



GUIDA OPERATIVA SISMICA DOWN - HOLE

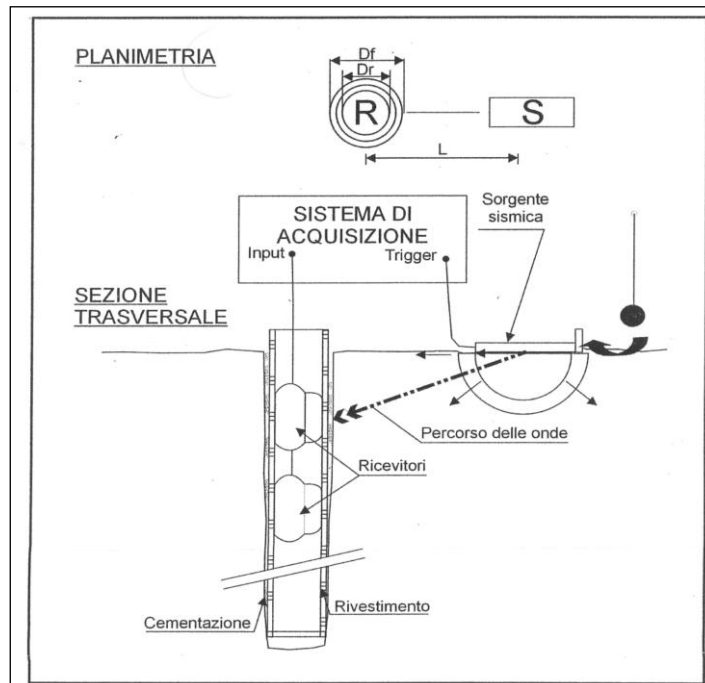
Procedura Sismica in foro tipo down-hole

- **Generalità**

Il metodo Down-Hole rappresenta una delle tecniche migliori e più precise per la determinazione delle proprietà fisico-meccaniche e dinamiche dei terreni (Gasperini & Signanini, 1983).

La prova consiste nel produrre, sulla superficie del terreno, una sollecitazione orizzontale e verticale mediante una sorgente meccanica, e nello studiare il treno di onde, P e S, che si propagano all'interno del terreno alle varie profondità in direzione verticale, con vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione (onde P), e polarizzate sul piano orizzontale con vibrazioni perpendicolari alla direzione di propagazione (onde SH).

Mediante un ricevitore costituito da una terna geofonica diretta secondo i tre piani dello spazio (z,x,y) disposto nel foro a profondità note, viene valutato l'istante di primo arrivo del treno delle onde P e SH, rispetto all'istante (misurato con il *trigger*) in cui vengono indotte le sollecitazioni alla sorgente; dividendo quindi per tali valori la



distanza tra sorgente e ricevitori, si può ricavare la velocità delle onde P e SH (**Fig. 1**).

Fig. 1: Schema di esecuzione di una prova down – hole.

L'indagine sismica in foro permette di rilevare orizzonti a minor velocità sottostanti ad un livello a velocità più elevata, superando così i limiti della sismica a rifrazione, conosciuto in bibliografia come “orizzonte muto”.

Per le indagini sismiche in foro ci sono varie geometrie di acquisizione secondo come si dispongono tra di loro il sistema energizzante e i ricevitori, ognuna delle quali da un nome diverso alla prova.

Si distinguono tre diversi tipi di indagine: down - hole, cross - hole e up - hole (**Fig. 2**).

Nella prova down - hole la sorgente di onde elastiche si trova in superficie mentre i ricevitori in foro, nella prova up - hole avviene il contrario cioè sorgente in foro e ricevitori in superficie, mentre la prova cross - hole prevede il posizionamento della sorgente e dei ricevitori in due perfori a distanza di solito non superiore a dieci metri.

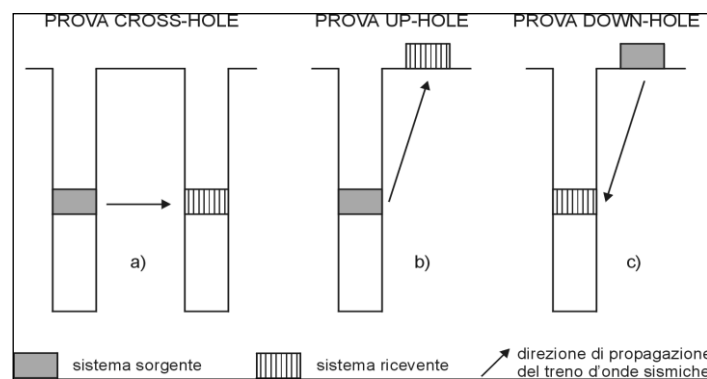


Fig. 2: Diverse metodologie di acquisizione per indagini sismiche in foro.

L'esecuzione delle prove in foro deve essere preceduta da una fase preparatoria in cui si realizza il foro, se questo non è già a disposizione, dove disporre i ricevitori o la sorgente, ed una fase di preparazione degli strumenti di registrazione. Durante la fase di perforazione del sondaggio è necessario operare in maniera tale da 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 come tubazioni in PVC o ABS con spessore > 3 mm da assemblare mediante filettatura M/F o con manicotti di giunzione incollati.

Infine, il foro deve essere cementato in corrispondenza dello spazio anulare compreso tra le pareti e il tubo di rivestimento e chiuso con un *packer*, in modo da garantire la continuità del contatto terreno - tubazione.

La metodologia consiste nella registrazione a varie profondità, mediante uno o più geofoni collocati in foro, dei primi arrivi delle onde generate da una sorgente posta in superficie a breve distanza dal bocca - foro, al fine di ottenere un profilo di distribuzione delle velocità di propagazione delle onde di corpo nei litotipi presenti nel sottosuolo.

Prima di ogni cosa, è però importante assicurarsi che il foro sia libero da strozzature e che il tubo di rivestimento non presenti lesioni.

- **Modalità di acquisizione**

Le componenti indispensabili per una misura Down Hole accurata consistono:

1. una sorgente meccanica in grado di generare onde elastiche ricche di energia e direzionali;
2. uno o più geofoni tridimensionali, con appropriata risposta in frequenza (4,5-14 Hz) e di diametro minore o uguale a 70mm, direzionali e dotati di un sistema di ancoraggio alle pareti del tubo-foro tramite un dispositivo di bloccaggio meccanico, pneumatico e/o elettrico;
3. un sismografo con numero di canali uguale o superiore al numero di ricevitori utilizzati in grado di realizzare campionature di segnali tra 0,025 e 2 millisecondi e dotato di filtri *high pass*, *bandpass* e *band reject*, di "Automatic Gain Control" e di convertitori A/D del segnale campionato ad almeno 16 bit;
4. un trasduttore (*trigger*) alloggiato nella sorgente necessario per l'identificazione dell'istante di partenza della sollecitazione dinamica mediante massa battente.

La sorgente deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali, cioè con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali (ed eventualmente anche verticali).

Per generare le onde di compressione P, si utilizzano i metodi classici quali caduta di un grave, mazza, cannoncino sismico, energizzatori oleopneumatici, etc..

Per la generazione delle onde SH la sorgente è generalmente affidata ad un parallelepipedo in legno o altro materiale, di forma tale da potere essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa (pendolo o mazza) in modo

coniugato (180°).

E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale e che poggia su di una superficie ben spianata e costituita preferibilmente da materiale sabbioso fine 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.

Risulta estremamente importante, perciò, curare un buon accoppiamento (*coupling*) tra il terreno ed il sistema energizzante, soprattutto quando si generano onde SH, al fine di evitare che l'energia prodotta in parte venga dispersa e che si proceda alla generazione di onde puramente di taglio, senza che sia ravvisabile alcun importante contenuto in onde P.

Il *coupling* deve essere per "contatto" e non per "infissione".

Il sistema di ricezione, nella sua versione ottimale, si deve comporre di due (o più) ricevitori, ciascuno dei quali costituito da un trasduttore di velocità orientato secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale.

I trasduttori devono possedere appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno di 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 di onde che si propaga all'interno del mezzo.

Nel caso di due ricevitori posti nel foro, questi devono essere collegati, secondo la loro lunghezza, in modo da 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) ed in modo tale da poterne anche controllare l'orientazione assoluta dalla superficie e far sì che questa rimanga tale per tutti i punti di misura. Bisogna porre particolare attenzione al fatto che i sistemi previsti per mantenere costanti le distanze e per garantire la stessa orientazione dei geofoni, non producono interazione sismica tra i due sensori.

Il trigger generalmente consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui viene generata la sollecitazione sismica di input, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata che viene inviata 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.

Il sistema di trigger è molto importante poiché ogni scoppio risulta rappresentativo di un

punto in profondità e di una velocità di propagazione.

Un ottimale sistema-trigger (interruttore, geofono starter, etc.) all'atto di sollecitazioni ripetute non deve presentare differenze di chiusura circuito superiori a 0.5 millisecondi.

Per l'acquisizione in SH, poiché è necessario eseguire la differenza tra la traccia relativa alla battuta destra e quella della battuta sinistra del parallelepipedo, è necessaria una strumentazione che preveda la funzione "inversione di polarità".

Le modalità esecutive dell'indagine dovranno essere le seguenti:

- posizionamento e bloccaggio degli energizzatori delle onde di compressione e di taglio in prossimità del bocca pozzo (a qualche metro di distanza dai 2 – 5 m) con orientazione in direzione ortogonale ad un raggio uscente dall'asse del foro;
- posizionamento e bloccaggio del ricevitore a fondo foro;
- generazione di un impulso di taglio normale e coniugato con relativa registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio per verifica dei parametri di acquisizione (*record time*).

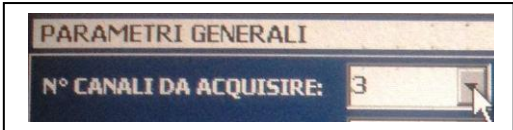
Stabiliti gli esatti parametri di acquisizione si procede con la registrazione nel seguente modo:

- energizzazione delle onde di compressione e di taglio e registrazione del file relativo;
- riposizionamento del ricevitore 1 metro più superficiale rispetto a fondo foro e ripetizione delle energizzazioni di compressione e di taglio come sopra;
- ripetizione delle medesime operazioni lungo tutta la verticale d'indagine.

Nello specifico:

Fase 1: Configurazione e settaggio parametri

- Configurazione strumento:
- Numero di canali da acquisire: 3 o 5 (dipende dal sensore da foro)
 - Frequenza di campionamento: 7500 o 15000 campioni per secondo
 - Numero pagine: 8 (4096 campioni)
 - Sensibilità del trigger: 208 mV
 - Pre-trigger: disattivato o 5-10 ms
 - Guadagno: da aumentare con la profondità



Fase2: energizzare onda di compressione P e premere esegui iterazione;

Fase3: dal menu iterazione selezionare nessuna operazione sul primo canale e sostituzione sui canali 2 e 3 e spostarsi in prossimità del parallelepipedo per procedere alla battuta su un lato;

Fase4: dal menu iterazione selezionare nessuna operazione sul primo canale e differenza sui canali 2 e 3 e procedere alla battuta sull'altro lato del parallelepipedo.

Durante questa fase si deve riconoscere chiaramente l'arrivo delle onde di taglio mediante inversione di polarità del segnale acquisito.



Fase5: Salvataggio del file in formato .seg2 che sarà quindi comprensivo e dell'onda P e dell'onda S.

Le misure saranno relative all'intervallo di profondità considerato; si consiglia di effettuare una misura ogni metro di sondaggio e avranno frequenza non inferiore a 1 misura ogni metro di sondaggio.

- **Elaborazione**

La metodologia classica di elaborazione dei dati in linea di massima si articola nelle seguenti fasi:

- picking dei primi arrivi;
- misura dei tempi di ricezione dei primi impulsi rilevati (t);
- calcolo dei tempi verticali (t).

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 confrontate con il segnale di trigger.

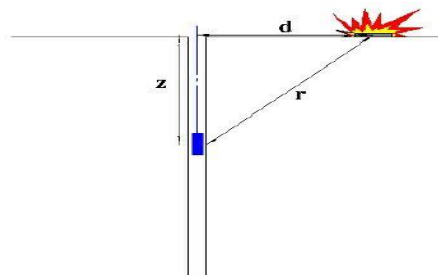
Operando con il doppio sistema di energizzazione, percussione verticale per le onde P, percussione orizzontale per le SH, si ha che nelle registrazioni energizzate in verticale si valuterà il primo arrivo in P e nelle registrazioni energizzate con percussione orizzontale, il primo arrivo sarà costituito dalle onde di taglio SH; col metodo della differenza “battuta destra - battuta sinistra” eventuali onde di compressione provocate durante l'energizzazione tenderanno ad annullarsi, al contrario delle SH, che invertendo in polarità a seconda della direzione di battuta, tenderanno a sommarsi aumentando così d'ampiezza.

La fase del *picking* dei primi arrivi consente di conoscere i tempi di arrivo obliqui (t).

La successiva operazione di *processing* riguarda la correzione dei tempi obliqui in tempi verticali, secondo la seguente equazione:

$$t_{\text{corr}} = \frac{z}{r} t$$

dove t_{corr} è il tempo verticale, z la profondità del ricevitore, r la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore, d la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro e t il tempo obliquo registrato dal geofono, come visibile nello schema semplificato in Fig. 3.



Schema della disposizione dello “shot – point” e del ricevitore in 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 onde rifratte di ampiezze non trascurabili che, precedendo quelle dirette, ingannano sui reali tempi d'arrivo indicando velocità intervallari anomale e sia perché, soprattutto in profondità, l'istante di primo arrivo delle onde non è talora 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.

Calcolati i tempi di tragitto corretti si grafica un diagramma tempi-profondità.

Il passo successivo è quello di individuare le dromocrone, cioè gli intervalli caratterizzati da una pendenza costante; tali pendenze sono sintomatiche della velocità di propagazione delle onde di corpo nei diversi sismostrati individuati.

La procedura di elaborazione descritta è quella del **Metodo Diretto** in quanto acquisita con ricevitore singolo a tre o cinque componenti (S3-S5) che viene calato nel foro.

Se la prova si esegue con due ricevitori (S3-2), si usa in fase interpretativa il **Metodo Intervallo** con il quale i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

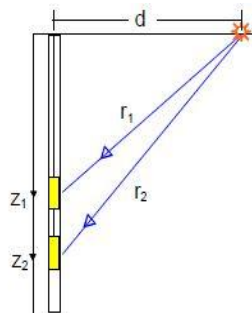


Fig. 4: Schema della disposizione con due ricevitori

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la formula descritta in precedenza e la velocità intervallo delle onde P e S, con relativo grafico, con la formula seguente:

$$v = \frac{z_2 - z_1}{t_{2COR} - t_{1COR}}$$

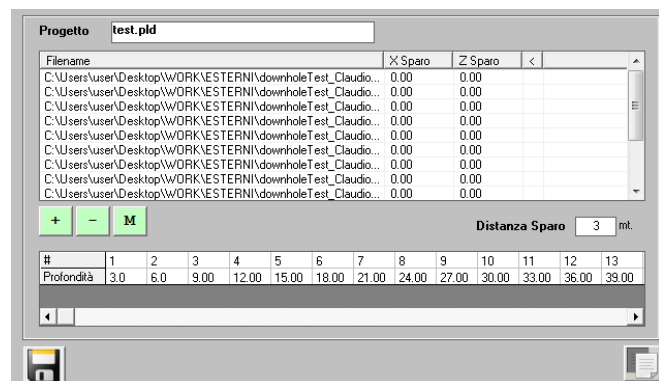
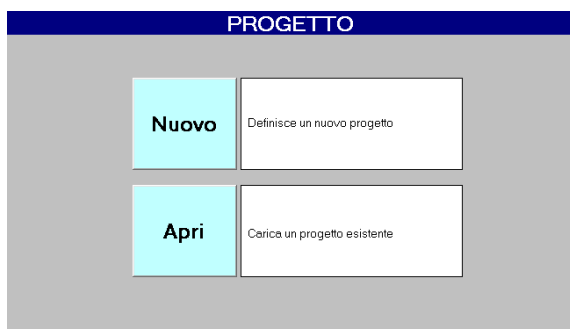
Questo metodo presenta però dei limiti: non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti e non è applicabile nel caso in cui $t_{2cor} < t_{1cor}$.

Il risultato finale della fase di acquisizione è costituito da una serie di files in formato .sg2 che verranno inseriti nel *software* specifico *PSLab* dove andranno opportunamente elaborati ed interpretati.

Il *software* attraverso una procedura guidata, permette di ottenere un rapporto dettagliato, corredato di grafici e tabelle a partire dai dati di campagna.

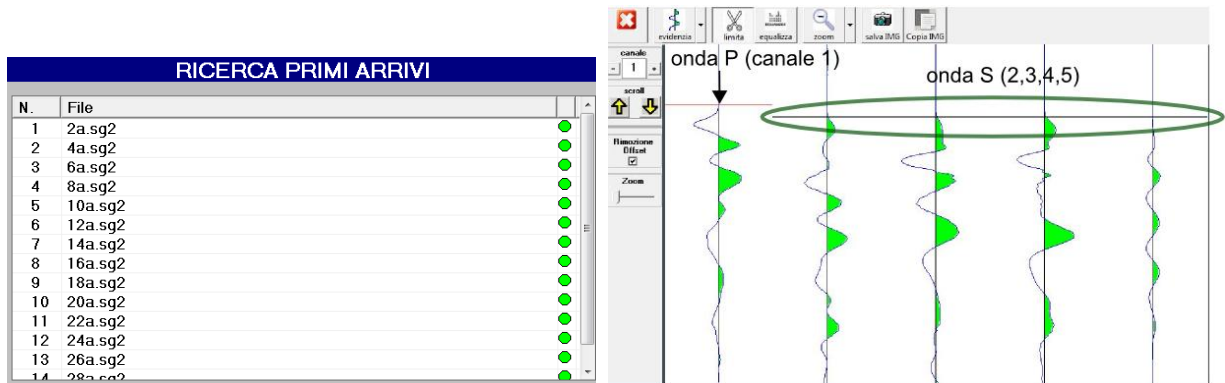
Definite le dromocrone e quindi individuati i diversi sismostrati viene calcolato il parametro Vs,30 utile per definire la categoria di suolo.

Si crea un progetto di lavoro salvando un file .pld e poi si importano le tracce e si definisce la geometria (distanza sparo e profondità).



Caricate tutte le tracce si passa alla ricerca dei primi arrivi aprendo di volta in volta le singole tracce e ricercando sui diversi canali l'esatto tempo di primo arrivo dell'onda P ed S (picking).

E' possibile evidenziare le diverse fasi dell'onda (positiva,negativa) rimuovere l'offset ed eseguire operazioni di zoom sull'ampiezza e sui tempi così da consentire una migliore interpretazione del dato.



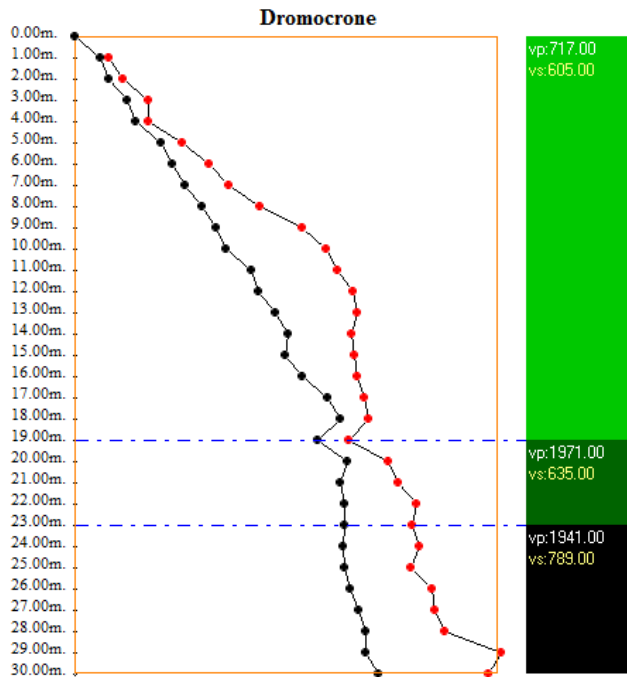
Completato il picking su tutte le tracce caricate nel progetto, è possibile visualizzare la tabella dei primi arrivi in cui viene riportato il calcolo dei tempi corretti (tempi verticali) che consentiranno nella fase successiva di valutare le velocità in termini di V_p e V_s .

Il calcolo si basa sul metodo diretto precedentemente descritto.

Nella sezione finale del software si individueranno le dromocrone definite dal picking effettuato; da questa scheda si procede ad assegnare i diversi sismostrati e in automatico verranno visualizzate le velocità di ciascuno.

I parametri elasto-dinamici verranno calcolati assegnando i valori della densità agli intervalli sismostratigrafici che si sono adottati; risulta fondamentale quindi, per una corretta interpretazione dell'indagine, avere a disposizione dati stratigrafici e geotecnici per una migliore stima dei risultati.

TABELLA PRIMI ARRIVI						
	Tp	Ts	Tp corr.	Ts corr.		
18.0 mt.	27.27	30.20	26.90	29.79		
19.0 mt.	25.00	28.20	24.69	27.85		
20.0 mt.	28.00	32.20	27.69	31.84		
21.0 mt.	27.20	33.20	26.93	32.87		
22.0 mt.	27.67	35.00	27.42	34.68		
23.0 mt.	27.60	34.60	27.37	34.31		
24.0 mt.	27.40	35.20	27.19	34.93		
25.0 mt.	27.53	34.33	27.33	34.09		
26.0 mt.	28.20	36.47	28.01	36.23		
27.0 mt.	29.00	36.80	28.82	36.57		
28.0 mt.	29.67	37.80	29.50	37.58		
29.0 mt.	29.67	43.53	29.51	43.30		
30.0 mt.	31.00	42.20	30.85	41.99		



L'utilizzo di indagini down-hole permette, quindi, una caratterizzazione in situ del terreno in termini di parametri elasto-dinamici e spessori dei sismostrati indagati.

Gli svantaggi sono dati dal carattere estremamente puntuale del dato acquisito e dalla scarsa attendibilità dello stesso per profondità d'investigazione inferiori alla distanza superficiale tra sorgente sismica e boccaforo.