

CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE

ARGOMENTO TRATTAZIONE:

- RICHIAMO ALLE NTC 2008
- CENNI TEORICI E PRINCIPI DI BASE DELLA SISMICA A RIFRAZIONE:
 - DI SUPERFICIE CON TECNICA TRADIZIONALE E TOMOGRAFICA
 - IN FORO (TIPO DOWN-HOLE E CROSS-HOLE)
- RICHIAMI AI MODULI ELASTICI DINAMICI

PROCEDURE DI ACQUISIZIONE IN CANTIERE : STRUMENTAZIONE TECNICA E PROBLEMATICHE

ELABORAZIONE ED INTERPRETAZIONE – LIMITI APPLICATIVI

ESEMPI DI APPLICAZIONI SPECIFICHE DELLE METODOLOGIE APPLICATE

Caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione - misura del Vs30

Nella logica prestazionale adottata dalle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08 – D.M. 14/01/2008) si richiede al progettista di affrontare e risolvere problematiche specialistiche, tra cui assume una particolare rilevanza la valutazione della stabilità geotecnico-sismica del sito di costruzione e del suolo di fondazione, con l'obiettivo ultimo di definire il rischio "geotecnico" nell'eventualità di un terremoto.

Un ruolo chiave nella caratterizzazione geotecnico-sismica occupano le **indagini sismiche**, che rappresentano il migliore metodo per la determinazione della velocità di propagazione delle onde di taglio e quindi del parametro **Vs 30** richiesto come richiesto per le categorie del sottosuolo.

Tralasciando le correlazioni empiriche di dubbia validità con i dati penetrometrici (oltretutto applicabili solamente su sedimenti non consolidati), le velocità delle onde di taglio si possono ricavare:

a) direttamente:

1) con la Sismica a **Rifrazione di Superficie in SH** (solo in assenza di inversioni di velocità(*));

2) con Sismica a Rifrazione in Foro con SH (tecnica tipo **Down-Hole** e **Cross-Hole**);

(*) se non utilizzata la tecnica Tomografica

b) in maniera indiretta:

3) attraverso l'analisi delle **Onde Superficiali** (velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza) ricavate utilizzando array sismici lineari a geometria semplice o più complessa con sistemi di energizzazione attiva (**SASW**, **MASW**) o passiva (ad esempio **ReMi**)

Al di là delle perplessità riguardanti l'effettiva correlazione tra il parametro normativo **Vs30** (preso come unico dato rappresentativo) e l'amplificazione degli effetti sismici di sito (Gallipoli e Mucciarelli, 2009), **la scelta più idonea della tecnica da utilizzare per la misura del profilo stratigrafico delle onde di taglio, deve tener in conto di alcune valutazioni relative a:**

- "valore" dell'opera in termini di coinvolgimento di risorse umane;
- "incidenza del sistema fondazionale rispetto la complessità del modello geologico-tecnico di sottosuolo;
- sismicità dell'area di progetto.

Il processo decisionale sarà quindi fondato su una analisi costi-benefici, salvaguardando in ogni caso l'ottenimento di una adeguata caratterizzazione sismica del sottosuolo. Nella considerazione ogni progetto deve essere valutato dettagliatamente con un approccio specifico, una regola generale di buon senso per la caratterizzazione sismica di sito può essere così sintetizzata.

1) Per la misura di Vs30, utilizzare preferibilmente tecniche dirette se:

- in abbinamento a campagne di indagini geognostiche (in tal caso l'incidenza dei costi è di poco superiore agli altri tipi di prove indirette);
- è necessaria anche una ottima caratterizzazione geotecnica e sismica di litotipi specifici (livelli altamente compressibili, liquefacibili, valutazione differente grado di fratturazione di un ammasso roccioso, ecc.)
- laddove si ipotizzano litostratigrafie con presenza di inversioni di velocità sismica.

2) Per la misura di Vs30, utilizzare tecniche indirette molto più economiche e speditive, in particolare da analisi di onde superficiali, se:

- esiste una discreta, anche se non puntuale, conoscenza del modello geologico-tecnico;
- se non vi sono spazi idonei agli stendimenti sismici (bastano soli 50m)

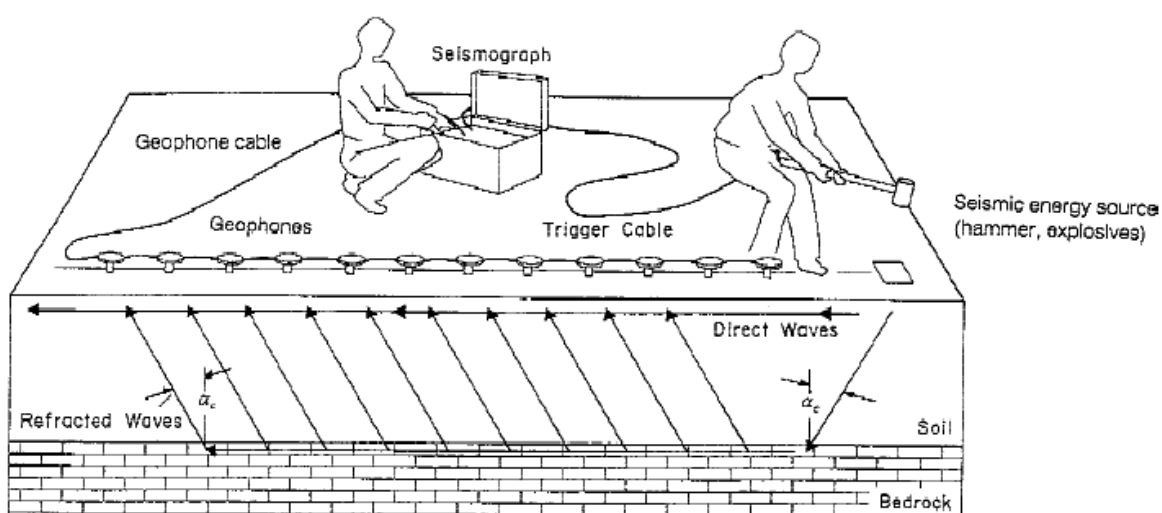
Congiuntamente alla misura del parametro di rigidità con le tecniche suddette, è sempre bene effettuare la misura della frequenza di sito ricavabile direttamente da registrazione di microtremori a stazione singola e analisi mediante la tecnica dei rapporti spettrali, in quanto il periodo di risonanza è un altro parametro sicuramente correlato alla risposta sismica locale.

2. METODO SISMICO A RIFRAZIONE : DI SUPERFICIE

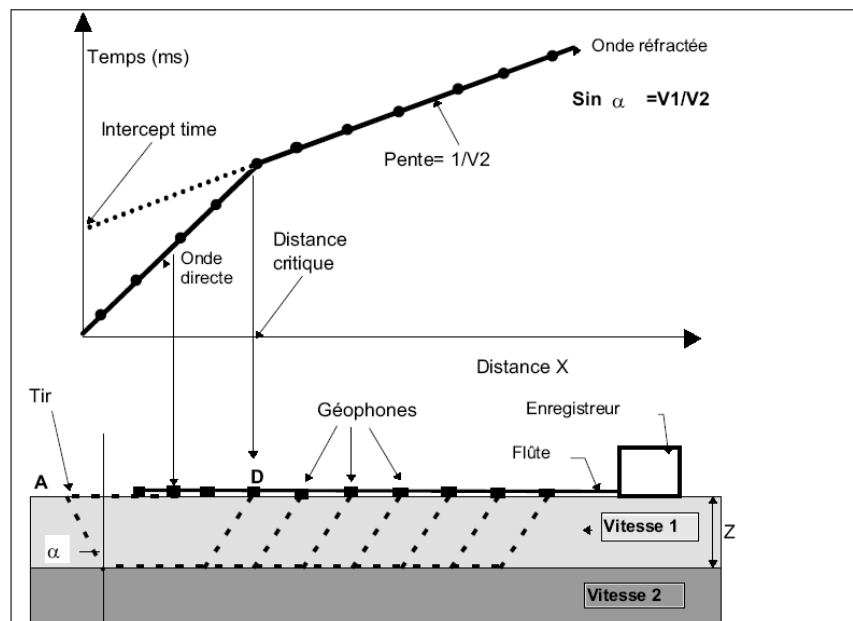
(Normativa Rif.: ASTM D 5777-00)

2.1. CENNI TEORICI

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura del tempo richiesto perché una perturbazione di origine elastica (onde di compressione P e di taglio S) si trasmetta dalla sorgente ai geofoni percorrendo gli strati superficiali, a bassa velocità, e la superficie di separazione di due mezzi elastici differenti con onde rifratte, a velocità più elevata.



La prospezione sismica a rifrazione è particolarmente indicata per ottenere rapide informazioni strutturali nel caso di strutture a grandi dimensioni, che siano costituite almeno da uno strato rifrangente ad alta velocità, giacente sotto una serie stratigrafica avente velocità più bassa. Se in un sistema di assi cartesiani si riportano i tempi di arrivo delle onde sismiche in funzione della loro distanza dal punto di scoppio, si ottiene una *famiglia di curve tempi-distanze che dipendono dalle caratteristiche geologiche locali*. Tali curve vengono dette "**dromocrone**".

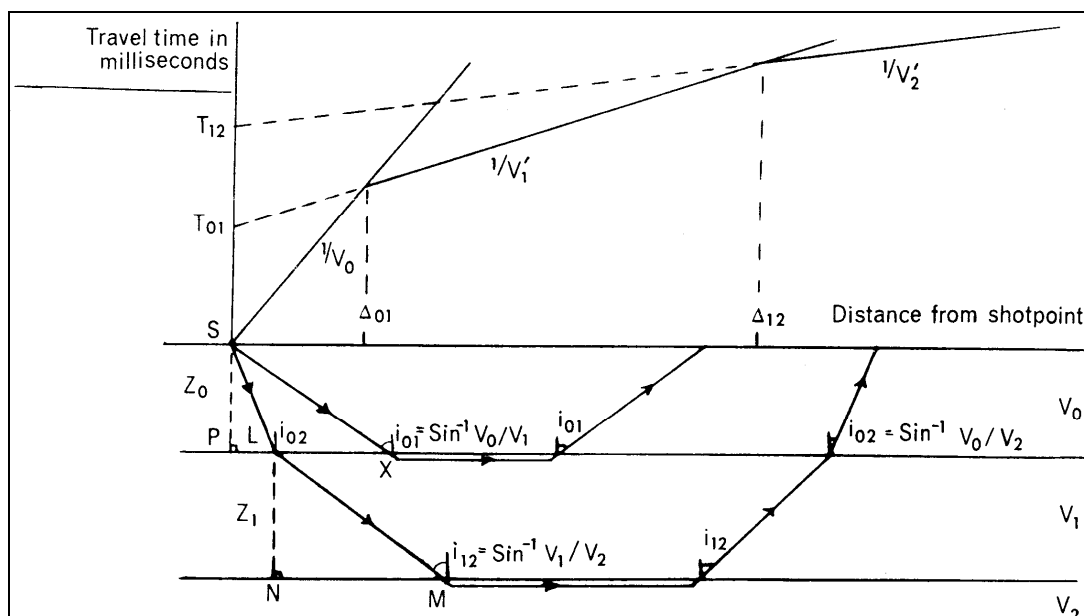


- Dromocrone corrispondenti al doppio strato ed all'areato

Nella figura sono rappresentate le dromocrone relative alle onde dirette, riflesse e rifratte, più la dromocrona degli impulsi diretti nell'areato. Il Tempo Intercetto rappresenta il valore del tempo di arrivo della rifratta a distanza zero, ottenuto proiettando sull'asse dei tempi la retta relativa alla velocità di propagazione nel secondo mezzo.

Nel punto angolare D corrispondente al geofono S_0 , arriveranno contemporaneamente le onde dirette e le onde rifratte. Per i geofoni posti ad una distanza minore di A - D, il primo arrivo sarà rappresentato da un'onda diretta. Da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una distanza maggiore di A-D.

Si possono costruire dromocrone anche nel caso di **n strati**, purché "le velocità aumentino sempre con la profondità"; ogni punto angolare indicherà il passaggio da uno strato al successivo, e le velocità saranno indicate dalla pendenza dei rispettivi rami di dromocrone. Se gli strati sono poco potenti con velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva.



Dromocrona nel caso di aumento della velocità con la profondità.

I principali limiti della sismica a rifrazione risiedono nella **impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità**, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l'energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta; tale situazione è nota come "**orizzonte muto**".

Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile.

Ambedue le situazioni stratigrafiche portano a sovraestimare o sottostimare lo spessore delle coperture.

2.3 METODI DI INTERPRETAZIONE SISMICA A RIFRAZIONE DI SUPERFICIE

Esistono differenti METODI di interpretazione della sismica a rifrazione di superficie che vengono di norma utilizzati a seconda dei seguenti casi di applicazione:

- **Metodo Delle Intercette (I.T.M. Intercept Time Methods)**
(Per Stratigrafie regolari a strati paralleli e sub-orizzontali) – Condizione che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità assolutamente necessaria;
- **Metodo Reciproco Generalizzato (G.R.M. – Palmer)**
(Per Morfologie articolate e strati $>20^\circ$) – Consente di ricostruire l'andamento di rifrattori ondulati a qualsiasi profondità, usando sempre geometria dei profili coniugati;
- **Metodo Reciproco di Hawkins o Delay Time (D.T.M.)**
(Per Morfologie articolate e strati $<20^\circ$) – Metodo più speditivo e semplificato del GRM
- **Metodo di RAY TRACING o Tomografico**
(Tracciamento dei raggi sismici usato in tomografia: per morfologie complesse e Inversioni delle Velocità Sismiche) –

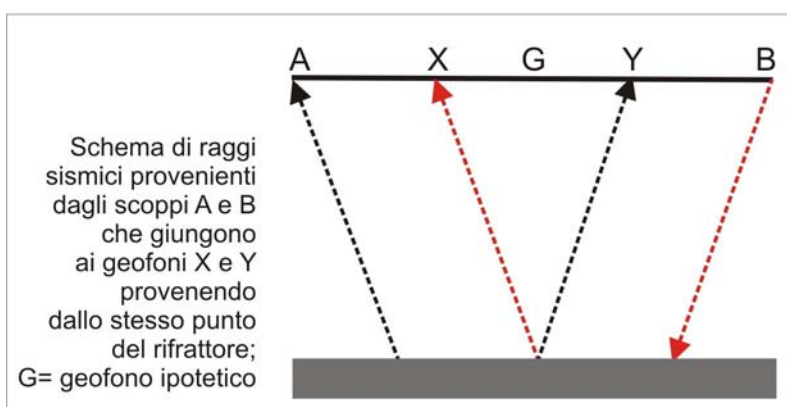
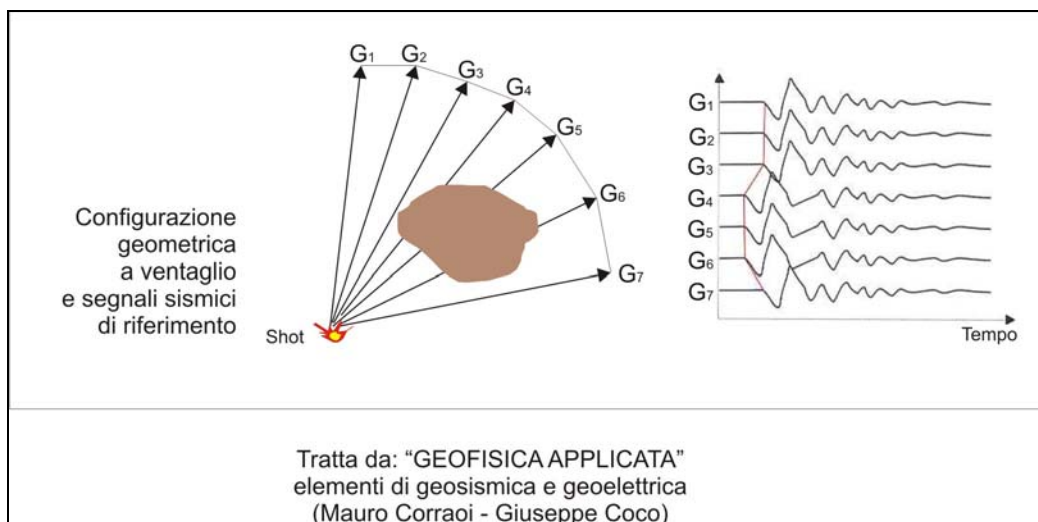


Figura tratta da: "GEOFISICA APPLICATA"
elementi di geosismica e geoelettrica
(Mauro Corrao -Giuseppe Coco)

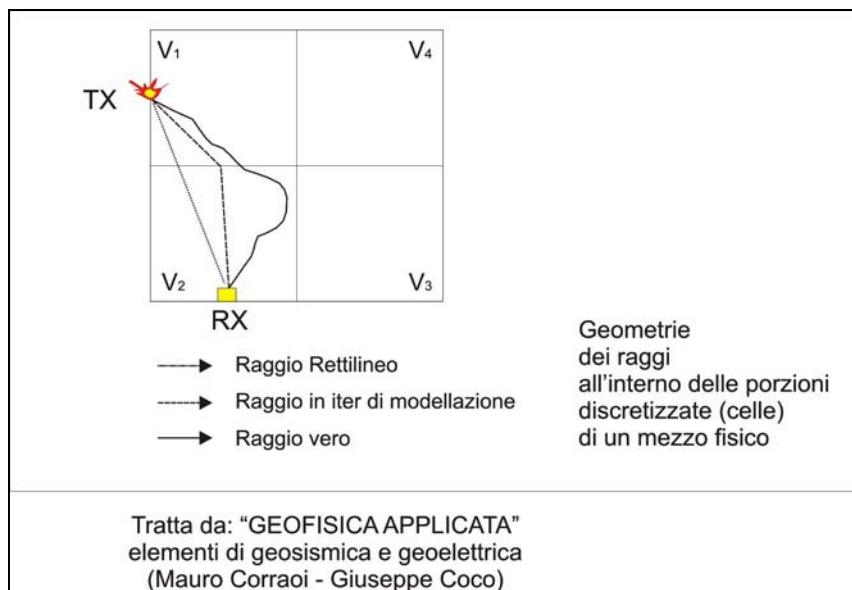
2.2 ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

Per elaborazione tomografica si intende la tecnica generale che consente di ricostruire oggetti bidimensionali o tridimensionali nel sottosuolo mediante la misura dei tempi di percorso (o delle ampiezze) di onde sismiche, che si propagano attraverso una determinata sezione, definita da fori di sondaggio o dalla stessa superficie del piano campagna.

La tecnica sperimentale si basa sulla collocazione lungo la sezione dell'oggetto da indagare del maggior numero di punti di trasmissione e di ricezione (TX scoppi-RX geofoni) della perturbazione elastica in modo che i raggi possano comprendere l'oggetto da investigare.



La ricostruzione del percorso dell'onda nel mezzo è legata all'assunzione di una rettilinearità all'interno del mezzo fisico (omogeneo) perché le onde seguono sempre il percorso per il quale impiegano il minimo tempo (nel mezzo più veloce).



La ricerca del modello di distribuzione di velocità del terreno che ottimizza i tempi di arrivo individuati sui sismogrammi delle registrazioni di campagna viene effettuato in modo iterativo fino al raggiungimento della soluzione che minimizza l'errore fra i tempi misurati e quelli calcolati sulla soluzione ottenuta.

L'impostazione del problema tomografico viene risolto tramite la costruzione di un sistema di equazioni lineari, che dai tempi osservati ottiene il campo delle velocità.

Viene utilizzato un modello di partenza privo di condizioni iniziali al fine di eliminare qualsiasi valutazione preliminare sull'assetto geologico che, in caso di imprecisioni, potrebbe dirottare verso una soluzione che non minimizzi l'errore oppure che lo minimizzi verso un minimo relativo della funzione di convergenza.

Il modello iniziale e la soluzione finale sono costituiti da una serie di celle all'interno delle quali il valore di velocità rimane costante: tale valore viene aggiornato ad ogni iterazione del procedimento di calcolo per raggiungere il miglior risultato. *Le dimensioni delle celle utilizzate e quindi il dettaglio finale ottenuto sono fortemente dipendenti dalla spaziatura dei geofoni e dal numero degli shot effettuati: aumentando la spaziatura dei geofoni si deve aumentare il numero degli shot per mantenere costante il dettaglio.*

Il software utilizzato per la ricostruzione dei tempi di arrivo e dei percorsi d'onda si basa su una soluzione agli elementi finiti (per l'Eikonal Equation -Vidale 1988) che tiene conto di tutti i possibili percorsi, onde dirette, rifratte e diffratte che generano i primi arrivi sui sismogrammi.

2.3 STRUMENTAZIONE METODOLOGIA

Gli elementi fondamentali dell'attrezzatura sismica sono:

- Sismografo
- Geofoni Verticali e Orizzontali
- Geofono starter
- Cavi Geofonici – Multicanale
- Massa battente , Cannoncino sismico

La strumentazione generalmente utilizzata è costituita da un sismografo a 24-48 canali a cumulabilità di impulsi con registrazione degli eventi in forma digitale.

I sensori hanno il compito di convertire l'energia elastica delle onde in volt, rappresentando le ampiezze in scale di grigi grazie alla dinamica del sismografo. Sono rappresentati generalmente da catene di 24-48 geofoni componente verticale (dai 15-30 Hz) e da geofoni a componente orizzontale (8-10Hz) per la registrazione delle onde SH.



L'energizzazione delle onde di compressione P avviene utilizzando, un grave del peso di 150-200 kg, fatto cadere su di una piastra in ferro da una certa altezza, mentre per l'emissione delle onde di taglio, si realizza ponendo in direzione perpendicolare allo stendimento un parallelepipedo di ferro o ad esempio un trave in legno, percuotendolo con una massa battente (o un pendolo) sui due lati opposti rispettivamente per la battuta destra e quella sinistra : ciò per ottenere l'inversione di fase dell'onda sismica ed eliminare così le ambiguità di determinazione del primo arrivo. Per aumentare l'effetto dell'energizzatore, il trave è appesantito con il peso di un autoveicolo ponendo le ruote dello stesso al di sopra del trave utilizzato.

Fondamentale, per una buona riuscita della registrazione dei dati di campagna è l'accoppiamento dei geofoni e della piastra/trave di energizzazione al terreno che sia suolo o roccia.

L'istante di tempo zero, ovverosia il segnale di inizio registrazione, viene inviato allo strumento, per entrambe i tipi di energizzazione, da un interruttore (Hammer switch) posto direttamente sulla massa battente o dal geofono starter.



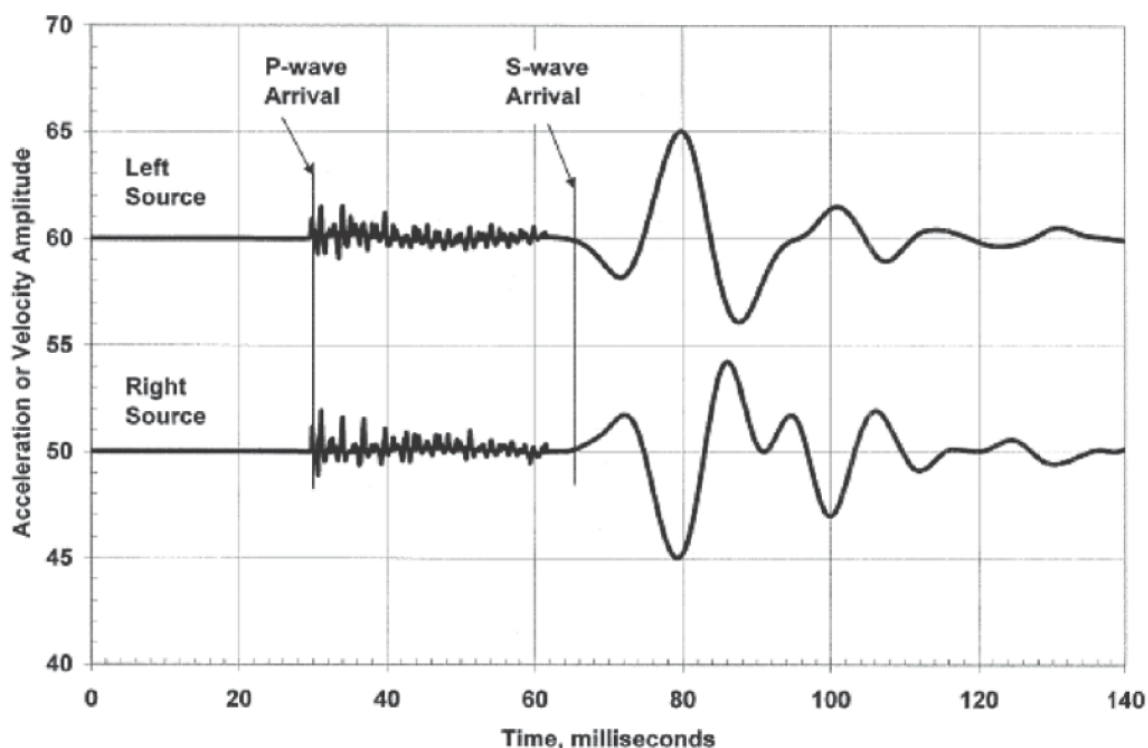
3. PROSPEZIONI SISMICHE - METODO DOWN-HOLE

(Normativa Rif.: ASTM D 7400 - 08)

3.1. CENNI TEORICI

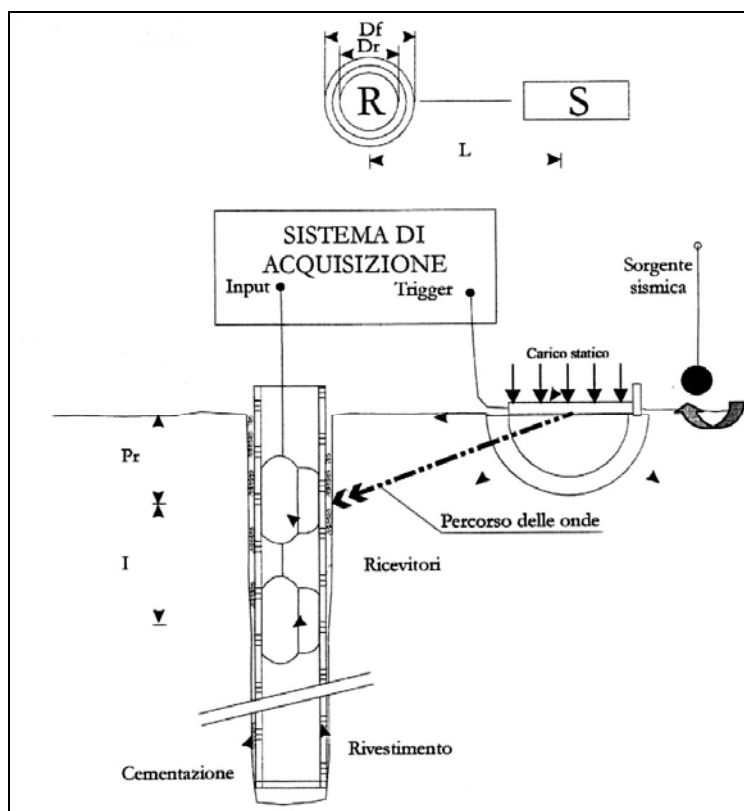
*Il metodo down-hole rappresenta una delle più accurate misure non distruttive per la determinazione delle velocità delle onde e di conseguenza delle proprietà fisico-meccaniche dinamiche dei terreni, in particolare per una corretta valutazione della risposta di un terreno soggetto a carichi dinamici (ad es. terremoti). Tale metodologia si basa sui principi della sismica a rifrazione di superficie ma, rispetto a quest'ultima, permette, tra l'altro, **di rilevare orizzonti a minor velocità sottostanti ad un livello a velocità più elevata**, superando così i limiti della sismica a rifrazione, conosciuto nella bibliografia come "orizzonte muto", in altre parole, uno strato a minore velocità di propagazione delle onde sottostante ad uno con velocità di propagazione più alta, è invisibile.*

Si registrano generalmente due tipi di onde di corpo, quelle di compressione (P) e quelle di taglio (SH polarizzate orizzontalmente).



L'esecuzione di una prospezione sismica Down-Hole richiede la perforazione di un sondaggio generalmente strumentato con un tubo (in PVC o altro materiale) di spessore maggiore o uguale a 3 mm con diametro non superiore ai 130 mm; durante la fase di perforazione ogni cura deve essere posta per ridurre al minimo il disturbo sulle pareti e nelle zone circostanti il foro. **La cementazione deve essere eseguita garantendo la continuità del contatto terreno - tubazione, iniziando a pompare dal basso verso l'alto spazzando via il fango ed i detriti eventualmente presenti.**

L'apparato di ricezione (geofono tridimensionale) é calato a profondità note nel foro e, mediante un packer di cui è dotato, fatto aderire alle pareti del tubo; successivamente sono registrati i sismogrammi relativi ai tempi di percorso tra il punto di energizzazione (shot-point) in superficie e quello a cui è posto il geofono. Tali tempi in fase di processing, sono inseriti in un diagramma spazio-tempo (dromocrona) dove la pendenza delle rette determinate dalla successione dei punti di primo arrivo, rappresenta la velocità dei litotipi investigati.



Schema di prospezione down-hole (Da programma VEL Regione Toscana)

3.2 STRUMENTAZIONE METODOLOGIA ED INTERPRETAZIONE

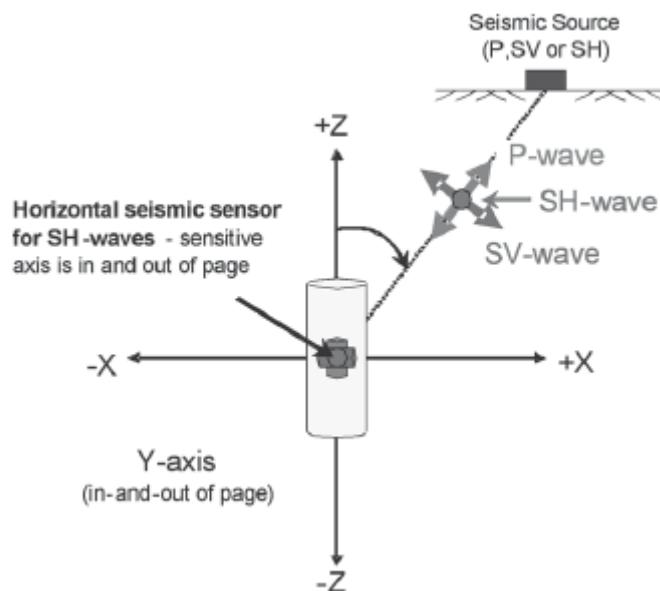
Gli elementi fondamentali dell'attrezzatura sismica sono:

- Sismografo
- Geofoni Triassiali da foro
- Geofono starter-trigger
- Sistema ancoraggio del Geofono (aria o azoto)

Per l'acquisizione si utilizza un sismografo che consente di sommare (in realtà è una differenza) le battute direttamente in campagna.

Il geofono tridimensionale di frequenza 4,5-10 Hz, (se ne possono usare anche due contemporaneamente ad una distanza fissa uno dall'altro) viene calato sul fondo del foro di sondaggio, mentre l'acquisizione viene svolta facendo risalire il sistema gradatamente, di una distanza generalmente pari ad un metro.

Bisogna prestare attenzione affinché la **direzione di vibrazione** del sensore orizzontale sia parallela alla direzione della sorgente di SH: per tale motivo si preferisce usare delle aste quadre per orientare il geofono.



La distanza dal centro del punto di scoppio – boccaforo è in genere compresa tra 1e5 m, in funzione della profondità di investigazione.

L'energizzazione delle onde di compressione P avviene utilizzando, una massa battente, fatta cadere su di una piastra in ferro da una certa altezza. Per le onde di taglio, l'energizzazione avviene mediante un trave in legno, orientato perpendicolarmente al raggio uscente dal foro, percosso alternativamente dalla massa battente ed appesantito con un automezzo ponendo le ruote al di sopra dello stesso, per migliorarne il contatto con il terreno.

Le due registrazioni (battuta destra e sinistra) sono sommate dallo strumento direttamente in acquisizione, producendo un solo sismogramma per le SH.

L'interpretazione consiste nella determinazione dei primi arrivi sia per le onde di compressione sia per le onde di taglio. I tempi così calcolati si riferiscono a tempi "obliqui" in quanto l'energizzazione non è allineata con i geofoni. Per ottenere i tempi in verticale viene effettuata una correzione che tiene conto sia della geometria del sistema, sia della correzione all'areato.



4. INDAGINI GEOFISICHE IN FORO: CROSS-HOLE

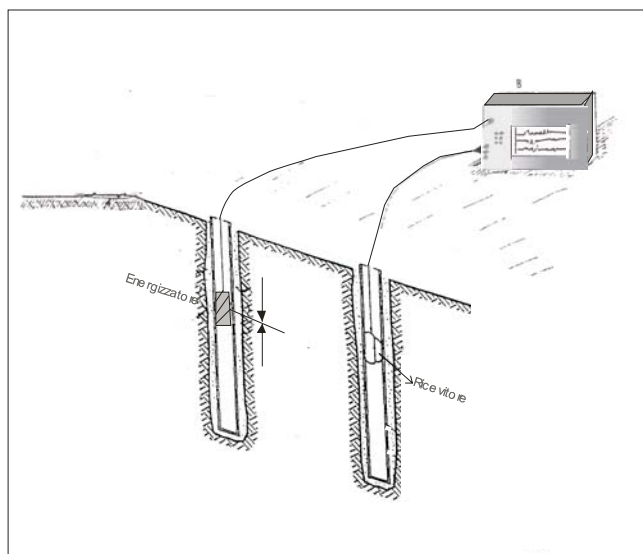
(Normativa Rif.: ASTM D4428/D4428M-91 ASTM)

Lo scopo della prova consiste nel determinare le velocità di propagazione delle onde di compressione (P), di taglio (S) calcolando il tempo ad esse necessario per percorrere la distanza tra due punti ad una distanza nota.

Anche con questa metodologia si possono "teoricamente" eliminare alcune problematiche peculiari della sismica a rifrazione di superficie, quali le inversioni di velocità (orizzonte muto) o la presenza di strati sottili (che possono portare a sovrastimare o sottostimare le caratteristiche dei terreni).

Queste misure sono comunemente effettuate con l'ausilio **di due o più fori** di sondaggio, appositamente rivestiti, in uno dei quali viene inserita la sorgente di energia (esplosivo, sparker o sorgente ad impatto), mentre nei restanti vengono posti gli apparecchi di registrazione. Si prosegue poi alla acquisizione dei dati con il progressivo spostamento dei punti di energizzazione e di misura lungo la verticale in modo che le strumentazioni rimangano tutte alla medesima quota.

L'interpretazione dei sismogrammi registrati durante la prova avviene mediante determinazione delle velocità di propagazione delle onde nel dominio del tempo e della frequenza (meno usata), misurando il tempo impiegato dalle onde sismiche nel percorrere, lungo la direzione orizzontale, la distanza tra la sorgente e i geofoni.



Schema di prospezione cross-hole.

L'esecuzione delle prospezioni descritte richiede la perforazione di almeno due fori di sondaggio generalmente strumentati con un tubo (in PVC o altro materiale) cementato alle pareti del foro al fine di garantire un migliore contatto con i terreni circostanti .

La validità dei risultati ottenuti, in termini di caratterizzazione sismica, è verificata se si verificano le seguenti condizioni:

- corretta cementazione della tubazione plastica con le pareti del foro.
- le onde viaggiano orizzontalmente nel terreno, ovvero non si presentano fenomeni di rifrazione su strati a velocità più alta contigui a quello interessato;
- sorgente e geofoni sono sullo stesso terreno, ossia le onde non attraversano discontinuità.
- le distanze tra i punti di energizzazione ed il geofono risultano note con estrema precisione. A tale scopo i fori utilizzati per le prove dovrebbero essere perfettamente verticali o comunque presentare una inclinazione nota.

E' possibile che in presenza di brusche e repentine variazioni di rigidità con la profondità le onde P e S vengano rifratte in corrispondenza delle discontinuità, giungendo ai ricevitori ancora prima di quelle dirette della stessa natura.

L'accuratezza delle misure si ottiene posizionando i fori il più vicino possibile (comunemente ad una distanza di **5 m**). La seconda condizione viene garantita da una accurata conoscenza geologica della zona, (anche mediante l'analisi delle stratigrafie dei fori di sondaggio utilizzati per le prospezioni), mentre la terza prescrizione in elenco si concretizza nella esecuzione di rilievi inclinometrici per la misura della verticalità dei fori .

4.1. STUMENTAZIONE ED ACQUISIZIONE

Gli elementi fondamentali dell'attrezzatura sismica sono:

- Sismografo
- Geofoni Triassiali da foro (1 o 2)
- Geofono starter-trigger

Per la verifica della verticalità dei fori e quindi per il calcolo delle distanze tra i due fori alle diverse profondità di misura è stata utilizzata una sonda inclinometrica biassiale servoinclinometrica SISGEO mod. S232SV30, avente le seguenti caratteristiche:

Sonda:

Tipo di sensore: servoinclinometrico

Campo di misura: $\pm 30^\circ$

Passo di misura: 1 m

Costante strumentale: 20.000 sin

Centralina:

Acquisitore automatico mod. SISGEO C800U

Programma di elaborazione e restituzione dati:

Inclin 2

4.2 STRUMENTAZIONE CROSS-HOLE

L'unità di registrazione è rappresentata da un sismografo a 24 canali a cumulabilità di impulsi della DMT SUMMIT mod. Compact con registrazione degli eventi in forma digitale, mentre il sistema di ricezione è costituito da un geofono tridimensionale con frequenza propria di 10 Hz reso solidale al foro di sondaggio mediante sistema di ancoraggio pneumatico.

La sorgente utilizzata è rappresentata da un martello da foro ad azione meccanica con la possibilità di **energizzare nelle due direzioni del foro in modo da generare onde di taglio con polarità invertita**. Il martello è reso solidale con il foro di sondaggio tramite dei pistoncini idraulici.

4.3. INTERPRETAZIONE DEI DATI

L'interpretazione delle misure Cross-Hole è avvenuta trovando inizialmente i tempi di arrivo per le singole registrazioni, sia per le onde P sia per le onde S: in considerazione

della distanza con la verticale dei due fori attrezzati, si sono quindi calcolati i valori di velocità con la profondità per entrambi i tipi di onde sismiche.



5. MODULI ELASTICI DINAMICI

5.1 RAPPORTO V_p/V_s

Questo parametro può fornire utili informazioni sullo stato di consolidazione e sulla presenza di gas nei porous media. Alcuni Autori (Gardner & Harris, 1968) affermano che rapporti maggiori di 2 si riscontrano in presenza di sabbie saturate non consolidate; alti rapporti risultano altresì per terreni incoerenti argillo-limosi ad alto grado di saturazione. Valori inferiori a 2 si registrano in presenza di rocce compatte o sedimenti gas saturati. In rocce saturate tale rapporto risulta dipendente dalla litologia, dalla quantità e geometria dei pori e dalle microfratture e potrebbe, nota la litologia, fornire indicazioni su questi ultimi due parametri.

5.2 COEFFICIENTE DI POISSON DINAMICO

Tra i moduli elastici dinamici, tale parametro è l'unico che non necessita della conoscenza della densità per la sua determinazione. E' definito dalla seguente equazione:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{(V_p/V_s)^2 - 1}$$

Sebbene in teoria sia considerato stress indipendente ed i suoi valori risultino compresi tra 0.25 e 0.33, nei porous- media esso risulta stress dipendente, e presenta un campo di variabilità più esteso e può addirittura arrivare secondo GREGORY (1976) a valori negativi. I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati, in alcuni sedimenti incoerenti e saturi i valori possono risultare uguali o superiori a 0.49; nelle sospensioni assume il valore di 0.5.

5.3 MODULO DI TAGLIO DINAMICO

E' definito dalla seguente equazione:

$$G = \gamma \cdot V_s^2$$

dove γ = densità

Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua. Il campo di variabilità nei porous media è molto esteso.

5.4 MODULO DI YOUNG DINAMICO

E' definito dalla seguente equazione:

$$E = (9 \gamma V_s^2 R^2) / (3R^2 + 1)$$

dove:

γ = densità

$$R^2 = K / (\gamma V_s^2)$$

$$K = \gamma(V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Tale modulo dipende dalla porosità, dalla pressione litostatica e dagli altri moduli elastici. Aumenta in misura considerevole quando al campione "dry" a bassa porosità vengono aggiunte piccole quantità di acqua, diminuisce quando un campione ad alta porosità viene sottoposto allo stesso trattamento.

I minimi valori del modulo si registrano in litotipi ad alta porosità saturi in gas, mentre i valori massimi si hanno per litotipi sotto pressione saturati in acqua ed a bassa porosità. Il campo di variabilità è considerevole.

5.5 MODULO DI BULK (o di compressibilità)

Esso è definito rispetto alle V_p , V_s e densità dalla seguente equazione:

$$K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

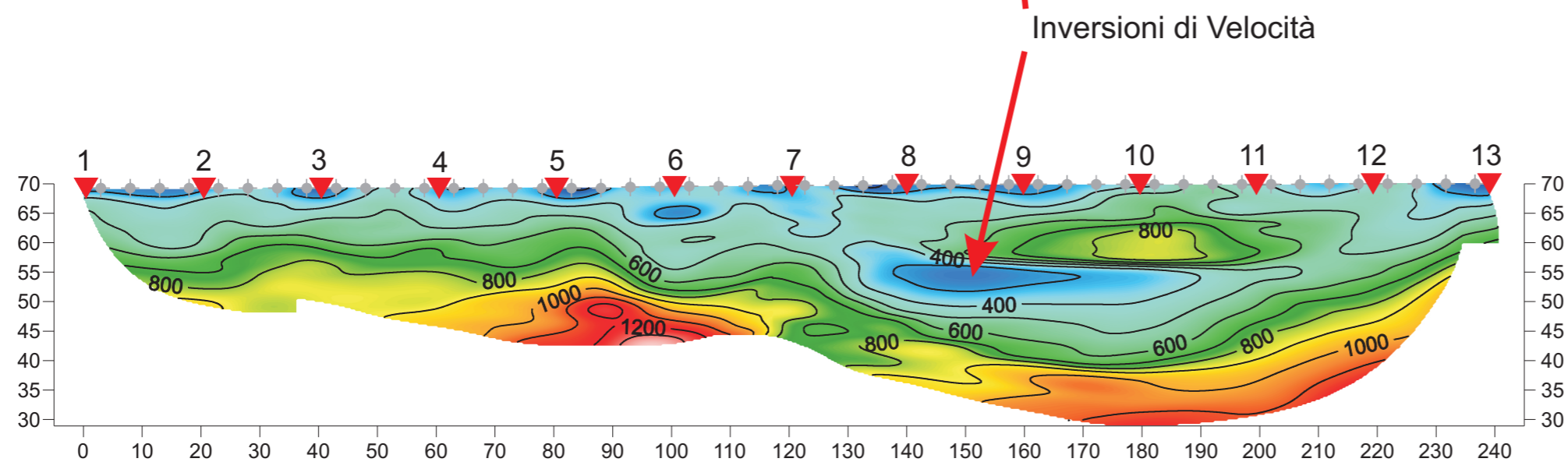
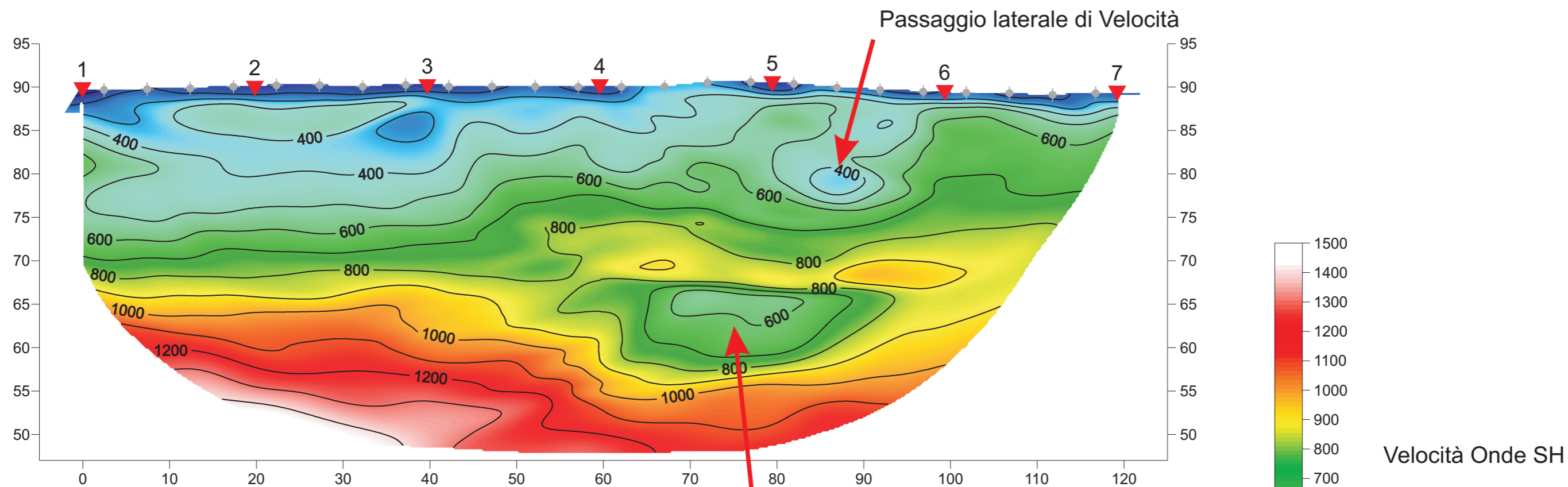
dove:

γ = densità

Questo Modulo varia con la porosità, con la pressione e con la quantità di fluido saturante. Esso aumenta con il grado di saturazione con il decrescere della porosità e con l'aumentare della pressione. Nelle rocce sedimentarie varia di oltre 30 volte.

ESEMPI APPLICAZIONI

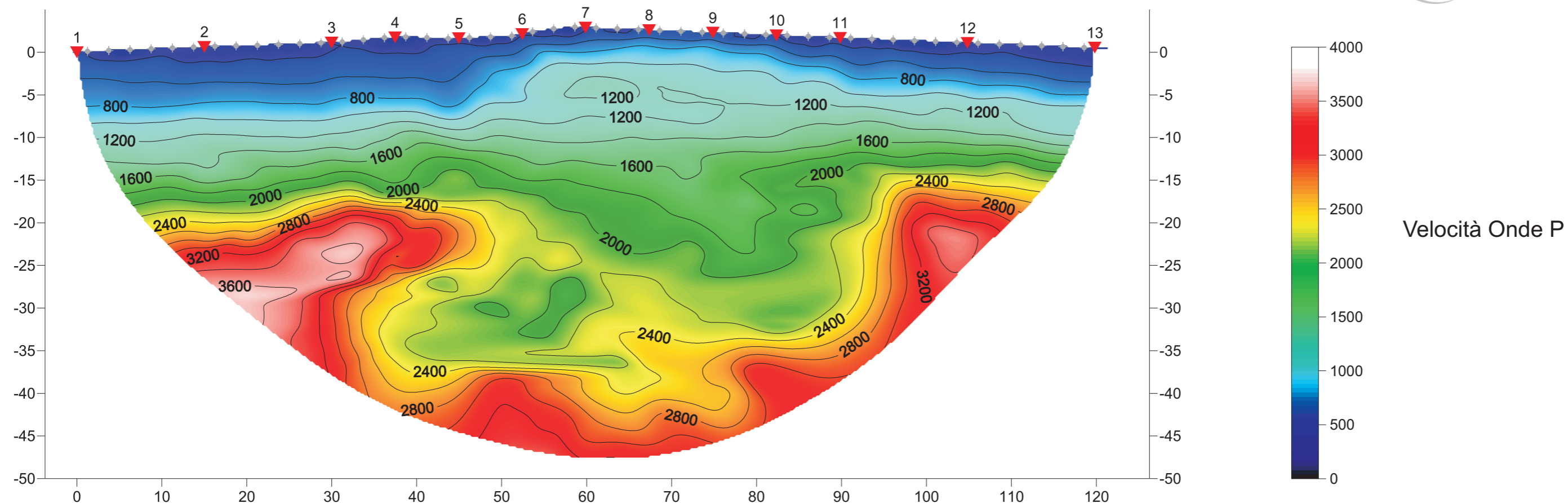
ESEMPI DI SEZIONI SISMICHE ELABORATE CON TECNICA TOMOGRAFICA



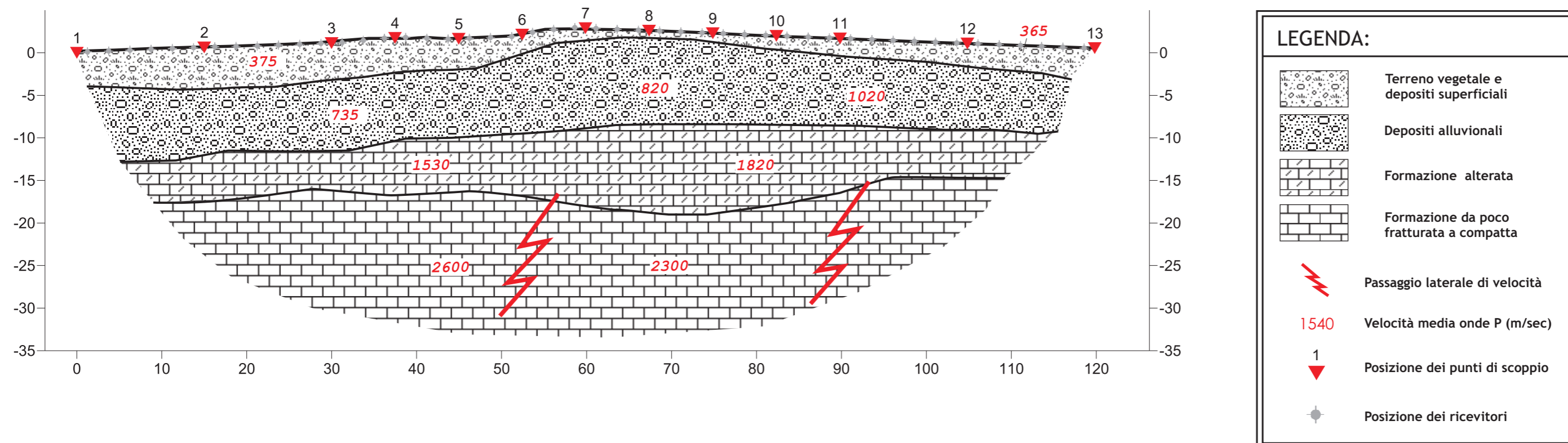
LEGENDA:

- 1 Posizione dei punti di scoppio
- Posizione dei ricevitori
- 200 Velocità media onde P (m/sec)

SEZIONE SISMICA ELABORATA CON TECNICA TOMOGRAFICA

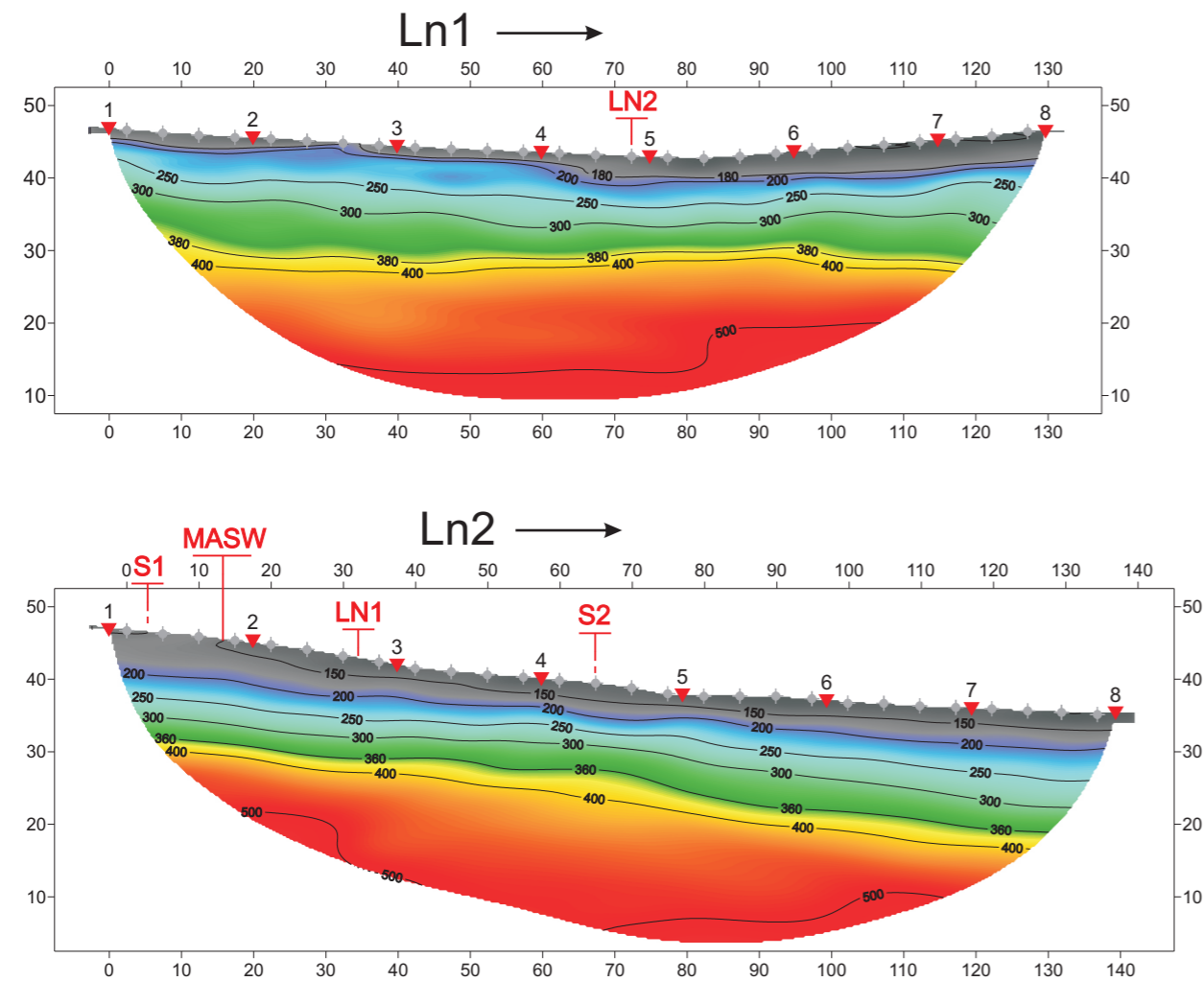


SEZIONE SISMICA ELABORATA CON TECNICA TRADIZIONALE - METODO DEI TEMPI INTERCETTI

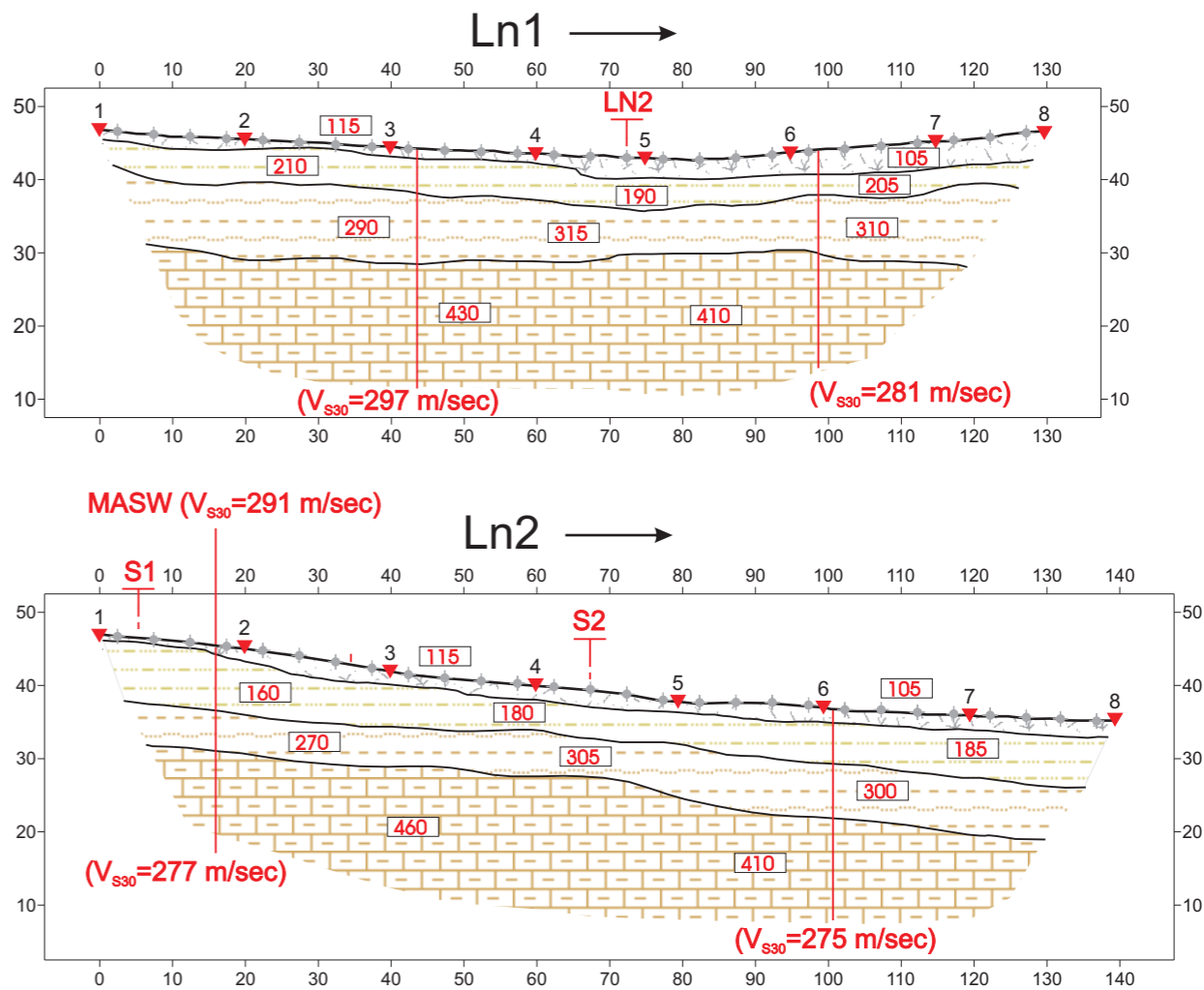


CALCOLO DEL PARAMETRO V_{s30} DALLA SISMICA A RIFRAZIONE E CONFRONTO CON PROVA MASW

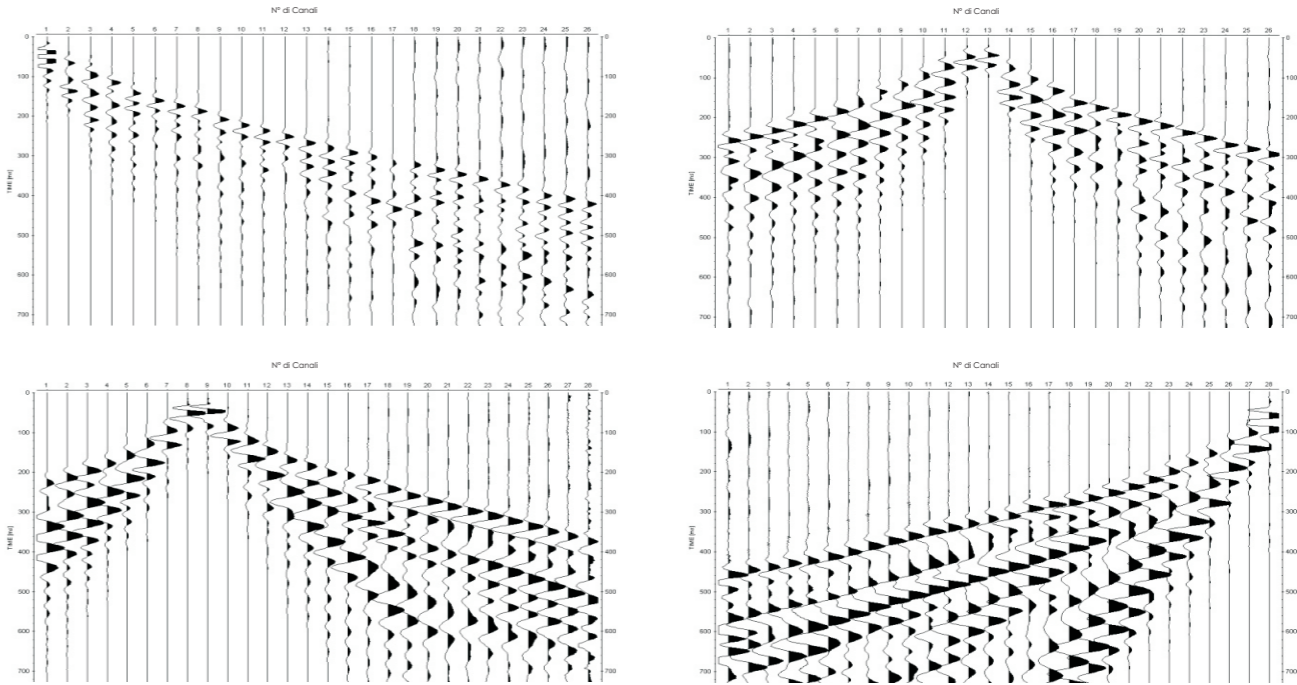
SEZIONI SISMICHE TOMOGRAFICHE



SEZIONI SISMOSTRATIGRAFICHE INTERPRETATIVE



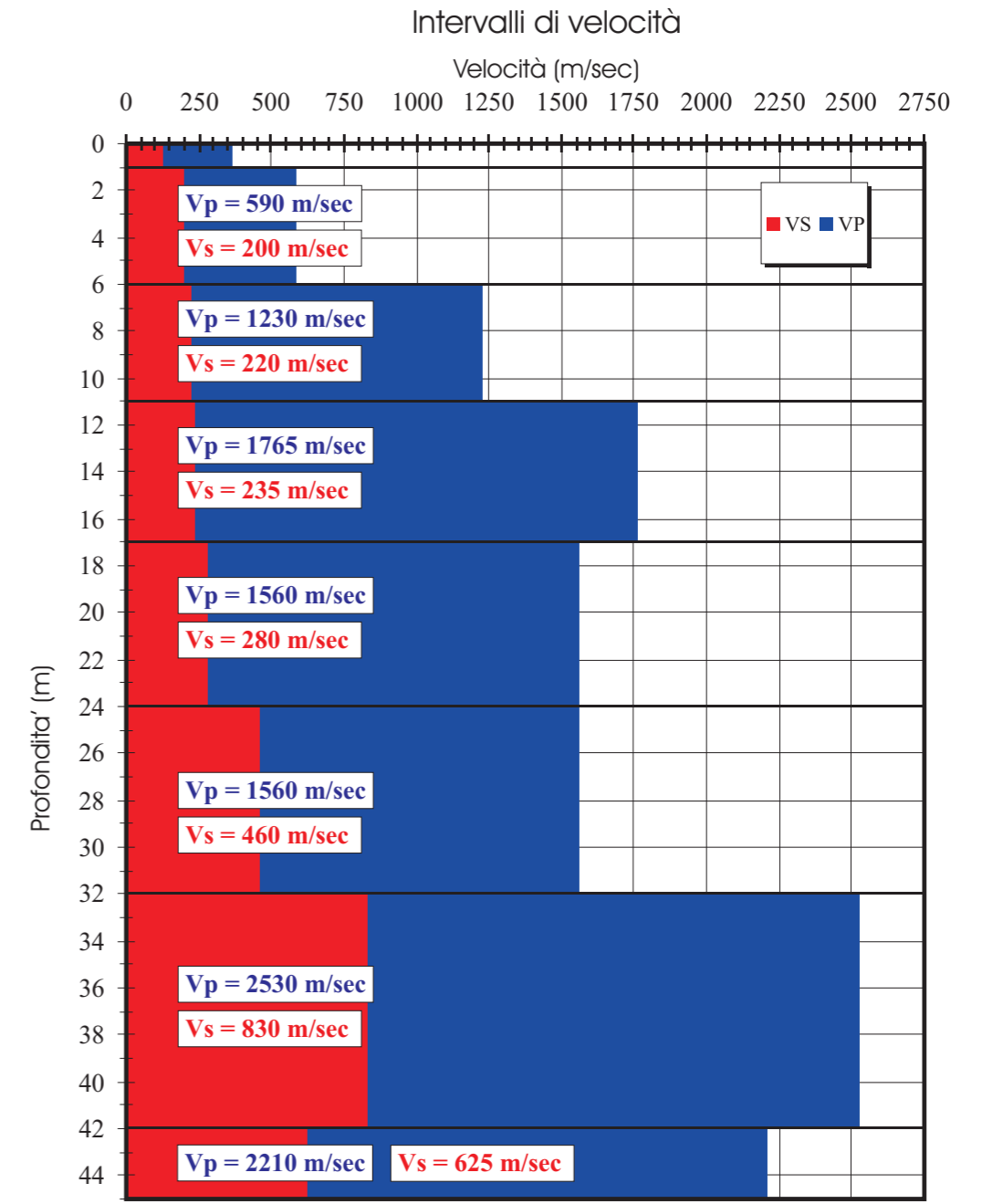
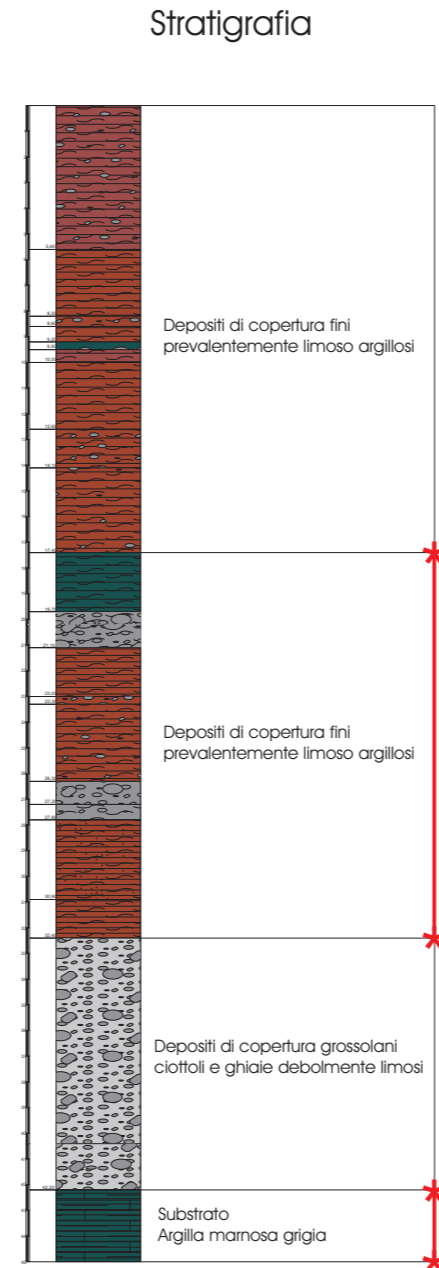
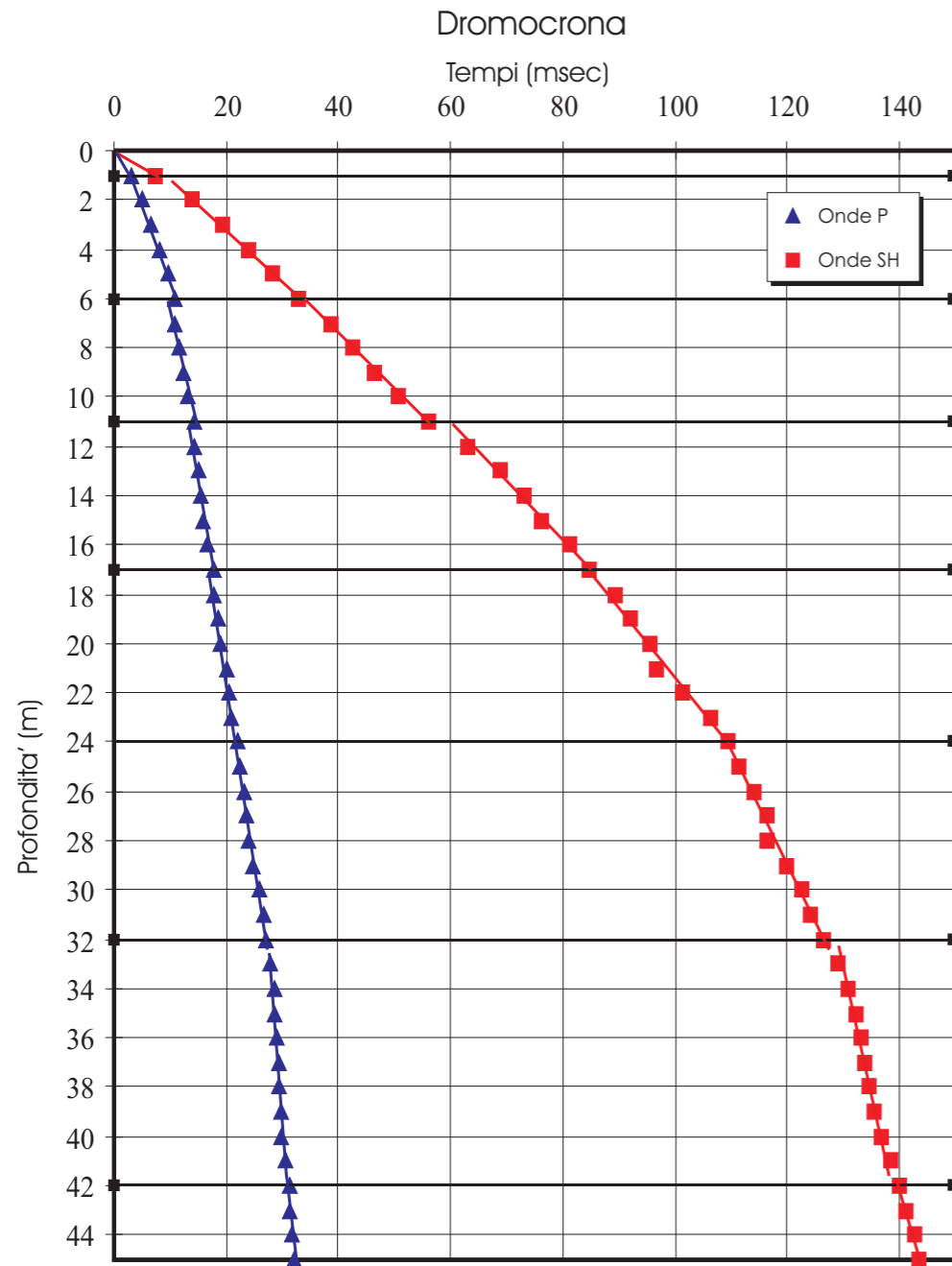
Esempi di registrazioni



LEGENDA:

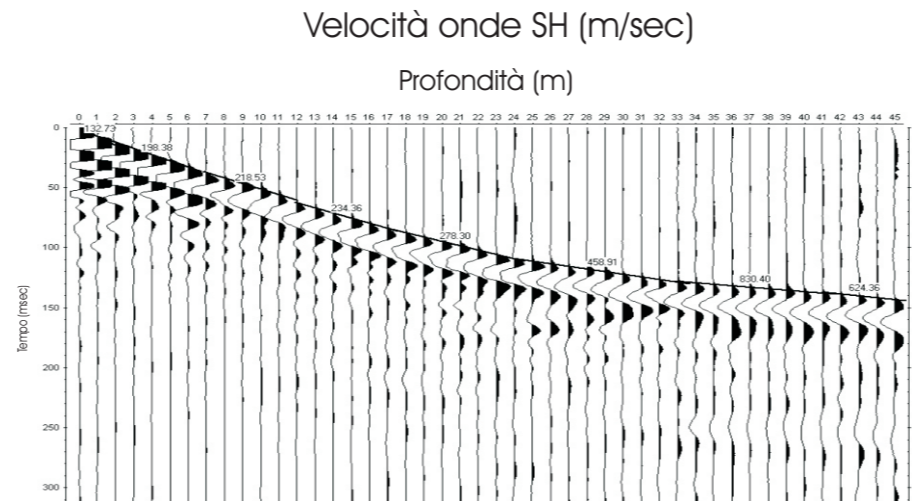
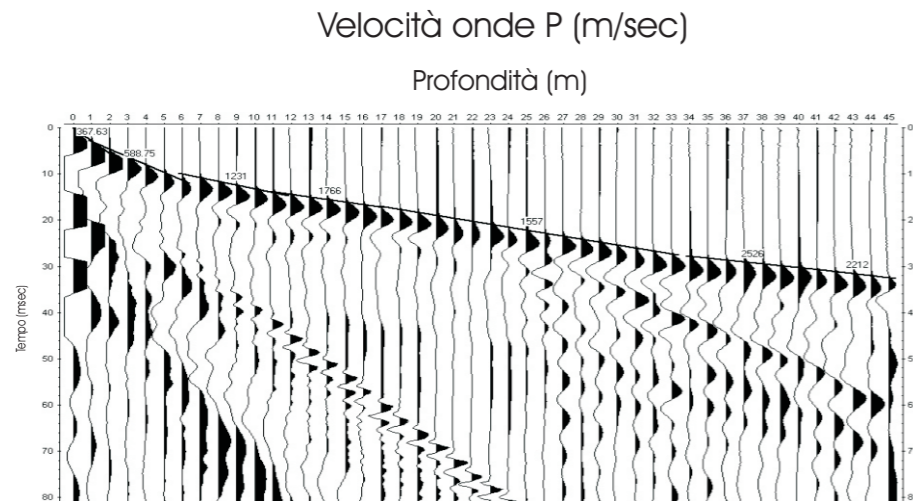
- 1 LN1 → 7 Base sismica a rifrazione
- 1 Punto di scoppio
- Posizione geofono
- 500 410 Velocità onde SH (m/sec)
- LN1 Incrocio con altra base sismica
- S2 Ubicazione sondaggio geognostico in prospettiva
- MASW Incrocio con prova MASW
- Terreno vegetale: limo deb. sabbioso
- Limo argilloso
- Argilla limosa
- Substrato Pliocenico

ESEMPIO DI INTERPRETAZIONE PROVA SISMICA IN FORO DI TIPO "DOWN-HOLE"



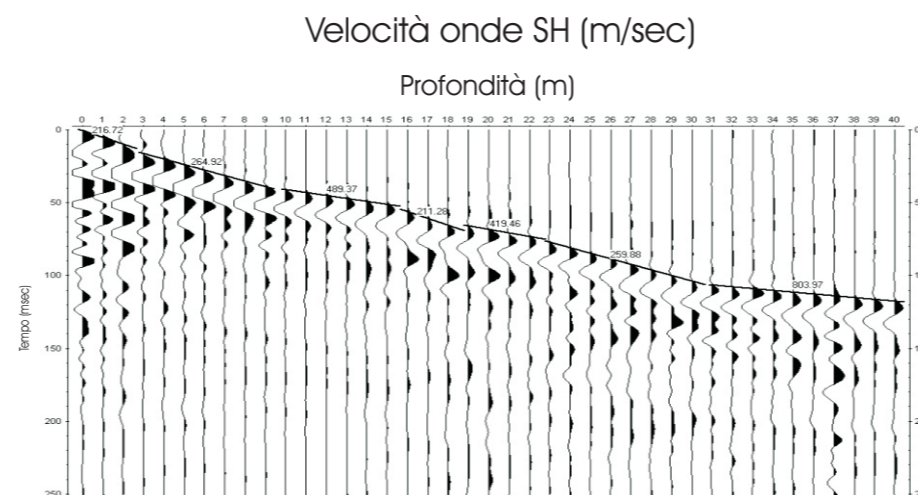
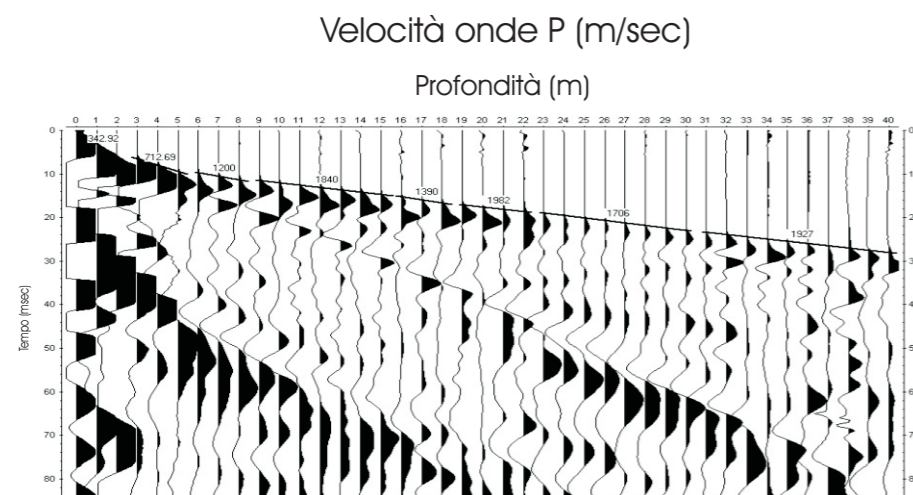
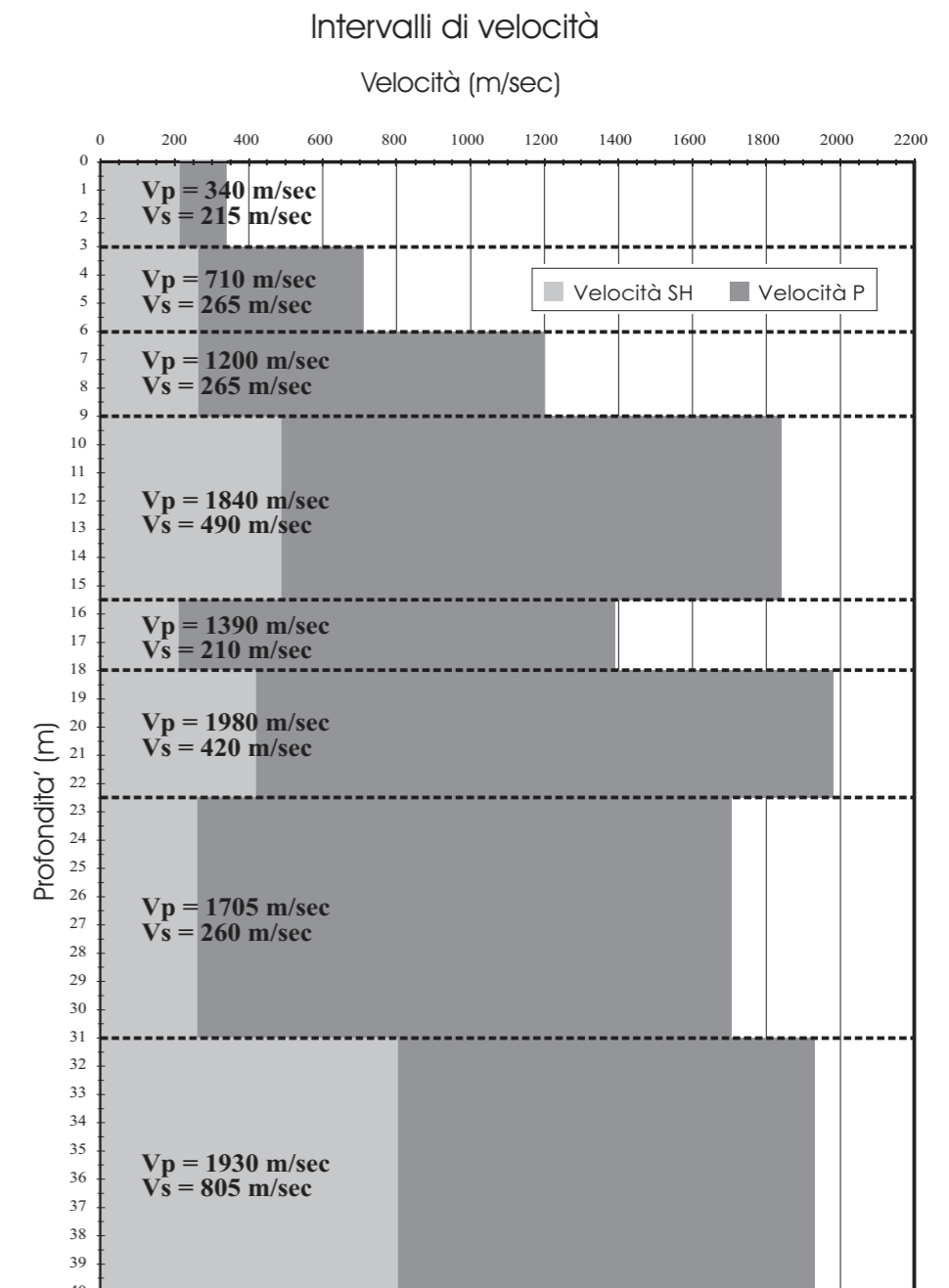
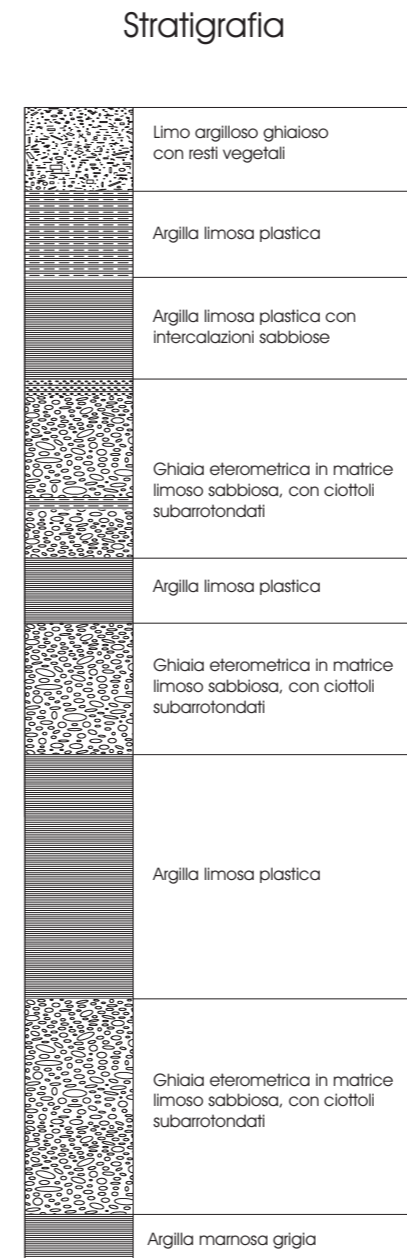
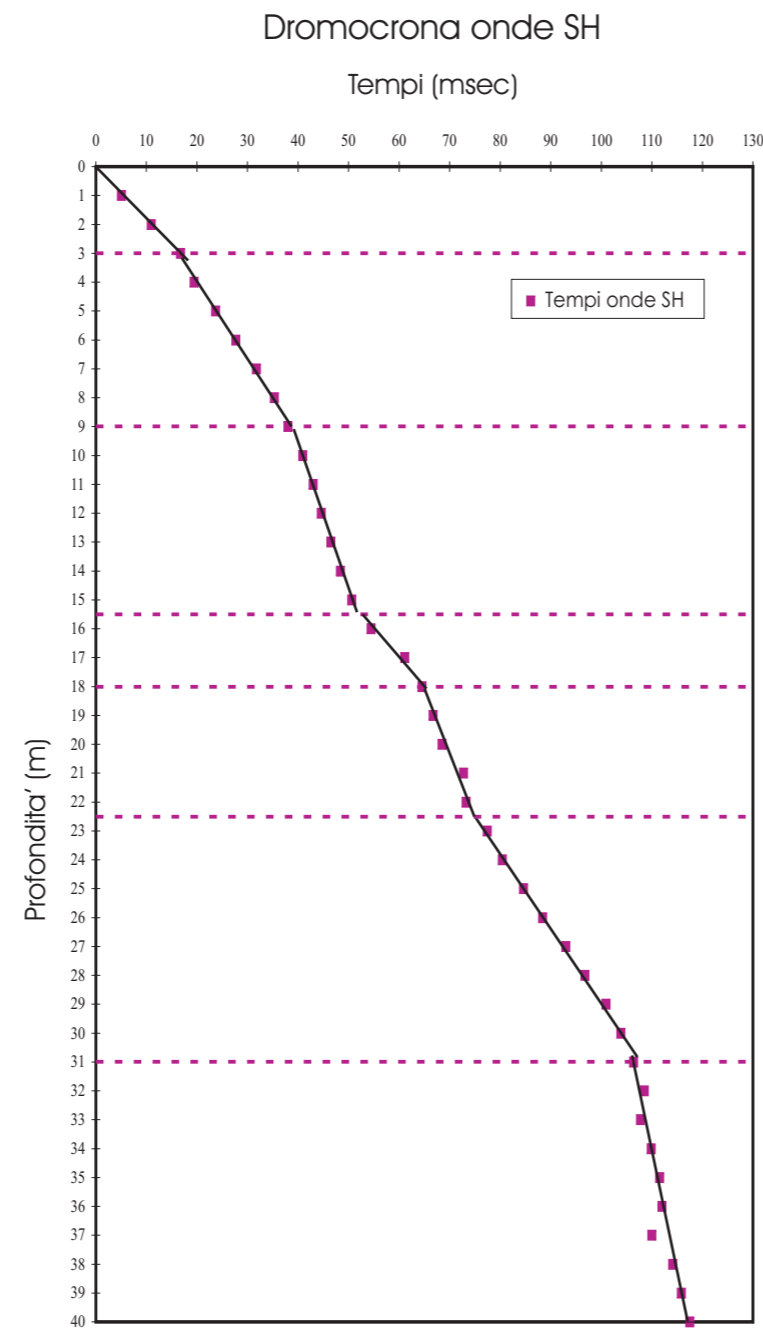
* Intervalli dove si verificano inversioni di velocità

$$V_{s30} = 251 \text{ m/sec}$$



*** MODULI ELASTICI DINAMICI***								
Int.	γ	Vp	Vs	Vp/Vs	E_0	G	α	K
0-1 m	1800	365	130	2.81	8.684E+07	3.042E+07	0.4274	1.99E+08
1-6 m	1900	590	200	2.95	2.181E+08	7.600E+07	0.4351	5.60E+08
6-11 m	1900	1230	220	5.59	2.728E+08	9.196E+07	0.4835	2.75E+09
11-17 m	1900	1765	235	7.51	3.129E+08	1.049E+08	0.4910	5.78E+09
17-24 m	1900	1560	280	5.57	4.419E+08	1.490E+08	0.4834	4.43E+09
24-32 m	1900	1560	460	3.39	1.168E+09	4.020E+08	0.4524	4.09E+09
32-42 m	2000	2530	830	3.05	3.967E+09	1.378E+09	0.4397	1.10E+10
42-45 m	2000	2210	625	3.54	2.276E+09	7.813E+08	0.4565	8.73E+09

*** γ Kg/m³ - Velocità m/sec - Moduli N/m² ***

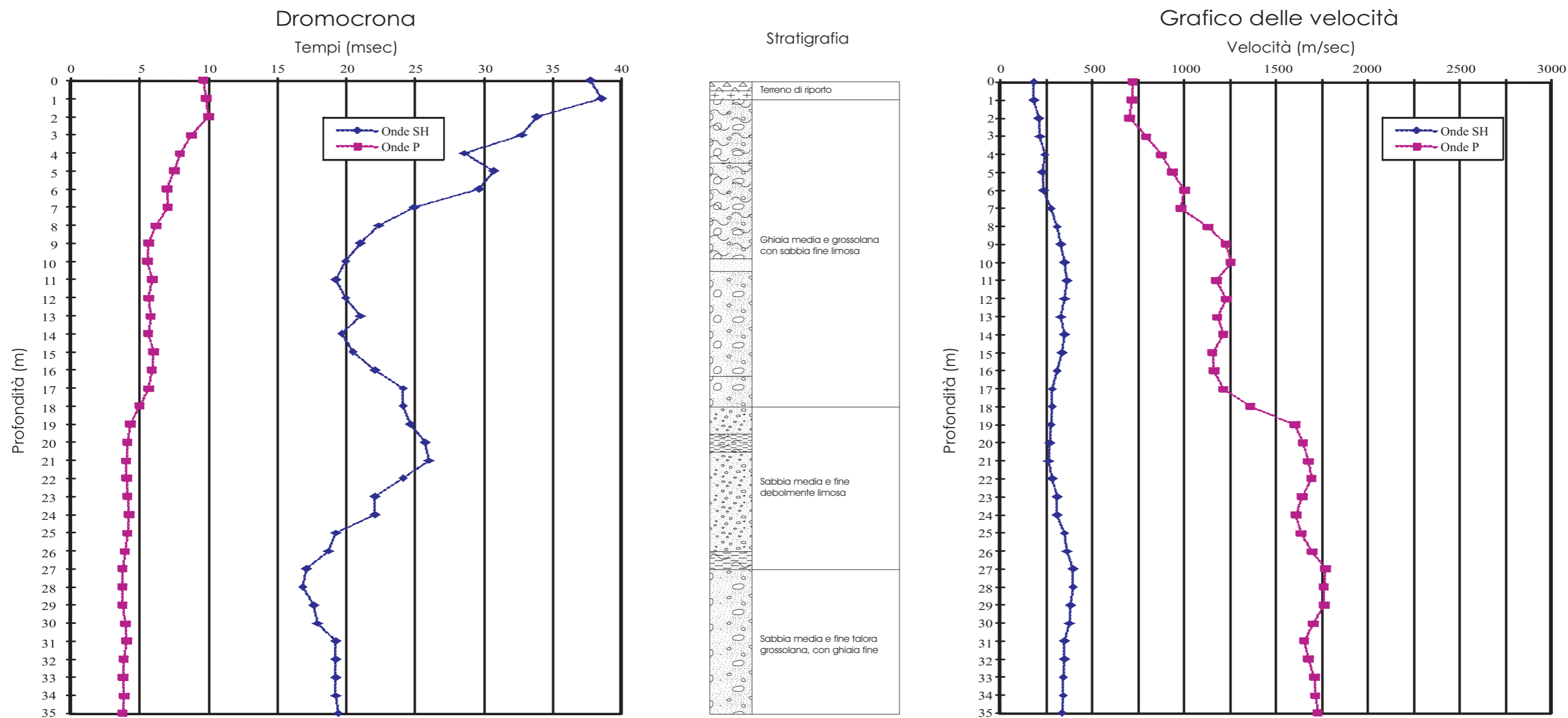


Intervalli dove si verificano inversioni di velocità

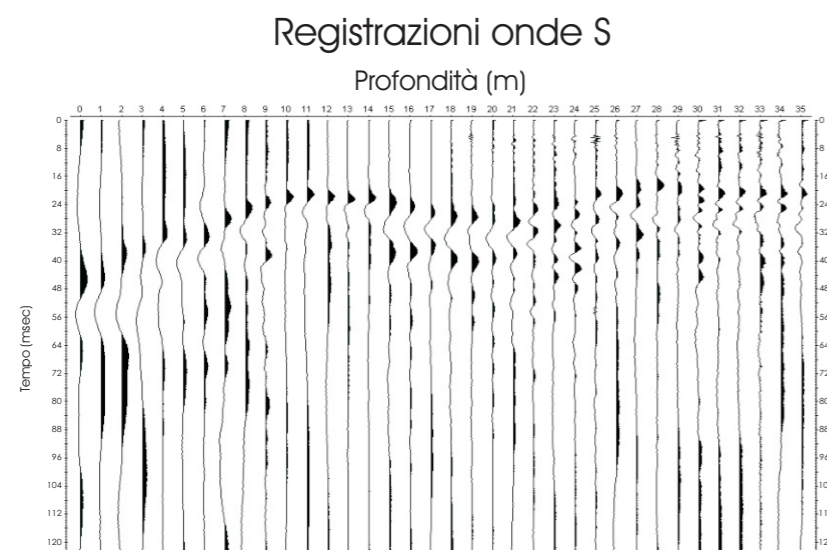
$V_{S30} = 296 \text{ m/sec}$
 $V_{S30} = 377 \text{ m/sec}$

*** MODULI ELASTICI DINAMICI***								
Int.	γ	V_p	V_s	V_p/V_s	E_o	G	σ	K
0-3 m	1800	340	215	1.58	1.942E+08	8.321E+07	0.1668	9.71E+07
3-6 m	1800	710	265	2.68	3.588E+08	1.264E+08	0.4191	7.39E+08
6-9 m	1900	1200	265	4.53	3.934E+08	1.334E+08	0.4744	2.56E+09
9-15,5 m	1900	1840	490	3.76	1.334E+09	4.562E+08	0.4618	5.82E+09
15,5-18 m	1900	1390	210	6.62	2.494E+08	8.379E+07	0.4883	3.56E+09
18-22,5 m	2000	1980	420	4.71	1.042E+09	3.528E+08	0.4764	7.37E+09
22,5-31 m	2000	1700	260	6.54	4.024E+08	1.352E+08	0.4880	5.60E+09
31-40 m	2000	1930	805	2.40	3.615E+09	1.296E+09	0.3947	5.72E+09
*** γ Kg/m ³ - Velocità m/sec - Moduli N/m ² ***								

ESEMPIO DI INTERPRETAZIONE PROVA SISMICA IN FORO DI TIPO "CROSS-HOLE"



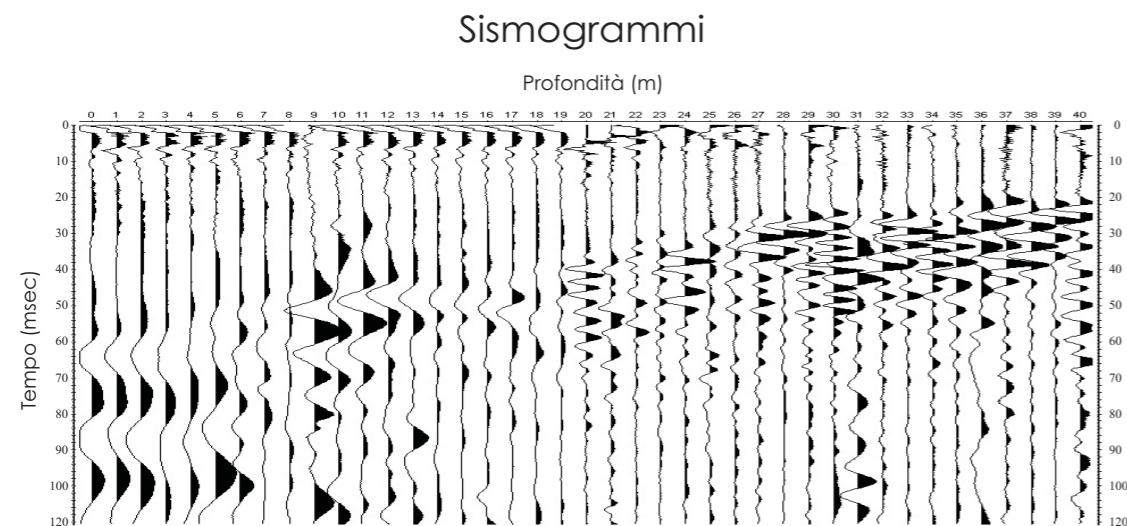
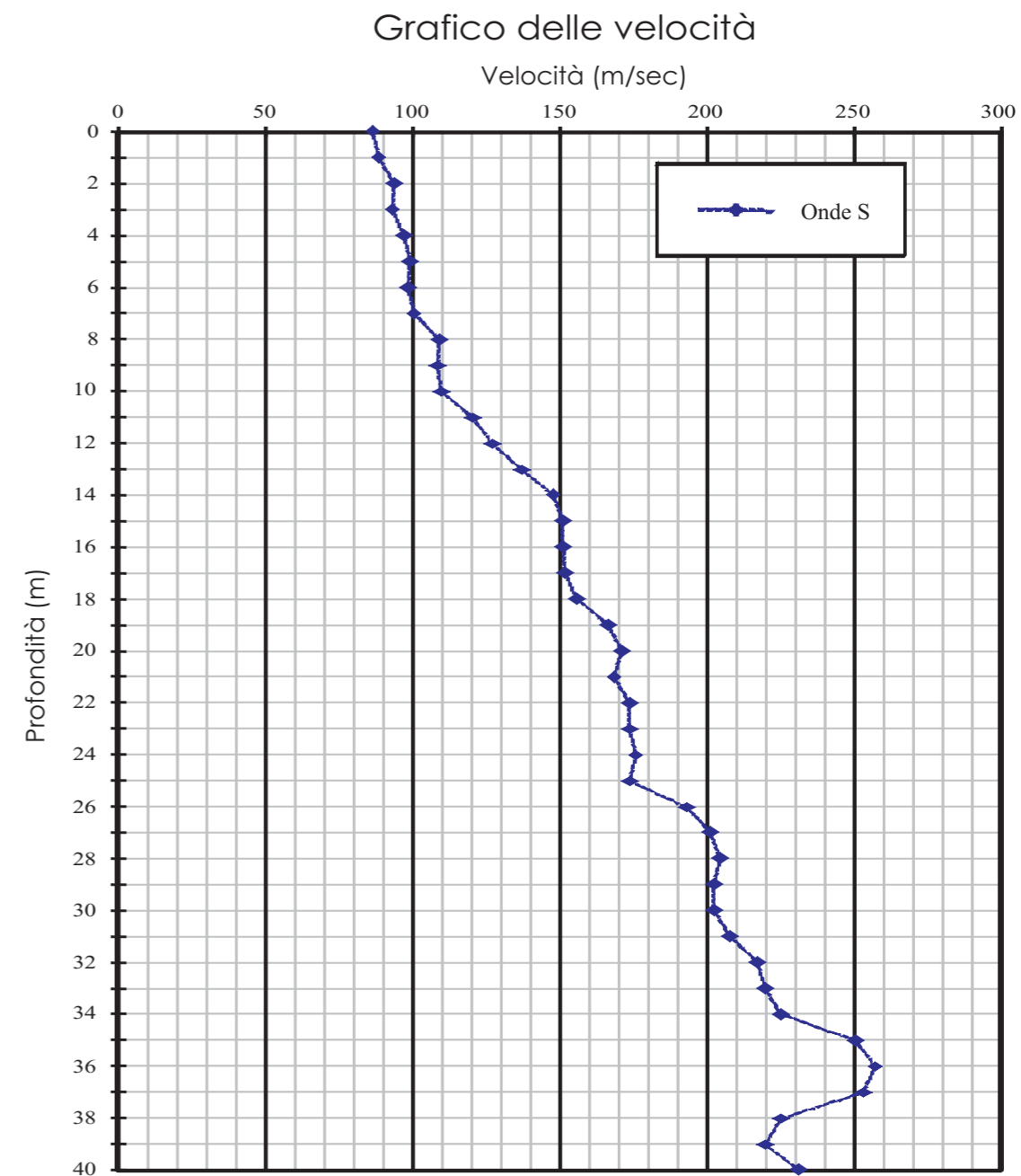
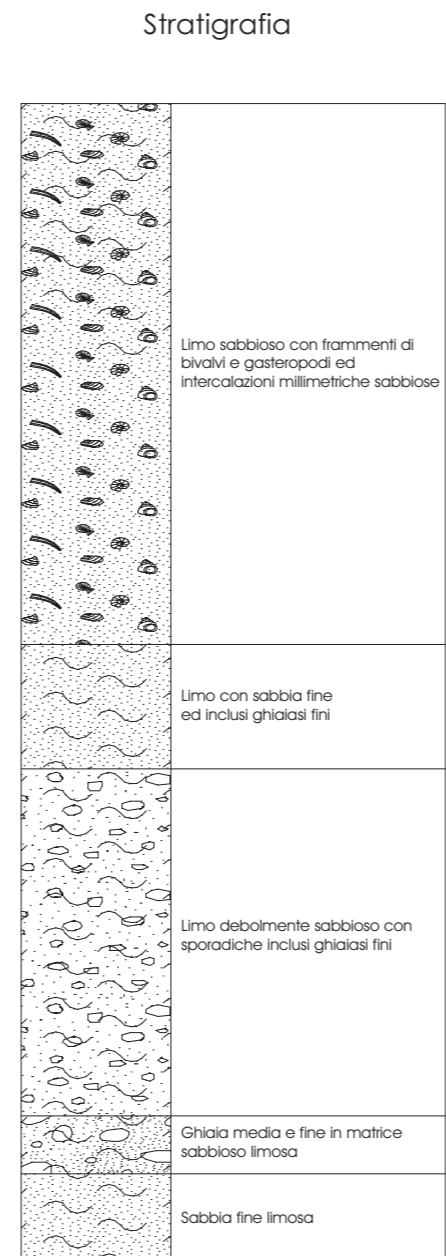
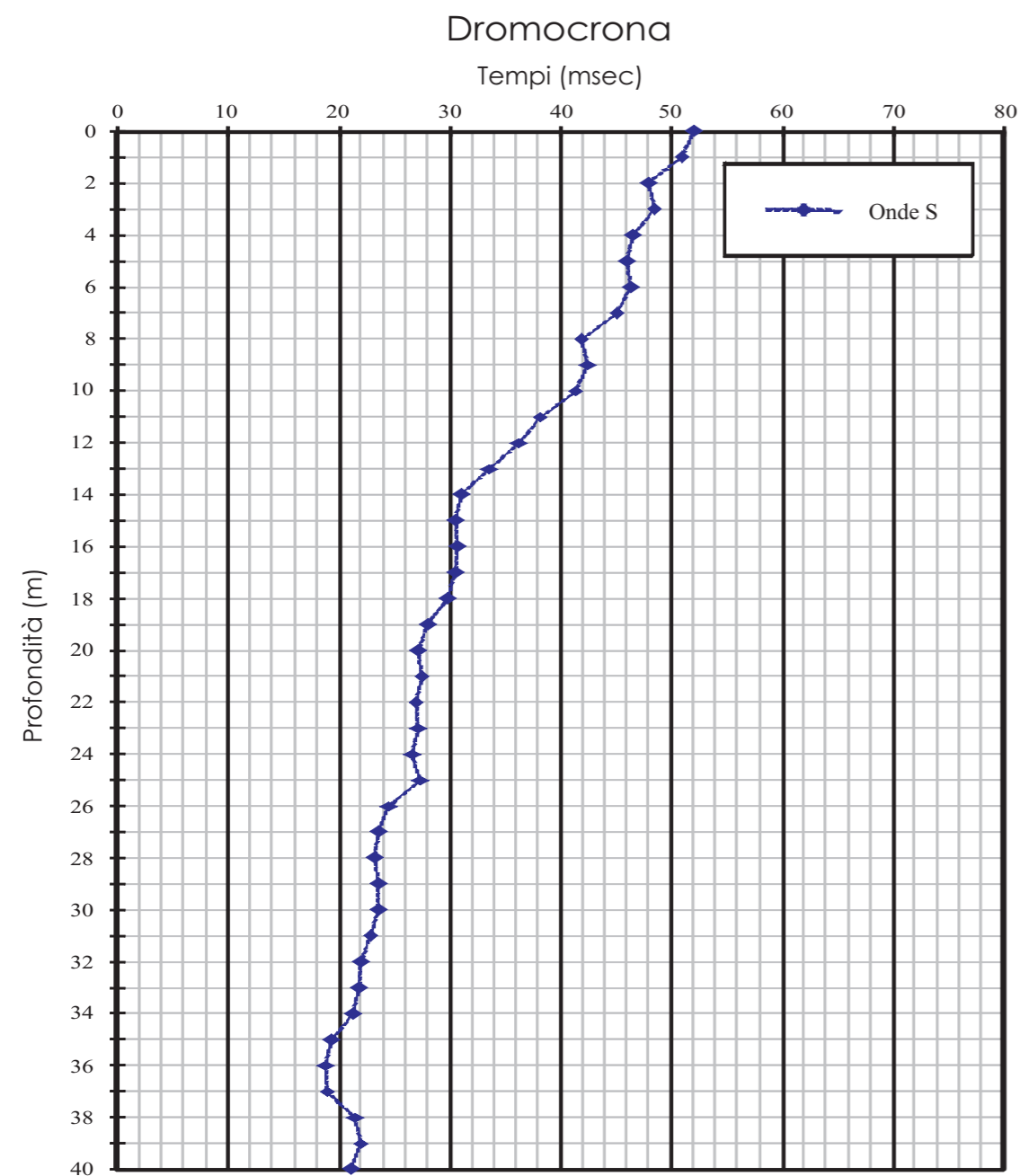
$$V_{s30} = 293 \text{ m/sec}$$



SPT n°	Profondità (m)	Velocità Onde S (m/sec)	N _{SPT}
1 (pa)	1.50-1.95	182	5
2 (pc)	3.00-3.45	214	6
3 (pc)	4.50-4.95	228	41
4 (pc)	6.00-6.45	236	49
5 (pc)	7.50-7.95	312	47
6 (pc)	9.00-9.45	331	46
7 (pc)	10.50-10.95	361	46
8 (pc)	12.00-12.45	347	72

SPT n°	Profondità (m)	Velocità Onde S (m/sec)	N _{SPT}
9 (pc)	13.50-13.95	351	55
10 (pc)	15.00-15.45	337	74
11 (pc)	18.00-18.45	285	82
12 (pa)	21.00-21.45	263	28
13 (pa)	24.00-24.45	308	34
14 (pa)	27.00-27.45	394	30
15 (pc)	30.00-30.45	374	43
16 (pc)	33.00-33.45	345	53

ESEMPIO DI INTERPRETAZIONE PROVA SISMICA IN FORO DI TIPO “CROSS-HOLE” ESEGUITA IN MARE



$V_{S30} = 135 \text{ m/sec}$