzando il rumore ambientale (microtremore, ovvero rumore ambientale a corto periodo) nell'ipotesi che lo spettro della componente verticale simuli quello di un rumore bianco.

Attraverso un sistema di acquisizione composto da un sensore a tre componenti (verticale, Est-Ovest e Nord-Sud), da un convertitore analogico digitale e da un GPS si registrano finestre di rumore ambientale dalle quali è possibile elaborare i rapporti H/V. Tali rapporti presentano un comportamento differente a seconda del sito considerato, mostrando a seconda dei casi un picco di amplificazione in corrispondenza della frequenza fondamentale del sito.

È importante sottolineare come in contesti geologico-tecnici semplici la tecnica Nakamura fornisca l'esatto valore della frequenza fondamentale, dimostrando peraltro che essa dipende da alcune caratteristiche dei litotipi di indagine; tra le più importanti si ricordano lo spessore delle coltri di copertura e i differenti parametri geotecnici e geofisici che definiscono il contrasto tra i litotipi.

Pare ormai chiaro, invece, come questa tecnica sperimentale, nella maggior parte dei casi, non consenta l'individuazione di eventuali fenomeni di amplificazione topografica e di effetti di amplificazione bidimensionale (i.e. effetti di bacino). I valori di amplificazione ottenuti dall'analisi di misure di microtremore (rumore ambientale a corto periodo inferiore a 5 secondi) in un'area di indagine, elaborate con la tecnica sopra descritta, devono essere interpretati in relativo, ovvero riconoscendo quali siti amplificano più di altri in funzione delle misure effettuate, senza però poter definire quale sia l'amplificazione "assoluta" su ogni sito.

In altre parole, la stima dell'effetto di amplificazione locale attraverso la metodologia Nakamura risulta comunque essere incompleta in quanto il metodo è potenzialmente in grado di fornire informazioni relative alla frequenza di risonanza di un sito

Recenti studi (Lermo & Chavez-Garcia, 1993; Lachet & Bard, 1994; Bard, 1998; Bindi et al., 2000, Parolai et al., 2002, Parolai et al., 2004) hanno dimostrato che per ottenere il valore reale dell'amplificazione è necessario effettuare il

calcolo dei rapporti spettrali sui terremoti; questo perché durante un evento sismico il terreno viene sollecitato in maniera differente, essendo coinvolti differenti tipi di onde sismiche, rispetto al rumore ambientale che si ipotizza essere caratterizzato dalle sole onde superficiali, generate da sorgenti locali ed escludendo qualsiasi sorgente profonda.

Di seguito verrà discussa in dettaglio la tecnica, con l'intento di porre in risalto i principali vantaggi, limitazioni e potenzialità di questa metodologia.

#### **2.B.4.2. Schema esecutivo della prova e processing dei dati**

Tralasciando la descrizione dei concetti teorici alla base del metodo, peraltro già ampiamente illustrati nella Letteratura specializzata, è importante focalizzare l'attenzione sulle procedure operative necessarie per una corretta acquisizione ed analisi dei dati.

Al fine di effettuare campagne di misura sperimentali necessarie per la determinazione della risposta sismica locale è indispensabile, infatti, definire delle linee guida che descrivano la procedura di installazione, registrazione ed elaborazione dei dati in modo da ottenere risultati (ovvero rapporti H/V) analiticamente corretti.

All'interno di una analisi di microzonazione oltre alle linee guida necessarie per la ricostruzione geologico-tecnica e la caratterizzazione geomeccanica (indagini sismiche in foro, prove down-hole, indagini cross-hole, misure sasw-fk, prospezioni sismiche a rifrazione, prospezioni con il metodo geoelettrico) bisogna stabilire un iter corretto ed affidabile per l'effettuazione di misure di microtremore in campo libero (tecniche HVSR o di Nakamura).

E' possibile prevedere la seguente procedura, peraltro già adottata anche in altri contesti regionali:

1. Definizione di tutti i siti caratterizzati da diverse situazioni morfologiche o geo-litologiche ed esecuzione di una misura HVSR per ciascun sito. Le misure dovranno essere effettuate su terreno libero, in aree adiacenti agli edifici ma a distanza da essi preferibilmente pari all'altezza degli stessi (in modo da evitare l'interferenza della struttura sulla misura);
2. Utilizzo di una strumentazione idonea composta da geofoni a 3 componenti (orientati in modo da avere le componenti N-S, E-O e Verticale) di frequenza naturale uguale (o inferiore) a 1Hz;
3. Registrazione di finestre di rumore di almeno 30 minuti utilizzando un campionamento non inferiore a 125 Hz (passo di campionamento non superiore a 8 ms);
4. Controllo dell'accoppiamento sensore-terreno che deve essere ottimale. Dove possibile è consigliato l'interramento del sensore (in SESAME, 2004

sono indicate diverse analisi mirate alla definizione dell'influenza del luogo e della tipologia di appoggio del sensore);

5. Verifica del condizioni meteorologiche: è bene evitare giornate piovose e/o ventose.

Come indicato anche dalle Linee Guida fornite nell'ambito del progetto SESAME, 2004, il processing dei dati potrà essere effettuato nel seguente modo:

- a) Suddivisione della finestra di registrazione completa (di almeno 30 minuti) in sotto-finestre di almeno 120 secondi (la lunghezza della finestra dipende dal valore minimo di frequenza che si è interessati a campionare);
- b) Eliminazione delle sotto-finestre eventualmente contenenti transienti (la procedura indicata in SESAME, 2004 prevede un'analisi basata sul rapporto  $Sta/Lta$  in grado di riconoscere la parte stazionaria del microtremore registrato escludendo le porzioni di segnale contenenti transienti per esempio legati a sorgenti specifiche prossime al sensore come passi o passaggio di automobili);
- c) Utilizzo delle FFT (Fast Fourier Transform) per il computo degli spettri includendo l'operazione di tapering (l'utilizzo della FFT è convenzionalmente consigliato però è necessario ricordare che tale metodo in presenza di transienti fornisce degli spettri che possono essere non corretti; per questo motivo, se lo step precedente non è stato effettuato, è sempre necessario analizzare gli spettri calcolati eliminando le sotto-finestre che mostrano un andamento anomalo rispetto al comportamento medio; ultimamente si stanno testando delle nuove metodologie basate sull'utilizzo dello spettro di potenza al posto dello spettro di Fourier calcolato tramite FFT);
- d) Lisciamento (smoothing) degli spettri utilizzando diverse tecniche. Le più utilizzate sono la Konno-Ohmachi smoothing window, valida soprattutto per analizzare frequenze inferiori a 1 Hz e la Hanning smoothing window, valida per frequenze superiori a 1 Hz;
- e) FACOLTATIVO: calcolo della componente orizzontale media ottenuta preferibilmente mediando (media geometrica) le due componenti orizzontali E-O e N-S;
- f) Calcolo del rapporto spettrale H/V (o dei rapporti NS/V, EO/V) per ciascuna sotto-finestra selezionata;
- g) Stima del valor medio della curva H/V e della sua deviazione standard (generalmente si considera il valor medio  $\pm 1$  sigma ma è anche possibile considerare i 3 sigma in modo da avere una stima più completa dell'errore associato a ciascuna frequenza.

I risultati forniti devono essere comprensivi sia dei rapporti spettrali H/V sia degli spettri iniziali non processati in modo da valutare anche a posteriori l'effettiva

qualità di un rapporto spettrale (per esempio la presenza di rumore industriali monocromatici caratterizzati da picchi stretti visibili negli spettri originali possono creare artefatti all'interno della curva H/V).

Calcolati per ciascun punto di misura i relativi rapporti spettrali H/V, è necessario passare all'interpretazione dei risultati:

- Riconoscimento e definizione dei picchi significativi: le linee guida del Progetto SESAME (2004) forniscono una serie di criteri che permettono di definire il livello di affidabilità della misura e di identificare il picco significativo (uso di test statistici opportuni);
- Interpretazione dei risultati: un'analisi di rapporti spettrali basata sul metodo Nakamura non può essere utilizzata per definire la risposta sismica locale, anche se limitatamente alla stima della frequenza di risonanza di un suolo, senza che sia possibile validare i risultati attraverso altre tecniche come i metodi H/V basati su fasi S sismiche o i metodi RST (metodi con stazione di riferimento) o modelli 1D basati su dati desunti da indagini geofisico-geotecniche di esplorazione geologica del sottosuolo.

In relazione a quest'ultimo aspetto, è stato ampiamente dimostrato come la tecnica Nakamura fornisca risultati quando l'assetto sismostratigrafico del sottosuolo sia caratterizzato da contrasti di impedenza significativi fra i depositi di copertura ed il substrato sismico (i.e.  $> 2.5$ , Parolai et al., 2002); in questi casi, il picco H/V può essere utilizzato per definire la frequenza fondamentale di risonanza del sito ma non le armoniche superiori (l'ampiezza del picco H/V, invece, non è direttamente relazionabile alla effettiva amplificazione).

In presenza di gradienti di velocità regolari senza significativi contrasti di impedenza la metodologia Nakamura generalmente non riesce ad evidenziare alcun picco di amplificazione. Inoltre nelle condizioni in cui il substrato sismico ovvero il contrasto di impedenza più significativo sia molto profondo (con picchi teorici di risonanza inferiori a 1 Hz) è possibile non riuscire ad estrapolare dai rapporti H/V alcun picco significativo.

Inoltre, la presenza di effetti bidimensionali nell'assetto geologico sepolto può invalidare completamente i risultati dell'analisi H/V. Infine, la tecnica di Nakamura non consente l'individuazione di eventuali fenomeni di amplificazione topografica.

### **2.B.4.3. Alcuni esempi di applicazione**

Nell'ambito del Programma regionale VEL, la Regione Toscana ha sperimentato ampiamente tale metodologie in numerose aree caratterizzate da un'elevata sismicità (Garfagnana, Lunigiana e Valtiberina), attraverso campagne di determinazione dei parametri di amplificazione locale attraverso misure di rumore sismico.

I risultati acquisiti dalle suddette campagne di misura confermano come solo in presenza di buoni contrasti d'impedenza sismica, ed in generale dove siano presenti le condizioni geologico-geofisiche riportate nel precedente paragrafo, sia effettivamente possibile riconoscere un chiaro picco (operando nel rispetto degli elevati standard citati in precedenza) come nell'esempio riportato nella Fig.1, che mostra i risultati di alcune analisi effettuate all'interno di un'area pianeggiante caratterizzata dalla presenza di depositi fluvio-lacustri, sovrastanti le Arenarie del Macigno. Lo spessore delle coperture, sulla base delle informazioni note in bibliografia (Cerrina et al., 1987), confermate dalla realizzazione nell'area di indagini geotecniche e geofisiche in foro e di superficie (Rainone et al. 2003), tenderebbe ad aumentare in maniera considerevole procedendo da SW verso NE, fino a raggiungere ordini del centinaio di metri.

Per queste misure, l'effetto di amplificazione locale riscontrato risulta essere ben definito per una frequenza intorno a 1.8 – 2.0 Hz.), in linea con analisi effettuate nell'area sulla base delle conoscenze geologico-tecniche acquisite nell'ambito degli studi connessi con il Progetto VEL (Rainone et al. 2003).

E' necessario sottolineare come, anche in un caso ottimale per l'applicazione del metodo Nakamura (come per esempio nel caso di stratigrafia semplice ed elevato contrasto di impedenza), le misure di rumore effettuate in condizioni meteorologiche particolari come la presenza di forte vento (Figura 2) possano essere alterate significativamente rendendo difficile l'interpretazione e la definizione della frequenza di risonanza sulla base delle curve H/V. In tali casi è sempre necessario ripetere la misura.

Dove, invece, il contrasto d'impedenza tra coperture e substrato non è evidente oppure, dove il substrato sismico è molto profondo (maggiore di 100 metri dal piano campagna), i rapporti H/V non appaiono chiari e/o affidabili neanche nella stima delle frequenze fondamentali (aree caratterizzate dai suddetti elevati spessori sono chiaramente molto diffuse).

A titolo di esempio, si riportano i risultati della campagna svolta su un'area in cui le indagini di esplorazione del sottosuolo evidenziano elevati spessori delle coperture sismiche, caratterizzate da depositi fluvio-lacustri. L'analisi del dato viene complicata anche dalla presenza, nelle sottofinestre utilizzate in fase di processing, di disturbi ambientali derivanti dalla elevata antropizzazione delle aree d'indagine, ricadenti in contesti caratterizzati dalla presenza di attività industriali (Figura 3). Nelle medesime aree, l'esplorazione del sottosuolo attraverso indagini sismiche, sia in superficie (sismica a rifrazione in onde P ed SH) sia in foro (prove down-hole in onde P ed SH), ha dato, invece, buoni risultati (anche nei pressi di aree industriali), grazie ad una corretta impostazione e successiva applicazione delle modalità di acquisizione del segnale sismico.



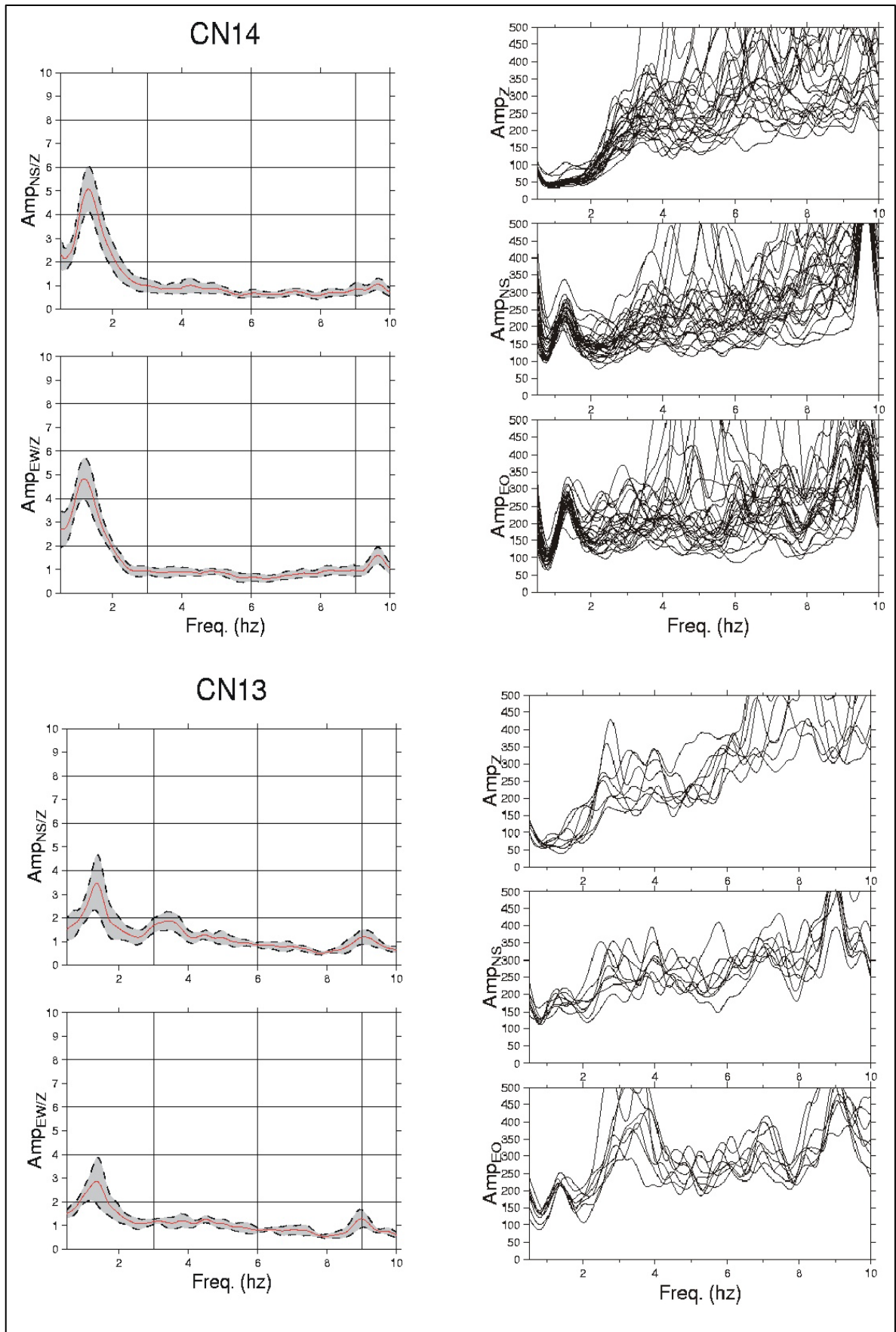


Figura 1 – Risultati di alcune analisi di microtremori effettuate nell'ambito del programma VEL

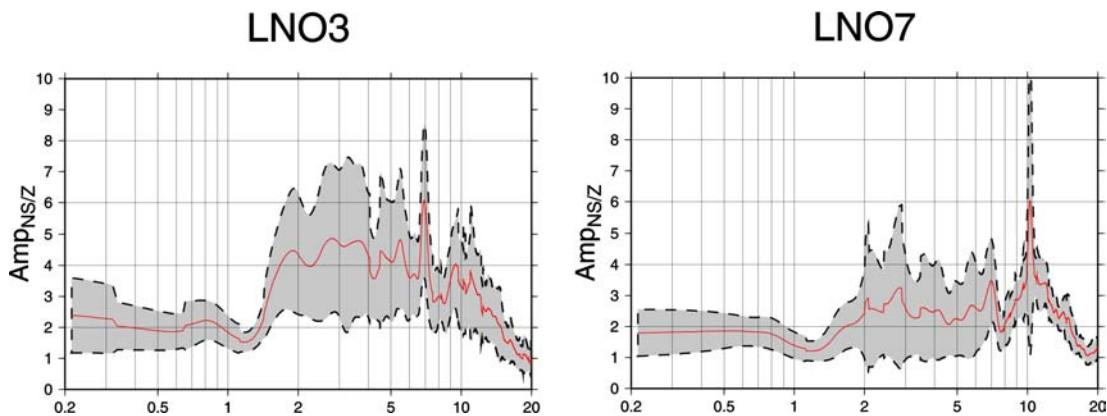


Figura 2 – Risultati di alcune analisi di microtremore effettuate durante una giornata ventosa: l'ubicazione dei punti misura LN03 e LN07 è coincidente con LN08 e LN06 rispettivamente.

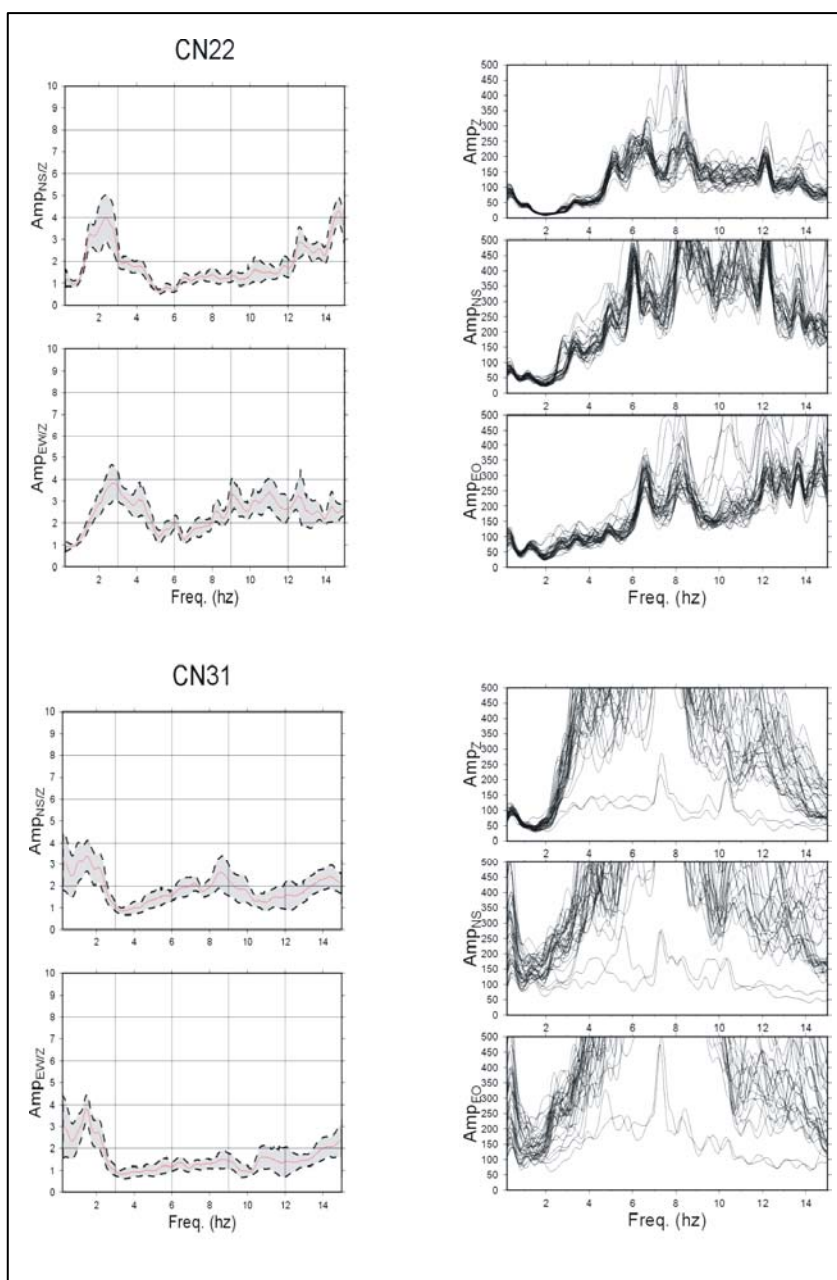


Figura 3 – Risultati di alcune analisi di microtremori effettuate nell'ambito del Programma VEL

#### **2.B.4.4. Osservazioni Conclusive: limiti di applicabilità**

La tecnica proposta da Nakamura, 1989 ("noise") può essere usata per valutazione speditiva dei fenomeni di amplificazioni locale. In particolare il rapporto H/V può essere utilizzato per la stima della frequenza fondamentale di vibrazioni del terreno o, alternativamente, dello spessore H delle coltri. Tuttavia è sempre necessario considerare alcune importanti aspetti legati all'applicabilità del metodo:

- H/V può ritenersi valido solo in presenza di contrasti di impedenza maggiori di 2.5;
- L'ampiezza del picco H/V non è direttamente relazionabile alla effettiva amplificazione (può essere talora assunta come limite inferiore);
- La presenza di effetti bidimensionali può invalidare totalmente i risultati di una analisi H/V. In particolare la generazione di onde diffratte può portare ad una amplificazione della componente verticale;
- La tecnica di Nakamura non consente l'individuazione di eventuali fenomeni di amplificazione topografica;
- rapporti H/V possono essere influenzati dalla natura del noise (da cui la necessità di ripetere le misure effettuate per esempio in condizioni meteorologiche particolari).

Inoltre, i metodi HVSR presentano delle limitazioni in presenza di stratificazioni caratterizzate dai seguenti aspetti:

- Profondità del substrato sismico: profondità superiori a 100 m comportano delle frequenze caratteristiche dell'ordine di 1 Hz o inferiori con conseguente necessità di uso di sensori a bassa frequenza;
- I contrasti di velocità (impedenze acustiche) debbono essere piuttosto significativi, tanto questi sono minori ed a forte stratificazione tanto più la determinazione della frequenza caratteristica del sito risulta di difficile identificazione;
- Mezzi con alternanze sottili di strati a diversa rigidità spesso sfuggono all'indagine.

Inoltre, le caratteristiche del noise possono in alcuni casi portare all'inapplicabilità del metodo HVSR, come la presenza di sorgenti molto coerenti derivanti da macchine vibranti (pompe) con frequenze monocromatiche o presenza di noise variabile significativamente nel tempo con presenza di alternanze di spikes con noise.

Pertanto, in base alle suddette considerazioni, l'utilizzo di misure di rumore sismico può essere destinato alla ricostruzione speditiva della distribuzione delle frequenze caratteristiche nei vari punti di misura, ma soltanto a seguito della taratura fornita da una dettagliata ricostruzione dell'assetto geologico-geomorfologico a scala di dettaglio sia tramite rilievo di superficie, sia per mezzo di metodologie multidisciplinari di esplorazione del sottosuolo.

E' inoltre consigliato un confronto dei risultati ottenuti tramite rumore ambientale con le funzioni di trasferimento derivate attraverso l'applicazione di tecniche a singola stazione (H/V) o a stazione di riferimento (H/Href) basate sull'analisi di terremoti.

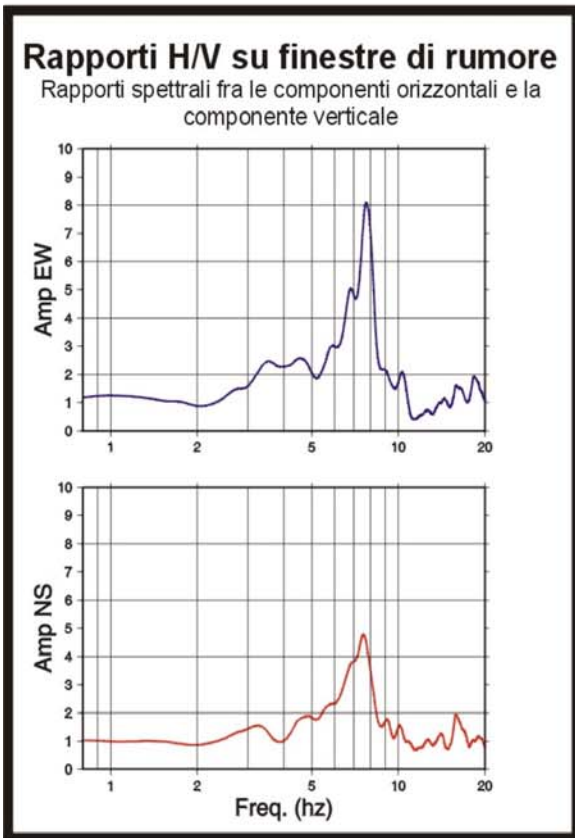
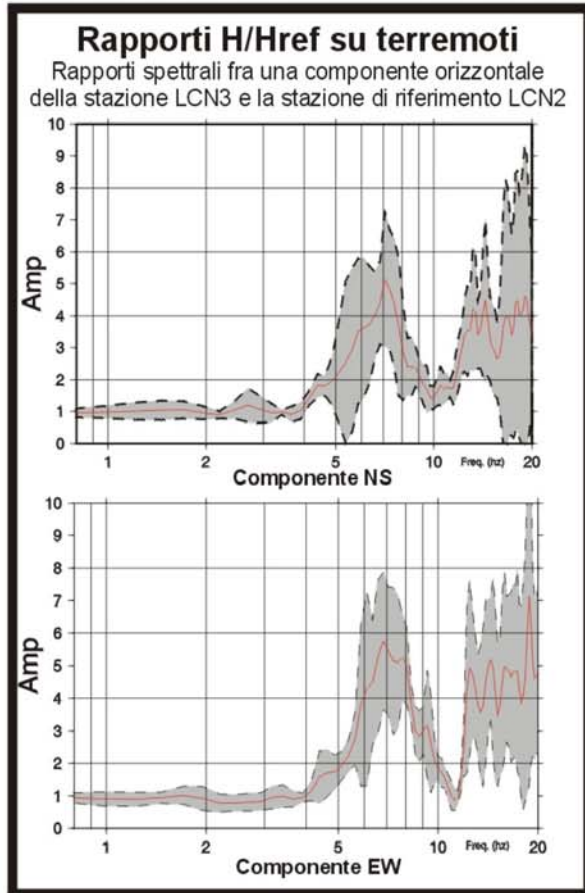
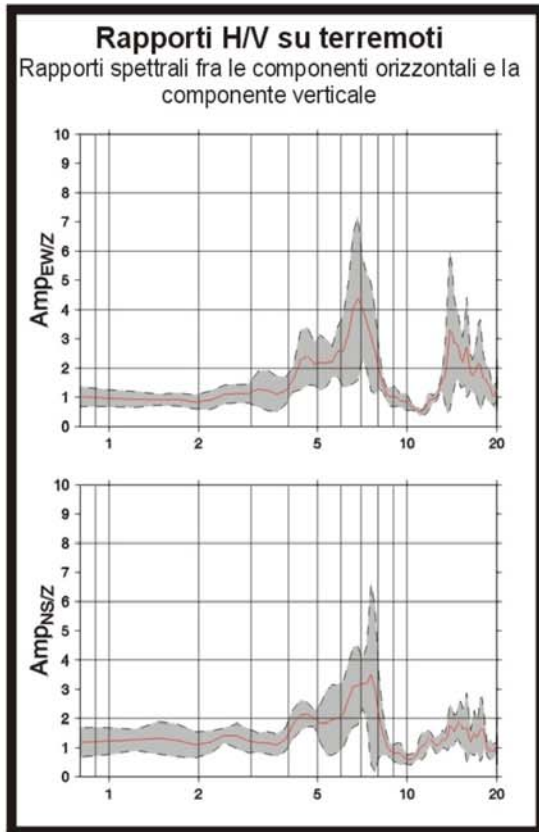
Da tale confronto è possibile valutare l'effettiva affidabilità ed accuratezza dei parametri legati all'effetto di sito determinati attraverso il metodo Nakamura.

A tal proposito in figura 4 è illustrato, per una stazione di monitoraggio, il confronto tra i risultati di analisi di microtremore (H/V su finestre di rumore) con misure basate sull'analisi di terremoti, con tecnica sia a stazione singola (H/V su terremoti), sia a stazione di riferimento (H/Href su terremoti).

La buona correlabilità, in termini spettrali, anche nei confronti delle analisi dinamiche 1D e 2D, svolte sulla base della caratterizzazione geologico-geotecnica-geofisica condotta, dimostra la buona applicabilità del metodo nel sito in oggetto.

L'utilizzo, invece, delle suddette misure per la ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo appare, allo stato attuale, confinato in un ambito sperimentale, senza fornire le garanzie scientifiche necessarie per un utilizzo applicativo dei dati acquisiti, soprattutto in un contesto regionale in cui sono state frequentemente riscontrate le suddette limitazioni geologico-tecniche per l'applicazione del metodo.

# Stazione LCN3



Stazione installata presso un locale della scuola in ristrutturazione di Licciana Nardi (sondaggi S1 e S1b)

Periodo di funzionamento: 8 Marzo 2005 - 6 Aprile 2005

Numero di terremoti registrati: (MI > 2.5): 7

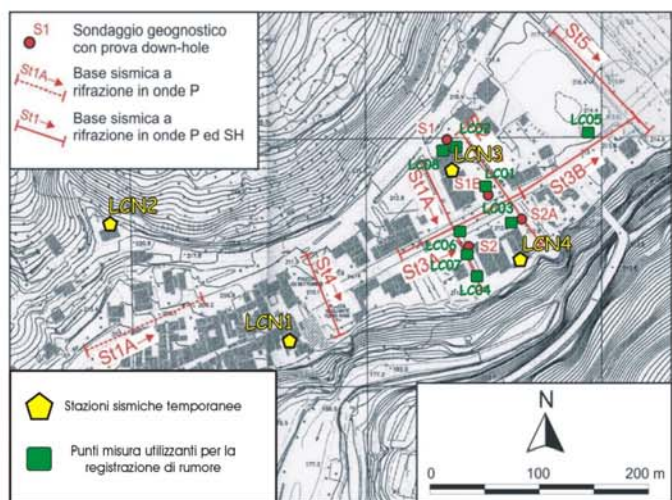


Figura 4 – Confronto tra misure di noise e misure di terremoti per una delle stazioni di monitoraggio installate nell’ambito del Programma Regionale VEL

#### **2.B.4.5. Riferimenti Bibliografici**

- Bard P.Y., 1998, Microtremor measurement: a tool for site effect estimation? Second International Symposium on the effects of the surface geology on the seismic motion, EGS98-Japan.
- Bindi D., Parolai S., Spallarossa D. and Cattaneo M., 2000, Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures, *Journal of Earth. Eng.*, 4, n. 1, 97-113 pp.
- Cerrina Feroni A., Decandia F.A., Guelfi F., Kaelin O., Marcellini A., Patacca E., Plesi G. & Scandone P., 1987, Mappe di microzonazione: l'esempio di Castelnuovo Garfagnana. In: G. Imbesi, A. Marcellini, V. Petrini, C. Di Passio e M. Ferrini (a cura di), *Progetto Terremoto in Garfagnana e Lunigiana*. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti e Regione Toscana, 65-74. Edizioni La Mandragora, Firenze.
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Rainone M.L., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Signanini P. & Vessia G., 2004, Valutazione della risposta sismica locale attraverso l'applicazione di metodologie multidisciplinari comparate: gli esempi di Fivizzano e Licciana Nardi (Toscana Settentrionale). XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio 2004.
- Lachet C., Bard P. Y., 1994, Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *Journals of Physics of the Earth*, 42, 377-397 pp.
- Lermo J., Chàvez-García F.J., 1993, Site effects evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, n. 5, 1574-1594 pp.
- Lermo J. & Chavez-Garcia F.J., 1994, Are microtremor useful in site response evaluation? *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364.
- Nakamura Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR Railway Tech. Res. Inst.* 30, 1, 25-33.
- Parolai S., Bormann P., Milkereit C., 2001, Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements, *Journal of Earth. Eng.* 5 (4), 541-564 pp.
- Parolai S., Bormann P. & Milkereit C., 2002, New relationships between  $V_s$ , thickness of the sediments and resonance frequency calculated by means of H/V ratio of seismic noise for Cologne area (Germany). *Bull. Seism. Soc. Am.* 92 (6), 2521-2527.
- Parolai S., Richwalski S. M., Milkereit C., Bormann P., 2004, Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany), *Tectonophysics*, 390, 57-73 pp.
- Rainone M.L., Signanini P. & D'Intinosante V., 2003, Metodi geofisici integrati per la ricostruzione del sottosuolo e per la caratterizzazione dinamica dei terreni

negli studi di microzonazione sismica: l'esempio di Pieve Fosciana (LU).  
Quaderni di Geologia Applicata, 10 (1). pp. 75-88.  
SESAME, 2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio  
technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.  
SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12.





**SEZIONE 3**  
INDAGINI GEOTECNICHE

### **(3B1) DEFINIZIONI ED ASPETTI GENERALI**

Per indagini geotecniche di sito e di laboratorio si intendono:

- 1) Indagini convenzionali:
  - a. sondaggi comprensivi della sistemazione finale del foro, pozzetti e/o saggi esplorativi, trincee, etc.;
  - b. prove penetrometriche in foro (SPT);
  - c. prove penetrometriche dinamiche (DPT);
  - d. prove penetrometriche statiche (CPT, CPTU, SCPT);
  - e. prove dilatometriche con dilatometro piatto (DMT);
  - f. prove pressiometriche (SBPT);
  - g. prove scissometriche (FVT);
  - h. prove di carico su piastra (PLT);
  - i. prove triassiali convenzionali finalizzate alla determinazione dei parametri di resistenza al taglio o della resistenza al taglio non drenata (TX);
  - j. prove di taglio diretto finalizzate alla determinazione dei parametri di resistenza al taglio (TD);
  - k. prove edometriche finalizzate alla determinazione della storia tensionale, dello stato tensionale in sito, dei parametri di comprimibilità e dei parametri di consolidazione primaria e secondaria (ED);
  - l. prove di classificazione (CLASS).
- 2) Indagini finalizzate alla determinazione dei parametri necessari per le analisi di risposta sismica locale dei depositi di terreno:
  - a. prove di colonna risonante (CR);
  - b. prove di taglio torsionale ciclico (TTC);
  - c. prove triassiali non convenzionali con misura locale della deformazione (TXC).

La progettazione geotecnica in zona sismica si occupa essenzialmente dei seguenti aspetti:

- analisi di risposta sismica;
- valutazione del potenziale di liquefazione;

- analisi di stabilità dei pendii in terreni e rocce;
- analisi di stabilità in condizioni sismiche delle fondazioni e delle opere di sostegno;
- verifiche delle condizioni di esercizio delle fondazioni e delle opere di sostegno;
- interazione dinamica terreno-fondazione-struttura.

Tutte le analisi sopra-elencate possono essere effettuate in termini di sforzi efficaci o totali. Le analisi in termini di sforzi totali richiedono la conoscenza di parametri ricavabili da prove eseguite in condizioni non drenate. Tuttavia, qualora le analisi vengano fatte in termini di sforzi efficaci è necessario, in aggiunta ai parametri di resistenza e deformabilità, definire un criterio per la determinazione dell'aumento della pressione dell'acqua interstiziale e per la degradazione ciclica delle caratteristiche meccaniche dei terreni. Nel caso di depositi asciutti è possibile ricorrere alle analisi in termini di sforzi efficaci. Si comprende pertanto che un'informazione fondamentale da ricavare dalle indagini in sito è la profondità di falda e più in generale la definizione delle condizioni idrauliche del sottosuolo.

Nel caso dei terreni a grana fine si considera la  $c_u$  come resistenza al taglio non drenata. Per i terreni a grana grossa si farà invece riferimento alla resistenza non drenata in condizioni cicliche  $\tau_{cyc,u}$ . Per quel che concerne i parametri di resistenza in termini di sforzi efficaci, qualora non si ricorra ad involuppi di rottura curvilinei si farà riferimento ai parametri del criterio Mohr-Coulomb ( $c'$ ,  $\phi'$ ). Le caratteristiche sforzi-deformazioni-resistenza dei terreni da utilizzarsi per le analisi prima indicate dipendono dal modello di comportamento che si assume per il terreno, dalla geometria del problema e dalla cinematica delle onde sismiche. A seconda del tipo di modello impiegato e delle ipotesi restrittive introdotte sono necessari diversi parametri come schematicamente riassunto nella Tabella 3B1 in relazione al caso delle analisi di risposta sismica.

Più in dettaglio è possibile affermare che nell'ipotesi di comportamento visco-elastico-lineare è sufficiente definire due costanti elastiche, ad esempio il modulo di taglio elastico ed il coefficiente di Poisson elastico, nonché il rapporto di smorzamento ( $G_o, \nu_o, D_o$ ). Nel caso dei terreni, l'ipotesi di risposta elastica o pseudo-elastica è confinata alle deformazioni minute, inferiori a 0.001%. La non linearità dei terreni può essere espressa con un approccio semplificato assumendo leggi di tipo quasi-lineare o elastico lineare equivalenti.

Nel caso di sollecitazioni monodimensionali sarà sufficiente definire la variazione del modulo di taglio e dello smorzamento con il livello di deformazione a taglio (curve  $G-\gamma$  e  $D-\gamma$ ). Volendo schematizzare il comportamento del terreno con leggi veramente non lineari è possibile definire

la relazione sforzi deformazioni di primo carico [ $\tau = f(\gamma)$ ] e quella relativa ai rami di scarico e ricarico [ $\tau = g(\gamma)$ ]. Questo modo di procedere è possibile nel caso di sollecitazioni di tipo monodimensionale. Nei problemi bi e tridimensionali occorre definire una legge costitutiva elasto-plastica accoppiata di tipo generale.

**Tabella 3B1** – Parametri di interesse

<b>Legame costitutivo</b>	<b>Metodo di analisi</b>	<b>Parametri</b>
Visco-Elastico lineare	Lineare	$G_o, \nu_o, D_o$
Elastico quasi-lineare	Lineare-equivalente	$G - \gamma, D - \gamma, \nu$
Elasto-plastico con danneggiamento	Integrazione passo passo delle equazioni di moto	$\tau = f(\gamma), \tau = g(\gamma)$ (1D)

Le analisi di risposta sismica nell'ambito del progetto VEL sono state di norma eseguite utilizzando un modello visco-elastico-lineare equivalente con geometria 1D e 2D. Più sovente, si fa ricorso ad approcci puramente empirici, specialmente nel caso in cui si vogliano affrontare dei problemi di stabilità.

Le prove geotecniche hanno quindi lo scopo di determinare i parametri sopra indicati ed in particolare, le caratteristiche di deformabilità, le caratteristiche di smorzamento ed i parametri di resistenza. A questo proposito occorre precisare che le diverse tecniche sperimentali oggi disponibili consentono di determinare i suddetti parametri con differenti approcci:

- **Approccio A:** attraverso una misura diretta dei parametri di interesse (attività sperimentale su elemento di volume);
- **Approccio B:** attraverso un'interpretazione più o meno razionale dei dati di prova (soluzione di un problema al finito);
- **Approccio C:** attraverso correlazioni empiriche tra i risultati di prova ed i parametri di interesse. Una variante di questo approccio prevede l'utilizzo diretto dei risultati di prova all'interno di approcci semplificati.

### **(3B1.1) SCELTA DEL TIPO DI PROVA**

Nel capitolo introduttivo sono stati stabiliti dei criteri generali per la scelta della tipologia di prova. I diversi tipi di indagine in sito ed in laboratorio sono riassunti rispettivamente nelle Tabelle 3B2 e 3B3. Le ultime due colonne evidenziano il tipo di approccio su cui si basa l'interpretazione della prova ed i parametri ottenibili.

### (3B1.2) ESTENSIONE DELLE INDAGINI

Per ciò che riguarda l'estensione delle indagini occorre distinguere due situazioni:

- a) indagini per l'adeguamento o la progettazione di una struttura;
- b) indagini finalizzate alla microzonazione di un centro urbano.

Nel caso a) il numero di verticali, la massima profondità da raggiungere ed il numero di campioni da prelevare, nonché la scelta del tipo di campionatore saranno definiti con i criteri usuali della Geotecnica. Unicamente nella definizione del tipo di suolo le informazioni ed in particolare il profilo di velocità dovrebbe riguardare almeno i primi 30 m di profondità.

In relazione al punto b), ed in particolare per le analisi di risposta sismica, i sondaggi dovrebbero essere spinti sino ad incontrare il substrato roccioso penetrandovi per almeno 5 m. In linea di massima è possibile definire come substrato roccioso le formazioni con velocità di propagazione delle onde di taglio pari a 1000 m/s.

**Tabella 3B2** – Elenco delle prove geotecniche in sito

Nome della prova	Norma di riferimento	Approccio	Parametri determinabili
Penetrometrica statica (CPT, CPTU, SCPT)	ASTM D3441-94	C	$c_u, \tau_{cyc,u}, \varphi', G_o$
Penetrometrica dinamica (SPT)	ASTM D1586-84	C	$\tau_{cyc,u}, \varphi', G_o$
Carico su piastra (PLT)	ASTM D1194-93, D1195-93, D1196-93, D4394-84, D4395-84	B	Deformabilità
Dilatometrica (DMT)	-	B,C	Resistenza, Deformabilità
Pressiometrica (SBPT)	ASTM D4719-87, D4971-89	B	Resistenza, Deformabilità
Scissometrica (FVT)	ASTM D2573-94	B	$c_u$
Penetrometrica dinamica (DPT)	-	B	$\tau_{cyc,u}, \varphi', G_o$

In fase di programmazione del sondaggio occorre evidenziare che:

- la profondità da raggiungere è indicata con un'approssimazione di almeno 5 m;
- occorre preliminarmente individuare i litotipi che possono essere campionati prevedendo il prelievo di uno o due campioni per ciascuno.

La raccolta e l'informatizzazione di tutti i dati geotecnici disponibili, anche quelli dei privati o prodotti dagli Enti Pubblici in relazione ad altri progetti, sono

essenziali per ottimizzare l'impiego delle risorse economiche ai fini della caratterizzazione sismica delle aree oggetto d'indagine.

### (3B1.3) DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

Nel seguito vengono descritte le diverse metodologie di indagine di sito e laboratorio illustrando per ciascuna metodologia i seguenti aspetti:

- scopo;
- campo d'applicazione;
- attrezzatura consigliata e/o prescritta;
- modalità di esecuzione consigliata e/o prescritta;
- interpretazione della prova consigliata e/ o prescritta quando tale aspetto risulta rilevante;
- presentazione dei risultati richiesta.

**Tabella 3B3** – Elenco delle prove geotecniche di laboratorio

Nome della prova	Norma di riferimento	Approccio	Parametri determinabili
Triassiale cicliche con misura locale (TXC)	JGS T 542-1995 (*)	A	$\tau = f(\gamma)$ , $\tau = g(\gamma)$ $G - \gamma$ , $D - \gamma$
Torsionali cicliche (TTC)	JGS T 543-1995 (*)	A	$\tau = f(\gamma)$ , $\tau = g(\gamma)$ $G - \gamma$ , $D - \gamma$
Colonna Risonante (CR)	ASTM D4015-92 (*)	A	$G - \gamma$ , $D - \gamma$
Misure sismiche in laboratorio (MS)	-	A	$G_o$ , $D_o$
Triassiali convenzionali (TX)	AGI 1994, ASTM D2850-03a, D2166, D4767	A	$c'$ , $\phi'$ , $c_u$
Taglio diretto (TD)	AGI 1994, ASTM D3080-03	A	$c'$ , $\phi'$
Edometro (ED)	AGI 1994, ASTM D2435-03, D4186	A	Compressibilità, OCR, $c_v$ , $c_\alpha$
Classificazione (CLASS)	AGI 1994, ASTM D4318-00, D2487-00, C136-01, D1140-00, D2217-85, D422-63, D 2974 – 87, D4648-00, D2216-98, D854-02, CNR UNI 10010/64, CNR UNI 10013/64, CNR UNI 10014/64	C	Suscettibilità alla liquefazione, identificazione terreni

ASTM=American Society of Testing Materials

JGS=Japanese Geotechnical Society

(\*) si veda: Cavallaro A., Fioravante V., Lanzo G., Lo Presti D.C.F., Pallara O., d'Onofrio A., Santucci F., Rampello S. e Silvestri F. 2001.

## **(3B2) INDAGINI IN SITO**

Le indagini in sito dovranno essere eseguite secondo le procedure indicate nelle “*Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*” (AGI, 1977), salvo quanto specificato di seguito.

### **(3B2.1) SONDAGGI (■)**

I sondaggi hanno i seguenti obiettivi:

- Ricostruzione stratigrafica del terreno mediante la campionatura completa dei litotipi attraversati dall'utensile di perforazione, ricostruzione del profilo granulometrico e attraverso la compilazione della colonna lito-stratigrafica e di ulteriori informazioni previste nella compilazione del log-stratigrafico, integrandole con l'interpretazione geologica del materiale estratto;
- Prelievo di campioni indisturbati finalizzati alle determinazioni dei parametri geotecnici necessari per le analisi di risposta sismica (modulo di taglio, rapporto di smorzamento, ...) tramite prove dinamiche di laboratorio;
- Porre in opera eventuale strumentazione geotecnica e di consentire l'esecuzione di alcuni tipi di prove in sito;
- Effettuare rilievi e misure sulle falde acquifere;
- Tarare le metodologie sismiche di superficie;
- Permettere l'esecuzione della prova down-hole per la determinazione puntuale delle velocità di propagazione delle onde P ed SH. Per assicurare la corretta esecuzione della prova geofisica dovrà essere eseguita una adeguata cementazione del foro di sondaggio, secondo quanto specificato nelle presenti I.T. A tal fine il pagamento del sondaggio all'Impresa verrà effettuato solo dopo l'esecuzione della prova geofisica, potendo così verificare se le registrazioni acquisite sono di qualità e non disturbate dalla non continuità della cementazione. Il diametro del sondaggio dovrà essere sufficiente a garantire l'esecuzione della prova DH, secondo quanto prescrivono le I.T. nel paragrafo 2B2.3.1.

Nelle aree in frana, per misurare l'entità degli spostamenti, il sondaggio potrà essere attrezzato con tubo inclinometrico (come dettagliatamente illustrato nel paragrafo 3B2.1.5).

Nel caso di sondaggi predisposti per la successiva esecuzione di indagini di tipo geofisico si fa presente quanto segue:

- per la prova Cross-hole è necessario controllare la deviazione dalla verticale (si vedano le istruzioni specifiche per tale tipo di prova). A tal fine è necessario attrezzare il foro con tubo inclinometrico;
- per la prova Down-hole non si rendono necessari controlli di verticalità;
- deve essere attentamente eseguita la cementazione del tubo su tutta la lunghezza della perforazione (si vedano le istruzioni relative alle indagini geofisiche).

E' prevista inoltre durante tutte le fasi di sondaggio (installazione cantiere, perforazione, cementazione, ecc...) la presenza costante di un geologo incaricato dall'Amministrazione Appaltante che svolga il ruolo del geologo assistente di cantiere e di direttore dei lavori (D.L.) per l'intera durata del sondaggio. Si precisa che tale incarico sarà affidato direttamente alla persona fisica (geologo professionista che seguirà personalmente il sondaggio) e non a persone giuridiche (Imprese).

Il geologo incaricato dell'assistenza e direzione dei lavori del sondaggio geotecnico dovrà seguire costantemente i lavori e dovrà assicurare che questi vengano svolti secondo quanto prescritto dalle Istruzioni Tecniche Regionali, ricordando che gli obiettivi principali e i compiti del geologo assistente di cantiere (DL) sono i seguenti:

1. Controllo e verifica preliminare della dotazione della strumentazione di perforazione (sonda, carotieri, campionatori, corone, rivestimenti.) in relazione alla tipologia presunta dei terreni;
2. Controllo e posizionamento della sonda sulla verticale esplorativa indicata dall'Amministrazione appaltante;
3. Ricostruzione del profilo stratigrafico e compilazione del modulo stratigrafico come descritto in Figura 3B2;
4. Controllo continuo durante la fase di perforazione evidenziando, in accordo con il geologo dell'Impresa ed il sondatore, il tipo di carotiere da adottare, di volta in volta, in maniera da garantire il minor disturbo possibile nel terreno e la maggior percentuale di recupero;
5. Direzione dei lavori di prelievo (profondità e tipo in relazione alla natura del terreno) dei campioni indisturbati finalizzati alla determinazione dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica tramite prove dinamiche di laboratorio. Il geologo Assistente di Cantiere può modificare in corso d'opera il programma preliminare in relazione al prelievo di campioni, laddove i terreni attraversati lo



permettano, avendo premura di verificare anticipatamente l'idoneità dei campionatori in riferimento alle specifiche indicate nelle Istruzione Tecniche;

6. Controllo della regolare preparazione dei campioni (paraffinatura, etichettatura etc.) e del loro recapito presso la struttura indicata dall'Ente (Comune, Provincia, Regione Toscana);
7. Direzione dei lavori di esecuzione delle prove geotecniche (misure SPT, prove di permeabilità etc.);
8. Effettuazione delle misure di falda durante e dopo la perforazione e comunque sempre all'inizio ed alla fine di ogni giornata lavorativa;
9. Direzione dei Lavori di condizionamento del foro (tubo inclinometrico, tubo piezometrico, tubo per prove down-hole) con particolare riguardo alle modalità di cementazione e successivo controllo della accessibilità del foro per tutta la profondità;
10. Comunicazione tempestiva all'Amministrazione appaltante di eventuali inadempienze e/o mancanze da parte dell'Impresa appaltatrice;
11. Redazione della Relazione Tecnica delle indagini secondo le specifiche tecniche riportate nel paragrafo Appendice 3B2.1a.

Qualora fossero verificate inadempienze da parte del Direttore Lavori, per ciò che riguarda l'assistenza di cantiere, sono previste penali.

Le perforazioni saranno eseguite generalmente con le modalità atte ad effettuare sondaggi a carotaggio continuo: si ricorrerà a procedimenti a distruzione di nucleo per eventuali fori integrativi da attrezzare con tubi inclinometrici, piezometri e in tratti non significativi a litologia uniforme e nota.

I sondaggi saranno misurati per metro lineare di foro eseguito; le profondità saranno misurate dal piano d'imposta dell'attrezzatura.

La profondità della falda acquifera incontrata e la quota di stabilizzazione dell'acqua in foro dovrà essere rilevata con misure giornaliere ad inizio e fine perforazione sulla base delle tabelle in Figura 3B4. Vanno altresì segnalate eventuali perdite di fluido.

I sondaggi e le prove in sito devono essere in generale spinti fino ad incontrare la roccia "sana", attraversandola per uno spessore significativo.

Si ricorda inoltre che la profondità del sondaggio viene indicata con un intervallo di 5 m (es. 15/20 m) in quanto viene stimata:

- in base all'interpretazione dei risultati delle indagini di sismica a rifrazione, il cui metodo comporta un'approssimazione che può variare nell'ordine di alcuni metri anche in relazione alle caratteristiche della formazione incontrata;
- in base alla necessità di caratterizzare il materiale in condizioni ottimali (non alterato e/o fratturato), tramite l'effettuazione di prove geofisiche per la determinazione della Vs (DH e CH) e di prove geotecniche di laboratorio (prelievo ed analisi di campioni), per la caratterizzazione geotecnica del materiale prelevato.

Il sondaggio quindi, dovrà essere spinto per almeno 5 m all'interno della formazione "sana".

La stabilità del fondo del foro deve essere assicurata con i mezzi che la tecnica operativa mette a disposizione. In particolare, il battente di fluido in colonna deve essere mantenuto sempre più alto possibile, anche facendo sporgere fino ad un metro dal piano di lavoro l'estremità superiore del rivestimento da mantenersi pieno di fluido.

La stabilità delle pareti dovrà essere garantita da un rivestimento metallico provvisorio oppure mediante l'impiego di fanghi bentonitici, previa autorizzazione della D.L.

Nei terreni a grana grossa o nelle rocce fortemente fratturate, nel caso in cui si verifichi una perdita di fluidi di perforazione, occorrerà prevedere la cementazione e la riperforazione del foro di sondaggio.

Gli interventi di cementazione e riperforazione devono essere autorizzati dalla Regione Toscana previa richiesta da parte della D.L.

La pulizia del fondo foro, prima di eseguire manovre di campionamento e/o prova in sito, deve essere assicurata eseguendo, se necessario, apposita manovra di pulizia o di lavaggio con attrezzo a fori radiali.

Si precisa che il sondaggio deve essere realizzato in maniera da permettere la posa in opera del rivestimento e relativa cementazione per l'effettuazione delle prove cross-hole, secondo le specifiche riportate nella sezione B.1.4, delle prove cown-hole, secondo le specifiche riportate nella sezione B.1.5, e della strumentazione di tipo accelerometrico.

Le misure dei diametri dei sondaggi per le prove specifiche sono indicate nei capitolati d'appalto.

### 3B2.1.1 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO

I sondaggi saranno eseguiti con sistema a rotazione, impiegando i seguenti utensili di perforazione:

- carotieri semplici con valvola di testa a sfera e calice;
- carotiere doppio a corona sottile (T2, T6) con estrattore;
- carotiere triplo con portacampione interno estraibile ed apribile longitudinalmente (T6S) con estrattore e calice.

A seconda della natura litologica dei terreni si stabilirà quale tipo di carotiere utilizzare. Si richiederà il T6s o il triplo in tutti i casi in cui possono essere previsti prelievi di spezzoni di carota di roccia per prove meccaniche di laboratorio.

In linea generale si richiede sonda semovente cingolata o autocarrata in grado di fornire spinta massima, tiro, coppia massima e di essere attrezzata con aste di perforazione e rivestimento sufficienti a raggiungere profondità massime di 80 m. In fase di piazzamento della macchina operatrice dovrà essere curata al massimo la verticalità del foro, mediante controlli con livella torica sulla colonna di perforazione.

Per quanto riguarda il diametro del sondaggio, considerato che nei sondaggi da effettuare la Regione Toscana prevede l'esecuzione di prove down-hole, questo dovrà essere sufficiente a garantire l'esecuzione di tali prove, secondo quanto prescrivono le presenti I.T.

In particolare il diametro minimo a fondo foro dovrà essere sufficiente a prelevare campioni indisturbati del diametro non inferiore a 80 mm, e comunque ad attrezzare il foro con tubo in ABS, PVC pesante o inclinometrico di diametro interno di 80 mm.

Nello specifico, nel caso di sondaggi profondi ( $z > 50,0-60,0$  m) oppure laddove le condizioni e caratteristiche dei terreni non garantiscano una perfetta prosecuzione della perforazione si potrà richiedere, previo parere della D.L., l'impiego di doppi rivestimenti metallici provvisori, uno interno con diametro pari a 127mm e uno esterno con diametro pari a 151mm. L'impresa avrà cura di asportare, attraverso adeguate manovre di pulizia a fondo foro, tutto il materiale presente nell'intercapedine tra i due rivestimenti. L'impiego dei rivestimenti provvisori devono essere esplicitamente autorizzati dalla D.L.

La profondità che dovrà essere raggiunta verrà indicata dal geologo assistente di cantiere o dal D.L. (incaricato dall'Appaltante), che segue il sondaggio, sentito il parere della Regione Toscana e dei referenti scientifici prima dell'inizio

del foro ed eventualmente durante la perforazione in relazione alla natura dei terreni incontrati. Il D.L. potrà modificare in corso d'opera il programma preliminare di indagine in relazione al prelievo di campioni e anche alla profondità di indagine nel rispetto degli obiettivi fissati dal programma.

Nei sondaggi il carotaggio potrà interessare l'intero foro o uno o più tratti separati del foro, in ogni caso il carotaggio (lunghezza della singola manovra < 1,5 m) dovrà essere fornito adottando tutte le cautele, le attrezzature e gli accorgimenti necessari per ottenere la massima percentuale di recupero; si dovrà operare a secco se viene utilizzato il carotiere semplice, soprattutto nei terreni granulari o nei terreni fini poco consistenti. In altri tipi di terreno, sentita la D.L. sarà possibile operare il carotaggio con fluido di circolazione. Ovviamente, utilizzando carotieri doppi-tripli occorrerà prevedere la circolazione del fluido di perforazione.

Il recupero del materiale all'interno del carotiere semplice, nel caso in cui siano presenti terreni sciolti, deve essere effettuato mediante pistone o aria compressa per non pregiudicare lo stato di rimaneggiamento del materiale.

Di norma, le percentuali di recupero, valutate per ogni singola manovra<sup>1</sup>, non dovrebbero essere inferiori a:

- 70% per i terreni a grana grossa (sabbia, ghiaia, ecc.);
- 80% per i terreni a grana fine (argilla, argilla marnose, ecc.) e rocce fratturate;
- 90% per rocce compatte in genere (calcari, calcari marnosi, arenarie, conglomerati, gessi, anidriti, rocce ignee, rocce metamorfiche, ecc).

Qualora tali percentuali di recupero non venissero realizzate per chiara negligenza dell'Impresa quei tratti di sondaggio non saranno contabilizzati nel computo complessivo, oltre la responsabilità da parte del geologo assistente di cantiere relativamente al non corretto utilizzo del carotiere in relazione alla tipologia di terreno presente.

L'attribuzione dei terreni incontrati alle classi sopra riportate è fatta dal geologo incaricato per l'assistenza di cantiere: qualora il recupero risulti inferiore alle percentuali sopra riportate, a giudizio insindacabile della Regione Toscana potrà essere richiesta la ripetizione del sondaggio senza alcun aggravio di spesa a carico dell'Appaltante. In ogni caso il tratto corrispondente alla percentuale di recupero inadeguata non sarà computata nella contabilità finale.

---

<sup>1</sup> Nel caso in cui in una singola manovra venissero attraversati materiali con caratteristiche significativamente diverse, la percentuale di recupero andrà valutata separatamente per ogni singolo materiale.

Durante il carotaggio, il geologo dell'Impresa appaltante, è sufficiente che compili una breve nota che riporti la stratigrafia desunta dal sondaggio con indicazione relativa agli spessori e alle litologie presenti sul log-stratigrafico redatto dalla Regione Toscana.

Il geologo incaricato dall'Appaltante, invece, deve anch'esso compilare la stratigrafia di campagna e successivamente elaborarla nella versione definitiva seguendo in maniera precisa quanto previsto nelle presenti Istruzioni Tecniche.

I campioni indisturbati dovranno essere prelevati alle profondità indicate dalla Regione Toscana – Settore Servizio Sismico Regionale e comunque, ogni qual volta venga rilevata una variazione delle caratteristiche del terreno attraversato (dove chiaramente le caratteristiche dei terreni lo consentano) e dopo aver sentito preventivamente il parere della Regione Toscana - Settore Servizio Sismico Regionale.

Il materiale estratto dal sondaggio sarà riposto in cassette catalogatrici di misure opportune (es. 100 x 50cm) e di altezza adeguata rapportata al diametro della perforazione, rispettando la sequenza stratigrafica rinvenuta. I separatori interni (oppure in alternativa opportune segnature) indicheranno le quote di inizio e fine di ogni manovra ed il prelievo dei campioni.

Le cassette catalogatrici saranno contrassegnate da una etichetta o scritta inamovibile e indelebile riportante:

- località;
- designazione del cantiere - Committente - Esecutore;
- geologo di cantiere ed esecutore del sondaggio;
- designazione del sondaggio;
- tipo di campione e numero d'ordine;
- profondità di prelievo (da/a);
- orientamento (alto/basso);
- data di prelievo.

I carotaggi contenuti nelle cassette dovranno essere tempestivamente trasportati a cura dell'Impresa e consegnati al Comune che li dovrà conservare in ambienti riparati dalle intemperie. Le cassette dovranno avere caratteristiche tali da evitare perdite di materiale e mescolamenti, anche in caso di rovesciamento della cassetta.

Per ogni cassetta dovranno essere eseguite due fotografie a colori con angolazioni diverse, una perpendicolare e l'altra obliqua, in modo da individuare in maniera ottimale le variazioni litologiche.

Nelle foto dovrà essere ben visibile l'etichetta dove sono apposte le indicazioni riguardanti il cantiere, il sondaggio e le quote di riferimento ed un metro per i riferimenti di scala.

Inoltre nel caso in cui nel corso del sondaggio vengano eseguite manovre di carotaggio tramite l'impiego del T6s, il geologo assistente di cantiere dovrà realizzare ulteriori n°2 fotografie del materiale carotato con questo carotiere prima che questo venga trasferito nelle cassette catalogatrici. Copia di queste foto dovrà essere allegata alla relazione finale. E' altresì opportuna una loro trasmissione all'Ente Appaltante in tempi brevi (al termine del sondaggio) anche in sola forma digitale. Le foto suddette sono di particolare rilievo per documentare la bontà del carotaggio specialmente in terreni fratturati e nel caso di utilizzo di carotiere T6s. In questo caso, infatti, il trasferimento del materiale in cassetta ed il successivo controllo per la sua identificazione può comportare un sostanziale rimaneggiamento dello stesso rendendo problematiche le operazioni di collaudo descritte nel seguito.

Infine, l'assistente di cantiere dovrà produrre anche ulteriore materiale fotografico relativo alla sonda perforatrice utilizzata e all'attrezzatura di perforazione completa di carotieri, corone, campionatori, SPT, fustelle... In particolare dovrà essere realizzata una fotografia per ogni campione prelevato da inviare al laboratorio di analisi.

Le fotografie effettuate saranno consegnate in originale oppure, se realizzate con macchina fotografica digitale, su supporto magnetico e dovranno essere allegate nella relazione illustrativa finale a cura del geologo incaricato per l'assistenza al cantiere.

I carotaggi contenuti nelle cassette catalogatrici dovranno essere tempestivamente trasportati e conservati in ambienti riparati dalle intemperie.

Rientra tra i compiti dell'Impresa:

- il trasporto dei carotaggi contenuti nelle cassette catalogatrici sino alla sede del Comune;
- la consegna delle stesse ai tecnici dell'Amministrazione Comunale.

Nel caso di campioni indisturbati dovranno essere riportati i dati relativi al campionamento eseguito con l'annotazione del:

- tipo di campionatore;

- metodo d'infissione del campionatore;
- condizioni di prelievo (presenza d'acqua, energia d'infissione, ecc.).

Al fine di mantenere disponibile il foro di sondaggio, anche per successivi utilizzi, si raccomanda di proteggere il boccapozzo con pozzetto e chiusura inamovibili e di attrezzare lo stesso con strumentazioni idonee alle problematiche che il caso richiede (tubi inclinometrici in ABS o PVC pesante nel caso di pendii, tubi per prove tipo Down hole, piezometri, etc).

### 3B2.1.2 SONDAGGI A DISTRUZIONE DI NUCLEO

Considerato che nei sondaggi da effettuare la Regione Toscana spesso prevede l'esecuzione di prove down-hole, il diametro del sondaggio dovrà essere sufficiente a garantire l'esecuzione di tali prove, secondo quanto prescrivono le presenti I.T. nel paragrafo 2B2.3.

La perforazione andrà eseguita a rotazione utilizzando utensili a rotazione a distruzione di nucleo.

Per questo tipo di sondaggio la stratigrafia andrà compilata in base all'esame dei detriti facendo riferimento al modulo di Fig. 3B2, per le parti compilabili.

### 3B2.1.3 PRELIEVO CAMPIONI

E' consentito il prelievo di campioni disturbati e rimaneggiati al solo fine di determinare le caratteristiche fisiche dei terreni o a fini di classificazione. In particolare si prevede:

- il prelievo di campioni disturbati o a disturbo limitato, mediante l'impiego di campionatori a pareti grosse da 100 mm e fustelle in pvc, da infiggere a percussione o a pressione, a seconda della natura geolitologica dei terreni stessi;
- il prelievo di campioni rimaneggiati e loro conservazione in contenitori trasparenti a chiusura ermetica.

I campioni indisturbati andranno invece prelevati impiegando uno dei seguenti campionatori:

- campionatori a pareti sottili infissi a pressione (campionatore a parete sottile tipo Shelby del diametro minimo di 80 mm);
- campionatori a pistone idraulici o meccanici (tipo Osterbeg);

- campionatori rotativi a doppia o a tripla parete con scarpa avanzata tipo Denison o tipo Mazier modificato.

Per il campionatore semplice tipo Shelby la scarpa del tubo campionatore deve avere un tagliente con angolo non superiore a 6°. L'impresa dovrà produrre un'attestazione relativa all'uso di campionatori con i requisiti richiesti. I laboratori, incaricati di eseguire le indagini geotecniche sui campioni prelevati, verificheranno la conformità dei tubi campionatori con i requisiti prescritti comunicandolo alla Regione Toscana. La D.L., in via preliminare durante la fase dei lavori, deve fornire una valutazione di massima, anche tramite acquisizione di informazioni dall'Impresa esecutrice, sulla presenza del tubo campionatore con i requisiti richiesti. Inoltre, i campionatori a pareti sottili, con o senza pistone, dovranno avere un coefficiente di ingresso molto piccolo e certamente minore di 0.5 %.

E' prevista un'accurata pulizia del foro di sondaggio con metodi adeguati (carotiere semplice e manovra finale a secco, utensile di spurgo a getto radiale e soprastante calice di raccolta del detrito, ecc.). Nel caso di campionatori tipo Denison il campione sarà alloggiato in un tubo in ABS o PVC interno al tubo non rotante e opportunamente paraffinato dopo il recupero. L'entità della sporgenza del tubo interno va concordata con la direzione lavori. Nel caso di campionatore Mazier modificato il campione sarà alloggiato in un tubo di acciaio inossidabile, cadmiato o comunque trattato. Anche in questo caso si procederà alla paraffinatura. Inoltre la carota di terreno prelevato non dovrà avere un diametro inferiore a 80 mm.

In ogni caso le ditte forniranno le caratteristiche del tubo campionatore in dotazione e quanto non espressamente indicato andrà concordato con la direzione lavori. I tubi campionatori utilizzati dovranno essere nuovi e costituiti in acciaio inox e dotati di tagliente affilato.

L'introduzione del campionatore nel foro di sondaggio deve essere controllata con misure di profondità in modo che, posato il campionatore a fondo foro, si possa verificare la corrispondenza con la profondità precedentemente raggiunta dalla perforazione. I campioni indisturbati dovranno avere dimensioni non inferiori a 80 mm di diametro e 500mm di lunghezza. Eventuali discordanze tra le due profondità richiederanno un'ulteriore pulizia del foro e vanno comunque sempre annotate nel modulo di sondaggio riportato in Fig. 3B2.

Il campione deve essere conservato nello stesso tubo utilizzato per il prelievo e dovrà essere sigillato mediante tappi a tenuta, previo incollaggio di paraffina fusa alle estremità.

Si procederà quindi all'apposizione sul contenitore di un'etichetta (non degradabile per umidità) in cui sono indicati:



- designazione del cantiere - Committente - Esecutore;
- designazione del sondaggio;
- tipo di campione e numero d'ordine;
- profondità di prelievo (da/a);
- orientamento (alto/basso);
- data di prelievo.

Nel caso di campioni indisturbati dovranno essere riportati i dati relativi al campionamento eseguito con l'annotazione del:

- tipo di campionatore;
- metodo d'infissione del campionatore;
- condizioni di prelievo (presenza d'acqua, energia d'infissione, ecc.).

I campioni devono essere conservati, a cura dell'Amministrazione Comunale in locali idonei, in posizione orizzontale evitando scuotimenti ed urti e particolarmente protetti dai raggi del sole, dal gelo e da fonti di calore fino al momento della consegna al laboratorio geotecnico. Rientra tra i compiti dell'Impresa:

- il trasporto e la consegna dei campioni al Comune;
- la successiva spedizione degli stessi al laboratorio geotecnico per le analisi, corredata, tramite apposita distinta, di tutte le informazioni necessarie alla univoca individuazione del campione. Tale distinta dovrà essere inviata per conoscenza dalla Ditta esecutrice delle indagini al Servizio Sismico regionale.

Qualora il prelievo dei campioni non venga effettuato secondo le modalità previste nelle presenti Istruzioni Tecniche Regionali per inadempienza da parte dell'Impresa, per quanto segnalato dal geologo incaricato della D.L. non verrà autorizzato il pagamento per tutta la profondità relativa al litotipo interessato dal prelievo.

Per quanto riguarda le informazioni relative ai sondaggi che il geologo incaricato dal Comune o dalla Regione Toscana dovrà riportare nella Relazione Geologica si rimanda al paragrafo 3B2.16.

### 3B2.1.4 SISTEMAZIONE PER INDAGINI GEOFISICHE

I fori in cui vengono eseguite le prove sismiche dovranno essere attrezzati con tubo di rivestimento in ABS o PVC pesante o di tipo inclinometrico di spessore maggiore o uguale a 5.0 mm, lunghezza minima degli spezzoni di 3 metri, assemblati mediante filettatura a vite ed eventuali manicotti di giunzione e muniti di tappi di testa e fondo foro per l'effettuazione di misure sismiche in foro (le indicazioni sul rivestimento saranno fornite dalla Regione Toscana Settore - Servizio Sismico Regionale).

La posa in opera del tubo di rivestimento, di diametro interno minimo di 80 mm, necessario per l'effettuazione delle prove sismiche, dovrà effettuarsi con le seguenti modalità:

- lavaggio accurato del foro con acqua pulita e controllo della profondità;
- calo della tubazione nel foro; i tubi saranno giuntati con manicotti incollati ma non rivettati (eventualmente fissati con viti autofilettanti non passanti), in modo da garantire la perfetta linearità interna e l'assenza di scalini nella tubazione, onde evitare problemi per l'inserimento dei geofoni tridimensionali per l'esecuzione delle prove sismiche in foro;
- cementazione dell'intercapedine foro-tubo.

La cementazione deve essere eseguita in modo da garantire la continuità del contatto terreno-tubazione su tutta la verticale per garantire registrazioni in P ed SH di qualità. Al fine di garantire una completa ed ottimale cementazione, la realizzazione della prova geofisica in foro dovrà essere effettuata non prima di 10 giorni dalla fine delle operazioni di cementazione del foro di sondaggio.

E' possibile, prima ancora di collocare il rivestimento, chiudere il fondo del foro con un cappello (*packer*) dotato di valvola di controllo sferica *one-way*, in grado di accogliere un tubo del diametro di 38 mm; dopodiché, una volta posizionata la tubazione di rivestimento e centrata rispetto alle pareti del foro con l'ausilio di appositi distanziatori montati sul fondo, viene calato all'interno del foro, fino a raggiungere la valvola, un tubo in ABS o PVC del diametro di 38 mm, collegato in superficie ad una pompa convenzionale per mezzo della quale viene iniettata la miscela cementizia, che, una volta raggiunto il fondo del foro, inizia a riempire dal basso verso l'alto in maniera uniforme l'intercapedine tra foro e rivestimento, spazzando via il fango e i detriti eventualmente presenti (normativa ASTM).

E' possibile altresì calare direttamente il tubo per l'iniezione nell'intercapedine fino al fondo del foro e quindi procedere alla cementazione dal basso verso l'alto, in modo da poter garantire al massimo la continuità del terreno – tubazione, con tutti quegli accorgimenti necessari.

La miscela da utilizzare, in linea di massima, per la cementazione è costituita da una malta a ritiro controllato (acqua + cemento + bentonite), in particolare per la parte del foro che penetra nella roccia si consiglia il cemento di *Portland* convenzionale di densità pari a  $2.2 \text{ mg/m}^3$ , mentre per la parte a contatto con terreni, sabbie e ghiaie si sceglie una miscela con una densità prossima a quella del terreno circostante (da  $1.8 \text{ mg/m}^3$  a  $1.9 \text{ mg/m}^3$ ), ottenuta mescolando  $450 \text{ g}$  di cemento di *Portland*,  $450 \text{ g}$  di bentonite a  $2.8 \text{ kg}$  di acqua. La pressione di iniezione non deve essere superiore a  $2 \text{ atm}$  (Norma ASTM).

Questo in condizioni normali; qualora la situazione incontrata presentasse forti venute di acqua, fratturazione, scavarnamenti, etc., la composizione della miscela e la pressione d'iniezione potranno essere opportunamente variate sentita la Regione Toscana Settore - Servizio Sismico Regionale e tenuto conto che l'obiettivo è un contatto solidale tra terreno e tubo di rivestimento. In questo caso l'impresa dovrà comunicare la nuova composizione adottata.

Al fine di garantire l'accuratezza della cementazione, il pagamento del sondaggio sarà effettuato solo dopo l'esecuzione della prova geofisica, dopo aver verificato che le registrazioni acquisite siano di qualità e non disturbate dalla non continuità della cementazione.

Una volta terminate le operazioni di rivestimento e cementazione, l'interno dei tubi deve essere lavato con acqua pulita e lasciato pieno d'acqua.

Ciascun foro di sondaggio, attrezzato nel modo anzidetto, dovrà essere protetto da un pozzetto in ferro, in superficie o interrato, reso inamovibile e dotato di lucchetto. Ad esempio, in una sede stradale o in un sito per il quale il Comune prevede la realizzazione di un pozzetto a raso, dovrà essere realizzato un doppio pozzetto di cui quello esterno munito di coperchio di dimensioni adeguate, contenente al proprio interno un pozzetto dotato di lucchetto.

### 3B2.1.5 SISTEMAZIONE PER MISURE PIEZOMETRICHE

Nel caso di terreni a grana grossa si impiegheranno piezometri a tubo aperto, per quelli a grana fine piezometri tipo Casagrande. I piezometri a tubo aperto hanno diametro compreso tra 1 e 2 pollici ed il livello dell'acqua viene rilevato mediante freatimetro. La Figura 3B1 (Lancellotta, 1993) mostra la posa in opera di piezometri a tubo aperto senza isolamento (Figura 3B1a) e con isolamento (Figura 3B1b). La seconda soluzione va adottata nel caso di terreni non omogenei quando si è interessati ad una misura localizzata.

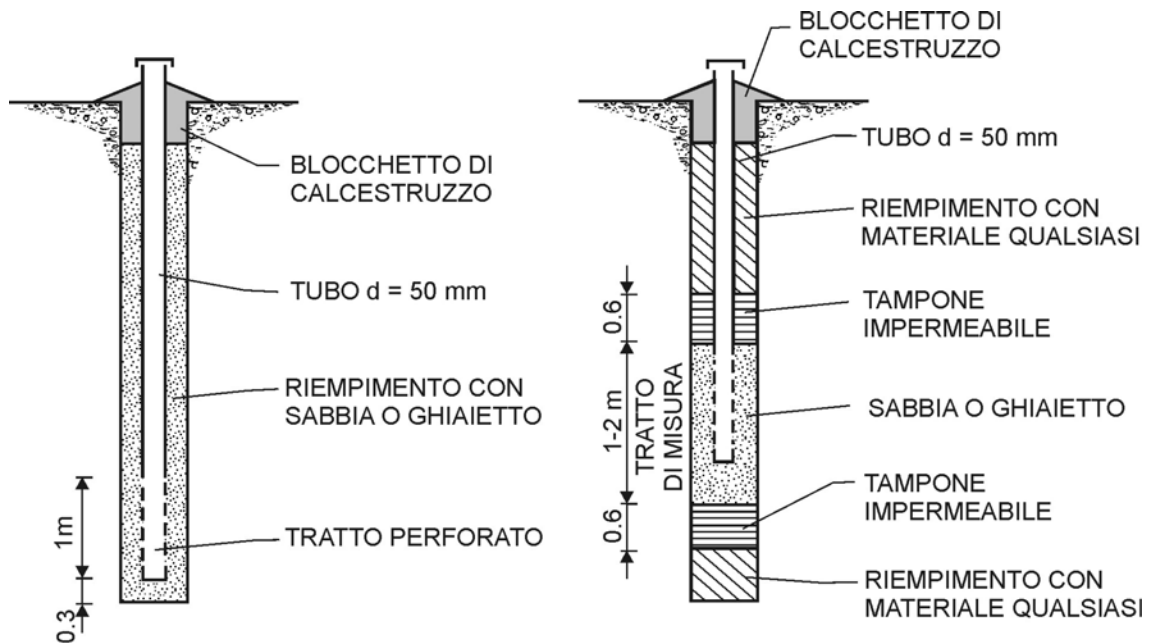
Nel caso di terreni a grana fine è opportuno installare piezometri tipo Casagrande costituiti da una cella piezometrica e da una doppia tubazione di misura e di spurgo. La cella piezometrica è costituita da un filtro cilindrico

(solitamente agglomerato di silice) e da un corpo in ABS o PVC. La tubazione di misura e di spurgo ha diametro nominale di ½ pollice ed lunghezza degli spezzoni compresa tra 3 e 6 m.

Prima della posa in opera occorre verificare che i tubi non presentino lesioni, schiacciamenti o curvature dovute al trasporto o all'immagazzinamento e che i filetti alle estremità dei tubi ed i manicotti non presentino anomalie tali da compromettere il corretto accoppiamento.

Per la posa in opera occorre procedere come di seguito descritto:

- montaggio dei manicotti di giunzione ad una estremità dei tubi con sigillatura mediante opportuni sigillanti;
- preparazione del materiale necessario alla formazione dello strato filtrante e di sigillatura;
- controllo della quota di fondo foro con scandaglio;
- lavaggio del foro con acqua pulita immessa dal fondo foro attraverso le aste della sonda;
- inserimento della cella, aggiungendo progressivamente gli spezzoni di tubo e sigillando le giunzioni con opportuni sigillanti; la giunzione dei tubi viene realizzata senza forzare eccessivamente l'avvitamento dei manicotti filettati al fine di evitare la restrizione delle estremità dei tubi;
- l'estremità superiore della doppia tubazione deve sporgere da piano campagna 20-30 cm per consentire un'agevole inserimento della sonda freaticometrica ed allo stesso tempo consentire la posa in opera di un pozzetto protettivo di dimensioni contenute.
- realizzazione dello strato filtrante in ghiaietto per lo spessore richiesto e ritiro dei rivestimenti;
- formazione del tappo impermeabile, costituito da palline di bentonite, con spessore adeguato, ritirando progressivamente i rivestimenti dal foro senza l'ausilio della rotazione;
- controllo della quota superiore del tappo impermeabile;
- riempimento del tratto del foro compreso tra l'estremità superiore del tappo impermeabile ed il piano campagna;
- verifica dell'assenza di ostruzioni ed ogni altro impedimento al passaggio della sonda freaticometrica.



**Figura 3B1** – a) Piezometro idraulico aperto in terreno omogeneo; b) Piezometro aperto con tratto di misura sigillato. Da Lancellotta, 1993

Al termine dell'installazione il piezometro deve essere spurgato mediante immissione di acqua pulita per almeno 10 minuti.

In particolari casi, si può richiedere, anche l'installazione di n.2 celle Casagrande nello stesso foro di sondaggio.

### 3B2.1.6 SISTEMAZIONE PER MISURE INCLINOMETRICHE

Devono essere utilizzati tubi inclinometrici, in alluminio anodizzato, a 4 guide con diametro interno delle guide compreso tra 75 e 80 mm e lunghezza non inferiore a m 3.00; la giunzione tra gli spezzoni di tubo deve essere realizzata per mezzo degli appositi manicotti in uguale materiale avente lunghezza di 300 mm e diametro massimo di ingombro pari a 92mm; le tolleranze di accoppiamento manicotto-tubi devono essere tali da garantire una rotazione reciproca dei tubi inferiore a 2 gradi.

La dotazione deve inoltre prevedere un tappo di fondo ed un tappo superiore di protezione, nonché una sonda testimone.

Per l'iniezione della miscela di cementazione, alla valvola di fondo è da preferire una tubazione continua a perdere (tipo rilsam o altro).

Prima della posa in opera si devono eseguire i seguenti controlli:

- che i tubi non presentino lesioni, schiacciamenti o curvature dovute al trasporto o all'immagazzinamento;
- che all'estremità i tubi e i manicotti non presentino anomalie tali da compromettere il buon accoppiamento degli stessi;
- verifica del corretto montaggio dell'eventuale valvola di fondo e delle attrezzature necessarie all'iniezione della miscela di cementazione;
- controllo e preparazione dei componenti per la realizzazione della miscela di cementazione che, di norma, deve essere composta da acqua, cemento pozzolanico e bentonite, rispettivamente in proporzione di 100, 50 e 5 parti di peso;
- verifica quota fondo foro.

La messa in opera deve avvenire con le seguenti modalità:

- preassemblaggio dei tubi in spezzoni di 6.0 m terminanti ad un estremo con un manicotto mediante le seguenti operazioni:
  1. inserimento del manicotto sul tubo per metà della sua lunghezza; esecuzione dei fori per i rivetti (4 per ogni tubo) a circa 50 mm dall'estremità del manicotto;
  2. mantenendo in posizione il manicotto mediante inserimento provvisorio di rivetti, introduzione dell'altro tubo ed esecuzione dei fori;
  3. rimozione del manicotto;
  4. stesura di un sottile strato di colla all'estremità dei tubi da giuntare, per una lunghezza di circa 15 cm;
  5. inserimento del primo tubo nel manicotto e rivettatura; inserimento del secondo tubo e rivettatura;
  6. abbondante fasciatura del giunto con nastro autovulcanizzante.
- inserimento del primo spezzone così predisposto nella perforazione bloccando la barra all'altezza della cravatta, avendo cura di non deformarla e di permettere la fuoriuscita del sono manicotto di giunzione;
- inserimento dello spezzone successivo con manicotto e collegamento con il precedente mediante foratura, rivettatura e sigillatura del giunto;
- ripetizione dell'operazione fino al completo inserimento della colonna di tubazione, provvedendo, ad intervalli opportuni, a fissare al tubo inclinometrico i tubetti di iniezione;
- completata la posa della colonna, accurato lavaggio della perforazione e prima verifica con sonda testimone della agibilità della tubazione inclinometrica; segue la cementazione a basa pressione (max 2 bar) attraverso la valvola di fondo o, preferibilmente, attraverso la tubazione esterna di iniezione; l'operazione viene considerata ultimata alla fuoriuscita della malta in superficie;
- al termine dell'iniezione di miscela, estrazione del tubo di rivestimento di

perforazione e rabbocco da piano campagna della miscela di cementazione; durante l'estrazione del tubo di rivestimento è assolutamente necessario non eseguire alcuna rotazione dello stesso;

- successivo lavaggio interno del tubo inclinometrico mediante abbondante circolazione d'acqua.

Al completamento dell'installazione del tubo occorre verificarne l'integrità e che risulti libero da ostruzioni o impedimenti al passaggio della sonda di misura, mediante l'utilizzo di apposita "sonda testimone", occorre inoltre determinare l'Azimut di orientamento delle guide mediante bussola ed eseguire la prima lettura inclinometrica di riferimento (lettura di zero).

### 3B2.1.7 STRATIGRAFIA DEL SONDAGGIO: MODULO PER LA COMPILAZIONE, SIMBOLOGIE E SPECIFICHE TECNICHE

Per un criterio di uniformità le stratigrafie dei sondaggi dovranno essere descritte utilizzando il modulo riportato di seguito (Fig. 3B2). Inoltre dovrà essere rilevato il livello di falda con misure giornaliere ad inizio e fine perforazione (in Fig. 3B3 vengono riportate le tabelle da utilizzare per la misura del livello di falda).

Il modulo per la compilazione della stratigrafia del sondaggio riporta le seguenti informazioni:

- informazioni generali sulla postazione del cantiere, sulle strumentazioni e le metodologie di perforazione;
- parametri acquisiti durante la fase di perforazione (manovre, velocità di avanzamento, RQD, recupero, struttura e fratturazione della roccia...);
- attrezzature utilizzate durante la fase di perforazione (carotieri, campionatori, rivestimenti..);
- prove eseguite durante la fase di perforazione (SPT, Pocket, Vane Test...) ed eventuali campioni prelevati;
- eventuali annotazioni ed osservazioni devono essere riportati nel campo note del log stratigrafico.

Si precisa che la percentuale di recupero di terreno da riportare nel log deve essere calcolata relativamente ad ogni singola manovra e valutata al momento dell'estrazione del terreno dal carotiere.

L'informazione qualitativa relativa alla velocità d'avanzamento durante la fase di perforazione secondo quanto specificato in Fig. 3B2, deve essere fornita insieme ad una valutazione quantitativa (espressa in cm/min) relativa ai parametri di avanzamento del carotiere (velocità di avanzamento, pressione

sulla colonna, coppia...) riportati anche in un diagramma velocità-profondità. La valutazione della velocità di avanzamento deve essere effettuata controllando che il sondatore non vari i parametri di perforazione (pressione in testa, pressione sulla colonna...) e può essere effettuata manualmente oppure preferibilmente mediante l'utilizzo di un contatore.

Per quanto riguarda la descrizione stratigrafica ed i parametri rilevabili dall'attività di sondaggio vengono forniti le linee guida secondo la normativa vigente (AGI, ISRM). In ogni caso nel log stratigrafico dovranno essere fornite le descrizioni stratigrafiche dei terreni attraversati con indicazioni litologiche ed interpretazione formazionale della litologia di appartenenza.

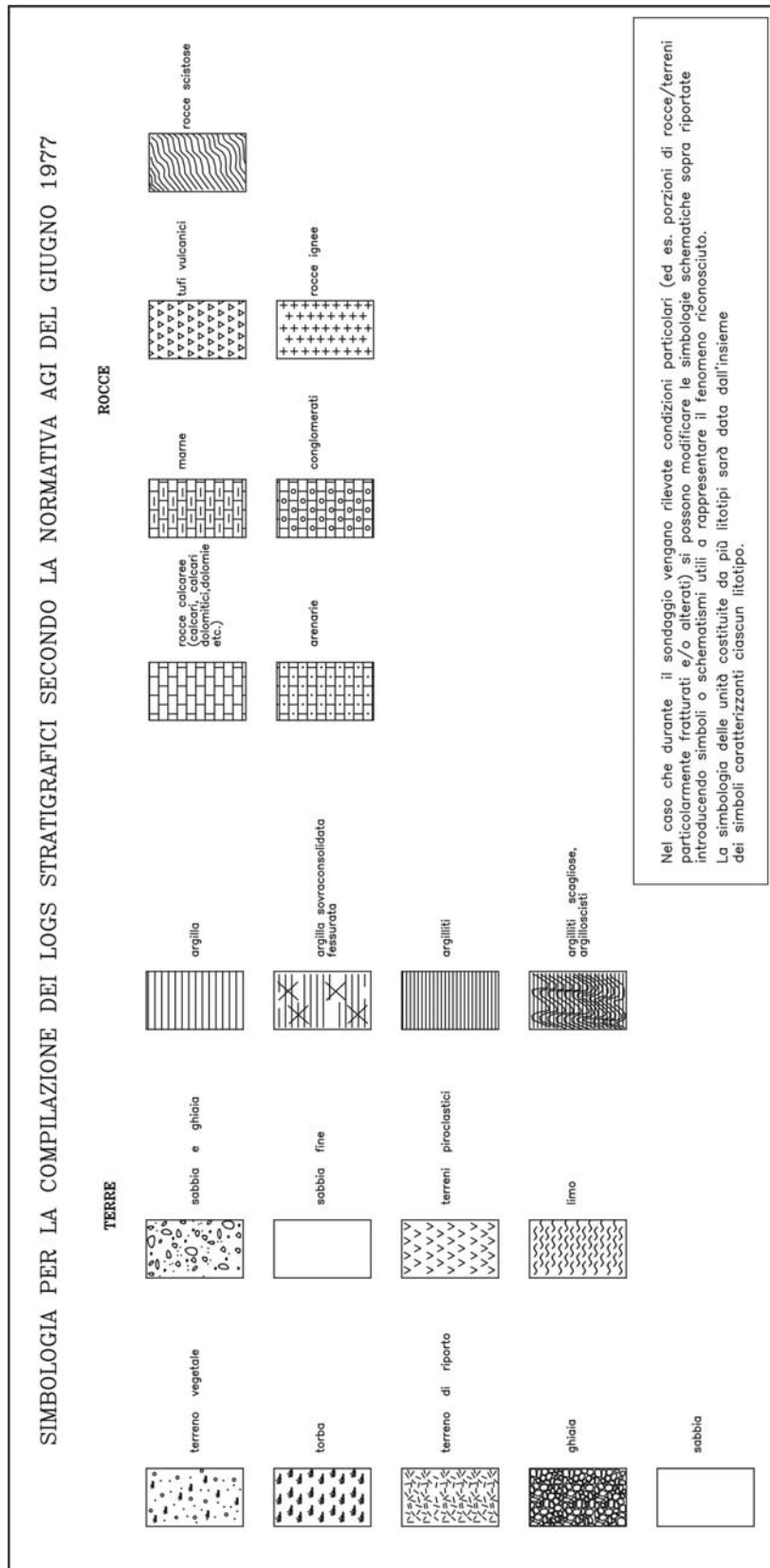
I simboli e le sigle da utilizzare per la compilazione vengono mostrati in Fig. 3B4 (per il tipo di campionatore, la velocità di avanzamento e il tipo di carotiere), mentre la simbologia da utilizzare per il disegno della stratigrafia è mostrata in Figura Fig. 3B5 (AGI, 1977).

Eventuali variazioni devono essere concordate con la Regione Toscana.









**Figura 3B5** – Simboli per rappresentazione stratigrafica

## SONDAGGI IN TERRE

Per ciascuno strato attraversato è possibile determinare i seguenti parametri:

1. tipo di terreno (granulometria);
2. consistenza;
3. colore;
4. struttura;
5. contenuto d'acqua;
6. odore;
7. reazioni all'HCl.

### a) Tipo di terreno

Viene fatto riferimento alla seguente tabella:

**Tabella 3B4** – Definizione del tipo di terreno

TIPO DI TERRENO			
DEFINIZIONE	DIAMETRO DEI GRANI (mm)	CRITERI DI IDENTIFICAZIONE	
BLOCCHI		visibili a occhio nudo	
CIOTTOLI			
GHIAIA	grossa		
	media		
	fine		
SABBIA	grossa		
	media		
	fine		
LIMO	0,06÷0,002		Solo se grossolano è visibile ad occhio nudo – poco plastico, dilatante, lievemente granulare al tatto, si disgrega velocemente in acqua, si essicca velocemente, possiede coesione ma può essere polverizzato fra le dita
ARGILLA	<0,002		I frammenti asciutti possono essere rotti ma non polverizzati fra le dita, si disgrega in acqua lentamente, plastica non dilatante, appiccica alle dita, si ritira durante l'essiccazione.
TERRENO ORGANICO O VEGETALE		Contiene una percentuale rilevante di sostanze organiche vegetali.	
TORBA		Predominano resti lignei non mineralizzati, colore scuro, bassa densità.	

Nella Tabella 3B4 sono indicati i diversi tipi di terreno ed i metodi che consentono il loro riconoscimento speditivo. Si hanno quattro gruppi principali:

- TERRE GRANULARI (blocchi, ciottoli, ghiaia, sabbia): se prevalgono grani visibili ad occhio nudo ( $d > 0.006$  mm), privi di coesione se asciutti;
- TERRE COESIVE (limo, argilla): se prevalgono grani non visibili ad occhio nudo, dotati di coesione se asciutti;
- TERRE ORGANICHE O VEGETALI: se prevalgono materiali organici o vegetale.
- TORBE: se prevalgono resti lignei.

Secondo la convenzione suggerita dall'AGI (1977) il nome della terra è quello della classe granulometrica dominante alla quale si fa seguire la denominazione della frazione secondaria secondo il seguente schema:

- preceduta dalla preposizione "con" se compresa tra il 50 ed il 25 % (es. limo con argilla);
- seguita dal suffisso "-oso" se fra il 25 ed il 15 % (es. limo argilloso);
- seguita dal termine "debolmente oso" se fra il 15 e il 5 % (es. limo debolmente argilloso).

In presenza di materiali composti da sabbia e ghiaia conviene attenersi alla Tabella 3B5 per una descrizione corretta dal punto di vista granulometrico:

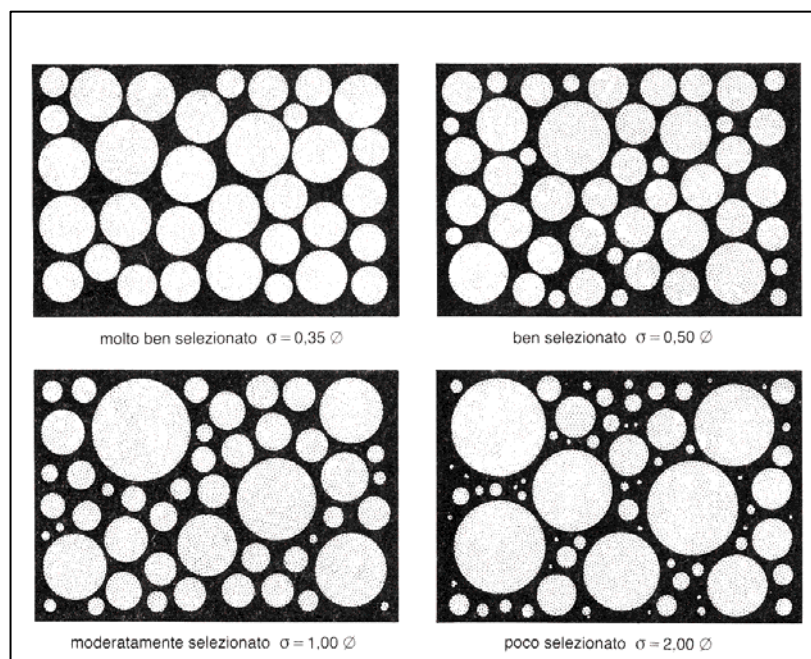
**Tabella 3B5** – Definizione del tipo di terreno in terreni composti da ghiaia e sabbia

<b>MATERIALE PREVALENTEMENTE SABBIOSO</b>	
$G \leq 5\%$	sabbia debolmente ghiaiosa
$5\% < G \leq 20\%$	sabbia ghiaiosa
$G \geq 20\%$	sabbia con ghiaia
$G \cong S$	sabbia e ghiaia
<b>MATERIALE PREVALENTEMENTE GHIAIOSO</b>	
$5\% < S \leq 20\%$	ghiaia sabbiosa
$S \geq 20\%$	ghiaia con sabbia
$S \cong G$	ghiaia e sabbia

La valutazione della determinazione del tipo di terreno verrà effettuata dal geologo in maniera speditiva, rimandando ad eventuali analisi di laboratorio la determinazione dell'esatta composizione granulometrica (analisi granulometriche).

Della frazione grossolana (blocchi, ciottoli, ghiaia) sarà specificata:

- la natura;
- il diametro massimo e medio dei grani;
- la percentuale e la composizione della matrice;
- il grado di uniformità della composizione granulometrica (sorting), rappresentato qualitativamente dalla Figura 3B6:



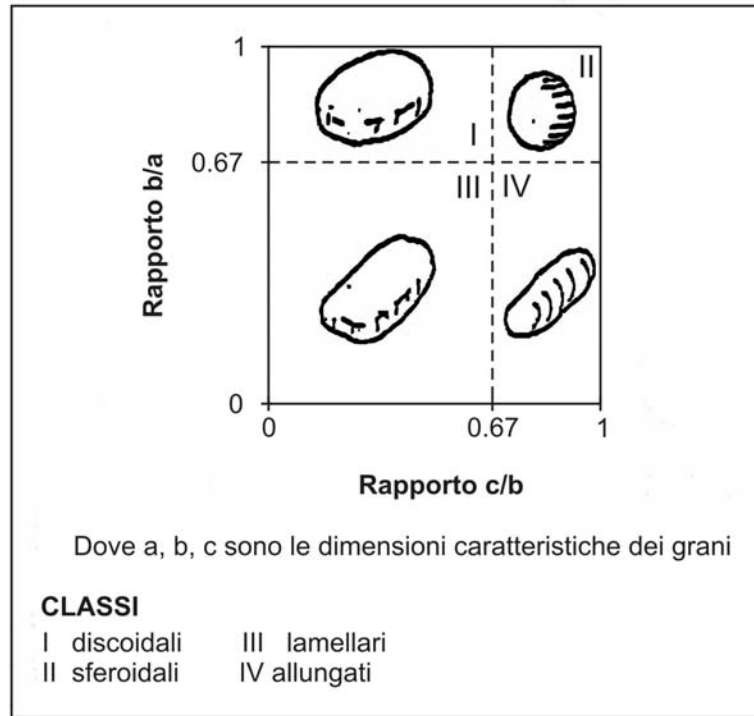
**Figura 3B6** – Carta di comparazione per la stima visiva del grado di selezionamento ( $\sigma$ )

La morfometria è definita da:

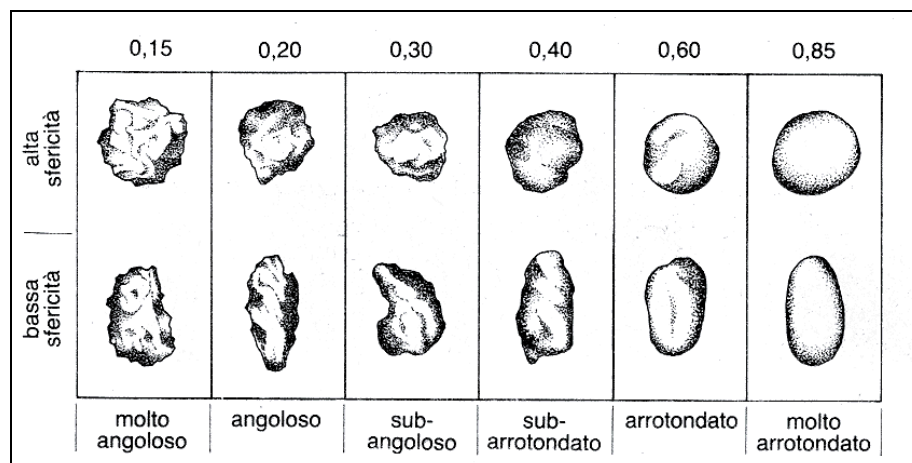
- **forma**: misura delle relazioni esistenti tra le tre dimensioni di un oggetto (Fig. 3B7):
- **sfericità**: valutazione quantitativa dell'equidimensionalità di un grano, indipendente dalla misura della forma e dell'arrotondamento, stabilita visivamente dal diagramma di Powers (Fig. 3B8):
- **grado di arrotondamento**: determinazione della curvatura degli spigoli;

indipendente dalla forma e dalla sfericità, può essere espresso tramite la tabella descrittiva A1.2.1.1.6:

Da un punto di vista grafico il grado di arrotondamento dei materiali grossolani è stabilito dalla rappresentazione comparativa di Pettijohn (fig. A1.2.1.1.7)



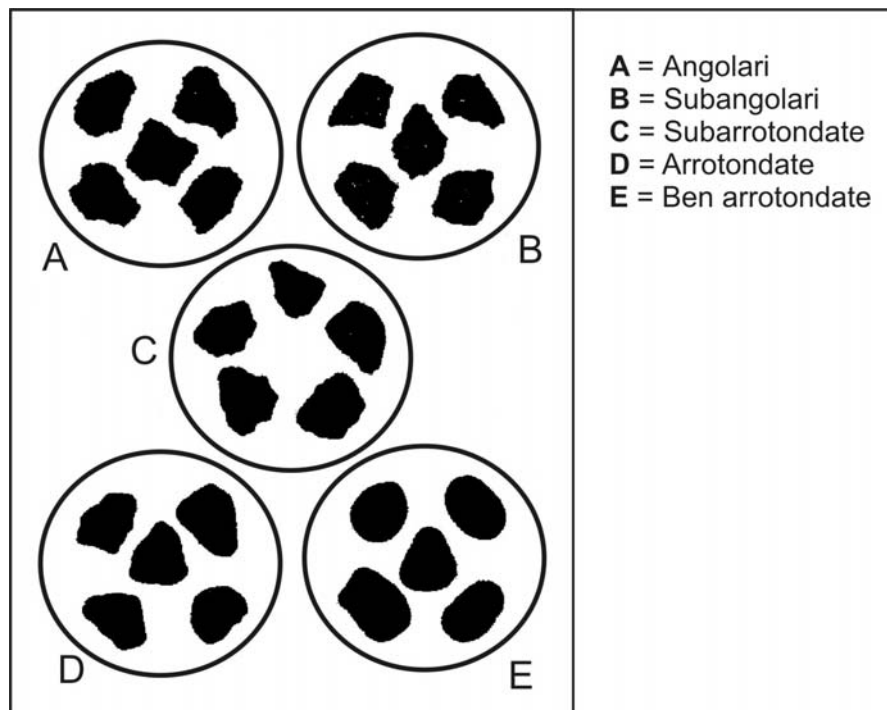
**Figura 3B7** – Diagramma di Zinng (da Gnaccolini, 1978) per la determinazione della forma di elementi di ghiaia e ciottoli



**Figura 3B8** – Carta di comparazione visiva per la stima visiva della sfericità in base all'arrotondamento dei granuli

**Tabella 3B6 – Definizione del grado di arrotondamento**

<b>ARROTONDAMENTO</b>		
<b>Definizione</b>	<b>Arrotondamento</b>	<b>Descrizione</b>
<b>angolare</b>	0÷0,15	nessun smussamento. Le particelle presentano spigoli vivi, facce relativamente piane.
<b>subangolari</b>	0,15÷0,25	mantiene forma originale con evidenze di smussamento. Le particelle presentano spigoli arrotondati, facce relativamente piane.
<b>subarrotondate</b>	0,25÷0,40	smussamento considerevole e riduzione dell'area di superficie del clasto. Le particelle presentano facce pressoché piane, con spigoli ben arrotondati.
<b>arrotondate</b>	0,40÷0,60	rimozione delle superfici originali, con qualche superficie piatta. Le particelle presentano facce incurvate e assenza di spigoli.
<b>ben arrotondate</b>	0,60÷1	superficie interamente compresa da curve ben arrotondate. Le particelle presentano facce tondeggianti.



**Figura 3B9 – Geometria delle particelle grossolane**



## b) Consistenza

La consistenza è una misura della durezza e della densità della terra, che possono essere considerate indici della sua resistenza e rigidità. La consistenza dei terreni coesivi sarà descritta con riferimento alla Tabella 3B7, misurando la resistenza al penetrometro tascabile sulla carota appena estratta e scortecciata con frequenza di una prova ogni 20÷30 cm.

**Tabella 3B7** – Consistenza dei terreni coesivi

<b>CONSISTENZA TERRENI COESIVI</b>		
<b>Definizione</b>	<b>Resistenza al penetrometro tascabile (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Prove manuali</b>
<b>Privo di consistenza</b>	< 0,25	Espelle acqua quando strizzato fra le dita
<b>Poco consistente</b>	0,25÷0,5	Si modella fra le dita con poco sforzo; si scava facilmente
<b>Moderatamente consistente</b>	0,5÷1,0	Si modella fra le dita solo con forte pressione. Offre una certa resistenza allo scavo.
<b>Consistente</b>	1,0÷2,5	Non si modella fra le dita. E' difficile da scavare.
<b>Molto consistente</b>	2,5÷5,0	Può essere scalfito con l'unghia del pollice. Si scava con molta difficoltà.
<b>Estremamente consistente</b>	>5,0	Può essere scalfito con difficoltà con l'unghia del pollice.

Nel caso di terreni granulari, si esprimerà la consistenza in termini di addensamento, in base al numero di colpi della Prova Penetrometrica Standard SPT:

**Tabella 3B8** – Consistenza dei terreni granulari

<b>CONSISTENZA TERRENI GRANULARI (ADDENSAMENTO)</b>		
<b>N<sub>SPT</sub></b>	<b>Valutazione dello stato</b>	<b>Prove manuali di addensamento</b>
0÷4	<b>Sciolto</b>	Può essere scavato con la pala.
4÷10	<b>Poco addensato</b>	Può essere scavato con la pala con difficoltà
10÷30	<b>Moderatamente addensato</b>	Può essere scavato con la pala con molta difficoltà
30÷50	<b>Addensato</b>	Non è sufficiente la pala per scavarlo
> 50	<b>Molto Addensato</b>	Non è sufficiente la pala per scavarlo

Nei terreni granulari, dove possibile, sarà valutato, sulla base di prove manuali, anche il grado di cementazione:

**Tabella 3B9** – Cementazione dei terreni granulari

<b>CEMENTAZIONE TERRENI GRANULARI</b>	
<b>Definizione</b>	<b>Criteri di identificazione</b>
<b>Debole</b>	Si sbriciola o si rompe con una piccola pressione delle dita.
<b>Moderata</b>	Si sbriciola o si rompe con una considerevole pressione delle dita.
<b>Forte</b>	Non si sbriciola o si rompe con la pressione delle dita.

### c) Colore

Il colore è il principale indicatore della composizione mineralogica e dei processi di alterazione; deve essere valutato subito dopo l'estrazione della carota. Può essere effettuata tramite Tavole dei Colori (es. Munsell soil color charts) in cui i colori sono indicati tramite dei codici alfanumerici.

La determinazione di tale parametro non è da considerarsi rilevante per le finalità della valutazione degli effetti locali, previste dal programma VEL.

### d) Struttura

Dove possibile, su spezzoni significativi, si potrà rilevare la struttura mediante la tabella:

**Tabella 3B10** – Definizione della struttura di un terreno

<b>STRUTTURA DEL TERRENO</b>	
<b>Definizione</b>	<b>Criteri di identificazione</b>
<b>Stratificata</b>	Alternanza di strati con spessore e/o colore diverso. Spessore maggiore di 6 mm.
<b>Laminata</b>	Alternanza di strati con spessore e/o colore diverso. Spessore minore di 6 mm.
<b>Fessurata</b>	Presenza di fratture lungo piani definiti.
<b>Massiva</b>	Materiale coesivo che se suddiviso in piccole porzioni mantiene identica resistenza alla rottura del terreno originario.
<b>Lenticolare</b>	Inclusione di piccole parti di materiale differente in lenti di spessore noto. Es. lenti sabbiose in argilla.
<b>Omogenea</b>	Colore e aspetto uniforme.

Per i materiali coesivi è importante mettere in evidenza la presenza di tessiture brecciate (es. presenza elementi consistenti in matrice molle) o di zone di taglio (superfici lisce e striate) perché tali caratteristiche controllano i parametri di resistenza disponibile.

#### **e) Contenuto d'acqua**

Le condizioni di umidità del terreno naturale, saranno definite utilizzando uno dei seguenti termini:

- Asciutto;
- Debolmente umido;
- Umido;
- Molto umido;
- Saturo.

Si deve descrivere la condizione propria del terreno naturale, escludendo quanto indotto dall'eventuale fluido di circolazione, l'uso del quale è connesso alle modalità di perforazione adottate.

#### **f) Odore**

Terreni contenenti quantità rilevanti di materiale organico offrono un caratteristico odore di vegetazione in decomposizione. Questo può essere rilevato su campioni freschi. Odori particolari (solventi ecc.) devono essere descritti. La determinazione di tale parametro non è da considerarsi rilevante per le finalità della valutazione degli effetti locali, previste dal programma VEL.

#### **g) Reazione all'HCl**

La reazione all'acido cloridrico sarà descritta attraverso i seguenti criteri:

**Tabella 3B11**

<b>REAZIONE ALL'ACIDO CLORIDRICO</b>	
<b>Definizione</b>	<b>Criteri di identificazione</b>
<b>Reazione nulla</b>	Nessuna reazione visibile
<b>Reazione debole</b>	Reazione tranquilla, con bolle che si formano lentamente
<b>Reazione forte</b>	Reazione violenta , con bolle che si formano immediatamente

La determinazione di questo parametro non è da considerarsi rilevante per le finalità della valutazione degli effetti locali, previste dal programma VEL.

## SONDAGGI IN ROCCIA

Per ogni litotipo attraversato saranno determinati i seguenti parametri secondo le modalità illustrate di seguito (in conformità alle specifiche IRSM e AGI):

- 1) **RQD** (Rock Quality Designation): rappresenta il recupero percentuale di carotaggio tenendo conto dei singoli spezzoni di carota aventi lunghezza superiore a 10 cm:

$$\text{RQD}\% = \frac{\text{lunghezza totale degli spezzoni di carota} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Lunghezza totale perforata}} \times 100 \quad (3B.1)$$

Si precisa che qualora il parametro RQD, venga calcolato pari a zero, deve essere fornita nel log stratigrafico una giustificazione scritta con eventuali osservazioni. Resta inteso che tale parametro deve essere calcolato per ogni manovra, a meno di brusche variazioni litologiche all'interno della manovra stessa.

- 2) **Natura petrografica e caratteri strutturali**: le rocce, opportunamente riferite alle classifiche litologiche sono riconosciute riportando i principali costituenti ed i caratteri strutturali relativi al loro stato di aggregazione, alle dimensioni e alla forma. Possono essere adottati i seguenti termini descrittivi suggeriti dall'AGI (Associazione Geotecnica Italiana, 1977) (tra parentesi la sigla da riportare sul modulo):

- Struttura "compatta": non è possibile distinguere i componenti della roccia a occhio nudo (1);
- Struttura "granulare": è possibile distinguere ad occhio nudo i costituenti (diversi od eguali) della roccia (es.: struttura cristallina, struttura clastica) (2);
- Struttura "orientata": i singoli elementi di roccia sono più o meno allineati secondo una direzione (es.: struttura laminata, struttura scistosa) (3).

- 3) **Resistenza della roccia integra e delle pareti delle discontinuità**: può essere misurata in vari modi:

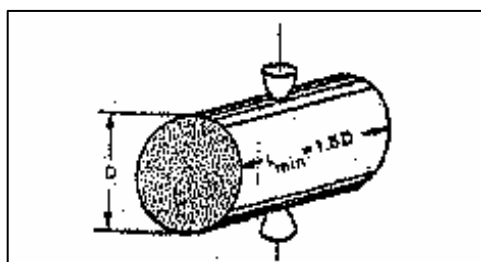
a) mediante *Prova Speditiva* con stima in funzione dell'entità della scalfitura provocata da una punta d'acciaio (tra parentesi il numero da riportare sul modulo):

- Superficie soffice – scalfibile con l'unghia (1);
- Superficie di media durezza – scalfibile con punta d'acciaio (2);

- Superficie dura – scalfibile debolmente con la punta d'acciaio (3).

b) Mediante Sclerometro di Schmidt (mod. L) secondo la metodologia indicata nella Sezione D- Volume 2 e succ.;

c) mediante la prova di Point Load Strength Test, proposta da Franklin (1970). Tale prova consiste nel sottoporre, fino a rottura, un provino della roccia in esame alla pressione di 2 elementi sagomati a cono e terminanti con una punta sferica secondo lo schema illustrato in Fig. 3B10. Nelle moderne attrezzature le 2 punte coniche sono comandate da un sistema idraulico a pressione.



**Figura 3B10** – Schema della prova di Point Load per la determinazione dell'indice  $I_s$

Dalla prova si ottiene un indice di resistenza  $I_s$ , definito dal rapporto:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (3B.2)$$

dove :

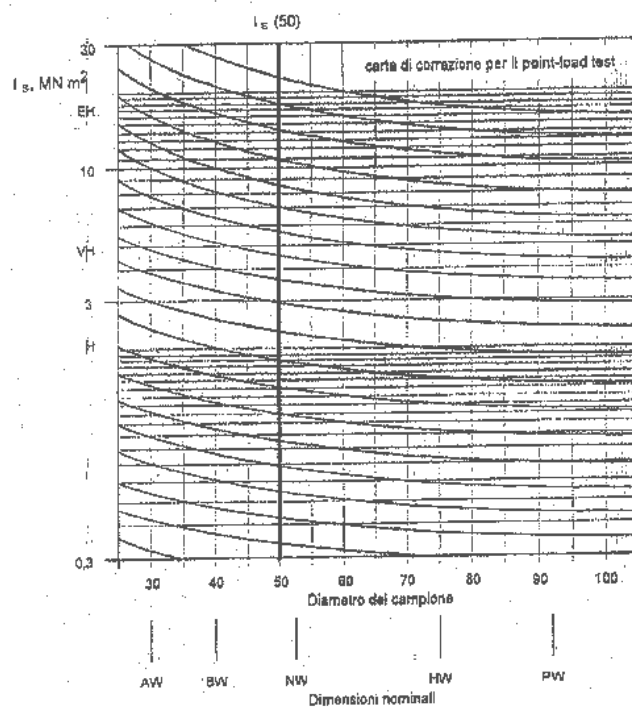
P = carico a rottura (KN/cm<sup>2</sup>);

D = distanza tra i due punti di applicazione della forza (cm).

Nella sua formulazione originale la prova veniva eseguita solo su spezzoni di carota, attualmente  $I_s$  si può ottenere sia da campioni di roccia con forme irregolari che da spezzoni di carote.

I risultati della prova sono influenzati da due importanti fattori quali forma e dimensioni del campione e contenuto in acqua.

Per rendere confrontabili i risultati ottenuti sui campioni aventi dimensioni diverse, si utilizza la "Size Correction Chart" che consente di ricavare un nuovo valore di  $I_s$  riferito ad un diametro standard di 50 mm:  $I_s(50)$  (Fig. 3B11).



**Figura 3B11 – Size correction chart (da manuale Tisco)**

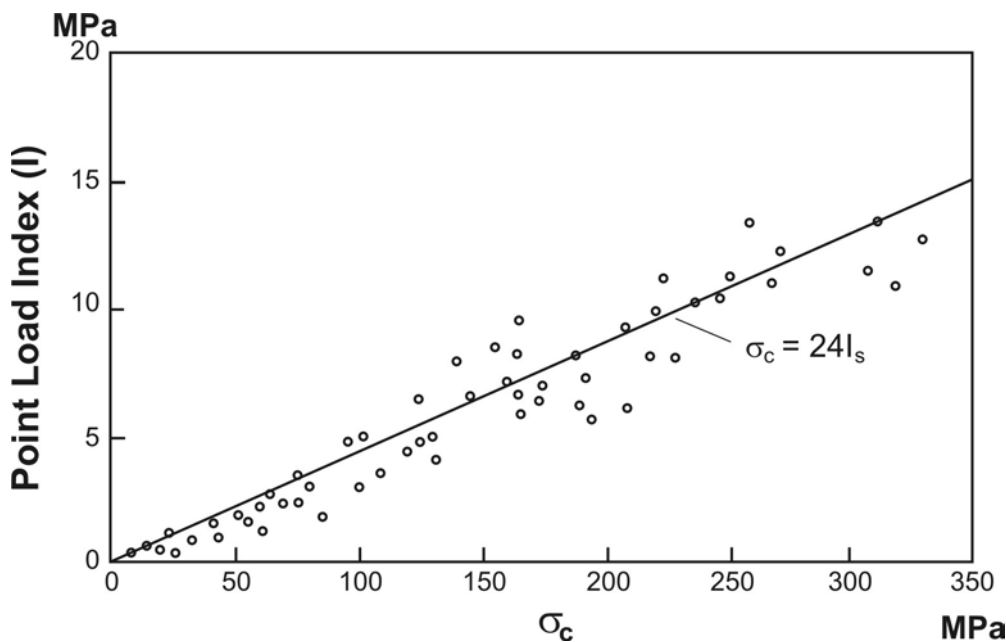
Per quanto riguarda, invece il contenuto d'acqua si è osservato che esso influenza sensibilmente il valore di resistenza (scostamenti del valore di  $I_s$  anche del 100%), pertanto le prove vengono effettuate su campioni a contenuto d'acqua naturale.

L'indice di Point Load corretto si può empiricamente correlare al valore di  $\sigma_c$  (resistenza a compressione monoassiale) applicando la seguente relazione:

$$\sigma_c = I_{s(50)} * 24 \quad (3B.3)$$

Tale correlazione risulta più attendibile nel caso di rocce con caratteristiche di omogeneità ed isotropia, mentre risulta meno attendibile nel caso di rocce anisotrope.

In Figura 3B12 è riportato un esempio di correlazione fra l'indice  $I_s$  e la resistenza a compressione monoassiale determinata su campioni di roccia omogenea e isotropa.



**Figura 3B12** – Esempio di correlazione per l'Indice  $I_s$  e la resistenza a compressione monoassiale ottenuta su campioni di calcarenite.

Il metodo più accurato per la misura della resistenza a compressione è il Point Load Test. Per l'esecuzione di tale prova dovranno essere prelevati spezzoni di carota significativi in accordo con il Settore Servizio Sismico Regionale.

- 4) Sul modulo dei logs stratigrafici deve essere registrata l'**inclinazione delle discontinuità** (per ogni famiglia) rispetto alla direzione di perforazione;
- 5) **Indice della spaziatura delle fratture o indice di fratturazione**: viene determinato rilevando il numero di discontinuità comprese in una lunghezza unitaria (1 metro) di carota:

$$I_f = \frac{\text{lunghezza unitaria}}{\text{numero di discontinuità}} \quad (3B.4)$$

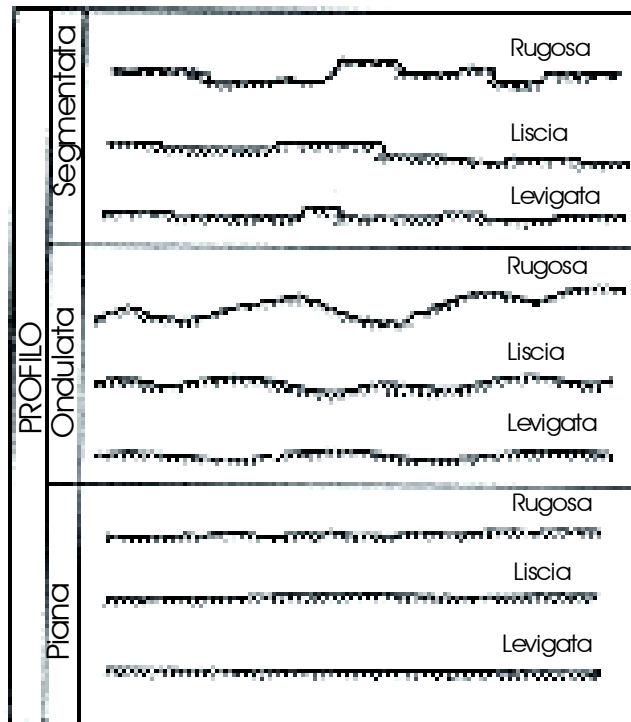
La determinazione di questo indice, che permette di valutare l'influenza delle discontinuità sul comportamento dell'ammasso roccioso, deve essere condotta subito dopo l'estrazione dei campioni dal foro in modo da evitare il conteggio delle fratture che in alcune rocce, si verificano per effetto dell'essiccamento.

E' inoltre necessario tenere conto dell'inclinazione relativa delle discontinuità incontrate (di cui al punto precedente): le discontinuità perpendicolari alla direzione di carotaggio saranno ad esempio incontrate con maggiore frequenza rispetto alle fratture che presentano giacitura diversa.

**Tipo di discontinuità:** per il tipo di discontinuità, ove oggettivamente riconoscibili dalle carote estratte e sulla base delle conoscenze di geologia strutturale, potrà essere utilizzata la seguente nomenclatura (tra parentesi la sigla da riportare sul modulo):

- **GIUNTO:** discontinuità di origine meccanica, che interrompe la continuità di un corpo litologicamente omogeneo, e lungo la quale non è avvenuto alcun scorrimento (GI);
  - **FAGLIA:** discontinuità lungo la quale è riconoscibile l'avvenuto scorrimento (FG);
  - **CONTATTO:** discontinuità che segna il passaggio tra tipi litologici differenti (CO);
  - **PIANO DI STRATO:** discontinuità correlata alla variazione delle condizioni di sedimentazione, all'interno di una stessa formazione, tipica di rocce sedimentarie (STR);
  - **SCISTOSITÀ:** piani di debolezza connessi all'orientazione preferenziale in letti e bande di alcune componenti mineralogiche della roccia, tipici di rocce metamorfiche (SC);
  - **CLIVAGGIO:** superfici di fissilità parallele, molto ravvicinate, spesso parallele ai piani assiali delle pieghe di formazione stratificate (CV);
  - **FILONE O LENTE:** inclusioni a differente composizione mineralogica in una formazione omogenea (FIL).
- 7) **Forma e scabrezza:** la scabrezza, dovuta alla presenza di irregolarità, ondulazioni o gradini sulla superficie della discontinuità potrà essere descritta, qualora oggettivamente riconoscibile, secondo lo schema della Figura 3B13





**Figura 3B13** – Schema del Profilo delle discontinuità

Vengono poi indicate, con il termine striate (slickensided), le superfici che presentano indizi di movimenti.

8) **Riempimento:** per il riempimento potranno essere utilizzate le seguenti dizioni (tra parentesi la sigla da riportare sul modulo):

- CALCITE (CC);
- QUARZO (QZ);
- BRECCE/SABBIE (BS);
- LIMO (LI);
- ALTRO ....

9) **Grado di alterazione:** sono individuati e distinti quattro gradi di alterazione senza però definire nel dettaglio i processi di decomposizione e di disgregazione che interessano le proprietà della roccia.

Le definizioni sono le seguenti (tra parentesi il numero da riportare sul modulo):

- **INALTERATA** – non sono visibili segni di alterazione nella roccia **(1)**;
- **LIEVEMENTE ALTERATA** – le superfici di debolezza presentano patine di ossidazione da locali a diffuse che interessano la roccia per uno spessore fino a 2 mm; le discontinuità possono contenere, a tratti, riempimenti di materiale alterato con spessore < 1 mm **(2)**;
- **MOLTO ALTERATA** – sono visibili i primi segni di disgregazione della roccia, in particolar modo lungo i piani di scistosità (lamine e piccole scaglie non completamente separate dalla superficie): le discontinuità possono contenere riempimenti di materiale alterato con spessore 1-5 mm; la carota estratta è poco consistente; può presentarsi sgretolata dall'acqua di perforazione (se non è riposta con le dovute cautele nella cassetta catalogatrice si rompe in numerose parti) **(3)**;
- **COMPLETAMENTE ALTERATA** – è possibile riconoscere anche se parzialmente, la tessitura originaria; il materiale estratto, che può presentare l'aspetto di un suolo, è privo di consistenza; il livello di alterazione è evidenziato dal completo cambiamento di colore **(4)**.

Oltre alla registrazione della stratigrafia, il geologo responsabile di cantiere annoterà sinteticamente nella documentazione del lavoro, ogni notizia utile od interessante (velocità di avanzamento: veloce, discontinua, lenta, ecc., perdite di fluido di circolazione, tendenze di rifluimenti in colonna, manovre di campionamento o prove non condotte a termine, presenza di gas, ecc.).

### 3B1.2.7 STANDARD DI VALUTAZIONE DEI RISULTATI

Per questo tipo di indagine, oltre alla consegna del log stratigrafico di cui sopra, deve essere prevista una **relazione generale** comprendente:

- a) obiettivi delle indagini e contesto geologico delle aree investigate desunte dal programma preliminare redatto dalla Regione Toscana e fornito al Committente;
- b) risultati delle indagini ed eventuali osservazioni. Devono essere riportate in particolare:
  - osservazioni varie relative alla “cronaca” del sondaggio, con riferimento alle problematiche occorse nella fase di perforazione, campionamento, perdite di fluido, velocità di avanzamento;
  - note in merito alla modalità di esecuzione della cementazione del foro e alla qualità della stessa;
  - dimensioni del foro;
  - presenza o meno di eventuali occlusioni in fase di perforazione;
  - rispondenza delle caratteristiche tecniche del sondaggio a quelle previste dalle Istruzioni Tecniche e agli obiettivi del programma di indagine;
  - eventuale presenza di acqua.

La relazione generale deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

Inoltre, deve essere prevista una relazione tecnica (anche allegata alla relazione generale) con documentazione, tabelle e grafici da cui risulti per ciascuna prova:

- a) la descrizione delle procedure seguite;
- b) la planimetria su base CTR 1:2000 ingrandita in scala 1:1000 con il diametro e la profondità del foro;
- c) coordinate in Gauss- Boaga in metri del sito ove è ubicato il sondaggio;
- d) le modalità di esecuzione, di rivestimento e di cementazione adottate, ed in particolare le dimensioni geometriche del rivestimento, la composizione della miscela iniettata, la massima pressione di iniezione, la portata e l'attrezzatura utilizzata e soprattutto la quantità di miscela adoperata.

- e) la strumentazione adottata per la perforazione: tipologie di carotieri, sonda, corone, campionatori e fustelle con allegato il materiale fotografico relativo alla strumentazione utilizzata.
- f) Le prove in situ eseguite (prove SPT, prove di permeabilità, misure di falda...) dovranno essere riportate nel log e in tabelle e corredate della necessaria descrizione della strumentazione utilizzata (peso del maglio, tipo di sgancio, altezza di caduta...).

La relazione tecnica deve essere consegnata deve essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

#### Standard di valutazione dei risultati

Sono state predisposti una serie di parametri per la valutazione della qualità dei dati acquisiti durante le fasi di perforazione ai fini di una loro possibile utilizzazione per un'attendibile interpretazione ai fini geologici. La valutazione sarà effettuata dai referenti scientifici della Regione Toscana, i quali a seguito della visione delle cassette catalogatrici, dei campioni prelevati, dai log-stratigrafici e dalle relazioni tecniche illustrative, dovranno fornire una scheda di valutazione sulla base dei parametri illustrati di seguito:

- a) **Valutazione delle operazioni di carotaggio e campionamento eseguite:**  
Verranno valutate in sede di sopralluogo, mediante la visione delle cassette catalogatrici, i seguenti aspetti:
  - 1. *le operazioni di carotaggio* necessarie per ottenere la massima percentuale di recupero valutata per ogni singola battuta e con il minor disturbo del terreno; corretto utilizzo del carotiere in relazione alla tipologia di terreno incontrato;
  - 2. *operazioni di campionamento:* tutti gli aspetti relativi al prelievo dei campioni e il corretto utilizzo del campionatore idoneo in relazione al materiale incontrato.
- 1. Valutazione delle operazioni di perforazioni (carotaggio). A tal fine sono distinte 3 classi di valutazione sulla base delle percentuali di carotaggio rilevato in riferimento alle IT:
  - A) La percentuale di carotaggio è superiore ai limiti delle IT, carote integre e materiale identificabile;

- B) La percentuale di recupero è inferiore ai limiti delle IT solamente per un'una porzione limitata di sondaggio definita in questo modo: per tre manovre consecutive e comunque per meno del 15% dell'intero sondaggio;
- C) La percentuale di recupero è insufficiente per una porzione ampia da non ritenere accettabile (per oltre tre battute consecutive è insufficiente oppure per più del 15% dell'intero sondaggio).

Nel caso di Valutazione di tipo B, alcune delle manovre errate non saranno pagate all'Impresa (anche in relazione alla eterogeneità del materiale incontrato) e il geologo assistente di cantiere subirà una decurtazione del 20% del contributo previsto, nel caso di tipo C non sarà pagato l'intero sondaggio all'Impresa e non sarà assicurato il contributo al geologo assistente di cantiere.

Le suddette valutazioni potranno tenere conto delle eventuali difficoltà incontrate nella fase di carotaggio e di campionamento imputabili alla presenza di materiale particolarmente grossolano e/o sciolto (elevati spessori di materiale di riporto...) oppure situazioni connesse con la presenza di materiale particolarmente fratturato e/o alterato (brecce di faglia e coperture di frana).

2. Valutazione delle operazioni di campionamento. A tal fine sono distinte 3 classi di valutazione sulla base delle caratteristiche del tubo campionatore (fustella) e del campione al momento dell'arrivo in laboratorio:
  - A) Tubo campionatore in buone condizioni e rispondenti ai requisiti delle IT;
  - B) Tubo campionatore non rispondente ai requisiti delle IT. I campioni sono comunque giudicati nella classe adeguata;
  - C) Tubo campionatore in cattive condizioni (ovalizzazioni, ruggine, danneggiamenti durante il trasporto, etc.) inidonei alla garanzia di un campione di buona qualità.

Nel caso di Valutazione di tipo B, i campioni non saranno pagati all'Impresa, nel caso di tipo C non sarà pagato tutto il tratto del sondaggio dove è presente la tipologia di terreno da campionare.

- b) **Valutazione della ricostruzione del profilo stratigrafico desunto dalle carote e relativa interpretazione geologica:** Verranno valutate in sede di sopralluogo, attraverso la visione delle cassette catalogatrici e nel log-stratigrafico fornito dal Geologo Assistente di Cantiere, tutti i terreni campionati e le attribuzioni formazionali fornite. A tal fine sono distinte 3 classi di valutazione:
  - A) La descrizione stratigrafica e la relativa interpretazione formazionale è corretta;

- B) La descrizione stratigrafica e la relativa interpretazione formazionale è incompleta, sono state rilevate alcune mancanze e sarà richiesto di implementare le parti incomplete o mancanti;
- C) La descrizione stratigrafica e la relativa interpretazione formazionale è inadeguata.

Nel caso di Valutazione di tipo B verranno richieste necessarie integrazioni al geologo assistente di cantiere, mentre nel caso di tipo C non sarà pagato l'intero contributo al geologo assistente di cantiere.

c) **Valutazione della relazione tecnica per la descrizione e l'utilizzo della strumentazione di perforazione (sonda, carotieri, campionatori, corone, rivestimenti).** Tali informazioni devono essere riportate nella relazione tecnica a cura dell'Impresa geologo assistente di cantiere. La strumentazione in relazione alla tipologia dei terreni deve essere coerente con quella indicata nelle Istruzioni Tecniche regionali. A tal fine sono distinte 3 classi di valutazione:

- A) La descrizione è conforme a quanto previsto nelle istruzioni tecniche;
- B) La descrizione è incompleta, sono richieste integrazioni;
- C) L'attrezzatura descritta non è conforme a quanto previsto dalle istruzioni Tecniche.

Nel caso di Valutazione di **tipo B** verranno richieste necessarie integrazioni all'Impresa geologo assistente di cantiere, mentre nel caso di **tipo C** non sarà pagato l'intero sondaggio all'Impresa contributo allo stesso.

d) **Valutazione della relazione tecnica finale** con particolare riferimento alla compilazione del log stratigrafico, all'adeguatezza delle misurazioni effettuate sulle carote (Pocket, Vane...) e in corso di perforazione (rilievo della falda...), esecuzione prove SPT, materiale fotografico presentato, descrizione della strumentazione tecnica. Tale valutazione sarà effettuata anche sulla base di sopralluoghi, attraverso la visione delle cassette catalogatrici. A tal fine sono distinte 3 classi di valutazione:

- A) La relazione tecnica è da ritenersi completa, in quanto comprende tutte le informazioni rilevabili come indicati dalle Istruzioni Tecniche Regionali;
- B) La relazione tecnica non contiene tutte le informazioni rilevabili, prima di autorizzare il pagamento sarà richiesto di implementare le parti incomplete o mancanti;

C) La relazione è carente nel complesso delle informazioni rilevate o non congruente a quanto realmente rilevato dal sondaggio.

Nel caso di Valutazione di **tipo B** verranno richieste necessarie integrazioni al geologo assistente di cantiere, mentre nel caso di **tipo C** non sarà pagato l'intero contributo allo stesso.

**e) Valutazione del raggiungimento degli obiettivi dell'indagine.** In riferimento al programma di indagine redatto, la Commissione di Collaudo dovrà valutare il raggiungimento degli obiettivi del sondaggio geotecnico tenendo conto dei seguenti aspetti:

- Raggiungimento del bedrock sismico definito sulla base delle indagini geofisiche;
- Esecuzione delle prove SPT, campionamento del terreno tramite il prelievo dei campioni;
- Ricostruzione stratigrafica del sondaggio stesso;
- Consentire la corretta esecuzione della prova down-hole.

A Tal fine saranno distinte due classi di valutazione:

**Tipo A** - L'indagine è rispondente agli obiettivi previsti nel programma di indagine;

**Tipo B** - L'indagine non è rispondente agli obiettivi previsti nel programma di indagine.

Nel caso di Valutazione di tipo B non sarà pagato l'intero sondaggio all'Impresa contributo al geologo assistente di cantiere.

Per la descrizione dettagliata di tutti i parametri oggetto del collaudo, si rimanda a quanto ampiamente descritto nel par. 3B2.1.

Nella relazione tecnica finale redatta dalla Commissione di Collaudo devono essere riportate tutte le considerazioni possibili relative ai parametri di cui sopra.

### **(3B2.2) POZZETTI E TRINCEE ESPLORATIVE (□)**

Pozzetti esplorativi superficiali e trincee d'ispezione costituiscono uno strumento integrativo di indagini particolarmente utile per accertare l'esatta consistenza e la profondità del piano di posa di fondazioni superficiali di edifici esistenti.

Questo tipo di indagine si limita ovviamente agli strati più superficiali.

Gli scavi andranno sostenuti mediante opere di sostegno provvisoria. Occorre inoltre verificare la stabilità del fondo scavo.

La loro esecuzione dovrà essere effettuata con l'obbligo di armare le pareti durante l'avanzamento dello scavo, onde garantire la sicurezza degli operai ed un sicuro accesso ai tecnici.

Per scavi da eseguirsi in aderenza a strutture murarie preesistenti e delle quali si vuole conoscere il piano di contatto delle fondazioni con il piano di sedime, si dovrà spingere la profondità sino a 1,00 m al di sotto del piano di appoggio delle fondazioni. Le trincee dovranno avere larghezza minima di 2,00 m, lunghezza variabile e profondità prestabilita.

Si dovrà operare in modo da garantire la buona stabilità delle pareti della trincea mediante idonee puntellature e qualora lo scavo sia stato effettuato con mezzi meccanici, l'armatura dovrà essere posizionata nello scavo prima dell'intervento di operai all'interno di questo.

### **3B2.3) MISURE INCLINOMETRICHE (□)**

I tubi inclinometrici sono strumenti utili per la misurazione dei movimenti del terreno in un determinato intervallo di tempo scelto.

La strumentazione è costituita da tubi a sezione circolare con diametro esterno che non supera i 92mm, con n.4 scanalature ortogonali che servono come guida alla sonda inclinometrica, essa viene alloggiata in fori di diametro 101mm opportunamente rivestito.

#### 3B2.3.1 MODALITÀ DI INSTALLAZIONE

La colonna inclinometrica viene installata in un foro di sondaggio. Una volta completato e pulito il foro, che dovrà essere rivestito opportunamente a seconda delle finalità, si procede all'installazione della colonna inclinometrica



formata da spezzoni di tubo in alluminio collegati da manicotti. Il primo spezzone dovrà essere chiuso al fondo da un tappo semplice o dalla valvola di fondo, a seconda delle modalità di riempimento dell'intercapedine. Particolare attenzione va posta nell'assemblaggio della colonna e soprattutto nel collegamento tra i singoli spezzoni e i manicotti di giunzione, in modo da evitare piegamenti e/o torsioni dei tubi. Va inoltre evitato l'utilizzo di rivetti.

Il riempimento dell'intercapedine tra il tubo inclinometrico e la parete del foro si otterrà con le modalità già discusse nel Paragrafo 3B2.1.5.

L'installazione andrà ultimata posizionando in superficie un pozzetto di protezione provvisto di idonea chiusura (Figura 3B.14).

### 3B2.3.2 STRUMENTAZIONE DA UTILIZZARE

La sonda utilizzata deve essere di tipo biassiale a servoinclinometri con fondo scala almeno di 14.5 gradi sessagesimali. Il passo sonda, cioè la distanza fra le ruote del carrello superiore e quelle del carrello inferiore, deve essere di 50 cm così come lo step delle letture.

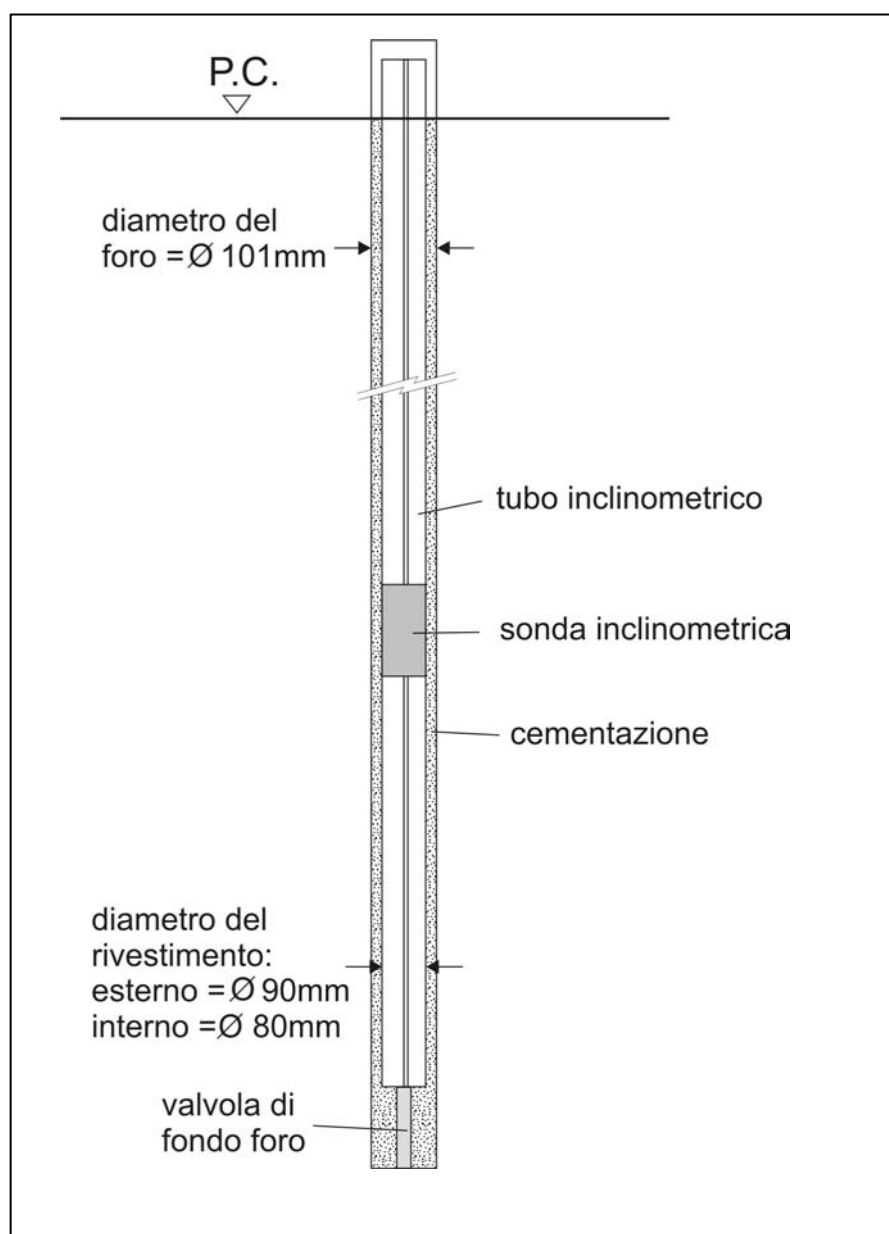
La sensibilità dell'asse trasverso non deve superare lo 0.015% del fondo scala, per grado sessagesimale. La variazione in temperatura della sensibilità deve essere minore o uguale allo 0.015 % della lettura, per grado centigrado.

La sensibilità nominale per passo metrico di lettura dovrà essere pari a 25000  $\text{sen}\alpha$  (angolo di inclinazione rispetto alla verticale). Il cavo di controllo, cioè il cavo con i conduttori elettrici ed il cavetto di rinforzo al quale è assicurata la sonda, deve riportare tacche di misura ogni 50 cm e garantire, data la presenza del rinforzo, la costanza nel tempo della distanza fra le tacche di misura. L'unità di lettura deve essere di tipo automatico con acquisizione dei dati.

### 3B2.3.3 MODALITÀ DI PROVA

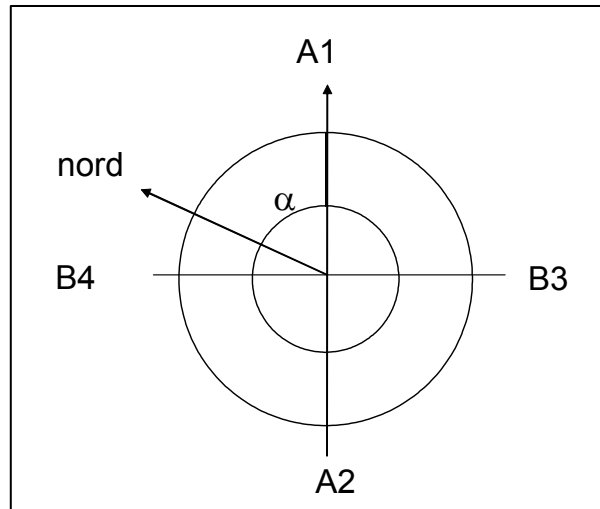
Si individua sul tubo inclinometrico, fra le quattro, la guida che più si approssima alla direzione di un probabile movimento (guida verso valle); si faccia riferimento alla Figura 3B15 in cui è schematizzata una sezione rappresentativa del tubo inclinometrico: le rette congiungenti le guide A1-A2 (componente X), e le guide B3-B4 (componente Y), formano un sistema di assi cartesiani. In base al programma di elaborazione dati che si utilizzerà, va certificata la correzione azimutale ( $\alpha$ ) da inserire con il segno positivo o negativo (l'angolo è positivo se si legge in senso antiorario dalla guida A1 al NORD).

Si porta la sonda inclinometrica fino al fondo del tubo, nella guida A1, a step di 50 cm acquisendo opportunamente i dati registrati dallo strumento. Recuperata la sonda inclinometrica, questa viene inserita nella guida A2, (guida diametralmente opposta alla A1) e si prosegue come per il punto precedente. Eseguite le misure sulla guida A2 si passa alla guida B3, ossia la guida posta a 90 gradi in senso orario rispetto alla A1 e successivamente alla guida A4 (guida diametralmente opposta alla A3). Alla fine della misure si sono ottenuti 4 valori di inclinazione sull'asse delle guide A1-A2 (X) e quattro valori di inclinazione sull'asse B1-B2 (Y) per ogni passo sonda, essendo così eseguita una misura di precisione a 4 guide. Dai valori mediati di inclinazione e con semplici formule trigonometriche possono essere ricavati i diagrammi riassuntivi.



**Figura 3B14 – Schema di un tubo inclinometrico**

Le letture della prima serie (detta lettura di zero) risultano fondamentali perché sulla loro elaborazione vengono tarate le successive letture. Uno dei diagrammi da controllare è quello della “verticalità” del foro che rappresenta la deviazione rispetto alla verticale. Occorre specificare il tipo di correzione dei dati elaborati, se effettuata.



**Figura 3B15**

Per quanto riguarda le letture successive a quella di zero i diagrammi da rappresentare sono:

**Componente A:** diagramma che rappresenta il movimento per sommatoria rispetto all'origine in mm lungo l'asse A1-A2;

diagramma che rappresenta il movimento per punti rispetto all'origine in mm lungo l'asse A1-A2.

**Componente B:** diagramma che rappresenta il movimento per sommatoria rispetto all'origine in mm lungo l'asse B1-B2;

diagramma che rappresenta il movimento per punti rispetto all'origine in mm lungo l'asse B1-B2.

**Risultante per punti:** diagramma che rappresenta la variazione di inclinazione locale alle varie profondità (facoltativo).

**Risultante per sommatoria:** diagramma che rappresenta il movimento per sommatoria dal basso (somma vettoriale) - profondità, con punto di zero al piede del tubo inclinometrico (massima profondità di lettura) e punti calcolati per ogni passo sonda (facoltativo).

**Azimut della verticalità:** diagramma che rappresenta la direzione della deviazione rispetto alla verticale in gradi sessagesimali.

### **3B2.4) PROVE DI PERMEABILITA' (□)**

Le prove di permeabilità hanno lo scopo di determinare sperimentalmente in sito il coefficiente di permeabilità  $K$  dei terreni.

Le prove comunemente utilizzate sono:

- prove di pompaggio (terreni a grana grossa);
- prove in foro di sondaggio;
  1. Lefranc (terreni a grana grossa);
  2. Lugeon (roccia);
- prove con piezometri (terreni a grana fine);
  3. piezometri in foro;
  4. piezometri infissi;
- prove con permeametri autopercoranti (terreni a grana fine);
- prove di dissipazione con piezocono (terreni a grana fine).

Nel caso dei terreni a grana fine il coefficiente di permeabilità può anche essere ricavato in laboratorio da prove di permeabilità oppure, indirettamente, dalle prove edometriche.

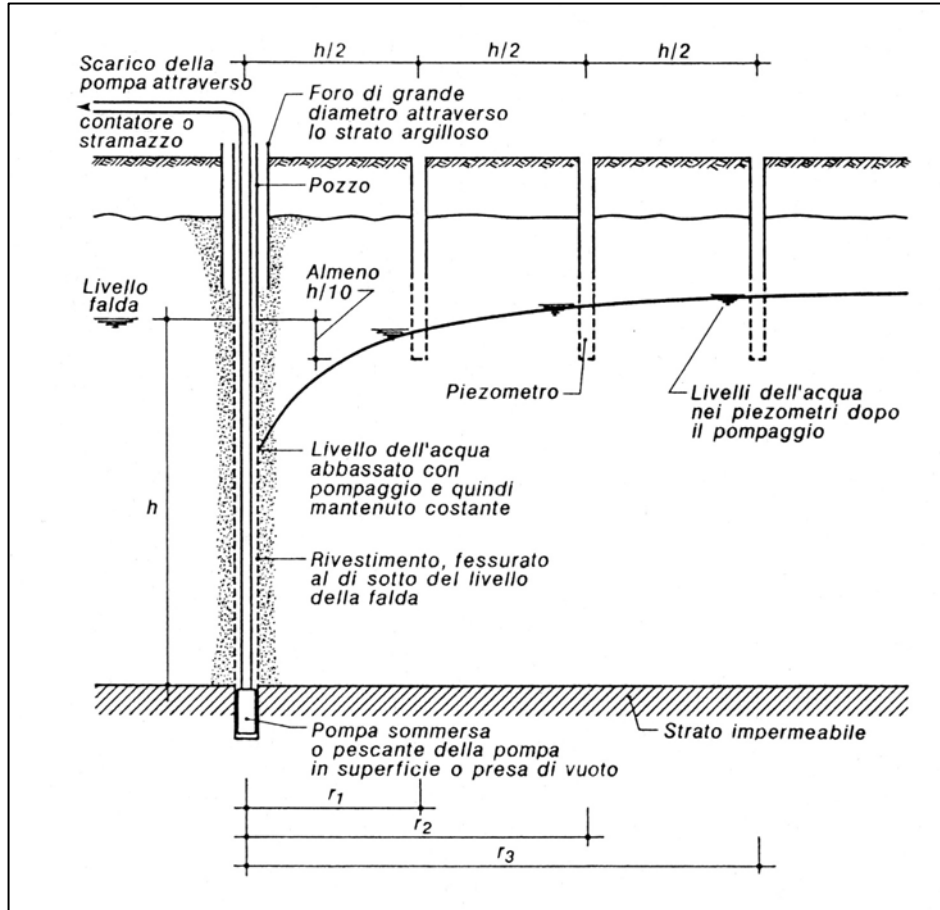
#### 3B2.4.1 PROVE DI POMPAGGIO

Si tratta di prove complesse e lunghe da effettuarsi unicamente in casi in cui la determinazione del parametro  $K$  risulti critica per il problema in esame.

La prova viene eseguita emungendo una portata d'acqua costante da un pozzo (diametro 500 1000 mm) e misurando gli abbassamenti della falda nel pozzo e in un allineamento di piezometri disposti lungo una direttrice radiale. La prova fornisce quindi la risposta dell'intero acquifero investigando un'ampia porzione di suolo. Si preferisce interpretare la prova in condizioni stazionarie, il che comporta tempi di emungimento lunghi da 24 a 72 ore o anche più.

La Figura 3B16 adattata da Cestari (1990) illustra uno schema semplificato dell'impianto e delle misure. La prova è fortemente influenzata dalla geometria

del suolo e dalle condizioni al contorno. Ciò comporta che la prova debba essere opportunamente pianificata e progettata caso per caso.



**Figura 3B16** – Schema ideale di pozzo per prove di pompaggio; acquifero orizzontale, indefinito orizzontalmente, confinato verticalmente. Pozzo che attraversa tutto l'acquifero (CIRIA, Rep. N 113, 1986 mod. da Cestari 1990)

### 3B2.4.2 PROVE IN FORO (LEFRANC)

Si tratta di una prova di tipo puntuale che riguarda uno strato di terreno (sezione filtrante) dallo spessore di alcuni centimetri sino a 2 metri purché collocati al di sotto del livello della falda. Misure di permeabilità al di sopra del livello della falda sono teoricamente possibili, ma l'interpretazione oltre che difficoltosa risulta affetta da maggiori incertezze. Le prove sono pertanto eseguite a fondo del foro di sondaggio. Nel caso in cui si vogliano eseguire misure a diverse profondità occorre interrompere, ogni volta il sondaggio.

La prova viene eseguita instaurando un dislivello piezometrico tra l'interno del foro, dove è stata realizzata la sezione filtrante, e l'esterno. Il moto di filtrazione che ne segue è diretto dal foro verso l'esterno (prove di immissione) o dall'esterno verso il foro (prove di ritorno). Ovviamente, le prove di ritorno possono essere eseguite solo sotto falda.

Le prove possono essere eseguite:

- a carico costante (mantenendo costante il dislivello piezometrico e misurando la portata);
- a carico variabile (instaurando un dislivello iniziale e registrando nel tempo le variazioni di altezza).

A seconda della geometria della sezione filtrante è possibile misurare il coefficiente di permeabilità in direzione verticale, orizzontale o un valore medio.

#### MISURA D ( $K_V$ )

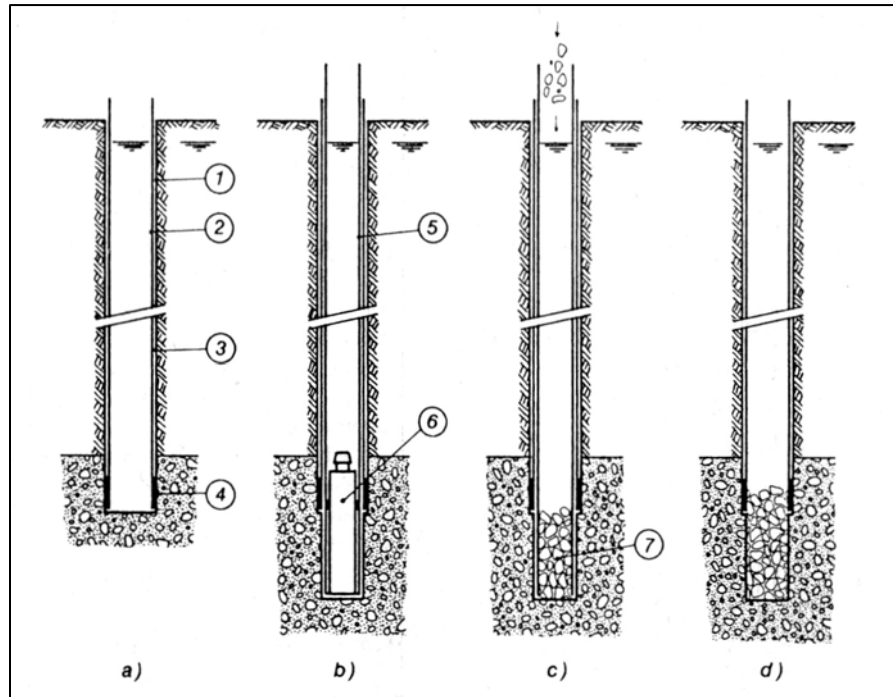
In un foro di sondaggio standard (101 mm) con rivestimento da 127 mm, viene calata una batteria di tubi da rivestimento (98/89 oppure 113/104 mm) recante, all'estremità inferiore un tubo (non finestrato) con tagliente lungo almeno 500 mm che sarà infisso a pressione nel terreno per almeno 400 mm. Si lava accuratamente la parte alta del terreno lasciando all'interno del tubo solamente 250-300 mm di terreno naturale. Il lavaggio va eseguito a bassa pressione e con utensili dotati esclusivamente di fori radiali. Vanno eseguiti opportuni controlli per verificare la correttezza delle operazioni di pulizia (quantità di detriti e di fini presenti nel fluido di ritorno, uso dello scandaglio per il controllo delle quote).

Al termine della prova di permeabilità il tubo viene estratto, il campione al suo interno viene recuperato ed analizzato.

Nel caso in cui siano presenti ghiaie, il foro rivestito deve avere diametro compreso tra 600 e 1200 mm. Il tubo per la creazione della sezione filtrante deve essere infisso per almeno un diametro, meglio due.

## MISURA DI ( $K_H$ )

Occorre realizzare una sezione filtrante cilindrica con rapporto L/D maggiore di 1.2. Il rivestimento del foro di sondaggio va infisso a secco nel tratto finale sino a raggiungere il tetto dello strato di misura. La Figura 3B17 (Cestari, 1990) illustra la metodologia consigliata per la predisposizione del foro.



**Figura 3B17** – Misure dei coefficienti di permeabilità orizzontale ( $K_H$ ) e medio ( $K_{av}$ ) in foro di sondaggio (prova tipo Lefranc). Sequenza schematica della preparazione del foro: a) si forza il rivestimento “a secco” (2) fino al tetto del tratto da provare, tappando (4) in tal modo l’intercapedine (3) fra rivestimento e parete del foro (1); b) si perfora la “tasca” di prova con attrezzo (6) e batterie “wireline” (5) telescopica al rivestimento (2); c) si estrae l’attrezzo di perforazione (6) con la fune, lasciando in posto la batteria “wireline” (5) a sostegno delle pareti della tasca, successivamente si riempie la tasca con il dreno (7); d) si estrae con cautela la batteria “wireline” (5). Da Cestari, 1990

Le prove a carico costante possono essere realizzate secondo lo schema di Figura 3B18 (Cestari, 1990). In assenza di scarico di troppo pieno, la costanza del livello deve essere controllata con una sonda galvanometrica oppure mediante asta graduata.

La portata va misurata con un contatore di precisione inserito nella mandata della pompa oppure misurando la variazione del livello dell’acqua nel vascone.

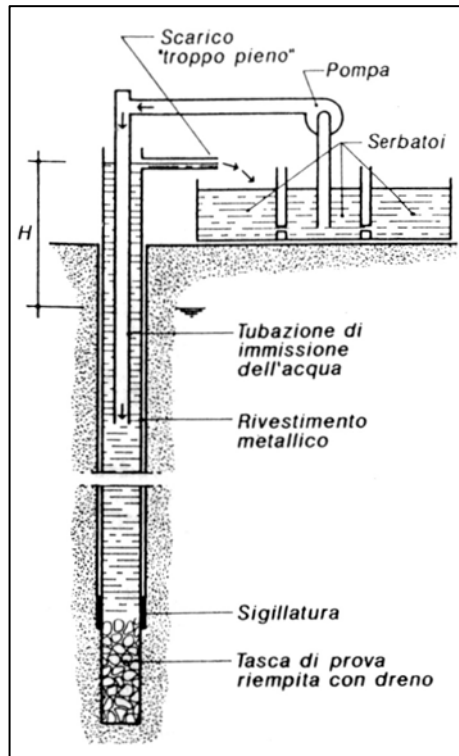


L'altezza e la portata vanno controllati e misurati ogni 2 o 5 minuti con durata complessiva pari rispettivamente a 10 o 30 minuti. Le prove a carico variabile (prove di immissione) prevedono la misura del livello statico iniziale e la successiva immissione di acqua in foro.

Si annota l'altezza iniziale  $h_0$  e quindi si misura l'altezza  $h$  ad istanti successivi dall'inizio prova ( $t_0$ ). Con  $h_0$  uguale o superiore a due metri le misure si effettueranno per riduzioni dell'altezza di 100 mm circa finché i decrementi non risultano inferiori o uguali a  $h_0/5$ .

Devono essere riportate tutte le informazioni necessarie a definire la geometria della sezione filtrante, la temperatura dell'acqua in foro e di quella immessa ed il livello statico della falda.

L'interpretazione delle misure andrà effettuata con i metodi usuali (Lancellotta, 1990).



**Figura 3B18** – Schema di prova per misure di permeabilità tipo Lefranc a carico costante, con immissione d'acqua. Da Cestari, 1990

### 3B2.4.3 PROVE IN FORO (LUGEON)

La prova valuta l'attitudine dell'ammasso roccioso a lasciar circolare acqua al suo interno. Si effettua immettendo acqua in pressione in un tratto di foro isolato. Poiché l'acqua in roccia circola attraverso le discontinuità, la misura è

un indice indiretto del grado di fratturazione della roccia.

Il parametro di assorbimento che si ricava dalla prova è espresso in Unità Lugeon.

**1 UL** = portata di un litro al minuto iniettata alla pressione di 1 MPa per 10 minuti in un tratto di foro della lunghezza di un metro.

Il tratto di foro da isolare per la prova può essere realizzato in avanzamento, ovvero sia col procedere della perforazione oppure in risalita, cioè a foro ultimato. Nel primo caso è sufficiente inserire un pistoncino (packer) espandibile immediatamente sopra il fondo del foro. Nel secondo caso, si può selezionare il tratto di foro da sottoporre a prova e isolarlo con due pistoncini alle estremità.

Il metodo in avanzamento garantisce un miglior controllo della tenuta dei packers. Il metodo in risalita è più economico e consente di scegliere il tratto da sottoporre a prova.

Il tratto di prova deve avere lunghezza da 1 a 5 m. E' anche possibile superare i limiti in ragione del grado di fratturazione dell'ammasso roccioso.

In ogni caso occorre che sia  $L > 5D$ .

Per garantire la buona tenuta dei packers è necessario che il foro non presenti irregolarità. Pertanto il foro andrà eseguito con corone diamantate e usando opportuni alesatori. Di norma si utilizzeranno packers di tipo pneumatico assicurandosi che la pressione di gonfiaggio sia almeno 0.2-0.3 MPa superiore a quella di iniezione dell'acqua.

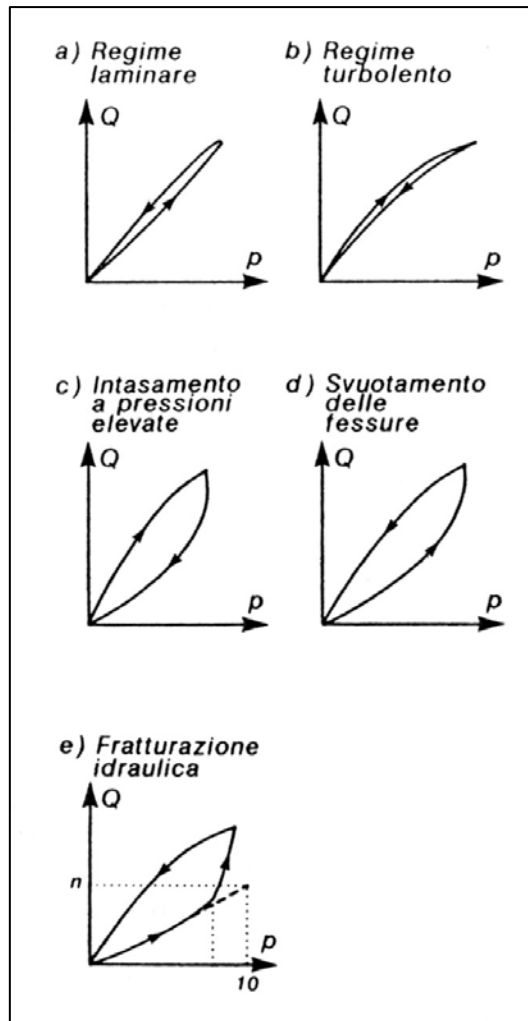
La membrana di tenuta dei packers deve avere sufficiente lunghezza. La pompa deve essere in grado di applicare pressioni superiori a 1 MPa e portate elevate. In genere una pompa che eroghi sino a 25 l/s per pressioni di 0.4 MPa è da considerarsi adeguata. Sono da preferirsi pompe a centrifuga rispetto a quelle a pistone per garantire una pressione costante.

La portata va misurata come per le prove Lefranc. Le pressioni di iniezione sono misurate con manometro posto sulla verticale del foro. Le perdite di carico (per correggere le misure del manometro) possono essere stimate da opportuni abachi o misurate direttamente in cantiere. L'impiego di trasduttori di pressione inseriti nella camera di iniezione, rendono superflua la stima delle perdite di carico e offrono la possibilità di registrare i dati in automatico.

E' importante definire il livello della falda statica e accertarsi che la pompa non aspiri aria. La prova consiste nel misurare la portata iniettata a pressione costante di 1 MPa per 10 minuti in un tratto di geometria nota.

La fase di misura sopra descritta è preceduta da iniezioni per 10 minuti a pressioni inferiori. Si realizzano gradini di pressione regolare (4 o 5) con incrementi di 0.2-0.25 MPa.

La portata viene misurata ogni 2 minuti verificando che non vari di oltre 0.1 l/s. Aumenti bruschi della portata segnalano l'insorgere di fenomeni di fratturazione idraulica. In questo caso la prova può essere sospesa. In assenza di fratturazione idraulica la prova può essere spinta sino a pressioni di 1.25 MPa.



**Figura 3B19** – Grafici tipici di prove Lugeon che evidenziano l'influenza sui risultati delle principali anomalie esecutive. Da Cestari, 1990

Le misure vengono eseguite in salita e in diminuzione della pressione. In ritorno la durata del singolo gradino di pressione è di 5 minuti.

Le portate misurate vengono diagrammate in funzione delle pressioni corrette. Il valore della portata per unità di lunghezza del tratto di misura

(litri/minuto/metro), corrispondente a 1MPa, rappresenta il parametro di interesse espresso in UL. Se invece le curve portate-pressioni corrette indicano la presenza di fenomeni come turbolenza, intasamento, svuotamento o fratturazione idraulica (Figura 3B19) la prova va interpretata secondo i seguenti criteri:

- turbolenza o intasamento (si prolunga la retta tangente al tratto iniziale e si determina il valore cercato su tale retta in corrispondenza della pressione di 1MPa);
- svuotamento (si misura direttamente sulla curva);
- fratturazione (si estrapola la curva prima dell'inizio della fratturazione).

#### 3B2.4.4 MISURE IN TERRENI A GRANA FINE

In questo caso le misure vengono effettuate di norma a carico variabile utilizzando piezometri infissi o messi in opera all'interno di fori di sondaggi (piezometri tipo Casagrande).

Il principale inconveniente nell'uso di piezometri tipo Casagrande deriva dalle incertezze riguardanti la geometria della cavità.

L'uso dei piezometri infissi (tipo Geonor, tipo Wilkes-Parry, tipo WMS) comporta invece due inconvenienti:

- il materiale attorno al piezometro risulta rimaneggiato in seguito al processo di infissione;
- il filtro del piezometro può essere intasato dalle particelle fini durante la penetrazione.

Il primo inconveniente viene rimosso mettendo in opera filtri porosi (permeometri) autop perforanti. In questo caso la tecnica dell'autoperforazione consente di mettere in opera il permeometro con un minimo disturbo.

Il secondo inconveniente, che riguarda anche i permeometri, è rimosso unicamente con l'uso di filtri protetti (piezometro Wilkes-Parry, permeometro autop perforante PERMAC).

Nel caso di piezometri infissi occorre attendere la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali indotte durante l'infissione. Il tempo di attesa è di 20-30 giorni per i piezometri di piccole dimensioni.

Nel caso di terreni a grana fine, escludendo le prove a carico costante, quelle a carico variabile comportano il contemporaneo instaurarsi di fenomeni di

filtrazione e consolidazione.

Nel caso in cui venga aumentata la pressione dell'acqua all'interno del filtro (flusso verso l'esterno) si ha una riduzione delle tensioni efficaci. Nel caso opposto si ha invece un aumento delle pressioni efficaci. Le caratteristiche di permeabilità sono dipendenti dal livello delle tensioni efficaci, ne consegue che le misure vanno pianificate e progettate caso per caso in ragione del problema da affrontare.

Analoghe considerazioni si applicano alle prove di dissipazione mediante piezocono.

### (3B2.5) PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE SPT (■)

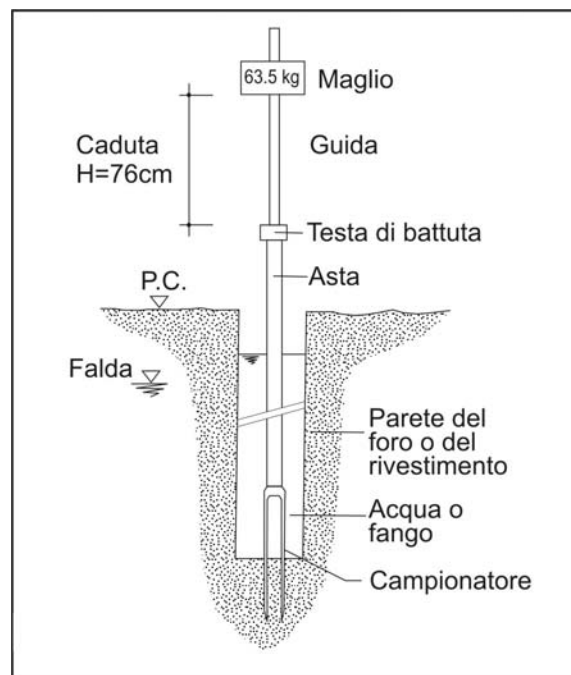
Scopo della prova è quello di determinare il numero di colpi ( $N_{SPT}$ ) necessari ad infiggere, per una profondità di 300 mm, un campionatore di dimensioni standard mediante battitura. I valori ottenuti consentono una stima qualitativa della consistenza del terreno. Inoltre è possibile stimare mediante correlazioni empiriche i seguenti parametri:

- la densità relativa, l'angolo di resistenza al taglio e la resistenza alla liquefazione dei terreni granulari;
- il modulo di taglio a piccole deformazioni sia nel caso di terreni a grana grossa che in quelli a grana fine.

La prova va preferibilmente realizzata in terreni granulari (sabbie e ghiaie fini). Tuttavia può essere eseguita in qualsiasi terreno sciolto ed anche nel caso di alcune rocce tenere. Unicamente in presenza di grossi elementi lapidei, la prova perde di significato.

#### 3B2.5.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova può essere effettuata in fori di sondaggio, oppure in fori appositamente eseguiti (Figura 3B20).



**Figura 3B20** – Schema di principio di una prova SPT (non in scala). Da Cestari, 1990

Sul fondo foro, opportunamente pulito, dovrà essere infisso a percussione un campionatore di forma e dimensioni standard. Viene determinato il numero di colpi necessari alla penetrazione di 45 cm, misurati separatamente in tre tratti di 15 cm ciascuno. Il materiale portato in superficie (Figura 3B21) viene identificato e può essere successivamente classificato in laboratorio.



**Figura 3B21** – Prova LPT, esempio di campione estratto (Rodio, Stretto di Messina, 1988). Da Cestari, 1990

L'attrezzatura e la modalità di prova sono quelle indicate dalla norma ASTM D 1586-84.

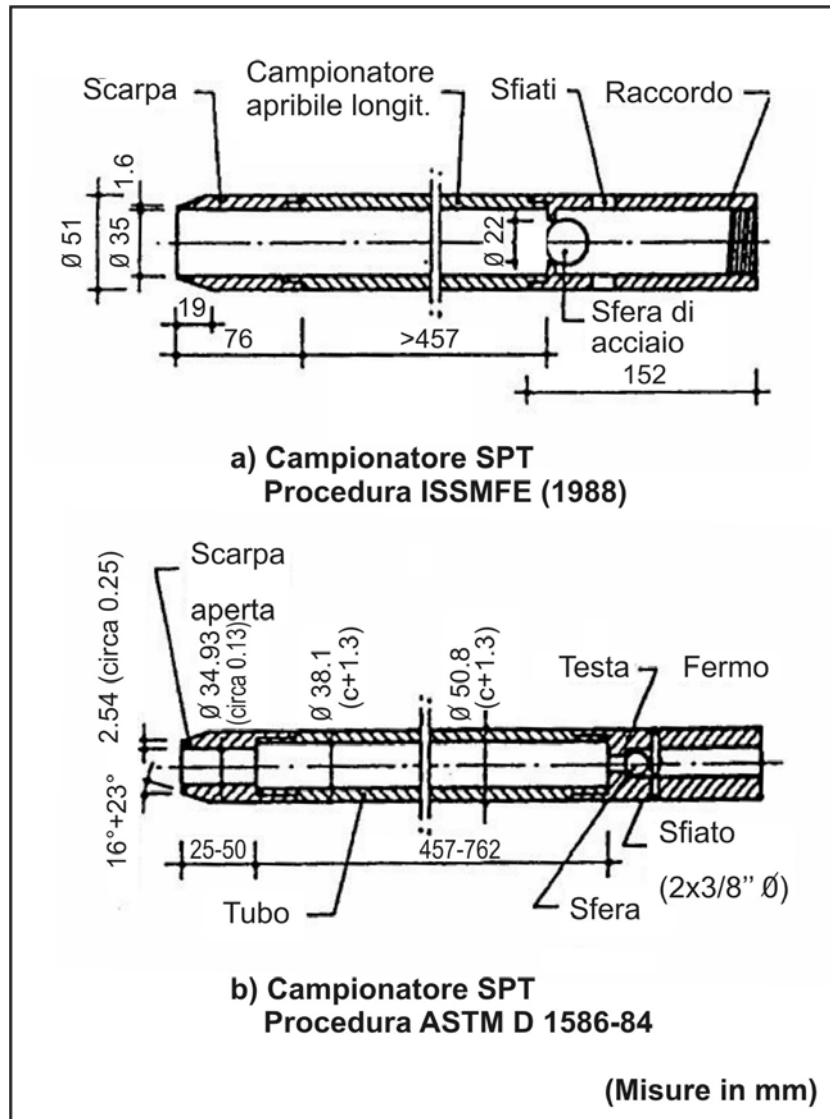
Le raccomandazioni AGI e a quelle dell'ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering) forniscono indicazioni a volte differenti e a volte in contrasto con quelle previste dalla citata norma ASTM. E' possibile fare riferimento alle raccomandazioni AGI o a quelle dell'ISSMGE unicamente per quanto di seguito specificato. Eventuali deroghe alla norma prescritta andranno concordate con la Direzione Lavori.

Il tubo campionatore (Figura 3B22) è di acciaio indurito con superfici esterne ed interne lisce. La norma ASTM prevede l'impiego del tubo campionatore standard tipo Raymond. Questo tubo, oltre la quota della scarpa, presenta un allargamento del diametro interno da 35 a 38.1 mm. Ciò è previsto per l'alloggiamento di un cilindro portacampione generalmente di plastica. La norma ASTM tuttavia non impone l'obbligo di utilizzare tale cilindro.

E' possibile utilizzare il tubo campionatore delle raccomandazioni ISSMGE che

non prevede il suddetto allargamento. Inoltre, il tubo campionatore può essere apribile longitudinalmente in due metà.

L'impiego di una punta conica di acciaio del diametro di 51 mm e angolo alla punta di 60° nei terreni ghiaiosi non è consentita né dalla norma ASTM né dalle raccomandazioni ISSMGE. La sostituzione del tubo campionatore standard con altro più idoneo ad attraversare ed eventualmente campionare i terreni a grana grossa deve essere preventivamente concordato con la DL.



**Figura 3B22** – Campionatori della prova SPT: i) il tubo apribile da 38.8 mm di diametro interno può essere munito di un porta-campione di spessore di 0.16mm; ii) può essere inserito un cestello di ritenuta metallico o in plastica; iii) l'estremità della scarpa può essere leggermente arrotondata. Da Cestari, 1990



L'impiego di tubi campionatori di dimensioni non standard come quelli utilizzati nella cosiddetta prova LPT (Large Penetration Test) va concordato con la DL.

La norma ASTM prescrive l'impiego di aste di acciaio che collegano la testa di battuta del maglio con il campionatore aventi rigidità non inferiore a quella delle aste di perforazione di tipo "A" (diametri 41.2/28.5 mm, modulo di resistenza  $w = 5.29 * 10^{-6} \text{ m}^3$ ).

E' consentito l'impiego delle aste di perforazione di tipo "N" (ad es. diametro 67 mm, spessore 8 mm  $w = 19.4 * 10^{-6} \text{ m}^3$ , peso 12.7 kg/m).

Le aste devono essere diritte presentando un'inflexione inferiore all'1%. Si raccomanda di avvitarle strettamente in corrispondenza dei giunti.

Il dispositivo di battuta consiste di:

- testa di battuta in acciaio strettamente avvitata all'estremità della batteria di aste;
- maglio  $63.5 \pm 0.5 \text{ kg}$ ;
- dispositivo di rilascio per una caduta libera del maglio di 760 mm.

Il dispositivo non deve superare il peso di 115 kg.

Occorre specificare il dispositivo di rilascio (Fune Manila da 25 mm e cabestano, Trip Monkey, Tombi o Tipo Giappone, Pilcon). Nel caso di dispositivo a fune e cabestano occorre specificare il numero di giri di fune (uno o due) e il diametro del cabestano (piccolo o grande).

Occorre inoltre specificare il tipo di maglio (Vicksburg, Donut, Safety, Old standard, Pilcon, Nenzi, Pinweight).

Le specifiche soprarrichieste sono superflue nel caso in cui venga fornita una taratura del sistema con l'indicazione del suo rendimento (ER %).

#### ESECUZIONE DEL FORO:

1. nella perforazione a distruzione con circolazione diretta (wash boring) l'utensile deve avere lo scarico del fluido laterale anziché verso il basso;
2. gli utensili di perforazione accettabili sono elencati nella citata norma ASTM. E' inaccettabile l'uso dell'elica cava nei terreni sotto falda ed è altresì inaccettabile l'impiego del campionatore tipo Raymond per l'esecuzione del foro in ogni caso;

3. il foro deve avere diametro compreso tra 63.5 e 150 mm. Il diametro interno del rivestimento, quando richiesto, deve essere compreso tra 56 e 162 mm;
4. in presenza di un rivestimento provvisorio il diametro del foro non deve essere superiore al 90% del diametro interno di tale rivestimento.

Alcune raccomandazioni utili secondo l'ISSMGE:

- il carico idrostatico nel foro non deve essere minore di quello esterno;
- la perforazione non va spinta oltre la quota prevista per la misura;
- il rivestimento non va infisso a profondità superiori a quelle previste per la misura;
- occorre evitare manovre che provochino l'estrazione del rivestimento.

#### ESECUZIONE DELLA PROVA

Il campionatore viene posizionato a fondo foro mediante la batteria di aste, dopodichè viene posizionato il dispositivo di battuta.

La penetrazione iniziale causata dal peso della strumentazione va annotata.

Si procede quindi all'infissione preliminare pari a 150 mm che viene interrotta al raggiungimento di 50 colpi annotando la penetrazione corrispondente (es: 50x11 = 50 colpi con 110 mm di penetrazione). Si passa quindi alla successiva infissione di 300 mm effettuata separatamente in due tratti di 150 mm ciascuno. Questa seconda fase di infissione viene interrotta al raggiungimento di 100 colpi annotando la penetrazione corrispondente (es. 30 + 70x13=30 colpi per i primi 150 mm e 70 colpi con una penetrazione di 130 mm). Il numero di colpi necessari ad infiggere il campionatore di 300 mm è indicato come resistenza alla penetrazione. La procedura sopra descritta è quella suggerita dall'ISSMGE e si discosta da quanto indicato nella norma ASTM. La procedura di prova dell'ISSMGE è quella che di regola andrà applicata in quanto fornisce un'informazione più completa salvo diverso accordo con la DL.

La frequenza di battitura non deve essere superiore a 30 colpi al minuto.

Il campione estratto dal campionatore dovrà essere conservato, trasferendolo dal tubo campionatore in contenitori di plastica a tenuta d'aria, contrassegnati con etichetta recante le seguenti informazioni: Cantiere, Numero di Sondaggio, Numero del Campione, Profondità di penetrazione, Lunghezza del campione, Data di prelievo, Valori N1, N2, N3 con le eventuali penetrazioni come specificato precedentemente.

### 3B2.5.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Si riassumono di seguito le informazioni e la documentazione che deve accompagnare ciascuna prova:

- Cantiere;
- Data di perforazione alla profondità di prova;
- Data e ora di inizio e fine prova;
- Numero del sondaggio;
- Metodo di perforazione e dimensioni del rivestimento provvisorio se impiegato;
- Dimensioni e peso delle aste impiegate per la prova;
- Tipo di campionatore, specificando nel caso di campionatore ASTM se si è utilizzato o meno un portacampione. Specificare anche se il campionatore è apribile longitudinalmente;
- Tipo di maglio e dispositivo di sgancio;
- Altezza di caduta libera;
- Profondità del fondo foro prima della prova;
- Profondità della base (scarpa) del rivestimento se impiegato prima della prova;
- Informazioni sulla falda e sul livello del fluido nel foro;
- Penetrazione per peso proprio;
- Resistenza alla penetrazione preliminare (primi 150 mm) con eventuale annotazione della penetrazione;
- Resistenza alla penetrazione vera (successivi 300 mm) con eventuale annotazione della penetrazione;
- Descrizione dei terreni recuperati col campionatore;
- Eventuali note;
- Eventuale taratura del rendimento energetico.

### **(3B2.6) PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPT, CPTU, SCPT) (■)**

La prova penetrometrica statica, che consiste nell'infissione a pressione nel terreno di una punta d'acciaio chiusa di forma conica, ha lo scopo di misurare la forza necessaria alla penetrazione della punta ( $Q_c$ ), la forza di attrito laterale tra il terreno ed un manicotto d'acciaio situato al di sopra della punta ( $Q_s$ ) ed eventualmente la pressione della fase liquida nei pori durante l'avanzamento della punta ( $u$ ). Da queste misure, effettuate separatamente, ma in modo continuo, è possibile determinare tramite correlazioni semiempiriche le seguenti caratteristiche:

- andamento stratigrafico;
- densità relativa ( $D_R$ ), angolo di resistenza al taglio ( $\phi^l$ ) e resistenza alla liquefazione dei terreni granulari;
- resistenza al taglio non drenata ( $S_u$ ) dei terreni a grana fine;
- modulo di taglio elastico a piccole deformazioni ( $G_0$ ).

La prova penetrometrica statica può essere realizzata in qualsiasi tipo di terreno sciolto. La prova risulta drenata nel caso dei terreni granulari (ghiaie fini, sabbie, sabbie debolmente limose) e non drenata in quelli saturi a grana fine (argille, argille limose). Nei terreni a grana fine parzialmente saturi e nel caso di terreni limosi e limo-argillosi è possibile che si verifichi una condizione di parziale drenaggio. L'interpretazione convenzionale dei risultati di prova fa riferimento o ad una condizione drenata o a quella non drenata.

#### 3B2.6.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

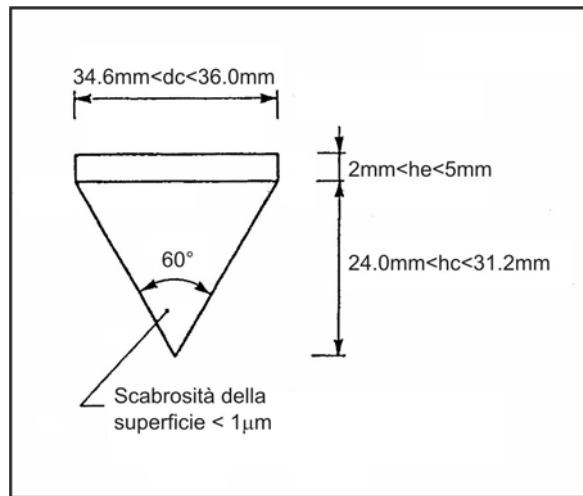
La norma ASTM D3441-94 è quella di riferimento salvo quanto specificato nelle presenti IT. La prova viene eseguita infiggendo a pressione nel terreno una punta conica di acciaio di forma e dimensioni standard (Figure 3B23 e 3B24) con una velocità di avanzamento costante pari a 2 cm/s.

Esistono sostanzialmente due tipi di apparecchiatura:

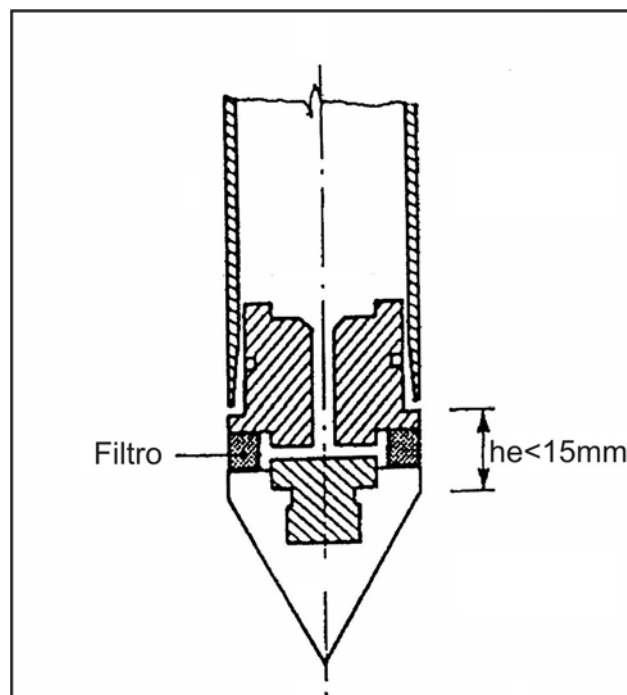
- punta meccanica;
- punta elettrica.

Solamente con la seconda è possibile effettuare misure continue come indicato nel descrivere lo scopo della prova. Le punte meccaniche sono in genere libere (telescopiche) rispetto alle aste di spinta e la misura della spinta viene fatta in superficie. La norma di riferimento, come per altro le citate raccomandazioni AGI (1977) considerano standard sia la punta elettrica che quella meccanica le quali tuttavia presentano differenze costruite sia geometriche che meccaniche. Le principali differenze nei risultati ottenibili con i due tipi di punta riguardano

soprattutto l'attrito laterale. Nel prosieguo si indica come standard la punta elettrica.



**Figura 3B23** – Cono standard. Da Cestari, 1990



**Figura 3B24** – Piezocono standard. Da Cestari, 1990

Le principali caratteristiche del cono standard sono di seguito riportate. E' fatto obbligo, nell'impiego di punte diverse da quella standard, di indicare dimensioni

e caratteristiche:

- area di base  $1000 \text{ mm}^2$  (tolleranze  $-5\% + 2\%$ );
- angolo di apertura  $60^\circ$  (altezza del cono compresa tra 24 e 31.2 mm);
- superficie del manicotto compresa tra 14.700 e 15.300  $\text{mm}^2$  con rugosità compresa tra 0.25 e 0.75  $\mu\text{m}$ . il diametro non deve risultare inferiore a quello del cono mentre può risultare maggiore con una tolleranza di 0.35 mm;
- estensione cilindrica  $2 \leq h_e \leq 5 \text{ mm}$  (senza setto poroso);  $h_e \leq 15 \text{ mm}$  (con setto poroso);
- -rugosità del cono inferiore a 1  $\mu\text{m}$ .

Per i penetrometri attrezzati per la misura della pressione dell'acqua (Piezoconi, CPTU), il setto poroso deve avere una permeabilità di 0.01 cm/s e deve essere saturato con glicerina. Il filtro può essere costituito da plastica porosa, materiale ceramico o acciaio inox sinterizzato.

Il Sistema di spinta consiste di:

- batteria di aste di spinta cave;
- batteria di aste interne piene (solo punte telescopiche);
- dispositivo di spinta;
- dispositivo di ancoraggio.

Le aste di spinta cave sono avvitate l'una sull'altra a formare una batteria rigidamente collegata con asse rettilineo costante. La flessione nel punto centrale di un'asta di spinta lunga 1 m non deve risultare superiore a 0.5 mm per le aste inferiori e 1 mm per le altre

Sulle aste cave, di diametro esterno 36 mm, se necessario, potrà essere installato un anello allargatore per diminuire l'attrito del terreno lungo la batteria a non meno di m 1,00 sopra la punta.

Le aste interne, a sezione piena, sono impiegate unicamente nei penetrometri meccanici di tipo telescopico . Il diametro di tale aste deve essere da 0.5 ad 1 mm inferiore a quello interno delle aste cave. Devono scorrere con grande facilità rispetto alle aste cave.

Il sistema di spinta deve avere una corsa minima di 1 m e deve spingere le aste a velocità di penetrazione costante ( $20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm}$  indipendentemente dalla natura e dalle caratteristiche del terreno). Si utilizzerà in generale un'apparecchiatura a spinta idraulica di capacità non inferiore al piano a 20 t. L'attrezzatura di spinta deve essere ancorata o zavorrata in modo tale da non muoversi rispetto a piano campagna. Vengono utilizzati a tale scopo autocarri

zavorrati per spinte fino a 20 t. In alternativa è possibile utilizzare 4 o 6 eliche di ancoraggio.

Le punte elettriche sono strumentate mediante celle estensimetriche per la misura continua della forza assiale agente sul cono ( $Q_c$ ) e della forza di attrito laterale agente sul manicotto ( $Q_s$ ). Per questa seconda misura è fondamentale che la cella estensimetrica sia insensibile agli sforzi normali e misuri unicamente quelli di taglio. Il piezocono è attrezzato per la misura della pressione interstiziale ( $u$ ) mediante un trasduttore di pressione. Normalmente le punte elettriche hanno un fondo scala da 5 t. E' possibile utilizzare coni con due celle di carico agenti in serie e dotate di diverso fondo scala nel caso di terreni teneri. I sensori sono condizionati da una centralina posta in superficie. Il collegamento elettrico è realizzato via cavo inserito nelle aste di spinta. La profondità è acquisita dalla centralina grazie alla presenza di un encoder collegato meccanicamente al dispositivo di spinta.

Nella prova continua (velocità di infissione pari a  $20\text{mm/s} \pm 5\text{mm/s}$ ) l'infissione di ciascuna asta di spinta (lunghezza 1 m) avviene in modo continuo. E' raccomandato un rilevamento continuo delle grandezze ( $Q_c$ ,  $Q_s$  ed eventualmente  $u$ ). In ogni caso l'intervallo tra due letture deve risultare inferiore a 0.2 m.

Le misure andranno eseguite con le seguenti precisioni: non peggiore del 5% del valore misurato, non peggiore dell'1% del valore massimo di resistenza misurata nello strato attraversato. La profondità andrà rilevata con una precisione non inferiore a 0.1 m.

Può essere accettata al massimo una deviazione dalla verticale della spinta fornita dall'attrezzatura pari al 2%. Le punte penetrometriche elettriche possono essere strumentate con un inclinometro da utilizzare al fine di controllare la verticalità. L'esigenza di controllare la verticalità si pone particolarmente a profondità elevate e nei terreni molto compatti o dove la presenza di elementi lapidei grossi può causare una rilevante deviazione dalla verticale.

Le prove vanno eseguite ad almeno 1 m da una precedente verticale e/o ad almeno 25 diametri da un preesistente foro di sondaggio.

Rettilinearità delle aste di spinta, usura del cono e calibrazioni dei sensori e del sistema di acquisizione dati vanno verificati periodicamente.

Per il superamento di un tratto particolarmente resistente si potrà disporre l'esecuzione di un preforo rivestito, di diametro superiore a quello delle aste del penetrometro (40 - 50 mm). A tale fine è anche possibile ricorrere a penetrometri statici/dinamici (si veda il paragrafo 3B2.7.2 riguardante il Penetrometro tipo Meardi, DPT).

Nel caso di preforo di diametro superiore occorrerà disporre all'interno una tubazione di guida del diametro anzidetto, corredata di adatti centrotori.

### 3B2.6.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Nella restituzione dei risultati occorrerà contrassegnare con la lettera **R** ogni grafico se l'attrezzatura e le modalità di esecuzione sono interamente in accordo con gli standards di riferimento. Si farà seguire la lettera **R** con una delle seguenti a seconda del tipo di penetrometro impiegato:

**M**=meccanico

**H**=idraulico

**E**=elettrico

Occorre inoltre indicare: le caratteristiche di fondo scala dei sensori di misura, posizione dell'eventuale filtro, data, identificazione della prova, ubicazione e ditta esecutrice.

Occorre inoltre indicare:

- La profondità alla quale un anello allargatore o aste di spinta di minore diametro sono state manovrate (parzialmente estratte e risospinte a quota) per ridurre l'attrito laterale e per ottenere quindi una maggiore penetrazione;
- Ogni interruzione della normale procedura;
- Osservazioni dell'operatore relative al tipo del terreno, suoni sulle aste di spinta, sobbalzi per presenza di ghiaia, inconvenienti, ecc.;
- Dati relativi alla esistenza ed allo spessore di riporti, o alla esistenza ed allo spessore di scavi, nonché la quota di inizio prova rispetto alla superficie del terreno originale o modificata;
- La quota di piano campagna;
- Eventuali letture inclinometriche;
- Tutte le verifiche effettuate dopo l'estrazione;
- Livello idrico nel foro dopo l'estrazione;
- Eventuale profondità alla quale il foro è franato;
- Eventuale riempimento del foro a fine prova.

Infine occorre indicare: identificativo della punta, nome dell'operatore, date e riferimenti certificati di taratura dei sensori.

Vengono determinate le seguenti grandezze:



1. Resistenza alla punta  $q_c = Q_c/A_c$  ( $A_c$ =area di base del cono);
2. Attrito laterale locale  $f_s = Q_s/A_s$  ( $A_s$ =area del manicotto);
3. Spinta totale  $Q_t$  è la forza necessaria a spingere contemporaneamente nel terreno la punta e le aste;
4. Resistenza di attrito totale  $Q_{st} = Q_t - Q_c$ ;
5. Rapporto delle resistenze  $R_f$  (%) =  $100 f_s/q_c$ ;
6. Indice delle resistenze  $I_f = q_c/f_s$ .

Grafici, scale raccomandate:

- per la profondità: 1 unità a piacere  $x = 1$  m (in ordinate);
- per la resistenza alla punta ( $q_c$ ):  $x = 20$  Kg/cm<sup>2</sup> (2000 kN/mq, 2 MPa);
- per la resistenza laterale ( $f_s$ ):  $x = 0,5$  Kg/cm<sup>2</sup> (50 kN/m<sup>2</sup>);
- per il rapporto ( $R_f$ ):  $x = 20$  unità del rapporto;
- per la forza di attrito totale  $Q_{st}$ :  $x = 500$  kg (5kN);
- per la pressione dell'acqua  $u$ :  $x = 0.2$  kg/cmq (20 kPa).

Per il penetrometro meccanico l'elaborazione grafica dovrà essere accompagnata dalla copia delle letture ai manometri, che verranno effettuate ogni 20 cm di avanzamento, delle grandezze misurate.

I valori della resistenza penetrometrica vanno corretti per effetto della  $u$ , quando questa viene misurata, nel seguente modo:

$$q_c \text{ (corr.)} = q_c \text{ (mis.)} + u(1-a)$$

dove  $a = A_N/A_c$  (dove  $A_c$  = area del cono,  $A_N$  = area netta del corpo dello strumento depurata dallo spessore del manicotto).

E' inoltre consigliato procedere al filtraggio statistico dei dati ed alla correzione della profondità in base alle letture inclinometriche. Quest'ultima correzione è fattibile unicamente se si dispone delle misure inclinometriche. Il filtraggio dei dati ha lo scopo di ridurre la dispersione dei valori misurati e di pervenire ad un profilo semplificato.

Quando viene impiegata una punta con setto poroso, nel caso si eseguano misure di dissipazione della pressione neutra, dovranno essere forniti anche i grafici della pressione neutra in funzione del tempo.

Ogni rapporto anche parziale deve comprendere una chiara planimetria del sito. Vanno riportate in risalto le posizioni in cui le prove sono state effettuate e l'eventuale sequenza temporale di esecuzione di sondaggi e prove penetrometriche.

Le modalità di esecuzione delle prove penetrometriche con il cono sismico (SCPT) sono trattate nel paragrafo 3B2.7.

### **(3B2.7) PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE (DPT) (■)**

Lo scopo della prova è quello di determinare il numero di colpi ( $N_{30}$ ) necessari ad infiggere, per una profondità di 30 cm, una punta conica di dimensioni standard mediante battitura. I valori ottenuti consentono una stima qualitativa della consistenza del terreno. Inoltre è possibile correlare empiricamente i valori misurati con quelli ricavati dalla prova SPT. E' pertanto possibile ricavare i seguenti parametri:

- la densità relativa, l'angolo di resistenza al taglio e la resistenza alla liquefazione dei terreni granulari.
- il modulo di taglio a piccole deformazioni sia nel caso di terreni a grana grossa che in quelli a grana fine.

#### 2B2.7.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

I penetrometri dinamici sono classificati in base al peso del maglio come indicato nella tabella (Stefanoff et al. 1988).

Normalmente, in ragione della natura molto consistente dei terreni prevalentemente incontrati, si farà ricorso a penetrometri superpesanti. Più precisamente, in accordo alle raccomandazioni AGI (1977), si suggerisce l'impiego del penetrometro tipo Meardi e della relativa metodologia descritta nel seguito (Meardi e Meardi 1974).

La prova trova il suo miglior campo di applicazione nei terreni granulari molto addensati o contenenti ghiaia. Tuttavia può essere eseguita in qualsiasi terreno sciolto ed anche nel caso di alcune rocce tenere.

Unicamente in presenza di grossi elementi lapidei, che potrebbero danneggiare la punta, la prova non è eseguibile.

**Tabella 3B12** – Classificazione dei penetrometri (Stefanoff et al. 1988)

TIPO	SIGLA	MASSA DEL MAGLIO M (kg)
Leggero	DPL	$M \leq 10$
Medio	DPM	$10 < M < 40$
Pesante	DPH	$40 \leq M < 60$
Superpesante	DPSH	$M \geq 60$

E' tuttavia possibile impiegare attrezzature e modalità differenti. In questo caso l'impresa è tenuta a fornire le necessarie specifiche tecniche al fine di ottenere un parere preventivo di idoneità da parte dei consulenti tecnici della Regione Toscana.

Per le prove "tipo Meardi", occorre infiggere nel terreno mediante battitura una punta conica di dimensioni standard per una profondità di 30 cm. Dopodiché occorre infiggere il rivestimento esterno.

La prova di resistenza potrà partire dal piano di campagna, oppure, previ opportuni accorgimenti, con inizio dal fondo dei fori di sondaggi.

Poiché con tale prova si ottengono informazioni di tipo continuo, dovranno essere eseguite misurazioni di resistenza alla penetrazione durante tutta l'infissione.

#### 2B2.7.2 PENETROMETRO TIPO MEARDI

L'attrezzatura si compone di una prima batteria di aste ciascuna della lunghezza di 1.2 m, di peso pari a 7 Kg/m, e diametro di 34 mm, alla cui estremità inferiore sarà collegata una punta conica di diametro 50,8 mm ed angolo di apertura 60° (Figura 3B12), e di una seconda batteria di aste concentriche alla prima, di diametro 48/43 mm e di peso 5,3 Kg/m circa, alla cui estremità inferiore dovrà essere avvitata una scarpa tagliente. Questa seconda batteria di aste ha lo scopo di eliminare l'attrito tra aste interne e terreno.

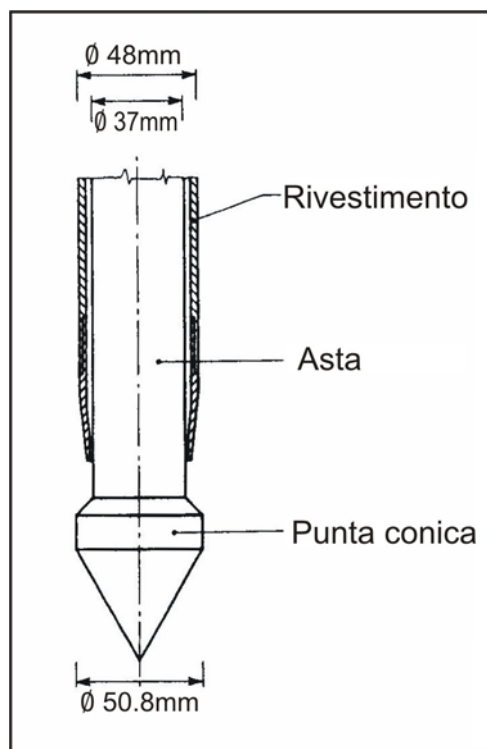
Il maglio di 73 Kg dovrà avere un'altezza libera di caduta di 75 cm.

Il sistema di sollevamento del maglio potrà essere idraulico con sganciamento automatico oppure con azionamento fune-cabestano senza sgancio automatico.

E' fatto obbligo specificare le caratteristiche del penetrometro utilizzato qualora queste si discostino da quelle standard sopra specificate.

La prova dovrà procedere alternativamente e consecutivamente ora battendo sulle aste interne per infiggere la punta e contando il numero dei colpi ( $N_P$ ) necessari per avanzare nel terreno di 30 cm, ora sulle aste esterne per rilevare il numero dei colpi ( $N_r$ ) necessari per un eguale avanzamento nel sottosuolo. La prova verrà interrotta quando  $N_p$  o  $N_r$  superano il valore di 100.

La punta conica deve sporgere dalla batteria di tubi esterni non più di 30 cm in qualsiasi fase della prova. Ciò per evitare che attriti laterali sulle aste alterino i dati di resistenza  $N_p$  misurati. E' consentito infiggere la punta per una profondità di 20 cm anziché 30 cm. Tale difformità dallo standard suggerito deve essere evidenziato nella presentazione dei risultati.



**Figura 3B25** – Penetrometro superpesante tipo Leardi-AGI Punta e rivestimento (Nenzi)

Le batterie, le aste interne collegate alla punta conica e i tubi esterni, devono essere liberi per tutta la durata della prova. Nel caso di blocco delle due colonne a seguito di penetrazione di materiale nell'intercapedine, la prova dovrà essere sospesa.

### 3B2.7.3 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

A completamento della prova dovrà essere fornita una relazione complessiva contenente:

- a) una documentazione comprendente:
  - tabella dei valori delle resistenze  $N_p$  e  $N_r$  misurate alle diverse

- profondità per ciascuna prova;
- diagramma di  $N_p$  in relazione alla profondità;
  - diagramma di  $N_r$  in relazione alla profondità;
  - l'altezza media di caduta del maglio per l'infissione del rivestimento;
  - grafico di  $N_r'$  in funzione della profondità, dove  $N_r'$  è ricavato da  $N_r' = 75 N_r / H'$  essendo  $H'$  l'altezza media di caduta del maglio durante l'infissione del rivestimento;
  - schema eventuale del preforo;
  - specifiche riguardanti l'attrezzatura ed in particolare il tipo di sollevamento adottato.
- b) l'interpretazione stratigrafica delle verticali analizzate;
- c) la planimetria CTR in scala 1:5.000, ove esistente, per una visione più generale del sito d'indagine. In alternativa sarà utilizzata una planimetria CTR in scala 1:10.000;
- d) coordinate in Gauss- Boaga del sito ove è ubicata l'indagine;
- e) la planimetria CTR in scala 1: 1000 con l'ubicazione delle indagini (vanno riportate in risalto le posizioni in cui le prove sono state effettuate e l'eventuale sequenza temporale di esecuzione di sondaggi e prove penetrometriche);
- f) le fotografie in originale o in digitale su floppy disk o CD relative alle varie fasi di esecuzione della prova.

La relazione complessiva dovrà essere consegnata al Servizio sismico della Regione Toscana in n. 3 copie cartacee, di cui due copie rilegate e una copia non rilegata e n. 2 copie su CD-Rom. Inoltre, nel caso in cui l'Amministrazione Appaltante non sia la Regione Toscana ma un Ente Locale si invita l'Impresa ad inviare una quarta copia cartacea al Comune di riferimento.

### **(3B2.8) PROVE SCISSOMETRICHE (FVT) (□)**

Le prove scissometriche consentono di determinare la resistenza al taglio non drenata ( $S_u$ ) in terreni coesivi saturi fornendo la variazione di tale parametro con la profondità.

La prova trova il suo miglior campo di applicazione nei terreni coesivi teneri e saturi. Tuttavia può essere eseguita in qualsiasi terreno a grana fine saturo.

#### 2B2.8.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nell'infiggere, in una porzione di terreno non disturbata, una paletta costituita da 4 lame di acciaio di forma rettangolare o lanceolata e nel farla ruotare misurando il valore massimo della coppia applicata. Si assume che tale operazione comporti la rottura in condizioni non drenate di un cilindro di terreno avente l'altezza  $H$  della paletta ed il suo diametro  $D$ . La resistenza al taglio mobilizzata è quella disponibile sull'intera superficie del cilindro.

Le caratteristiche dell'apparecchiatura impiegata andranno indicate nella relazione finale. E' possibile eseguire le misure all'interno di fori di sondaggi utilizzando degli scissometri meccanici.

La prova può essere eseguita all'interno di un foro di sondaggio o anche in assenza di fori di sondaggio con le modalità e l'attrezzatura di seguito indicate. Attrezzatura ed esecuzione della prova sono regolate dalla norma ASTM D 2573 fatto salvo quanto di seguito espressamente specificato.

Occorre utilizzare una paletta costituita da 4 lame di acciaio di forma rettangolare o lanceolata avente diametro compreso tra 50 e 100 mm. In parziale deroga a questa indicazione dell'ASTM è consentito utilizzare le palette della Geonor con lame rettangolari e diametro pari a 45-55-65 mm. Il rapporto tra l'altezza della paletta e il diametro è in ogni caso pari a 2. Lo spessore delle alette deve essere limitato e deve soddisfare la condizione che l'area della superficie di base delle alette sia inferiore al 15 % dell'area del cerchio che le circonda.

La paletta va infissa in una porzione di terreno non disturbata o relativamente poco disturbata. A tal fine occorre che la paletta sia spinta ad una profondità pari a 5 volte il diametro al di sotto del fondo foro. Nel caso di prove eseguite senza la preventiva realizzazione del sondaggio vengono utilizzate palette protette da una scarpa. In questo caso la paletta andrà spinta ad una profondità pari a  $5D$  al di sotto della quota raggiunta dalla scarpa di protezione. In deroga a quest'ultima prescrizione, nel caso in cui si utilizzi lo scissometro Geonor o

previa autorizzazione della DL è possibile spingere la paletta ad una profondità di soli 50 cm al di sotto della scarpa di protezione.

La rotazione della paletta va imposta dalla superficie con una velocità non superiore a 0.1°/sec o 6°/min. Nel corso di questa operazione va misurata la coppia torcente. L'applicazione della coppia va iniziata subito dopo l'infissione con un'attesa massima non superiore a 5 minuti.

Nel caso in cui l'asta porta paletta non sia protetta dal terreno circostante, occorre misurare l'attrito che si sviluppa al contatto tra asta e terreno correggendo conseguentemente il valore della coppia misurata. Nel caso di asta protetta occorre verificare periodicamente che l'attrito sui cuscinetti sia trascurabile.

E' possibile misurare la resistenza residua o del terreno rimaneggiato subito dopo aver ruotato la paletta per almeno 10 giri completi.

Le prove vanno intervallate di almeno 0.7 m.

#### 2B2.8.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

La resistenza al taglio non drenata andrà calcolata nel seguente modo:

$$S_u(FV) = T/k \quad (3B.5)$$

dove T è la coppia massima applicata al netto degli attriti tra asta porta paletta e terreno (come sopra specificato, tale attrito non entra in gioco nel caso di aste protette); mentre k è un fattore che dipende dalla geometria, dalle dimensioni della paletta e dalla distribuzione degli sforzi di taglio lungo il cilindro di rottura.

In particolare per palette di forma quadrata di altezza H e diametro D andrà utilizzata la seguente relazione:

$$S_u(FV) = \frac{T}{\frac{\pi D^3}{2} \left( \frac{H}{D} + \frac{a}{2} \right)} \quad (3B.6)$$

dove a dipende dalla distribuzione degli sforzi di taglio lungo la superficie laterale del cilindro di rottura. Nel caso di distribuzione uniforme  $a=2/3$ , per distribuzione parabolica  $a=3/5$  e per distribuzione triangolare  $a=1/2$ .

Nella restituzione dei risultati occorrerà utilizzare la simbologia sopra indicata specificando le relazioni impiegate per ottenere i valori di resistenza al taglio.

### **(3B2.9) PROVA DILATOMETRICA (DMT) (□)**

Lo scopo della prova è quello di misurare la forza necessaria alla penetrazione ( $Q_d$ ) di una lama d'acciaio di forma e dimensioni standard, la pressione corrispondente al primo distacco ( $p_0$ ) di una membrana d'acciaio collocata su una faccia laterale della lama e quella corrispondente ad uno spostamento del centro della membrana pari a 1.0 mm ( $p_1$ ). Da queste misure, effettuate separatamente e a diverse profondità, è possibile determinare l'indice dilatometrico  $I_D$ , l'indice della tensione orizzontale  $K_D$  ed il modulo dilatometrico  $E_D$  e successivamente, tramite correlazioni semiempiriche, stimare le seguenti caratteristiche:

- andamento stratigrafico;
- densità relativa ( $D_R$ ), angolo di resistenza al taglio ( $f'$ ) e resistenza alla liquefazione dei terreni a granulari;
- resistenza al taglio non drenata ( $S_u$ ) dei terreni a grana fine;
- modulo di taglio elastico a piccole deformazioni ( $G_0$ ).

#### 2B2.9.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova con dilatometro piatto o di Marchetti (DMT) consiste nell'infiggere a pressione, sino alla profondità desiderata, una lama d'acciaio e quindi nell'espandere una membrana circolare d'acciaio situata su una faccia laterale in modo tale che il centro di questa membrana compia un'escursione di 1.0 mm.

La prova dilatometrica va preferibilmente realizzata nei terreni granulari fini. Tuttavia è possibile eseguirla in quasi tutti i terreni sciolti. In terreni cementati, nelle ghiaie e in terreni strutturati che presentano inclusioni capaci di deviare la lama dalla verticalità, l'esecuzione della prova risulta poco agevole o impossibile. La presenza di ghiaia a spigoli vivi può inoltre lacerare la membrana d'acciaio. L'esecuzione di prefori consente, seppure con ulteriori oneri, di operare anche nelle condizioni più difficili. La prova è drenata nel caso dei terreni a grana grossa (ghiaie, sabbie, sabbie debolmente limose) e non drenata in quelli saturi a grana fine (argille e argille limose). Nei terreni a grana fine parzialmente saturi e nel caso di terreni limosi e limo-argillosi è possibile che si verifichi una condizione di parziale drenaggio. L'interpretazione convenzionale dei risultati di prova fa riferimento o alla condizione drenata o a quella non drenata.



La lama ha una larghezza di 95 mm, lunghezza di circa 200 mm e spessore di 14 mm. La membrana ha uno spessore di 0.2 mm ed un diametro di 70 mm. L'espansione viene effettuata utilizzando azoto in bombole dotate di regolatori di pressioni. L'azoto in pressione raggiunge la membrana tramite un cavetto elettro-pneumatico. Un cilindretto di acciaio chiude un circuito che disattiva e attiva un segnale audio in superficie in corrispondenza di due posizioni predefinite della membrana: il segnale audio viene disattivato nella posizione (A) quando il centro della membrana ha subito uno spostamento di 0.05 mm; il segnale audio viene riattivato nella posizione (B) quando il centro della membrana ha subito uno spostamento di 1.1 mm. Una centralina, posta in superficie e dotata di un misuratore di pressione consente di determinare le pressioni A e B corrispondenti alle posizioni (A) e (B) della membrana. L'attrezzatura di infissione è usualmente la stessa usata nelle prove CPT. La spinta necessaria all'infissione è misurata tramite una cella di carico posta immediatamente al di sopra della lama.

Non esiste una specifica norma ASTM, si farà quindi riferimento a quanto indicato dal documento ASTM 1986 Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test. Geotechnical Testing Journal, Vol. 9, N° 2.

In genere l'espansione della membrana e le relative misure vengono effettuate ogni 0.2 m di profondità. E' consigliabile effettuare la penetrazione con una velocità di 2 cm/s come per le prove penetrometriche. Al raggiungimento della profondità di interesse si scaricano le aste di spinta, si chiude la valvola di sfiato e si provvede ad immettere gas per espandere la membrana entro 15 secondi dal raggiungimento della profondità. La lettura di A deve essere effettuata entro 15-20 s dall'inizio dell'immissione. La pressione B va raggiunta e determinata in un tempo di 15-30 s.

Rettilinearità delle aste di spinta, usura della membrana e della lama vanno verificati periodicamente. La calibrazione della membrana va effettuata prima di ogni prova determinando la pressione  $\Delta A$  necessaria a mantenere il centro della membrana alla distanza di 0.05 mm e la pressione  $\Delta B$  necessaria ad imporre uno spostamento della sola membrana di 1.10 mm. La pressione  $\Delta A$  è negativa ma viene introdotta nelle formule col valore assoluto.

#### 2B2.9.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

DETERMINAZIONE DI  $p_0$ :

$$p_0 = -1.05 \cdot (A - \Delta A) - 0.05 \cdot (B - \Delta B) \quad (3B.7)$$

DETERMINAZIONE DI  $p_1$ :

$$p_1 = B - \Delta B \quad (3B.8)$$

DETERMINAZIONE DI  $Q_D$ :

$$q_D = Q_D / A_D \quad (3B.9)$$

dove  $A_D$  è l'area della sezione trasversale di poco più grande di quella del cono (13.3 cm<sup>2</sup>).

INDICE DILATOMETRICO:

$$I_D = \frac{p_1 - p_o}{p_o - u_o} \quad (3B.10)$$

dove  $u_o$  è la pressione idrostatica.

INDICE DELLA TENSIONE ORIZZONTALE:

$$K_D = \frac{p_o - u_o}{\sigma'_{v_o}} \quad (3B.11)$$

dove  $\sigma'_{v_o}$  è la tensione verticale geostatica.

MODULO DILATOMETRICO:

$$E_D = 34.7(p_1 - p_o) \quad (3B.12)$$

L'attrezzatura e la prova sono brevettate ed un numero limitato di imprese specializzate ha in esclusiva l'uso dell'attrezzatura e l'esecuzione delle prove.

Questo gruppo di imprese fornisce anche l'interpretazione ingegneristica delle misure fornendo i parametri geotecnici di interesse con la profondità.

### **(3B2.10) PROVE PRESSIOMETRICHE CON PRESSIOMETRO AUTOPERFORANTE (SBPM) (□)**

La prova ha lo scopo di determinare la curva di espansione (curva pressione-spostamenti radiali) di una sonda cilindrica preventivamente inserita nel terreno. Dalla curva di espansione pressiometrica è possibile ricavare le seguenti informazioni:

- modulo di taglio  $G$ ;
- densità relativa ( $D_R$ ), angolo di resistenza al taglio ( $\phi_1$ ) e di dilatanza ( $\psi$ ) dei terreni a grana grossa;
- resistenza al taglio non drenata ( $S_u$ ) dei terreni a grana fine.

La prova pressiometrica viene realizzata in tutti i terreni sciolti, nelle rocce tenere e nelle rocce vere e proprie. Nelle presenti IT viene trattata la prova con pressiometro autopercussore eseguibili unicamente in terreni sciolti, rinviando alla norma di riferimento per la prova in roccia. La prova è drenata nel caso dei terreni a grana grossa (ghiaie, sabbie, sabbie debolmente limose) e non drenata in quelli saturi a grana fine (argille e argille limose). Nei terreni a grana fine parzialmente saturi e nel caso di terreni limosi e limo-argillosi è possibile che si verifichi una condizione di parziale drenaggio. L'interpretazione convenzionale dei risultati di prova fa riferimento o alla condizione drenata o a quella non drenata.

#### 2B2.10.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova pressiometrica consiste nell'installare nel terreno, alla profondità desiderata, una sonda cilindrica e nell'espandere successivamente tale sonda registrando le pressioni applicate e gli spostamenti radiali o le variazioni di volume della sonda.

Sono disponibili diversi tipi di pressimetri: pressiometro Menard (MPM), presso-pressiometro (PIP), pressio-cono (FDPM) ed il pressiometro autopercussore (SBP). L'attrezzatura di seguito descritta è quest'ultima.

La sonda cilindrica è cava e al suo interno consente il passaggio di un utensile disagregatore. Il fluido di perforazione e i detriti risalgono in superficie passando all'interno della sonda. La sonda ha diametro di 80 mm e lunghezza complessiva superiore a 1000 mm. Questa tecnica di avanzamento e installazione della sonda nel terreno è ritenuta causare un disturbo minimo.

Esternamente la sonda pressiometrica porta una membrana di gomma eventualmente protetta da strisce metalliche (lanterna cinese) nel caso di terreni ghiaiosi o sabbiosi con asperità. Questa membrana è la parte

espandibile della sonda ed il rapporto tra la lunghezza della membrana espandibile e il diametro a riposo della sonda deve essere di almeno 6. L'espansione della membrana viene realizzata mediante l'uso di gas in controllo di carico o di spostamento. La pressione del gas è misurata all'interno della sonda mediante trasduttore di pressione. Lo spostamento radiale è misurato in tre punti a 120° nella sezione centrale della sonda mediante tre braccini strumentati. La massima pressione applicabile è di 4 MPa e la massima deformazione raggiungibile è del 20 %.

La prova si divide in due fasi: a) installazione della sonda alla profondità desiderata mediante la tecnica dell'auto perforazione e b) espansione della cavità.

La tecnica dell'autoperforazione prevede la lenta infissione nel terreno della scarpa di perforazione al di sopra della quale è posto il modulo di misura. La pulizia del foro avviene in due fasi: 1) frantumazione del terreno mediante utensili disgregatori rotanti posti all'interno della scarpa. Si usano utensili diversi a seconda del tipo di terreno; 2) recupero dei detriti mediante circolazione di acqua o fanghi.

La sonda pressiometrica è infatti un cilindro cavo e sia la manovra dell'utensile disgregatore mediante batteria di aste, sia l'operazione di recupero dei detriti utilizzano la cavità interna della sonda. Si ritiene minimo il disturbo causato dall'inserzione della sonda con la tecnica dell'autoperforazione in quanto si ipotizza che il volume di terreno asportato venga progressivamente sostituito col volume della sonda, in modo tale che il terreno non subisca significativi spostamenti laterali. Per tali ragioni la prova SBPT è considerata ideale per la misura della rigidità in sito e della pressione orizzontale geostatica.

Le prove a deformazione controllata vengono eseguite imponendo una velocità di deformazione pari a 1%/m o anche 0.1%/m. Nel corso della prova vengono registrati i valori di pressione e i corrispondenti valori di deformazione misurati in tre diversi punti, come già detto.

Le prove a controllo di carico richiedono una stima di massima della pressione limite (pL) in modo da scegliere ogni gradino di carico pari a circa 1/10 di pL. Per ogni gradino di carico si misurano le deformazioni a 15, 30, 60 e 120 s.

In una tipica curva pressiometrica è possibile eseguire anche alcuni cicli di scarico-ricarico.

## 2B2.10.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Una prova pressiométrica consiste nell'espansione di una cavità cilindrica di lunghezza finita  $L$  e diametro  $D$ . Nell'interpretare la prova si fa usualmente riferimento alle ipotesi semplificative sotto riportate:

- Condizioni di deformazioni piane nel piano orizzontale ( $e_z = 0$ ); questa ipotesi è verificata solamente nei terreni omogenei in direzione orizzontale e nel caso di sonde infinitamente lunghe;
- Condizioni drenate nei terreni a grana grossa. Nei terreni a grana fine si assume che l'espansione della cavità avvenga in condizioni non drenate anche se l'ipotesi di parziale drenaggio appare più realistica;
- I valori delle tensioni iniziali al contorno sono noti e corrispondono alla tensione geostatica orizzontale;
- Viene assunto un modello costitutivo semplificato del tipo elastico-perfettamente plastico.

Dalle ipotesi sopra riportate ne deriva che, nel caso di espansione in argille, è possibile ricavare la rigidezza a taglio dalla curva pressiométrica mediante la seguente relazione:

$$G_s(\varepsilon_c) = \frac{1}{2} \cdot \frac{dp}{d\varepsilon_c} \quad (3B.13)$$

dove  $G_s(\varepsilon_c)$  è il modulo secante che compete a un dato livello di deformazione. Questo metodo è noto come metodo della sottotangente.

Nel caso delle sabbie, è preferibile determinare il modulo di scarico-ricarico dei cicli facendo riferimento al livello di deformazione medio e allo stato di tensione medio nella zona attorno alla cavità.

La resistenza al taglio non drenata delle argille ed i parametri di resistenza al taglio delle sabbie vengono ottenuti con metodi semiempirici dalla determinazione della pressione limite.

Attrezzatura ed esecuzione delle prove pressiométriche dovranno fare riferimento alle norme ASTM D4719-87, D4971-89

### **(3B2.11) Prove di carico su piastra (PLT) (□)**

La prova ha lo scopo di determinare la capacità portante di una fondazione modello e la deformabilità del terreno sottostante la piastra di prova per una profondità pari a circa la larghezza o diametro della piastra medesima.

La prova può essere effettuata in qualsiasi tipo di terreno sciolto, roccia tenera o roccia vera e propria. Nel caso di prove in terreni sciolti, la massima dimensione di clasti al di sotto della piastra non deve essere superiore a 100 mm.

#### 2B2.11.1 SCHEMA ESECUTIVO DELLA PROVA

La prova consiste nel sottoporre una piastra di dimensioni standard e di sezione circolare o quadrata a carichi di ampiezza crescente applicati per mezzo di un sistema di contrasto e di un martinetto idraulico. La piastra viene strumentata con comparatori elettrici in modo da rilevare il contemporaneo cedimento. La prova può essere eseguita a piano campagna o dentro pozzi appositamente realizzati. La prova viene anche eseguita su roccia all'interno di gallerie di piccolo diametro o cunicoli esplorativi. In questo caso i carichi vengono applicati contemporaneamente su due superfici contrapposte utilizzando piastre rigide di sezione circolare o piastre flessibili di sezione anulare.

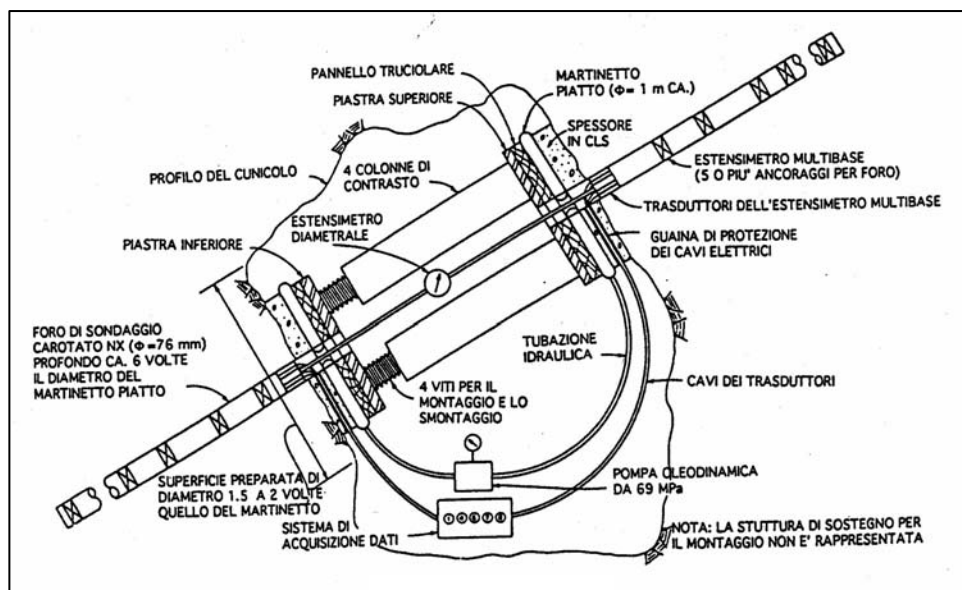
#### ESECUZIONE DELLA PROVA SU TERRENI SCIOLTI

Occorre una serie di piastre circolari di acciaio con spessore di almeno 25 mm e diametro minimo non inferiore a 152 mm e massimo non superiore a 762 mm. In alternativa è possibile usare piastre quadrate di area equivalente. Per ogni prova si usano almeno quattro piastre collocate l'una sull'altra a formare una piramide in modo da avere una struttura infinitamente rigida. Due piastre contigue non debbono differire in diametro per più di 152 mm. Occorre inoltre un telaio di reazione in grado di sopportare il carico totale da applicarsi alla piastra, un martinetto idraulico di adeguata capacità e con contatto sferico, due o più trasduttori di spostamento con precisione di 0.03 mm e corsa di 25 mm e infine un'asta di riferimento a cui vincolare i trasduttori. L'asta di riferimento va collocata ad una distanza di 2.4 m dalla circonferenza della piastra.

Occorre preparare un letto di gesso e sabbia prima di collocare la piastra di prova. Successivamente si posizionano le piastre concentriche. Occorre evitare che il terreno, in superficie o al fondo di uno scavo subisca perdita di umidità in seguito all'esposizione all'aria. Se si usano unicamente due trasduttori andranno posizionati alle estremità di un diametro. Tre trasduttori verranno collocati a 120°. La piastra viene precaricata due volte in modo da imporre un cedimento compreso tra 0.25 e 0.51 mm, dopodichè si dà inizio alla prova vera e propria incrementando il carico e registrando il cedimento in condizioni monotone o cicliche.

## ESECUZIONE DELLA PROVA SU ROCCE

E' preferibile utilizzare martinetti piatti di sezione anulare con diametro compreso tra 0.5 e 1.0 m (Figura 3B26). Gli spostamenti vengono misurati con trasduttori del tipo LVDT, dotati di precisione pari a  $\pm 0.002$  mm e sensibilità pari a  $\pm 0.001$  mm, e/o estensimetri multipli cementati all'interno di fori di sondaggio carotati NX (diametro 76 mm) aventi profondità pari a circa 6 volte il diametro del martinetto (Figura 3B26). Il carico applicato viene misurato mediante trasduttori di pressione aventi precisione pari a  $\pm 0.14$  MPa e sensibilità pari a  $\pm 0.07$  Mpa oppure mediante celle di forza aventi precisione pari a  $\pm 4.4$  kN e sensibilità pari a  $\pm 2.2$  kN.



**Figura 3B26** – Prova di carico su piastra

Occorre predisporre, mediante opportuni mezzi di scavo scelti in relazione al tipo di roccia, una superficie avente diametro pari a circa 1.5-2.0 volte quello del martinetto piatto. Su tale superficie occorre gettare, previa pulizia dell'area di scavo con getti d'acqua, del calcestruzzo, utilizzando opportune casseforme, di spessore non superiore a 120 mm per un martinetto avente diametro di 1.0 m. Per diametri inferiori occorrerà ridurre lo spessore del getto. Occorre evitare la presenza di bolle d'aria tra martinetto e spessore in calcestruzzo. Al di sopra del martinetto viene collocato un pannello truciolare (spessore 13 mm) su cui poggia una piastra d'acciaio. Il contrasto è realizzato mediante quattro colonne (Figura 3B26). Se la prova viene eseguita a piano campagna, occorre prevedere un solo martinetto ed un'adeguata struttura di contrasto. Misure dello spostamento della superficie rocciosa vanno rilevate:

- lungo il perimetro esterno del martinetto in almeno 6 punti equidistanti tra loro;
- lungo il perimetro interno del martinetto in almeno tre punti equidistanti tra loro.

Il sistema di supporto dei trasduttori deve essere esterno alla zona di influenza ed in nessun caso va posizionato sul sistema di carico.

Misure di spostamento all'interno dell'ammasso roccioso vengono rilevate mediante estensimetri multibase (Figura 3B26). I punti di ancoraggio vanno selezionati accuratamente ispezionando preventivamente le carote ed il foro stesso mediante una sonda o altra attrezzatura idonea. La Figura 3B26 riassume i criteri da seguire nello stabilire i punti di ancoraggio.

Il corretto funzionamento di tutta l'attrezzatura va preventivamente verificato.

## 2B2.11.2 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

### TERRENI

La prova consente di determinare direttamente la capacità portante della piastra. Il valore di capacità portante sperimentalmente determinato può essere estrapolato alla fondazione reale. Con riferimento alle formule di capacità portante disponibili è possibile ricavare dalla pressione limite il valore della resistenza al taglio non drenata delle argille o i parametri di resistenza al taglio dei terreni a grana grossa. Inoltre la prova consente di determinare il modulo di deformazione dalla seguente relazione basata sulle ipotesi di mezzo elastico isotropo ed omogeneo:

$$\Delta s = \frac{\Delta p}{E} \cdot D \cdot (1 - \nu^2) \cdot C_d \quad (3B.14)$$

dove D è il diametro della piastra,  $\nu$  ed E sono rispettivamente il coefficiente di Poisson ed il modulo di Young del terreno,  $\Delta s$  e  $\Delta p$  sono spostamenti e pressioni applicati alla piastra e  $C_d$  ingloba il fattore di forma e di approfondimento della fondazione.

E' anche possibile ricavare il coefficiente di sottofondo alla Winkler:

$$k = \frac{\Delta p}{\Delta s} \quad (3B.15)$$

### ROCCE

#### Piastra circolare:



$$E = \frac{(1 - \nu^2) \cdot p \cdot D}{s_c} \quad (3B.16)$$

dove:  $p$ =pressione applicata;  $S_c$ =cedimento al centro dell'area caricata.

$$E = \frac{2(1 - \nu^2) \cdot p \cdot D}{s_b} \quad (3B.17)$$

dove:  $S_b$  =cedimento al bordo dell'area caricata.

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p}{s_z} \left[ (D^2 / 4 + z^2)^{1/2} - z \right] - \frac{(1 + \nu) \cdot p \cdot z}{s_z} \left[ z \cdot (D^2 / 4 + z^2)^{-1/2} - 1 \right] \quad (3B.18)$$

dove  $S_z$  =cedimento al centro dell'area caricata alla profondità  $z$ .

### Piastra anulare

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p \cdot (R2 - R1)}{s_c} \quad (3B.19)$$

dove:  $S_c$  = cedimento al centro dell'area caricata;  $R2$ = raggio esterno,  $R1$ = raggio interno.

$$E = \frac{4(1 - \nu^2) \cdot p \cdot (R2 - R1)}{s_b} \quad (3B.20)$$

dove:  $S_b$  = cedimento al bordo dell'area caricata.

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot p}{s_z} \left[ (R2^2 + z^2)^{1/2} - (R1^2 + z^2)^{1/2} \right] + \frac{(1 + \nu) \cdot p \cdot z^2}{s_z} \left[ (R1^2 + z^2)^{-1/2} - (R2^2 + z^2)^{-1/2} \right] \quad (3B.21)$$

dove  $S_z$  =cedimento al centro dell'area caricata alla profondità  $z$ .

Il cedimento baricentrico sotto l'area caricata può essere espresso mediante le equazioni (3B.18) e (3B.21) e più in generale:

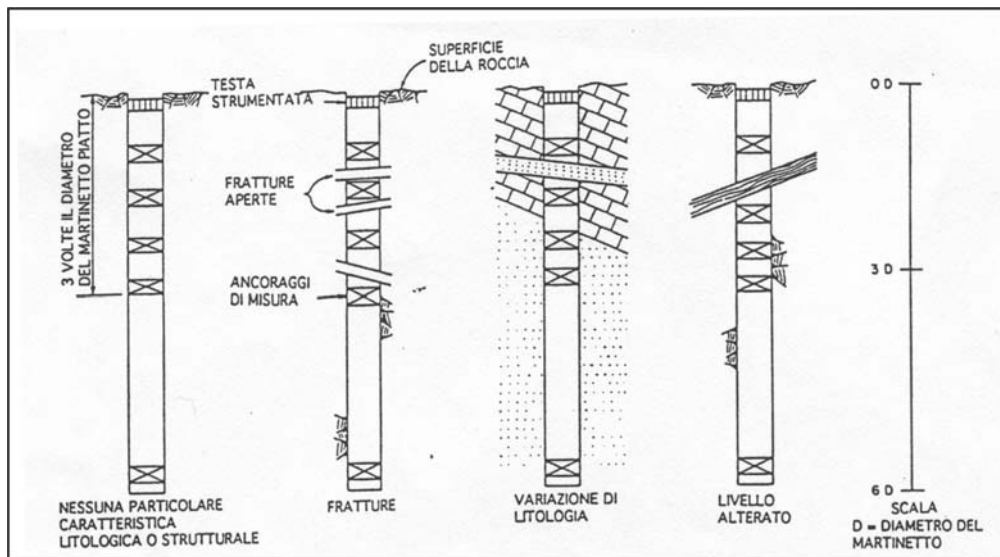
$$s_z = \frac{p}{E} K_z \quad (3B.22)$$

il modulo E può quindi essere ricavato dallo spostamento relativo tra due posizioni al di sotto del centro dell'area caricata nel modo seguente:

$$E = p \cdot \frac{K_{z1} - K_{z2}}{s_{z1} - s_{z2}} \quad (3B.23)$$

dove:  $K_{z1}$ ,  $K_{z2}$  coefficienti geometrici alle profondità  $z1$  e  $z2$  rispettivamente,  $s_{z1}$ ,  $s_{z2}$  = spostamenti alle profondità  $z1$  e  $z2$  rispettivamente.

*Attrezzature e modalità esecutive dovranno fare riferimento alle norme SNV 670317a (1981), ASTM D1194, D1195, D1196-93, D4394 e D4395-84, D4403.*



**Figura 3B27 – Esempio di ubicazione degli ancoraggi**

### **(3B3) PROVE DI LABORATORIO**

Nella scelta e nella programmazione delle prove di laboratorio da eseguire in un determinato sito deve essere tenuto sempre presente quale siano gli obiettivi.

L'obiettivo prioritario è quello di poter avere tutte le informazioni per poter effettuare una scelta corretta delle prove da eseguire sui campioni indisturbati in relazione alla tipologia di terreno presente e al grado di disturbo, ma soprattutto in relazione alle finalità del progetto (valutazione effetti locali su un'area, interventi di progettazione edifici...).

Il livello minimo delle prove da eseguire dovrebbe essere quello di poter eseguire oltre alle granulometrie anche la prova di taglio diretta. Per quest'ultima occorre un provino in buone condizioni. Da questa prove è possibile ottenere tutti i parametri di resistenza al taglio, sia di picco che residuo e inoltre poter determinare l'angolo di attrito a volume costante.

Tuttavia dove possibile (ossia dove il materiale è ancora più integro) è sempre preferibile effettuare prove triassiali, in quanto più complete, perché permettono di controllare l'aumento di volume in relazione alla possibilità di consolidare il provino e controllare il drenaggio.

Inoltre da considerare anche che mentre nella prova di taglio diretto i tre provini hanno dimensioni ridotte (sono di dimensioni quadrate altezza 2cm e diametro circa 60mm) e quindi è possibile ricavare più provini da una sola fustella; la prova triassiale richiede sempre 3 provini (a volte anche 2) ma con dimensioni più elevate (quasi il doppio – diametro 50mm e altezza 10-12cm).

Un'altra tipologia di prova differente dalle precedenti in quanto a risultati ottenuti è la prova edometrica. Anche questa dovrebbe essere sempre preferita in quanto fornisce informazioni complete sulla storia tensionale del deposito prima del prelievo. Quindi per esempio permette di capire se un terreno è sovraconsolidato o meno e capire quindi quale può essere il percorso a rottura o la capacità portante dello stesso. Inoltre fornisce tutte le informazioni sulla consolidazione del terreno in modo da poter valutare gli eventuali cedimenti.

Naturalmente il terreno per questo tipo di prova deve essere completamente integro (indisturbato). Il provino da utilizzare è abbastanza limitato come dimensioni.

Tutte queste sono prove considerate di tipo statico e permettono di ricavare sia i parametri di resistenza al taglio e i parametri di deformabilità del terreno. Sono prove da realizzare qualora si intervenga in un'attività di progettazione

antisismica e devono essere previste nei campioni più superficiali del terreno (in generale entro 10-15m del terreno di fondazione).

Nella scelta della prova occorre valutare anche, oltre a quanto già detto, il tipo di intervento progettuale da realizzare. Infatti se deve essere realizzato un progetto di ampliamento, adeguamento sismico, verifiche sismiche su edifici esistenti allora sono da preferire prioritariamente i parametri di resistenza al taglio rispetto a quelli edometrici in modo da poter determinare e verificare la capacità portante del terreno.

Se invece si tratta di nuove costruzioni il discorso è diverso e più ampio. Entrano in gioco tutti i parametri di cui sopra.

Per quanto riguarda invece tutte le prove dinamiche, per la scelta bisogna aver chiari quali sono gli obiettivi. Normalmente tali risultati possono essere usati sia per modellazioni monodimensionali su singoli siti (edifici strategici) o su vaste aree (anche modellazioni bidimensionali). Pertanto è opportuno fornire nella maniera più corretta possibile la curva  $G-\gamma$  e la curva  $D-\gamma$ . Questo deve essere valutato anche in relazione alla tipologia di terremoto atteso (magnitudo) e alla eventuale durata.

Vi sono sostanzialmente due tipologie di prove: colonna risonante + taglio torsionale ciclico e le prove triassiali.

Le prime tipologie di prove sono sostanzialmente simili, cioè permettono di ricostruire la curva  $D$  e  $G$  a piccole e medie deformazioni (tutto il plateau fino alla prima variazione di pendenza).

Per le piccolissime deformazioni è opportuno ricavare tali valori dalle misure in situ ( $G_0$  e  $D_0$ ).

Le seconde tipologie di prove (triassiali cicliche e triassiali con misure locali delle deformazioni) sono da preferire sempre perché a differenza delle precedenti permettono di ricostruire la curva del modulo di taglio  $G$  in maniera completa e più rappresentativa sia per le piccole deformazioni sia per le grandi deformazioni arrivando anche fino a rottura.

Inoltre con tali prove è possibile ottenere ulteriori informazioni circa la verifica della sovrappressione interstiziale e le verifiche a liquefazione (triassiale ciclica) e la storia tensionale del materiale e i parametri di taglio. L'unico aspetto negativo di tali prove consiste nell'impossibilità di ricavare la curva del Damping Factor. Pertanto sotto questo aspetto è necessario combinare queste prove con quelle precedenti.

Un altro aspetto da valutare nella scelta è la possibilità di tener conto, nella prova in cella triassiale con misure locali della deformazione, dell'anisotropia del terreno durante la fase di consolidazione mediante il controllo del  $K_0$ . Pertanto rappresenta più realisticamente la situazione reale. Da questo punto di vista la CR e il Taglio torsionale vengono realizzati previa consolidazione isotropa.

La scelta tra la prova triassiale ciclica e quella con misure locali della deformazione è legata al fatto che entrambi possono portare il provino a rottura, ma mentre la prima prevede un percorso tensionale ciclico portando il provino a rottura dopo numerosi cicli in cui il terreno è sollecitato (rappresenta meglio un materiale già precedentemente sollecitato), il secondo arriva direttamente a rottura senza effettuare cicli di carico-scarico.

Per tutte le prove di laboratorio, l'Impresa esecutrice dovrà obbligatoriamente indicare, sia sulle fustelle, sia sui sacchetti per prove SPT, le seguenti informazioni:

- committente
- località prelievo
- tipo di campione (sigla)
- n° sondaggio
- n° campione
- profondità di prelievo e tratto di terreno campionato (evidenziando in tal modo le differenze tra lo spessore di terreno prelevato e la lunghezza della fustella).
  - Le prove di laboratorio sono distinte in due categorie:
    - prove convenzionali;
    - prove finalizzate alle analisi di risposta sismica
  - Le prove di laboratorio convenzionali hanno lo scopo di:
    - classificare e identificare i materiali (prove di classificazione: CLASS);
    - determinare la storia tensionale e lo stato tensionale iniziale del deposito (Edometrie: ED);
    - determinare i parametri di comprimibilità e permeabilità (Edometrie: ED)
    - determinare i parametri di resistenza e la resistenza al taglio non drenata (triassiali convenzionali TX e taglio diretto TD)

Le prove finalizzate alle analisi di risposta sismica hanno essenzialmente lo scopo di determinare le caratteristiche di deformabilità (modulo di taglio) e smorzamento dei terreni al variare della deformazione.

### **3B3.1 PROVE CONVENZIONALI**

#### 3B3.1.1 CLASSIFICAZIONE

Per l'esecuzione di tali prove si farà riferimento alle norme e raccomandazioni di seguito citate AGI 1994, ASTM D4318-00, D2487-00, C136-01, D1140-00, D2217-85, D422-63, D 2974 – 87, D4648-00, D2216-98, D854-02, CNR UNI 10010/64, CNR UNI 10013/64, CNR UNI 10014/64.

Si ritiene opportuno, per una completa classificazione procedere alle seguenti determinazioni:

descrizione del campione (informazioni sul tipo di campionatore e sulle condizioni del campione. Nel caso di campioni indisturbati allegare foto con colorimetro dopo averlo scortecciato e misure con torvane o pocket penetrometer). Nella relazione tecnica andranno indicati ogni osservazione sulla fustella (indicare la classe del campionatore, specificando inoltre la qualità del tubo campionatore e del tagliente) e sul campione di terreno (classe del campione, specificando quindi il grado di disturbo, eventuale rammollimento e probabili cause).

- contenuto naturale in acqua;
- peso di volume;
- peso unitario secco (o densità secca);
- peso specifico del solido;
- granulometria-aerometria;
- limiti di Atterberg;
- contenuto dei carbonati;
- sostanze organiche.

L'analisi granulometrica è l'insieme di quelle operazioni occorrenti per determinare la distribuzione percentuale, per massa, dei grani secondo le loro dimensioni.

Per il trattenuto al setaccio 200 ASTM si opererà per vagliatura meccanica a secco o per via umida. La frazione fine passante al suddetto setaccio sarà analizzata per sedimentazione o mediante aerometria.

Oltre alla curva granulometrica ed alla classificazione in accordo alle raccomandazioni AGI verranno forniti i seguenti valori:

$d_{max}$  = diametro massimo dei grani

$d_{50}$  = diametro medio dei grani

$U_c = d_{60} / d_{10}$  = coefficiente di uniformità

$C_c = d_{30} / (d_{60} * d_{10})$  = coefficiente di curvatura

Per ciò che attiene ai limiti di Atterberg oltre ai valori dei limiti liquido e plastico andranno fornite le singole determinazioni, e, per il limite liquido il grafico delle misure sperimentali (contenuto d'acqua – numero colpi).

Per le altre grandezze andranno indicati i valori determinati associati al prelievo per cui le determinazioni sono state eseguite.

### 3B3.1.2 EDOMETRIA

Lo scopo di tale prova è quello di determinare sia i parametri di deformabilità e compressibilità ed i coefficienti di consolidazione primaria ( $C_v$ ) e secondaria ( $C_\alpha$ ), sia la storia tensionale del deposito stimando la tensione di preconsolidazione e quindi il grado di sovraconsolidazione (OCR). Nel caso di prove edometriche in edometri strumentati per la misura di  $K_0$  è possibile tentare la misura diretta dello sforzo orizzontale.

La prova consiste nel comprimere un elemento di terreno di forma cilindrica con diametro pari a circa 2.5 l'altezza racchiuso all'interno di un anello rigido e pertanto lateralmente confinato ed impedito nelle deformazioni laterali. La compressione avviene applicando un carico verticale al provino in modo continuo o a gradini. Nel primo caso si avranno prove edometriche continue a velocità di spostamento costante, nel secondo caso prove ad incremento di carico.

Le prove a incremento di carico vengono eseguite con progressione geometrica dello sforzo verticale imposto ( $\Delta\sigma_v / \sigma_v = 1$ ) e mantenimento di ciascun gradino di carico per 24 ore, salvo diverse indicazioni.

Le misure delle deformazioni verticali andranno eseguite ai tempi indicati nelle raccomandazioni AGI e nelle norme menzionate.

Si suggerisce di misurare gli spostamenti verticali con LVDT aventi corsa pari a 2.5 mm e precisione pari a 0.1% FSO.

Nei risultati di prova occorrerà indicare:

- Cantiere, sondaggio, profondità e data di esecuzione
- Peso umido iniziale e finale
- Peso secco
- Altezza iniziale e finale

- Diametro
- Peso specifico dei grani
- Indice dei vuoti iniziale
- Grado di saturazione
- Peso di volume e contenuto d'acqua iniziale e finale
- Peso di volume secco
- Tabelle e grafici relativi alle seguenti grandezze (sforzi verticali, deformazioni verticali al t100, indice dei vuoti al t100, modulo edometrico,  $C_v, C_{\alpha\epsilon}, K$ );
- Diagrammi cedimenti-tempo per ogni gradino di carico. Di norma il tempo sarà riportato in scala logaritmica, salvo diverse indicazioni.

In alternativa alle prove ad incremento di carico è possibile eseguire prove edometriche a velocità di deformazione costante che consentono un notevole risparmio di tempo. Per le modalità di prova si rimanda alle indicazioni contenute nella norma ASTM D4186-89.

Infine vi sono anche prove edometriche con edometri strumentati per la misura della tensione orizzontale. La misura avviene mediante uno speciale anello di contenimento del provino. L'anello, strumentato con estensimetri compensatori, è confinato da una cella anulare pressurizzata ad olio.

All'applicazione del carico verticale, il provino genera tensioni orizzontali che sono compensate dalla pressione della cella anulare,  $\sigma_h$ . La pressione è governata da una pompa idraulica che ne regola l'entità in maniera tale da impedire le deformazioni radiali (gli estensimetri devono mantenere lo zero di partenza).

Questa apparecchiatura consente di misurare il rapporto  $K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$  durante tutto il corso della prova sia in fase di carico che di scarico.

### 3B3.1.3 TRIASSIALI CONVENZIONALI

Le prove triassiali convenzionali hanno lo scopo di determinare i parametri di resistenza al taglio o la resistenza al taglio non drenata.

#### PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE

Questa prova viene impiegata nel caso delle rocce utilizzando presse convenzionali. Le raccomandazioni ISRM forniscono indicazioni a riguardo di:



- forma e dimensione del provino:
- estremità del provino e dei piatti della pressa:
- velocità di carico:
- precisione nelle misure della deformazione e dello sforzo ed intervalli di misura.

Le prove triassiali convenzionali andranno eseguite secondo le raccomandazioni AGI e le apposite norme ASTM già citate. Si assume che il percorso di sollecitazione a rottura sia di tipo per compressione per carico con sforzo laterale totale costante. Tuttavia è possibile seguire differenti percorsi di sollecitazione in relazione al problema in esame. Le condizioni di prova di seguito riportate si riferiscono alla compressione per carico. Le indicazioni relative alla presentazione dei risultati sono di carattere generale.

I provini cilindrici di terra dovranno essere confezionati in maniera tale che il diametro non sia inferiore a 38.1 mm e l'altezza di 2 - 2,5 volte il diametro.

La prova completa dovrà essere eseguita su almeno due provini per ogni campione.

Le prove potranno essere del tipo:

- Non Consolidata - Non Drenata : il provino è inizialmente soggetto ad una compressione isotropa non drenata e successivamente viene portato a rottura in compressione per carico (aumento delle tensione verticale) sempre in condizioni non drenate;
- Consolidata - Non Drenata : il provino viene inizialmente consolidato isotropicamente e viene poi portato a rottura in compressione per carico in condizioni non drenate;
- Consolidata - Drenata : il provino viene inizialmente consolidato isotropicamente o anisotropicamente e viene poi portato a rottura in compressione per carico in condizioni drenate.

La condizione non drenata viene realizzata impedendo il drenaggio. La velocità di applicazione del carico deve consentire l'equalizzazione delle sovrappressioni interstiziali (convenzionalmente si adotta una velocità di deformazione pari a 1mm/min). La condizione drenata viene realizzata con drenaggio aperto adottando una velocità di applicazione del carico sufficientemente bassa in modo da lasciar dissipare la sovrappressione interstiziale. Il tempo per l'esecuzione di tale tipo di prova dovrà essere ricavato in relazione all'altezza del provino, al coefficiente di consolidazione e ad un coefficiente adimensionale, funzione delle condizioni di drenaggio del provino.

La rottura in condizioni di compressione per carico la si realizza mantenendo costante la pressione di contenimento esercitata idraulicamente in cella, mentre si dovrà aumentare progressivamente la pressione verticale sino alla rottura del provino stesso. La prova dovrà essere eseguita a velocità di deformazione costante.

Una volta completata la prova dovrà essere fornito:

per la prova Consolidata – Drenata

- diagramma  $q - \varepsilon_a$  (sforzo deviatorico  $\sigma_1 - \sigma_3$  in funzione della deformazione assiale);
- diagramma  $\varepsilon_v - \varepsilon_a$  (deformazione volumetrica in funzione della deformazione assiale);
- diagramma t-s' (percorso delle sollecitazioni efficaci).

per la prova Consolidata - Non Drenata

- diagramma  $q - \varepsilon_a$ ;
- diagramma  $\Delta u - \varepsilon_a$  (sovrapressione interstiziale in funzione della deformazione assiale);
- diagramma t-s'.

per la prova Non Consolidata - Non Drenata

- diagramma  $q - \varepsilon_a$ ;
- diagramma  $\Delta u - \varepsilon_a$ ;
- diagramma t-s'.

#### 3B3.1.4 TAGLIO DIRETTO

Le prove di taglio diretto hanno lo scopo di determinare i parametri di resistenza al taglio di picco e residua. Sono prove di tipo drenato che si possono eseguire su terreni sciolti o rocce utilizzando opportune apparecchiature. La forma del provino è di norma cilindrica con diametro pari a 2.5 l'altezza. Forme diverse si possono avere soprattutto nel caso di prove di taglio in roccia. La prova di taglio diretto consiste in generale nell'imporre la rottura per scorrimento lungo un piano prefissato. Di norma questo è realizzato in laboratorio utilizzando una scatola di taglio divisa in due metà tali che si possa realizzare lo scorrimento relativo di una metà rispetto all'altra con un piano di rottura orizzontale.

Le prove vanno eseguite su almeno tre diversi provini dello stesso materiale consolidati a differenti pressioni in condizioni confinate o Ko. Il livello delle

tensioni di consolidazione andrà stabilito in relazione al problema in esame e sarà applicato mediante l'imposizione di un carico verticale diretto (N) o agente attraverso un braccio di leva bilanciato. La fase di consolidazione durerà 24 ore. Nel corso di tale fase andranno rilevati gli spostamenti verticali nel tempo al fine di definire la velocità di spostamento da applicare in fase di rottura, che, secondo le raccomandazioni AGI, garantisca la condizione di drenaggio.

Più precisamente, dalla curva assestamenti radice del tempo si determinerà il  $t_{100}$ .

Si assume un tempo a rottura  $t_f > 10t_{100}$  ed uno spostamento a rottura ( $\delta_f$ ) funzione del tipo di materiale (argille tenere 8 mm, argille sovraconsolidate 2-5 mm, argille marnose 1-2 mm, sabbie 1-5 mm). La velocità di spostamento in fase di rottura è stabilita in base alla seguente relazione:

$$v = \delta_f / t_f \quad (3B.24)$$

Completata la fase di consolidazione si procederà a quella di taglio imponendo lo scorrimento relativo delle due metà della scatola di taglio a velocità costante pari al valore prefissato. Nel corso della prova occorrerà misurare la forza orizzontale T.

Per ogni provino verrà determinata la curva sforzi di taglio spostamenti orizzontali che consente di individuare la condizioni di picco. Per la determinazione delle condizioni residue si procederà alla ripetizione dei cicli di sollecitazione secondo le raccomandazioni AGI.

La prova viene interpretata assumendo che gli sforzi di taglio e normali agenti sul piano di scorrimento in condizioni di picco rappresentino gli sforzi a rottura sul piano di rottura. Tali sforzi vengono determinati nel seguente modo:

$$\tau = \frac{T}{A}; \quad \sigma = \frac{N}{A} \quad (3B.25)$$

dove: T = Forza orizzontale applicata al provino; N = Forza normale applicata al provino; A = area del provino. L'area del provino è determinata nel seguente modo:

$$A = 2 \cdot R^2 \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{s}{2 \cdot R} \right) - s \cdot \sqrt{R^2 - \frac{s^2}{4}} \quad (3B.26)$$

dove:

R: raggio del provino;

s: spostamento tra punti corrispondenti appartenenti alle due superfici (spostamento orizzontale).

Si consiglia di misurare la forza T mediante cella di carico e gli spostamenti verticale ed orizzontale mediante LVDT con corsa 2.5 e 10 mm rispettivamente e precisione pari a 0.1 % FSO.

Date due terne (picco e residuo) di valori  $\tau, \sigma$  a rottura è possibile definire l'involuppo di picco e quello residuo nel piano di Mohr.

Nel presentare i risultati occorrerà fornire la curva assestamenti tempo della fase di consolidazione, la curva sforzi di taglio spostamenti orizzontali relativa alla fase di taglio, la curva spostamenti verticali spostamenti orizzontali relativa alla fase di taglio ed infine i valori di resistenza di picco e residua di almeno tre provini in tabella e diagrammati nel piano di Mohr. Inoltre andranno riportate le informazioni relative alla località di prelievo, sondaggio, campione, profondità.

### **3B3.2 PROVE FINALIZZATE ALLE ANALISI DI RISPOSTA SISMICA**

Le prove di laboratorio sono finalizzate alla determinazione dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica. Tali parametri dipendono dal modello di comportamento e quindi dal tipo di analisi che si intende realizzare.

Le analisi di risposta sismica eseguite nell'ambito del progetto VEL sono di norma di tipo lineare-equivalente con geometria 1D e/o 2D. Per questo tipo di analisi è necessario definire le curve  $G-\gamma$  e  $D-\gamma$  e (per geometrie 2D, il coefficiente di Poisson, assunto costante). Solamente nel caso di analisi veramente non-lineari è necessario definire il legame sforzi-deformazioni in carico e scarico. Le prove di seguito specificate consentono di determinare le caratteristiche sforzi-deformazioni di interesse in relazione al metodo di analisi scelto.

E' opportuno che il laboratorio incaricato, per una corretta interpretazione dei risultati, fornisca insieme ad essi anche una relazione in cui vengano specificate le modalità seguite per ottenerli.

Verranno ora riassunte le modalità di esecuzione, le apparecchiature e i campi di applicazione relativamente alle seguenti prove dinamiche di laboratorio:

- prove di colonna risonante e di taglio torsionale ciclico;
- prova triassiale non convenzionale con misura locale delle deformazioni.

#### 3B3.2.1 COLONNA RISONANTE E TAGLIO TORSIONALE CICLICO

##### SCOPO DELLA PROVA

La prova di colonna risonante (talora accoppiata alla prova di taglio torsionale ciclico) è una prova di laboratorio che consente di misurare il modulo di taglio e il rapporto di smorzamento in corrispondenza di un intervallo deformativo compreso tra  $10^{-4}$  % e  $10^{-1}$  %, cioè compresa nel campo elastico a fronte di una sollecitazione pulsante ciclica.

La prova è eseguita utilizzando una apparecchiatura del tipo "fixed-free", cioè con la base del provino fissa e la testa libera di ruotare (detta di Stokoe) oppure del tipo "fixed-fixed" (detta di Hardin). Entrambe le apparecchiature impiegano un sistema elettromagnetico per applicare una torsione ciclica al provino.

La prova fornisce quindi:

- la legge di decadimento del modulo di taglio  $G$  con l'ampiezza della deformazione di taglio  $\gamma$  (curve  $G-\gamma$  come visibile in figura 4B4a)
- l'andamento del rapporto di smorzamento  $D$  al variare dell'ampiezza della deformazione di taglio  $\gamma$  (curve  $D-\gamma$  come visibile in figura 4B4b)

Il principale vantaggio della prova risulta essere l'accuratezza nella misura della rigidità a piccole deformazioni.

#### CONDIZIONE DI AFFIDABILITÀ DELLA PROVA

Il provino su cui viene eseguita la prova generalmente del diametro di 50mm e altezza 100mm, deve essere di ottima qualità e avere forma cilindrica piena o cava. La prova è applicabile a terreni coesivi ed incoerenti confezionati sotto forma di provini cilindrici di diametro compreso fra 38.1 e 71 mm e di altezza pari a 2 volte il diametro.

#### SCHEMA DELLA PROVA

Il sistema di sollecitazione è costituito da una struttura resa solidale alla testa del campione nella quale sono alloggiati dei magneti che, interagendo con delle bobine attraversate da corrente elettrica, trasferiscono al campione una torsione ciclica di frequenza pari al segnale in arrivo.

La prova di colonna risonante consiste nell'applicare, ad una delle estremità del provino di forma cilindrica, mantenendo fissata l'altra, un momento torcente  $M$  che varia nel tempo con legge sinusoidale, del tipo:

$$M = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3B.27)$$

dove  $A$  è l'ampiezza e  $\omega$  la pulsazione legata alla frequenza  $f$  dalla  $A = 2\omega f$ .

Fissando l'ampiezza  $A$  della sollecitazione e facendo variare la frequenza  $f$  si determina la frequenza di risonanza. La prova viene eseguita in condizioni non drenate su provini cilindrici pieni o cavi usualmente incastrati alla base imponendo una coppia torcente ciclica (sinusoidale) alla testa del provino.

Il provino deve essere precedentemente consolidato isotropicamente alla pressione verticale geostatica. La saturazione del provino è avvenuta mediante un processo di back-pressurizzazione sino al raggiungimento di valori del parametro  $B$  di Skempton superiori a 0.95.

La prova consiste nel determinare la frequenza di risonanza ( $f_n$ ). Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro che misura il moto alla testa, sono visualizzati sugli assi X – Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza.

La condizione di risonanza viene ottenuta variando manualmente la frequenza di eccitazione e componendo sull'oscilloscopio la tensione eccitatrice e la risposta dell'accelerometro. La condizione di risonanza è verificata quando i due segnali sono sfasati di  $90^\circ$ . Tale condizione si realizza allorché sull'oscilloscopio si visualizza un'ellisse in posizione perfettamente verticale.

I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico.

Vengono utilizzati diversi metodi per la determinazione di  $f_n$ . A titolo di esempio si può ricavare  $f_n$  dalla curva di amplificazione ottenuta per un appropriato intervallo di frequenze eccitrici. Nota la frequenza di risonanza, è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio utilizzando la teoria di propagazione delle onde elastiche nelle aste prismatiche. Le equazioni risolventi sono le seguenti:

$$\beta \tan \beta = I_s / I_t \quad (3B.28)$$

$$G_{eq} = \rho(2\pi f_n h / \beta)^2 = \rho V_s^2 \quad (3B.29)$$

dove:  $I_s$  e  $I_t$  sono rispettivamente i momenti polari di massa del provino e del motore,  $\beta = \frac{2\pi f_n h}{V_s}$  con  $h$  = altezza del provino.

L'equazione (B.28) viene risolta per tentativi. Una volta determinato è possibile dalla (B.29) ricavare il modulo di taglio ciclico  $G_{eq}$ . Inoltre conoscendo la rotazione subita dal provino è possibile determinare la deformazione di taglio  $\gamma$  del provino.

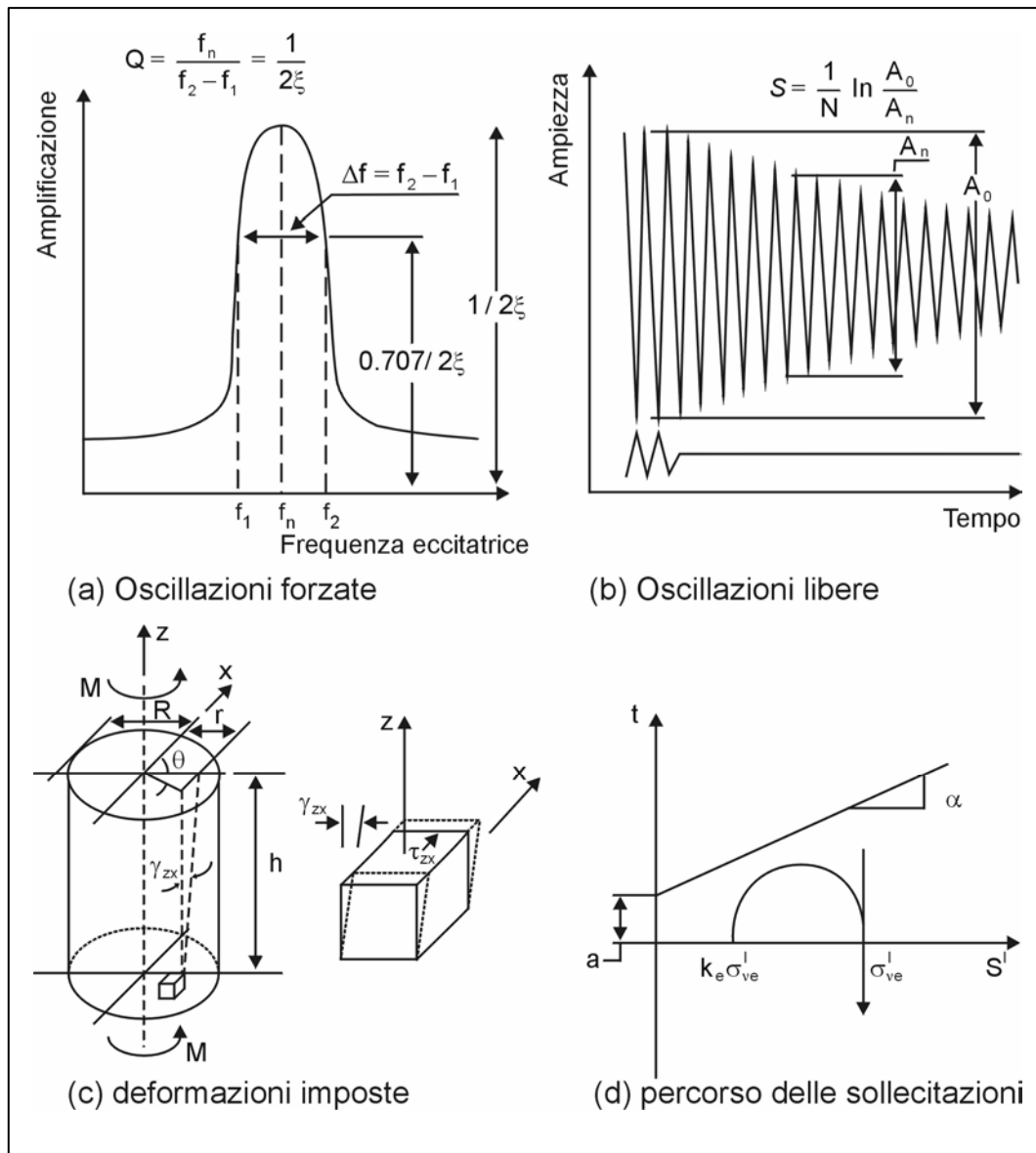
Dalla curva di amplificazione è possibile ottenere il rapporto di smorzamento determinando le frequenze  $f_1$  ed  $f_2$  che corrispondono ad ampiezze pari a 0.707 l'ampiezza di risonanza ed utilizzando la seguente relazione:

$$D_{\text{mag}} = \frac{f_1 - f_2}{2f_n} \quad (3B.30)$$

Interrompendo l'eccitazione è possibile registrare le oscillazioni libere e determinare il rapporto di smorzamento dal decremento logaritmico dopo un certo numero di cicli:

$$D_{\text{log}} = \frac{\ln(A_0 / A_N)}{2\pi N} \quad (3B.31)$$

Dove:  $A_0$  è l'ampiezza del ciclo in condizioni stazionarie mentre  $A_N$  è l'ampiezza relativa all'Nesimo ciclo successivo all'interruzione dell'eccitazione.



**Figura 3B28 – Schema prova colonna risonante**



L'equivalenza delle due espressioni per il calcolo del rapporto di smorzamento è verificata in condizioni di risonanza oppure nell'ipotesi che lo smorzamento sia indipendente dalla frequenza.

Le misure vengono ripetute applicando valori crescenti della coppia torcente ciclica. Per ogni livello di sollecitazione è possibile misurare, utilizzando ad esempio un accelerometro, il corrispondente livello di deformazione a taglio ( $\gamma$ ). La deformazione di taglio varia linearmente con la distanza radiale (R) assumendo un valore massimo al bordo della sezione e nullo in centro. Convenzionalmente, nel caso di provini cilindrici pieni, si assume come rappresentativa la deformazione a taglio in semplice ampiezza in corrispondenza di  $2/3 R$  (Figura 3B28):

$$\gamma = \frac{2}{3} R \frac{\theta}{h} \quad (3B.32)$$

dove:  $\theta$  è la rotazione angolare.

Nel caso di provini cilindrici cavi si ha il vantaggio che la deformazione a taglio risulta più uniforme (Figura 3B28). Il valore medio viene calcolato nel seguente modo:

$$\gamma = \frac{2}{3} \frac{\theta(R_e^3 + R_i^3)}{h(R_e^2 - R_i^2)} \quad (3B.33)$$

Dove:  $R_e$  = raggio esterno ed  $R_i$  = raggio interno.

La prova di colonna risonante fornisce per ogni livello di sollecitazione imposto le seguenti grandezze  $G_{eq}$ ,  $D_{mag}$ ,  $D_{log}$  e  $\gamma$ . La prova è eseguita in controllo di carico seguendo un percorso delle sollecitazioni del tipo indicato in Figura 3B28. I livelli deformativi che si possono imporre al provino variano nell'intervallo 0.0001 - 0.5 %.

Potendo operare a livelli deformativi molto bassi la prova fornisce i valori di  $G_o$  e  $D_o$ .

La prova di Colonna Risonante rappresenta uno dei metodi più precisi e ripetibili per la misura del modulo di taglio a piccole deformazioni. Ciò rappresenta il principale pregio della prova e consente, tra l'altro, di valutare l'eventuale danneggiamento elastico che i provini hanno subito in seguito all'applicazione di livelli di deformazione elevati (pre-straining) misurando  $G_o$  prima e dopo il prestraining. Per quel che concerne la determinazione delle curve  $G$ - $\gamma$  e  $D$ - $\gamma$ , occorre fare alcune considerazioni:

- la prova di colonna risonante impone velocità di deformazioni molto elevate e crescenti nel corso della prova, ad esempio da circa 10%/min sino a 3000%/min. La velocità di deformazione influenza la curva di decadimento del modulo e soprattutto il rapporto di smorzamento;
- la prova impone diverse centinaia o migliaia di cicli di sollecitazione al provino, il che è poco realistico;
- i parametri che si determinano sono utilizzabili unicamente in metodi elastico-equivalenti.

#### APPARECCHIATURA

Esistono diversi tipi di apparecchiature. In generale, le apparecchiature utilizzano provini cilindrici pieni con consolidazione solo di tipo isotropo. In alcuni casi si utilizzano provini cavi il che consente consolidazioni anisotrope con coefficiente di consolidazione minore di 1. L'apparecchiatura consiste di tre parti:

- sistema di eccitazione;
- cella di pressione;
- sistema di acquisizione dati.

#### SISTEMA DI ECCITAZIONE

Esso è costituito da:

- un generatore di funzioni arbitrarie (sinusoidali, rettangolari, triangolari, ecc.) che genera il segnale da inviare al motore elettrico che produce il momento torcente da applicare al provino;
- un amplificatore di potenza carica utilizzato per aumentare la potenza del segnale;
- un frequenzimetro che consente di misurare e modificare, una volta fissata l'ampiezza, la frequenza del segnale;
- un interruttore che consente di chiudere istantaneamente il circuito che collega il generatore di funzioni al motore elettrico e quindi di arrestare l'eccitazione per rilevare le oscillazioni libere.
- l'oscillatore torsionale, ovvero un motore elettrico costituito da magneti e avvolgimenti che si innesta direttamente sulla testa del provino senza attriti di sorta nella trasmissione della coppia torcente.

la cella di pressione, è composta da due piatti (inferiore e superiore) collegati da montanti e da un cilindro di acciaio o perspex. La tenuta della cella è garantita

da opportune guarnizioni. Sul piatto di base è collocato il piedistallo del provino ed il sistema di supporto del motore elettrico (oscillatore torsionale) per l'applicazione della coppia alla testa del provino

#### SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

Tale sistema si compone dei sensori e del sistema di acquisizione vero e proprio:

- un accelerometro fissato ad uno dei bracci dell'oscillatore, e quindi solidale col cappello e col provino, che serve a misurare la risposta in accelerazione del provino alla sollecitazione in termini di differenza di potenziale elettrico;
- un amplificatore di carica che consente di aumentare l'intensità della risposta per renderla meglio visualizzabile;
- un oscilloscopio a più canali, ad uno dei quali è collegato il generatore di funzioni e ad un altro l'accelerometro, in modo da visualizzare su un apposito monitor e registrare, quando viene attivata la memoria, l'eccitazione e la risposta del provino, in particolare sul monitor deve essere possibile rappresentare sia la risposta in funzione dell'eccitazione (scala XY) rappresentata da un'ellisse che la risposta e l'eccitazione sovrapposte in funzione del tempo (scala X,t e Y,t); nel primo caso per individuare la condizione di risonanza, che corrisponde alla forma più allungata dell'ellisse, e nel secondo caso per determinare il modulo di attenuazione quando viene interrotta l'eccitazione e si studiano le oscillazioni libere e viene attivata la memoria dell'oscilloscopio. In alternativa l'acquisizione può essere effettuata mediante schede A/D veloci collegate a PC.

#### 3B3.2.2 PROVA DI TAGLIO TORSIONALE CICLICO

L'apparecchio di taglio torsionale è in genere un adattamento della colonna risonante che prevede le seguenti modifiche: determinazione della coppia torcente applicata (misurata direttamente o stimata da opportune calibrazioni), misura della rotazione della testa del provino mediante una coppia di trasduttori di non contatto, applicazione di una storia dei carichi arbitraria e non necessariamente sinusoidale. La coppia massima è in genere di poco superiore a 1Nm. Ciò comporta l'impossibilità di raggiungere i livelli deformativi più elevati ed in generale le deformazioni massime risultano inferiori a 0.1 %.

Esistono tuttavia delle apparecchiature di taglio torsionale sviluppate indipendentemente e che consentono di raggiungere livelli deformativi anche elevati.

Dalle misure della coppia e della rotazione è possibile calcolare gli sforzi di taglio e le deformazioni a taglio. Per queste ultime valgono le considerazioni già sviluppate nel caso della colonna risonante. Gli sforzi di taglio sono valutati di regola mediante la seguente relazione:

$$\tau = \frac{4}{3\pi} \frac{(R_e^3 + R_i^3)}{(R_e^2 - R_i^2) \cdot (R_e^4 - R_i^4)} C \quad (3B.34)$$

dove C è la coppia.

Si eseguono di regola prove monotone e cicliche. Nel caso di prove cicliche si applicano sforzi di taglio di ampiezza crescente. Per ogni livello di sollecitazione si registrano di norma circa 30 cicli. Il numero minimo di acquisizioni per ciclo è circa 30.

E' possibile ricavare i seguenti moduli di deformazione o rigidezze da una prova monotona:

- |  |   |
|--|---|
| 1) $G_s = \tau / \gamma$                     | Modulo di taglio secante                      |
| 2) $G_t = d\tau / d\gamma$                   | Modulo di taglio tangente                     |
| 3) $G_o = \lim_{\gamma \rightarrow 0} (G_t)$ | Modulo di taglio iniziale o elastico (Zona 1) |

Nel caso di una prova ciclica è possibile ricavare:

- |                                       |                          |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 1) $G_{eq} = \tau_{SA} / \gamma_{SA}$ | Modulo di taglio ciclico |
|---------------------------------------|--------------------------|

con  $\tau_{SA}, \gamma_{SA}$  = rispettivamente sforzo di taglio e deformazione a taglio in singola ampiezza;

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 2) $D_{ist} = \Delta W / (4 \cdot \pi \cdot W)$ | Rapporto di smorzamento isteretico |
|---|------------------------------------|

dove  $\Delta W$  = area racchiusa nel ciclo,  $W$  = energia elastica immagazzinata pari a  $\gamma_{SA} \cdot \tau_{SA} / 2$ ; la definizione di rapporto di smorzamento isteretico coincide con quelle già introdotte unicamente in condizioni di risonanza oppure se si assume che lo smorzamento sia indipendente dalla frequenza.

Se si applicano cicli di piccola ampiezza è possibile ottenere il modulo  $G_o$ .

In conclusione, la prova torsionale consente di ricavare la curva sforzi-deformazioni di primo carico, detta anche curva scheletro da una prova di tipo monotono e quella di scarico e ricarico da una prova ciclica osservando

eventuali fenomeni di degradazione ciclica. I parametri ottenibili da prove di taglio torsionale sono quindi utilizzabili anche nell'ambito di metodi veramente non-lineari.

Le prove torsionali vengono eseguite in condizioni non drenate e in controllo di carico. Il percorso delle sollecitazioni è identico a quello che si impone nelle prove di colonna risonante.

### 3B3.2.3 TRIASSIALE NON CONVENZIONALE CON MISURA LOCALE DELLE DEFORMAZIONI

La prova triassiale di interesse è essenzialmente una prova di compressione eseguita in condizioni non drenate su un provino cilindrico avente rapporto altezza diametro pari a circa 2. Il percorso delle sollecitazioni totali che viene imposto nel corso di una prova triassiale a tensione orizzontale costante è diverso da quello imposto in Colonna Risonante e Taglio Torsionale ed è lecito attendersi una diversa risposta sforzi-deformazioni in virtù della natura anisotropa dei terreni e del diverso valore della tensione intermedia. Vale la pena ricordare che un'onda di taglio, generata da un sisma, che si propaga nel suolo in direzione verticale sottopone i diversi strati di terreno ad una storia irregolare di sforzi di taglio. Questa storia di carico può essere più fedelmente riprodotta nell'apparecchio di taglio torsionale piuttosto che in quello triassiale. A fronte di questa limitazione, la prova triassiale offre svariati vantaggi. Come già accennato, l'apparecchio triassiale ha subito notevoli miglioramenti negli ultimi 15 anni. Le innovazioni di maggiore interesse vengono di seguito richiamate e discusse.

#### MISURA LOCALE DELLE DEFORMAZIONI

Questo tipo di misura viene effettuato nella parte centrale del provino, svincolandosi dagli errori dovuti alla cedevolezza dell'apparecchiatura medesima, alle imperfezioni di contatto alla base e alla testa del provino ed al maggior grado di disturbo che le estremità del provino di norma presentano. Per questo tipo di misura vengono utilizzati sensori di elevata risoluzione e precisione, di solito trasduttori di non contatto. La misura locale della deformazione assiale e radiale offre diversi vantaggi: 1) l'impiego di sensori di elevata precisione consente di operare anche a livelli deformativi piccoli e medi di particolare interesse nell'ingegneria geotecnica sismica; 2) le misure vengono effettuate in una zona lontana dalle estremità dove è ragionevole assumere che il campo delle tensioni e delle deformazioni sia uniforme; 3) è possibile determinare le variazioni delle dimensioni del provino anche nel caso di terreni parzialmente saturi ed in assenza di misuratori della variazione di volume.

## USO DI PC NEL CONTROLLO DEI PROCESSI

L'uso di PC per l'acquisizione automatica dei dati e l'applicazione delle sollecitazioni offre diversi vantaggi:

- 1) è possibile effettuare una consolidazione a deformazione laterale impedita. A questo scopo è sufficiente disporre di sensori per la misura locale della deformazione radiale e di una servovalvola per l'applicazione della pressione orizzontale. Il PC è preposto al controllo del processo e regola la pressione orizzontale in modo tale che rimanga nulla all'interno di una prefissata tolleranza. Ciò consente di riconsolidare il provino in condizioni edometriche facendo a meno della conoscenza a priori della storia tensionale e/o del coefficiente di spinta a riposo  $K_o$ . Conseguentemente, il ripristino delle tensioni geostatiche, o quanto meno della loro migliore stima, richiede unicamente la valutazione della tensione verticale geostatica  $\sigma_{vo}$ ;
- 2) è possibile riconsolidare il provino seguendo il metodo detto del dry-setting. Questo metodo prevede, inizialmente, l'impiego di pietre porose e carta da filtro asciutte. Lo scopo è quello di impedire che il provino assorba acqua in fase di allestimento. Successivamente il sistema viene saturato imponendo un flusso d'acqua dal basso verso l'alto. Con un procedimento analogo a quello descritto al punto precedente è possibile in questa fase inibire il rigonfiamento, ovvero l'assorbimento d'acqua da parte del provino, imponendo che le variazioni di diametro e di altezza risultino nulle all'interno di prefissate tolleranze. Questo modo di procedere fornisce i valori della pressione residua (pressione che inibisce il rigonfiamento e che rappresenta una misura indiretta della qualità del campione) e rende minime le variazioni di volume durante la successiva riconsolidazione. Pertanto, la procedura descritta rappresenta un ottimo compromesso tra l'esigenza di ripristinare le tensioni geostatiche e quella di non variare il contenuto d'acqua del provino;
- 3) la riproduzione della storia tensionale in laboratorio è ritenuta un sistema efficace per mitigare gli effetti di disturbo dovuti al campionamento e alla successiva manipolazione dei provini. A questo scopo si esegue una consolidazione edometrica sino al raggiungimento della tensione di preconsolidazione ed un successivo scarico sempre in condizioni edometriche sino al raggiungimento della tensione verticale geostatica. Questa procedura può essere agevolmente applicata in celle triassiali controllate da PC ma richiede la conoscenza a priori della storia tensionale del deposito.

## MISURE SISMICHE

E' possibile eseguire nelle varie fasi di una prova triassiale delle misure della velocità di propagazione delle onde di taglio. Vengono utilizzati a questo scopo degli elementi piezoceramici bimorfi (Bender Elements - BE) di dimensioni 10x20x0.5 mm che si inflettono quando viene applicata una tensione generando prevalentemente onde di taglio. Per eseguire le misure si utilizza una coppia di BE. Gli elementi sono fissati nel piedistallo di base e nel capitello di testa dai quali sporgono per diversi mm. La parte dei BE che sporge viene infissa nel provino di terreno. Uno dei due BE è utilizzato come sorgente per generare le onde di taglio. A questo scopo viene eccitato con una forma d'onda sinusoidale di opportuna ampiezza. L'altro elemento funziona da ricevitore e trasduce l'energia meccanica che riceve in elettrica. E' pertanto possibile determinare il tempo di percorso (t) delle onde di taglio registrando su un oscilloscopio il segnale eccitatore e quello del ricevente. Il tempo di percorso può essere identificato dall'osservazione visiva delle registrazioni o utilizzando tecniche di correlazione incrociata. Si assume come percorso la distanza più breve tra i due BE ovvero la distanza tra le due estremità che protrudono all'interno del provino. Tale distanza (L) è nota cosicché è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde di taglio come  $V_s = L/t$ . La misura di  $V_s$  in fase di rottura serve a determinare l'eventuale danneggiamento elastico subito dal provino per effetto dell'applicazione degli sforzi di taglio.

Si eseguono di regola prove monotone e cicliche. Nel caso di prove cicliche si applicano sforzi di compressione di ampiezza crescente. Per ogni livello di sollecitazione si registrano di norma 30 cicli con un numero minimo di acquisizioni per ciclo pari a circa 30. Da una prova di tipo monotono è possibile ricavare i seguenti moduli di deformazione:

$$\begin{array}{ll} E_s = (q - q_o) / \varepsilon_a & \text{Modulo di Young secante} \\ E_t = dq / d\varepsilon_a & \text{Modulo di Young tangente} \\ E_o = \lim_{\varepsilon_a \rightarrow 0} (E_t) & \text{Modulo di Young iniziale o elastico (Zona 1)} \end{array}$$

dove:  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$  sforzo deviatorico;  $\varepsilon_a$  = deformazione assiale;  $q_o$  = sforzo deviatorico a fine consolidazione;

Da una prova ciclica anche questa eseguita in condizioni non drenate è possibile ricavare:

$$1) E_{eq} = q_{SA} / \varepsilon_{SA} \quad \text{Modulo di Young ciclico}$$

con  $q_{SA}, \varepsilon_{SA}$  = rispettivamente sforzo deviatorico e deformazione assiale in singola ampiezza

$$2) D_{ist} = \Delta W / (4 \cdot \pi \cdot W) \quad \text{Rapporto di smorzamento isteretico}$$

dove  $\Delta W$  = area racchiusa nel ciclo,  $W$  = energia elastica immagazzinata pari a  $\varepsilon_{SA} \cdot q_{SA} / 2$ ; la definizione di rapporto di smorzamento isteretico coincide con quelle già introdotta nel caso della prova torsionale e valgono considerazioni analoghe.

Anche in questo caso, se si applicano cicli di piccola ampiezza è possibile ottenere il modulo  $E_o$ .

In conclusione la prova triassiale consente di determinare i parametri necessari per le analisi veramente non lineari con alcuni vantaggi rispetto alla prova torsionale oltre a quelli già esaminati:

- la prova viene eseguita in controllo di deformazione il che garantisce la possibilità di mantenere costante la velocità di deformazione nel corso della prova, requisito essenziale vista l'influenza di questo parametro sulla rigidità;
- l'esecuzione dei cicli in controllo di deformazione è inoltre un requisito essenziale per valutare la degradazione meccanica del terreno con il numero dei cicli a livelli deformativi elevati (Zona 3);

è possibile in una prova triassiale portare il provino a rottura determinandone la resistenza al taglio non drenata. Questo parametro è necessario al fine di controllare che gli sforzi di taglio mobilitati dall'evento sismico che si simula siano compatibili con il criterio di resistenza. Tale parametro è inoltre utilizzato in diversi modelli per descrivere la curva scheletro.



### 3B3.2.4 PROVA TRIASSIALE CICLICA (CTXS)

La prova triassiale ciclica è eseguita utilizzando la cella triassiale standard; per l'applicazione dei carichi ciclici essa è posta sotto una struttura di contrasto dotata di un sistema elettropneumatico che consente di applicare al provino un carico sinusoidale di ampiezza costante. Il carico è tarato prima dell'inizio della prova mediante un apposito sistema di calibrazione.

Per la rilevazione dei parametri di prova sono stati collegati all'attrezzatura impiegata i seguenti strumenti elettronici:

- trasduttore di spostamento avente fondo scala di  $\cong 25$  mm, classe di accuratezza migliore di 0.3% del fondo scala;
- trasduttori di pressione aventi fondo scala 10 – 50 bar, classe di accuratezza migliore di 0.2% del fondo scala;
- cella di carico avente fondo scala 1KN, accuratezza migliore di 0.1% del fondo scala; condizionatori di segnale avente tensione di uscita 5 Vac e frequenza 5 KHz, classe di accuratezza migliore di 0.1 % del valore di uscita;
- personal computer con scheda e software idoneo per acquisizioni ad alte frequenze;
- box elettropneumatico per il controllo del carico dinamico con generatori di onde di carico ad una frequenza variabile da 0.05 a 2 Hz e un range di carico di  $\cong 300$ Kpa.

Il provino viene saturato e posto in consolidazione secondo le procedure standard ai valori di tensione efficace isotropa o anisotropa previsti. Al termine della consolidazione la cella è trasferita sotto la struttura di carico e a drenaggio chiuso sono applicati i carichi ciclici previsti.

Nel caso di prove triassiali cicliche finalizzate alla determinazione della curva "stress ratio – numero dei cicli" il campione è sottoposto al carico ciclico prestabilito e la prova è protratta fino al raggiungimento della liquefazione. Nel caso la prova fosse finalizzata alla determinazione dei cedimenti dinamici, il campione è sottoposto ad una successione di tre gradini di carico ciclico a valori di stress ratio crescenti, l'ultimo dei quali protratto sino al raggiungimento della liquefazione del provino.

Dopo ogni gradino il provino è stato riconsolidato per il tempo necessario a dissipare la pressione interstiziale indotta; le variazioni dimensionali misurate sono state utilizzate per il calcolo delle dimensioni del provino relative al ciclo successivo.

## PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Nei certificati di prova dovranno essere riportati, per ogni valore di carico ciclico applicato, oltre ad alcuni dati generali relativi al provino, il rapporto della pressione interstiziale sviluppata  $R_u$ , le deformazioni assiali cicliche in singola ed in doppia ampiezza e la tensione ciclica, tutti in funzione del numero di cicli applicati.

### 3B3.2.5 PROVA TRIASSIALE CICLICA "PROPERTY" (CTXP)

La prova triassiale ciclica "Property" permette di determinare il valore del modulo di Young (E) in funzione della deformazione ( $\epsilon_{sa}$ ), nonché il valore dello smorzamento (D) in funzione della deformazione assiale nella singola ampiezza a fronte dell'applicazione di una serie di cicli di carico assiale.

Per la rilevazione dei parametri di prova sono stati collegati all'attrezzatura impiegata i seguenti strumenti elettronici:

- trasduttore di spostamento avente fondo scala di  $\cong 5$  mm, classe di accuratezza migliore di 0.3% del fondo scala;
- trasduttori di pressione aventi fondo scala 10 bar, classe di accuratezza migliore di 0.2% del fondo scala;
- cella di carico avente fondo scala 1KN, accuratezza migliore di 0.1% del fondo scala;
- condizionatori di segnale avente tensione di uscita 5 Vac e frequenza 5 KHz, classe di accuratezza migliore di 0.1 % del valore di uscita;
- personal computer con scheda e software idoneo per acquisizioni ad alte frequenze;
- box elettropneumatico per il controllo del carico dinamico con generatori di onde di carico ad una frequenza variabile da 0.05 a 2 Hz e un range di carico di  $\cong 1$  KN.

Le prove devono seguire la seguente procedura:

#### FASE DI SATURAZIONE:

incremento della pressione efficace fino ad un valore di 25-50 Kpa, tale da impedire il rigonfiamento del provino;

aumento graduale della pressione interstiziale, in gradini di 50Kpa, fino al raggiungimento di un grado di saturazione (B) maggiore di 0.95; durante tale

fase si è mantenuto costante il valore della pressione efficace aumentando proporzionalmente la tensione totale.

#### FASE DI CONSOLIDAZIONE:

la consolidazione isotropa/anisotropa è ottenuta aumentando la pressione in cella gradualmente, in piccoli gradini, fino ai valori richiesti per la prova. Durante la consolidazione si misurano le variazioni di volume e di altezza del provino.

#### FASE DI PROVA:

al termine della consolidazione, la cella è trasferita sotto una struttura di carico dove, a drenaggio chiuso, si applicano una serie tra i 10 e i 20 cicli ognuna, a valori di carico sempre crescente; dopo ogni serie, la sovrappressione eventualmente prodotta viene lasciata dissipare. La prova è protratta fino al raggiungimento di una deformazione assiale compresa tra lo 0.1% e 1%.

#### PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Nei certificati di prova dovranno essere riportati, oltre ad alcuni dati generali relativi al provino, i seguenti parametri:

Modulo E (Mpa) in funzione della deformazione assiale nella singola ampiezza ( $\epsilon_{sa}$ ),

Lo smorzamento assiale K;

Il rapporto tra la pressione interstiziale sviluppata e la tensione efficace di consolidazione  $R_u$ ;

Per ogni serie di cicli l'andamento delle deformazioni in funzione del tempo (cicli);

Per ogni serie di cicli l'andamento delle sovrappressioni in funzione del tempo (cicli).

## BIBLIOGRAFIA E NORMATIVA TECNICA

AGI (1977) *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*

AGI (1994) *Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio*

ASTM C136-01

ASTM D422-63 *Test method for particle size analysis of soils*

ASTM D854-02 *Test method for specific gravity of soils*

ASTM D1140-00 *Test method for amount of material in soil finer than the No 200 sieve*

ASTM D 1194 – 94 *(Test method for bearing capacity of soil for static loading on spread footings)*

ASTM D 1195 – 93 *(Test method for repetitive static plate load tests of soils .....)*

ASTM D 1196 – 93 *(Test method for nonrepetitive static plate load tests of soils .....)*

ASTM D1586 – 84 *(Test method for penetration test and split-barrel sampling of soils)*

ASTM D2166 *test method for unconfined compressive strength of cohesive soils*

ASTM D2216-98 *test method for laboratory determination of water content content of soil and rock*

ASTM D2217-85 *Practice for wet preparation of soil samples for particle size analysis and determination of soil constants*

ASTM D2435-03 *test method for one-dimensional consolidation properties of soils*

ASTM D 2487 – 00 *(Classification of soils for engineering purposes – USCS)*

ASTM D 2573 – 94 *(Test method for field vane shear test of cohesive soils)*

ASTM D2850-03a *Test method for unconsolidated undrained compressive strength of cohesive soils in triaxial compression*

ASTM D 2974 – 87 *(Test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils)*

ASTM D3080-03 *Test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*

ASTM D 3441 – 94 (*Test method for deep, quasi-static, cone and friction –cone penetration test*)

ASTM D4015 *Test method for modulus and damping of soils by the resonant column method*

ASTM D4186 *Test method for one dimensional consolidation properties of soils using controlled strain loading*

ASTM D4318-00 *Test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils*

ASTM D 4394 – 84 (*Test method for determining the in situ modulus of deformation of rock mass using the rigid plate loading method*)

ASTM D 4395 – 84 (*Test method for determining the in situ modulus of deformation of rock mass using the flexible plate loading method*)

ASTM D4648-00 *Test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil*

ASTM D 4719 – 87 (*Test method for pressuremeter testing in soils*)

ASTM D4767 *test method for consolidated undrained triaxial compression test on cohesive soils*

ASTM D 4971 – 89 (*Test method for determining in situ modulus of deformation of rock using diametrically loaded borehole jack*)

ASTM (1986) *Flat Dilatometer Test* – Geotechnical Testing Journal, Vol. 9, No 2

Cavallaro A., Fioravante V., Lanzo G., Lo Presti D.C.F., Pallara O., d'Onofrio A., Santucci F., Rampello S. e Silvestri F. (2001) – *Report on the Current Situation of Laboratory Stress-Strain Testing of Geomaterials in Italy and its Use in Practice*. XV ICSMGE, Istanbul 27-31 August 2001, Special Volume of TC29, Advanced Laboratory stress-strain testing of geomaterials. pp 15-44.

Cestari F. (1990) – *Prove Geotecniche in sito*. Geo-Graph s.n.c. Segrate

CNR UNI 10010/64 (*peso di volume*)

CNR UNI 10013/64 (*peso specifico grani*)

CNR UNI 10014/64 (*limiti di Atterberg*)

Ghionna V., Lancellotta R. E Maniscalco R. (1983) – *Il pressimetro autoperforante*. Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni, Novembre 1983, No. 612.

Lancellotta 1993 *Geotecnica*, Zanichelli 2nda edizione

SNV (1981) 670317 a *Prova di carico su piastra*



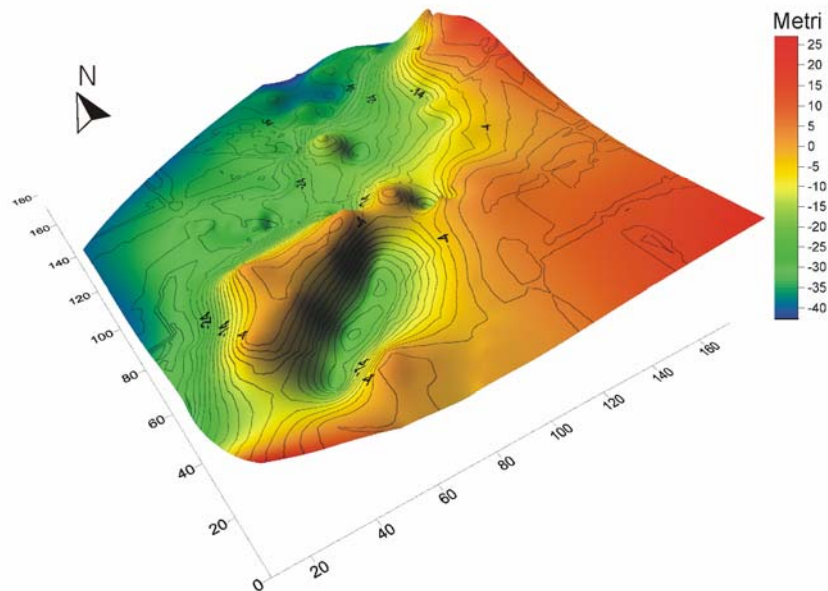
## **SEZIONE 4**

### CRITERI E METODI PER L'ANALISI NUMERICA DI AMPLIFICAZIONE SISMICA



La fase di esplorazione del sottosuolo permette, attraverso l'utilizzo integrato di diverse metodologie di indagine diretta ed indiretta, la definizione del modello geologico-tecnico del sottosuolo.

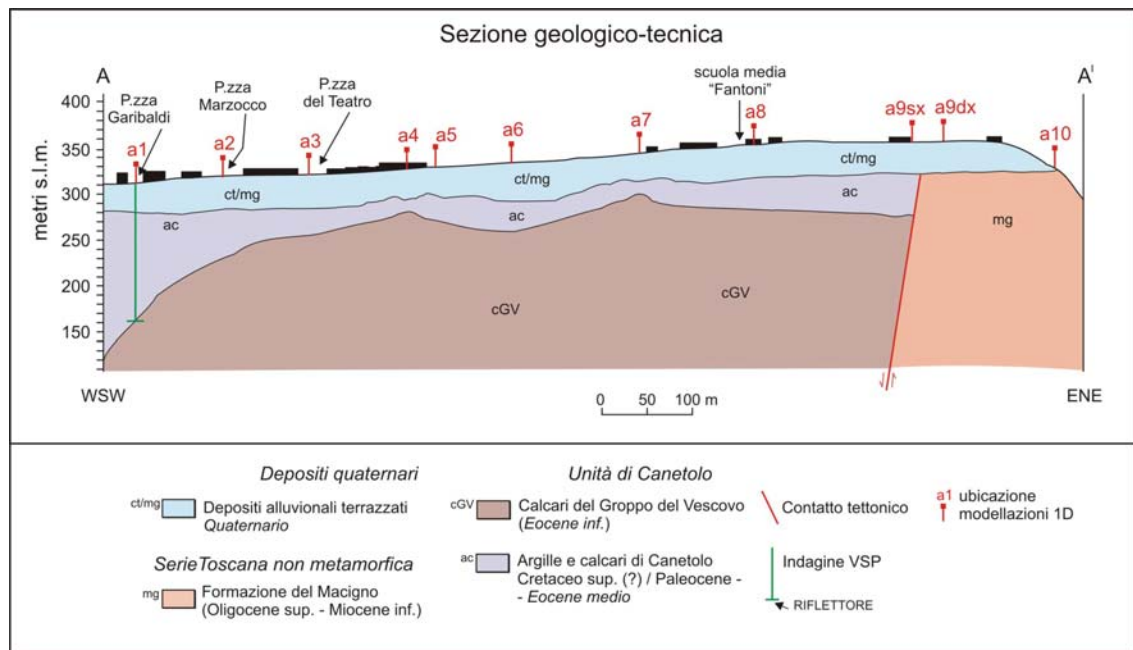
In questo modo è possibile completare le informazioni desunte dal rilievo geologico e geomorfologico di superficie ed eventualmente apportare modifiche a quest'ultimo in base alle informazioni acquisite sia in termini di geometrie sepolte sia per ciò che concerne la parametrizzazione fisico-meccanica dei litotipi oggetto d'indagine (Fig. 4B1). La determinazione del modello geologico-tecnico del sottosuolo offre, parallelamente, la possibilità di definire delle sezioni geologico-tecniche significative, da inserire come modello di input per la realizzazione di simulazioni dinamiche in campo mono e bidimensionale.



**Figura 4B1** – Ricostruzione tridimensionale della profondità del substrato sismico ( $V_s > 800$  m/sec), effettuata in base ai dati ottenuti a seguito della campagna di esplorazione multidisciplinare del sottosuolo

La scelta delle sezioni è finalizzata all'individuazione di particolari situazioni, caratteristiche di indizi di possibili amplificazioni locali (morfologie accidentate sepolte o superficiali, contatti tra litotipi caratterizzati da differenti velocità sismiche, etc..), al fine di simulare, attraverso appositi codici di calcolo numerico, l'influenza di tali scenari sulla risposta sismica locale.

In Figura 4B2 è illustrata una sezione geologico-tecnica realizzata in base all'integrazione delle informazioni desunte dalla campagna di esplorazione multidisciplinare del sottosuolo (sondaggi a rotazione, indagini sismiche a rifrazione, prove down-hole con estensione secondo tecnica VSP).



**Figura 4B2** – Esempio di sezione geologico-tecnica

La definizione della suddetta sezione permette una conoscenza sia in termini di parametri fisico-meccanici (soprattutto velocità di propagazione delle onde di taglio nei differenti terreni indagati) sia per ciò che concerne i rapporti geometrici superficiali e sepolti.

Queste informazioni, parallelamente alla determinazione di un terremoto di input e delle curve dinamiche (che informano sull'andamento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e dello smorzamento  $\square$  in funzione della deformazione  $\square$ ) per tutti i litotipi in esame, saranno utilizzate in fase di input per la realizzazione di modellazioni in campo mono e bidimensionale bidimensionale, sulla base dell'assunzione del legame costitutivo lineare equivalente per i litotipi considerati.

Tali analisi sono finalizzate a:

- 1) quantificare l'entità dei fenomeni di amplificazione locale nei comuni in studio;
- 2) comprendere l'influenza, sui valori delle amplificazioni calcolate, delle condizioni locali stratigrafiche e morfologiche.

La definizione del terremoto di input può derivare dall'acquisizione di registrazioni da reti accelerometriche (posizionate su siti in roccia in aree limitrofe alla zona di studio oppure sismogrammi sintetici derivanti da studi di pericolosità di base) normalizzate in base al valore di pga (peak ground

acceleration) previsto dagli studi di caratterizzazione macrosismica del territorio coordinati dal Servizio Sismico Regionale (Figura 4B3).

**Tabella 4B1** – Caratteristiche dei codici di calcolo più diffusi per l'analisi della risposta sismica locale. Da Silvestri (1998, mod )

CODICE DI CALCOLO	GEOMETRIA E CONDIZIONI AL CONTORNO	LEGAME COSTITUTIVO	METODO DI ANALISI	FONTE
SHAKE	1-D frontiera e base elastica	Monofase lineare equivalente Visco-elastico	Continuo Dominio frequenze	Berkley-Davis <i>Shnabel et al. (1972)</i> <i>Idriss &amp; Sun (1992)</i>
SHAKE 91				
PROSHAKE 1.1				
MASH	1-D	Monofase non lineare Visco-elastico	Discreto Dominio tempi	Berkley <i>Martin &amp; Sedd (1978)</i>
CHARSOIL	1-D base e superficie libera inclinate	Monofase lineare equivalente Isteretico	Linee caratteristiche	Ann Arbor <i>Streeter et al. (1974)</i>
DESRA	1-D frontiera rigida	Monofase lineare equivalente Isteretico	Discreto Dominio tempi	Vancouver-RPI <i>Finn et al. (1976)</i> <i>Vucetic (1986)</i>
DESRAMOND				
QUAD-4M	2-D base rigida o assorbente, superficie libera qualsiasi	Monofase lineare equivalente Visco-elastico	F.M.E. Dominio tempi	Davis <i>Hudson, Idriss &amp; Beikae (1993)</i>
LUSH	2-D/3-D base orizzontale, frontiera laterale assorbente	Monofase lineare equivalente Visco-elastico	F.M.E. Dominio frequenze	Berkley <i>Lysimer et al. (1975)</i>
FLUSH				
DYNAFLOW	2-D	Tensioni effettive Elasto-plastico	F.M.E. Dominio tempi	Princeton-EPC <i>Prévost (1981)</i>
GEFDYN	2-D/3-D			
FLAC	2D	Elastico non lineare equivalente	Differenze finite Dominio frequenze	Minneapolis-ICG <i>Coetsee et al. (1995)</i>
BESOIL	2D	Elastico non lineare equivalente	Elementi di contorno	Sanò (1996)

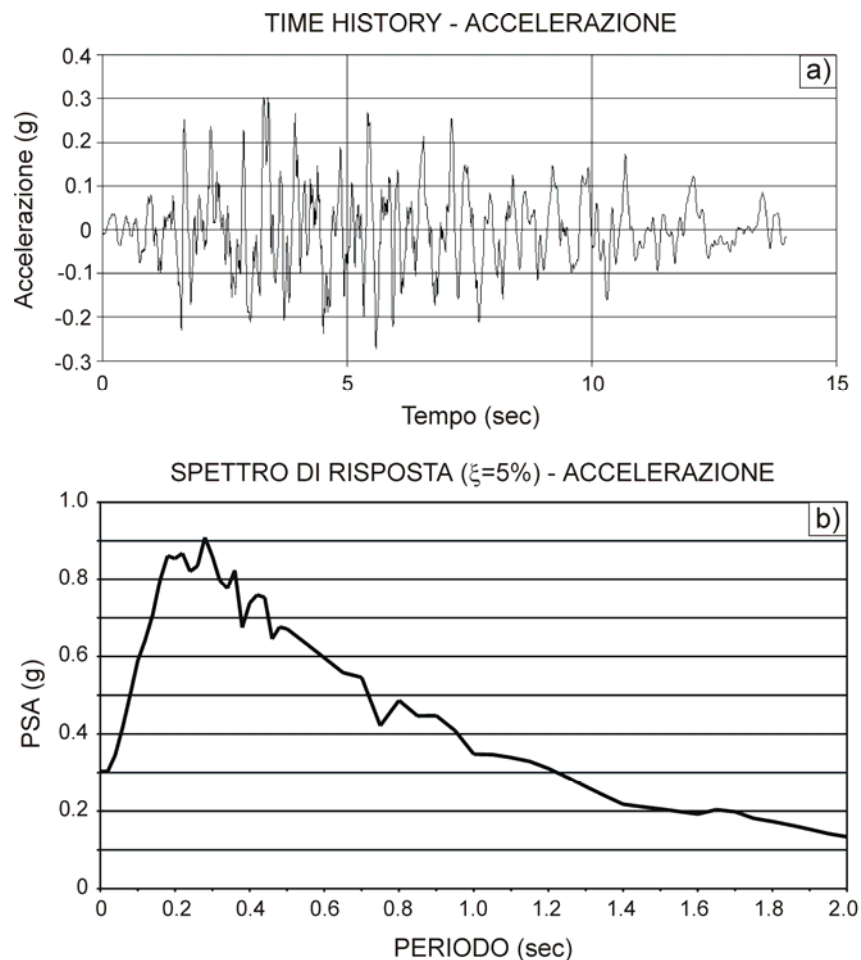
Nelle analisi numeriche possono essere impiegati diversi codici di calcolo (Tabella 4B1), tra i quali i più utilizzati sono il codice ProShake (1D) e Quad4M (2D) che simulano il terreno come mezzo elastico-equivalente.

Con tale approccio il comportamento dinamico dei terreni è caratterizzato dalla curva di decadimento del modulo di rigidezza al taglio  $G/G_0$  e dalle curve di incremento di smorzamento  $\gamma/\gamma_0$  (Figura 4B4). Numericamente le analisi monodimensionali implementano le funzioni di trasferimento alle interfacce tra due strati sovrapposti nell'ipotesi di propagazione monodimensionale delle onde di taglio S, in presenza di strati con giaciture pian parallele ed in condizioni di simmetria radiale.

Con tali analisi condotte in ipotesi spesso difficilmente verificate, si potrà indagare tuttavia l'influenza sulla risposta sismica dei depositi dei contrasti di

impedenza tra strati di diversa potenza e rigidezza al taglio. Nel caso delle simulazioni bidimensionali, rimarrà invariata la caratterizzazione del comportamento dinamico del terreno, tuttavia saranno rimosse le ipotesi di stratificazione orizzontale e propagazione delle onde di taglio verticale.

In questo modo, si potrà indagare l'effetto che la morfologia locale delle coperture induce sull'amplificazione o deamplificazione locale. Saranno quindi i confronti tra le analisi mono e bidimensionali a permettere di fare considerazioni sulla maggiore o minore influenza della geometria o del contrasto di impedenza, caso per caso.



**Fig. 4B3** – Moto di input utilizzato nelle simulazioni numeriche: a) time history, b) spettro di risposta al 5% di smorzamento

## **(4B1) PROGRAMMA PROSHAKE 1.1**

Il programma calcola la risposta associata alla propagazione verticale di onde S su modelli monodimensionali. Il codice di calcolo Proshake1.1 rappresenta l'evoluzione dei programmi SHAKE85 (Schnabel et alii, 1972) e SHAKE91 (Idriss & Sun, 1992), utilizzando un'interfaccia semplificata che consente un utilizzo molto più agevole e veloce, rispetto alle precedenti versioni, scritte in linguaggio Fortran. Il programma è organizzato in tre settori (Input Manager, Solution Manager e Output Manager).

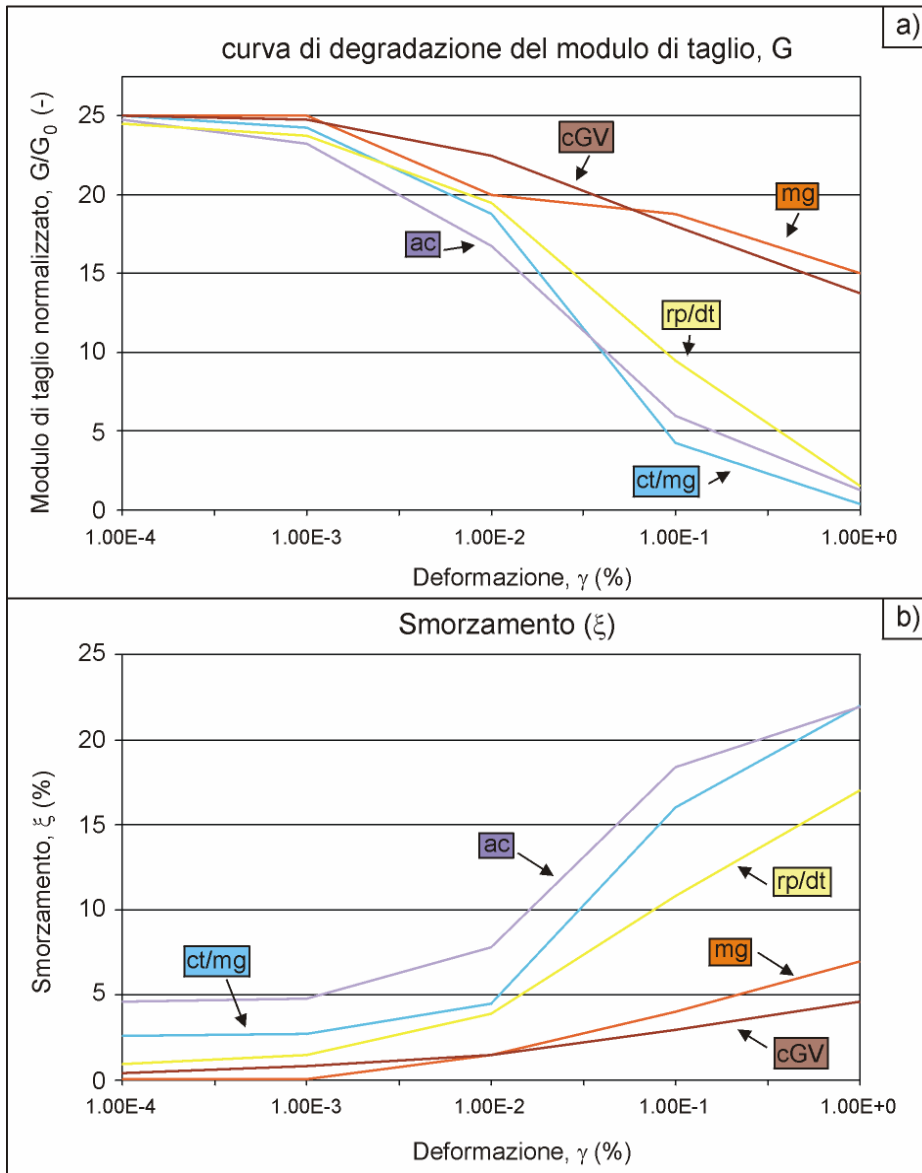
L'Input Manager permette l'inserimento dei dati di input richiesti dal programma (assetto stratigrafico della verticale su cui eseguire la modellazione, valori di  $V_s$  dei litotipi oggetto d'esame, peso di volume dei terreni indagati necessario per il calcolo del modulo di taglio massimo  $G_0$ , curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e del damping factor  $\alpha$  ed infine un terremoto di progetto da applicare in fase di input). I dati immessi sono salvati in un file con estensione .dat.

Il Solution Manager è utilizzato per eseguire l'analisi lineare equivalente, illustrando la variazione della tensione di taglio efficace e dell'errore associato alla variazione del modulo di taglio e dello smorzamento in funzione della profondità per ogni step di iterazione. Il risultato verrà salvato in un file con un'estensione .lyr.

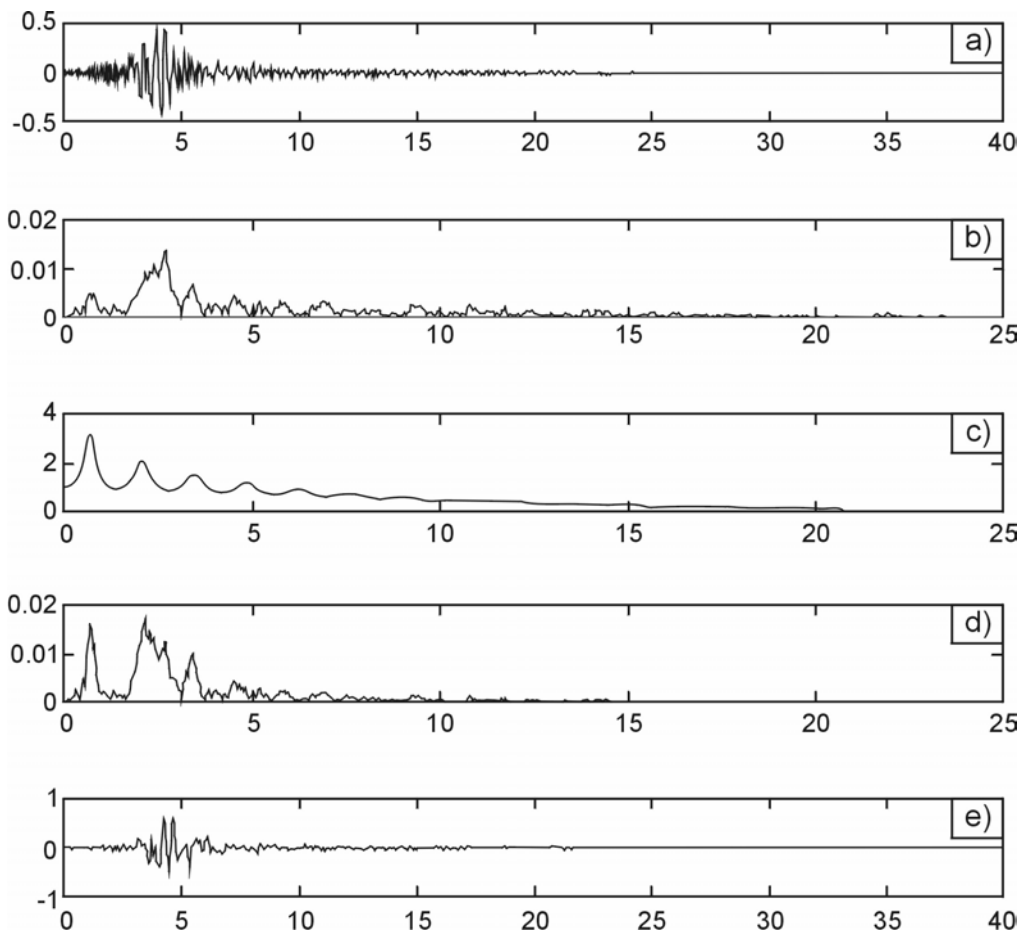
Infine, per mezzo dell'Output Manager, sarà possibile osservare graficamente i risultati della modellazione numerica attraverso diagrammi ground motion (time-history, spettri di Fourier, di fase e di potenza), grafici di distribuzione temporale di sforzi e deformazioni di taglio nel terreno, spettri di risposta, funzioni di trasferimento ed altri parametri ground-motion sia nel dominio del tempo che delle frequenze.

ProShake1.1 risolve nel dominio delle frequenze il problema della propagazione in direzione verticale delle onde di taglio.

Il modello fisico consiste di  $N$  strati piani e paralleli, di estensione orizzontale infinita, su un semispazio (bedrock sismico). Ogni strato, considerato omogeneo ed isotropo, è caratterizzato dallo spessore ( $h$ ), dalla densità ( $\rho$ ), dal modulo di taglio ( $G$ ), e dal fattore di smorzamento ( $\alpha$ ). Il programma è applicabile solo qualora il modello sia a strati orizzontali paralleli infinitamente estesi.



**Figura 4B4**



**Fig. 4B5** – Rappresentazione grafica del procedimento utilizzato dal codice di calcolo ProShake1.1: a) time history del moto di input e b) suo contenuto spettrale; c) funzione di trasferimento; d) spettro di Fourier del moto in output ed e) rappresentazione nel dominio del tempo ottenuta attraverso la trasformata inversa di Fourier

L'equazione d'onda utilizzata nel modello (viscoelastico linearizzato di Kelvin-Voigt) è:

$$\rho(\delta^2 u / \delta t^2) = G(\delta^2 u / \delta x^2) + \eta[\delta^3 u / (\delta x^2 \delta t)] \quad (4B.1)$$

dove

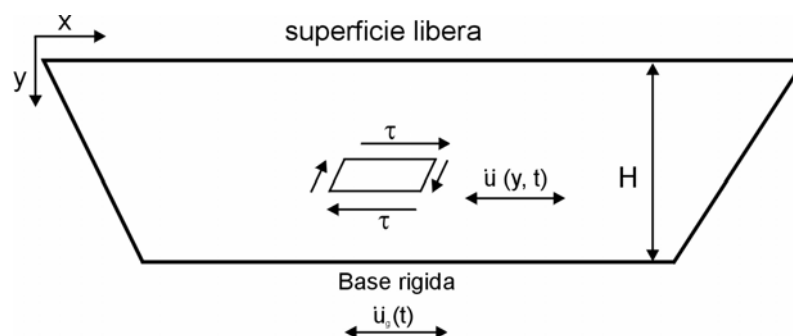
$$\eta = (2G\zeta/\omega)$$

$\delta^2 u / \delta t^2 = \text{moto sismico}$

In figura 4B5 è possibile osservare graficamente il procedimento utilizzato dal codice ProShake1.1; le fig. 4B5a e 4B 5b riportano le caratteristiche del moto di input rispettivamente nel dominio del tempo e delle frequenze. In figura 4B 5c è possibile osservare la funzione di trasferimento calcolata da programma (i picchi della funzione mostrano chiaramente le caratteristiche di amplificazione relative alle frequenze naturali del terreno); è inoltre possibile notare come la maggiore amplificazione si ravvisi alla frequenza più bassa, che viene definita frequenza fondamentale. Infine le figure 4B 5d e 4B 5e mostrano rispettivamente il contenuto spettrale del segnale in output ed il relativo sismogramma nel dominio del tempo (ottenuto attraverso la trasformata inversa di Fourier del segnale di output nel dominio delle frequenze).

#### **(4B2) PROGRAMMA QUAD4M**

Il codice di calcolo Quad4M implementa un metodo agli elementi finiti (F.M.E.) attraverso il quale è possibile valutare la risposta sismica locale secondo un modello bidimensionale, discretizzabile attraverso la costruzione di una maglia (mesh) costituita da elementi. Una rappresentazione dell'equilibrio del generico elemento di terreno soggetto al moto sismico è visibile in figura 4B6.



**Fig. 4B6** – Rappresentazione dell'equilibrio del generico elemento di terreno soggetto al moto sismico:  $H$  = spessore dell'elemento,  $\square$  = deformazione di taglio,  $\ddot{u}(y, t)$  = accelerazione dell'elemento,  $\ddot{u}_b(t)$  = accelerazione alla base del deposito



#### (4B2.1) FASE 1 – ANALISI 2D

Tale fase consiste nella definizione delle caratteristiche geometriche del modello ai fini della convergenza e della stabilità della soluzione, ricavata attraverso l'utilizzo del codice di calcolo agli elementi finiti QUAD4M. A tale scopo vengono effettuati i seguenti passaggi:

- individuazione della dimensione massima degli elementi finiti per la quale la discretizzazione risulta idonea a campionare il segnale in ingresso;
- studio di sensitività della risposta in superficie in funzione dell'approfondimento del bedrock e delle frontiere laterali della sezione in esame;
- studio di qualità della mesh effettuato in funzione della percentuale di elementi con angoli acuti inferiori ad un valore limite prefissato;
- determinazione del numero minimo di iterazioni necessario a conseguire la convergenza dei valori delle accelerazioni di picco.

Per determinare la dimensione massima degli elementi si fa riferimento ad una regola empirica comunemente adottata per evitare errori di sampling del segnale di carattere ondulatorio. Tale regola comporta che, nel generico strato di terreno, si adotti una dimensione massima degli elementi espressa dalla relazione:

$$d_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{k} = \frac{V_S}{k \cdot f_{\max}} \quad (4B.2)$$

dove  $V_S$  è la velocità delle onde di taglio nello strato in esame,  $f_{\max}$  è la massima frequenza che si vuole propagare e  $k$  è un coefficiente di stabilità in genere assunto pari a  $6 \div 8$ .

Le prove effettuate in sito mediante indagini sismiche consentono di misurare la velocità  $V_P$  delle onde di compressione, la velocità  $V_S$  delle onde di taglio, mentre indagini geotecniche di laboratorio su campioni prelevati durante l'esecuzione di sondaggi geognostici permettono la determinazione della densità  $\delta$ . Quest'ultima, moltiplicata per il valore dell'accelerazione di gravità  $g$ , consente di ricavare il peso di volume  $\gamma$  di ciascuno strato di terreno.

I valori precedentemente esposti consentono il calcolo dei parametri meccanici necessari alla modellazione dei depositi superficiali nelle sezioni in studio. Il modulo di taglio e il coefficiente di Poisson dinamico sono calcolati con le seguenti formule:

$$G = \rho V_S^2 \quad (4B.3)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1} \quad (4B.4)$$

Per ciascun materiale vengono, inoltre, calcolati i valori della lunghezza d'onda minima e della dimensione massima degli elementi finiti da utilizzare per la modellazione. Rispettivamente, questi si ottengono mediante le espressioni:

$$\lambda_{\min} = \frac{V_S}{f_{\max}} \quad (4B.5)$$

$$d_{\max} = \frac{\lambda_{\min}}{k} \quad (4B.6)$$

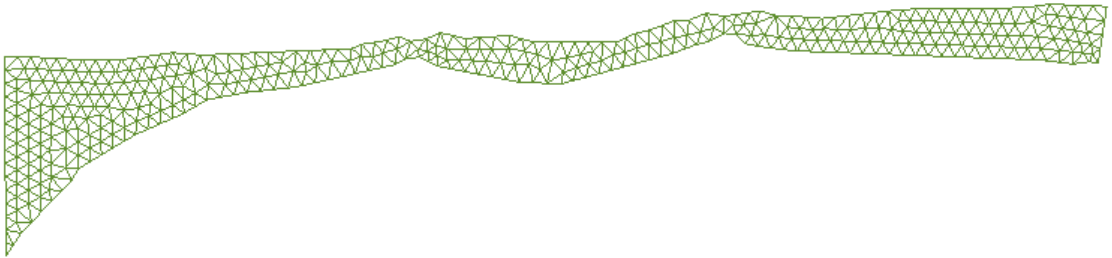
dove  $\lambda_{\min}$  è calcolato tenendo conto della massima frequenza significativa dell'input sismico. In riferimento alla scelta di  $f_{\max}$ , è necessario evidenziare che tale valore rappresenta un estremo superiore per il contenuto in frequenza dello spettro di pseudo-accelerazione del segnale di input. Tale circostanza impone di limitare l'ampiezza delle frequenze a quei valori dello spettro considerati significativi. Per la determinazione di  $d_{\max}$ , si fa uso di un coefficiente  $k$ , come suggerito da Lanzo e Silvestri (1999) di circa 7-8.

Lo studio di qualità della mesh ha come oggetto l'indagine della percentuale di elementi regolari rispetto al totale degli elementi presenti.

Tale indagine fa parte delle verifiche sulla distorsione della mesh che sono sempre richieste quando si effettuano modellazioni con gli elementi finiti poiché gli algoritmi che processano il modello sono in grado di fornire un miglior livello di approssimazione quanto più gli elementi sono di forma regolare. Gli elementi di cui è costituita la mesh sono di forma triangolare e pertanto la forma regolare ideale per il generico elemento è quella del triangolo equilatero. Si riporta, a titolo d'esempio, in Figura 4B7 una mesh costituita da 657 elementi triangolari di dimensioni massime non superiori a 11 m, relativa alla discretizzazione effettuata sulla sezione geologico-tecnica in Figura 4B2.

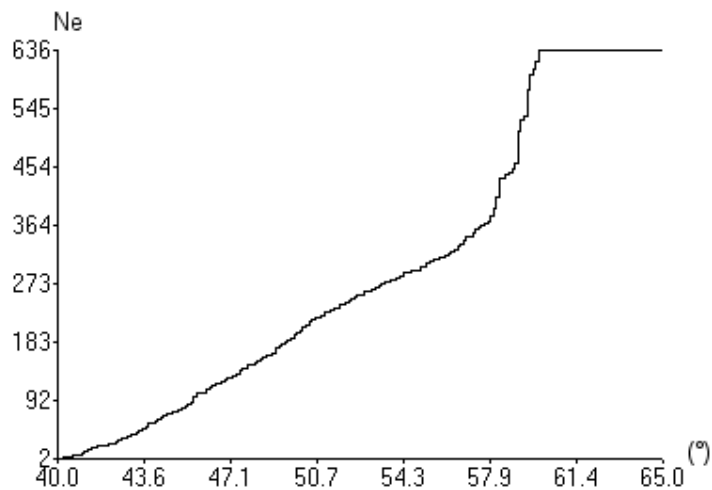
Non essendo possibile realizzare una mesh costituita da soli triangoli equilateri, a causa dell'irregolarità del profilo degli strati di terreno oggetto di

studio, si è assunta come misura della qualità della mesh la minima ampiezza degli angoli degli elementi triangolari di cui essa è costituita, ritenendo sufficientemente regolari quegli elementi il cui angolo minimo fosse di ampiezza almeno pari a  $40^\circ$ .



**Figura 4B7**

Per effettuare tale valutazione sono quindi stati costruiti i grafici che riportano il numero degli elementi il cui angolo minimo, espresso in gradi, supera un prefissato valore. La Figura 4B8 riporta il grafico degli elementi relativi alla mesh di Figura 4B7 il cui angolo minimo appartiene all'intervallo  $40^\circ$ - $65^\circ$ .



**Figura 4B8** – Numero di elementi triangolari il cui angolo minimo è superiore a  $40^\circ$ , nel caso della mesh composta da 657 elementi

Dal confronto emerge che 636 elementi su 657, pari al 96.8%, hanno angoli superiori a 40°. Tale mesh può essere ritenuta di ottima qualità poiché la quasi totalità degli elementi si avvicina ad un triangolo equilatero.

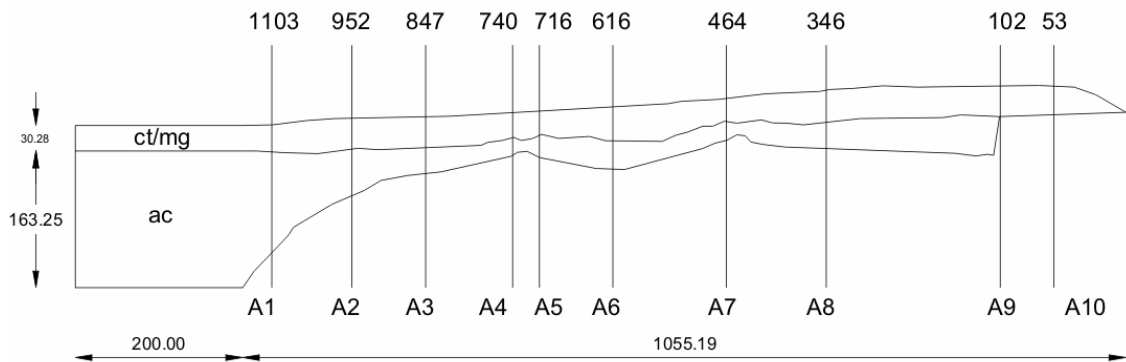
Dopo lo studio di qualità della mesh si determina il numero minimo di iterazioni necessarie perché l'algoritmo di calcolo delle accelerazioni, implementato nel QUAD4M, arrivi a convergere su un unico valore di accelerazione, per ogni nodo della mesh.

Una tale verifica viene effettuata per incrementi successivi, confrontando, ad ogni nuova iterazione, le accelerazioni ottenute in alcuni nodi fissi scelti sulla superficie. In considerazione dei risultati ottenuti, può essere verificato il numero di iterazioni necessarie, affinché si ottengano.

#### **(4B2.2) FASE 2 – ANALISI 2D**

Simulazioni numeriche realizzate applicando al modello un accelerogramma di input. Mediante tali analisi sono calcolati gli spettri di risposta e, conseguentemente, i fattori di amplificazione locali in un numero significativo di punti.

In Figura 4B9 è illustrata la sezione di modellazione, derivante dalla sezione geologico-tecnica in Figura 4B2.



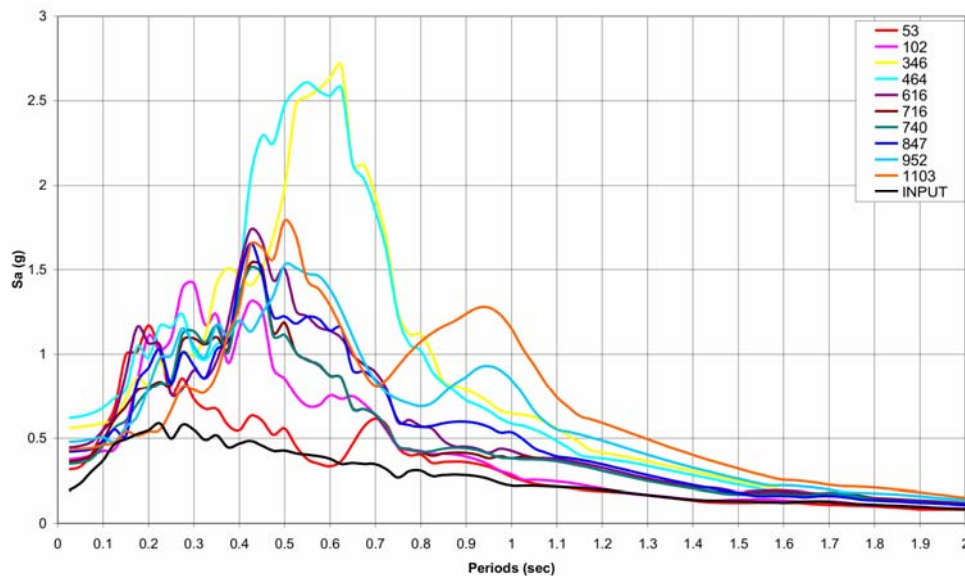
**Figura 4B9**

In Figura 4B9 sono indicate con sigla numerica (1103, 952, 847, etc..) i punti di misura delle indagini bidimensionali, corrispondenti alle verticali di modellazione monodimensionale (A1, A2, etc..) eseguite in ProShake 1.1.

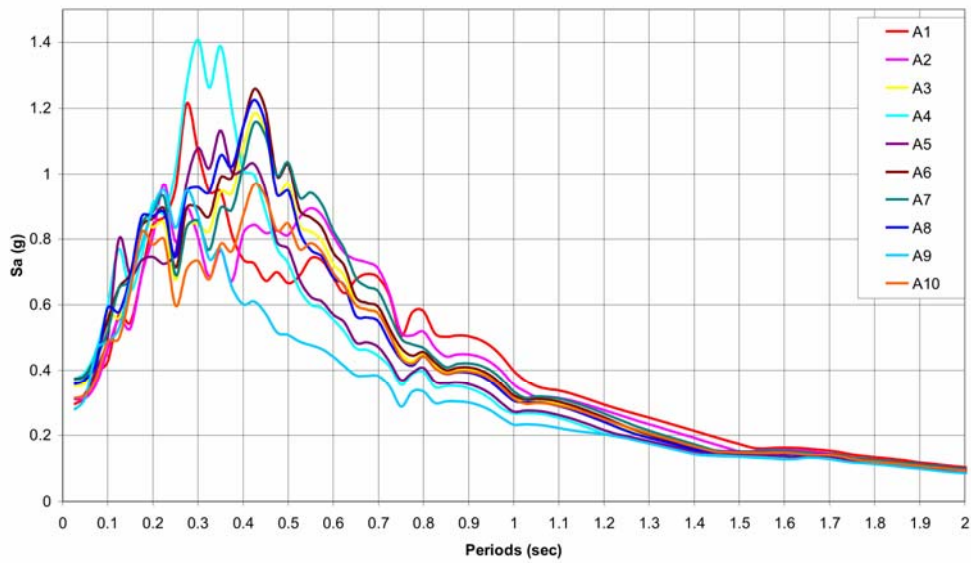
In figura 4B10 sono riportati gli spettri di risposta ( $\square = 5\%$ ) derivanti dall'esecuzione delle analisi bidimensionali. La figura 4B11 illustra, invece, i risultati delle modellazioni 1D.

La differente risposta sismica, valutabile sia per quanto riguarda il contenuto spettrale, sia in termini di pseudoaccelerazioni misurate può essere, quindi, imputabile al netto contributo degli effetti geometrici bidimensionali nella quantificazione degli effetti locali dell'area in esame, non considerabili attraverso un approccio di tipo monodimensionale.

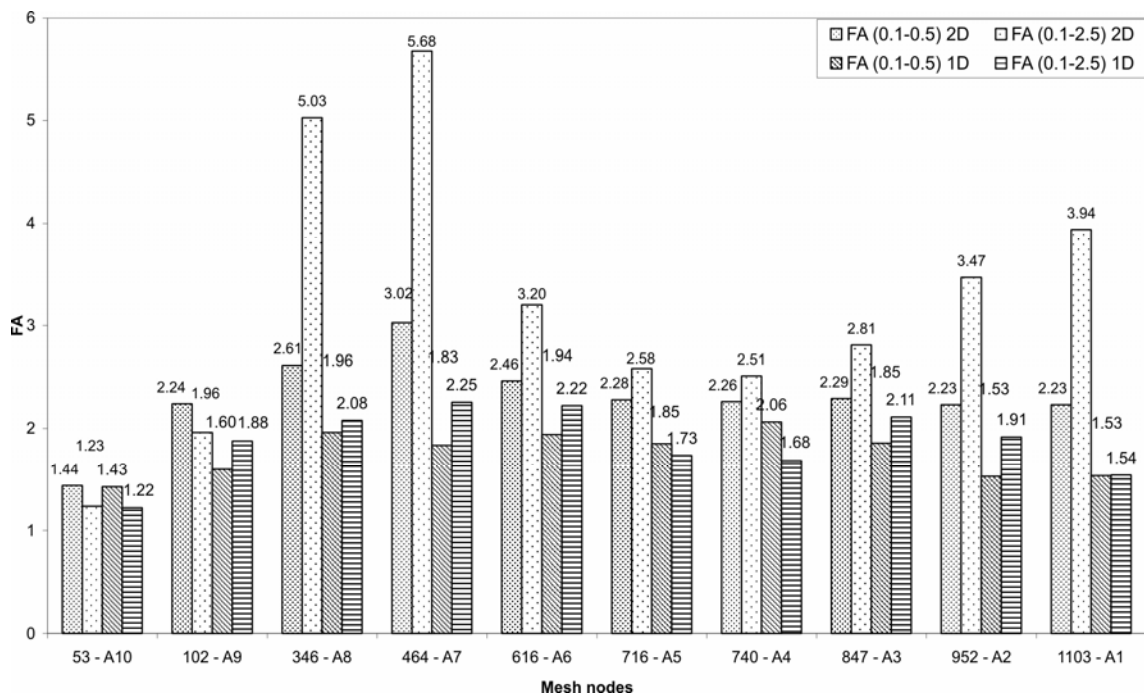
Tale indicazione viene confermata dal calcolo e successiva rappresentazione dei fattori di amplificazione (Figura 4B12), secondo le modalità operative esposte da Housner (1959).



**Figura 4B10** – Spettri di risposta relativi alle modellazioni 2D, la cui ubicazione è riportata nella sezione in Figura 4B9



**Figura 4B11** – Spettri di risposta relativi alle modellazioni 1D, la cui ubicazione è riportata nella sezione in Figura 4B9



**Figura 4B12** – Fattori di amplificazione (Housner, 1959)

Secondo Housner, il fattore d'amplificazione può essere inteso come il rapporto tra l'intensità spettrale di output e l'intensità spettrale d'input compresa tra due differenti intervalli spettrali: 0.1-0.5 sec e 0.1-2.5 sec:

$$FA = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{out}(T)dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{in}(T)dT} \quad (4B.7)$$

$$FA = \frac{\int_{0.1}^{2.5} PSV_{out}(T)dT}{\int_{0.1}^{2.5} PSV_{in}(T)dT} \quad (4B.8)$$

Anche in questo caso il confronto tra analisi monodimensionali e bidimensionali vede queste ultime intensamente e sistematicamente superiori alle prime.