



REGIONE SICILIANA
Assessorato Regionale Infrastrutture e Mobilità
Dipartimento Regionale Infrastrutture-Mobilità-Trasporti
SERVIZIO 8



**STUDIO GEOLOGICO PER IL PROGETTO DEFINITIVO INERENTI I
LAVORI PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO DI
MARETTIMO A SUD DEL CENTRO ABITATO**
ai sensi dell'art. 5 della L.R. n. 21/1998.

A.2

INDAGINI GEOFISICHE

Indagine sismica Down Hole
Tromografie Geoelettriche
Indagine sismica HVSR
Indagine sismica REMI-MASW



IL R.U.P

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E TRASPORTI PROVVEDITORATO INTERREGIONALE ALLE OPERE PUBBLICHE UFFICIO 3°: Tecnico e Opere Marittime per la Sicilia Piazza Giuseppe Verdi n. 16 Palermo			
Commissione Regionale dei Lavori Pubblici PROGETTO DEI LAVORI DI MESSA IN SICUREZZA DEL PORTO A SUD DEL CENTRO ABITATO, AI SENSI DELL'ART. 5 DELLA L.R.21/1998 Indagini geognostiche a supporto della progettazione			
Comune di Favignana (TP) – Isola di Marettimo			
PROGETTO DEFINITIVO			
Ditta esecutrice: Pietro Montanelli Trivellazioni	D.L. attività geologiche Dott. Geol. C. Caradonna	Dirigente Serv. 8 Arch. C. Ricciardo	RUP Ing. S. Ponte
RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE PROSPEZIONE SISMICA IN FORO			R2
			
Rif. Lav.: 002/2021	Date indagini: 18/01/2021 19/01/2021	Data emissione: 30/01/2021	Il Tecnico: Cr. Geol. Dario Miraglia 

SOMMARIO

1. Premessa.....	3
2. Indagine sismica Down Hole	4
2.1 Strumentazione e metodologia	5
2.2 Interpretazione delle misure eseguite	6

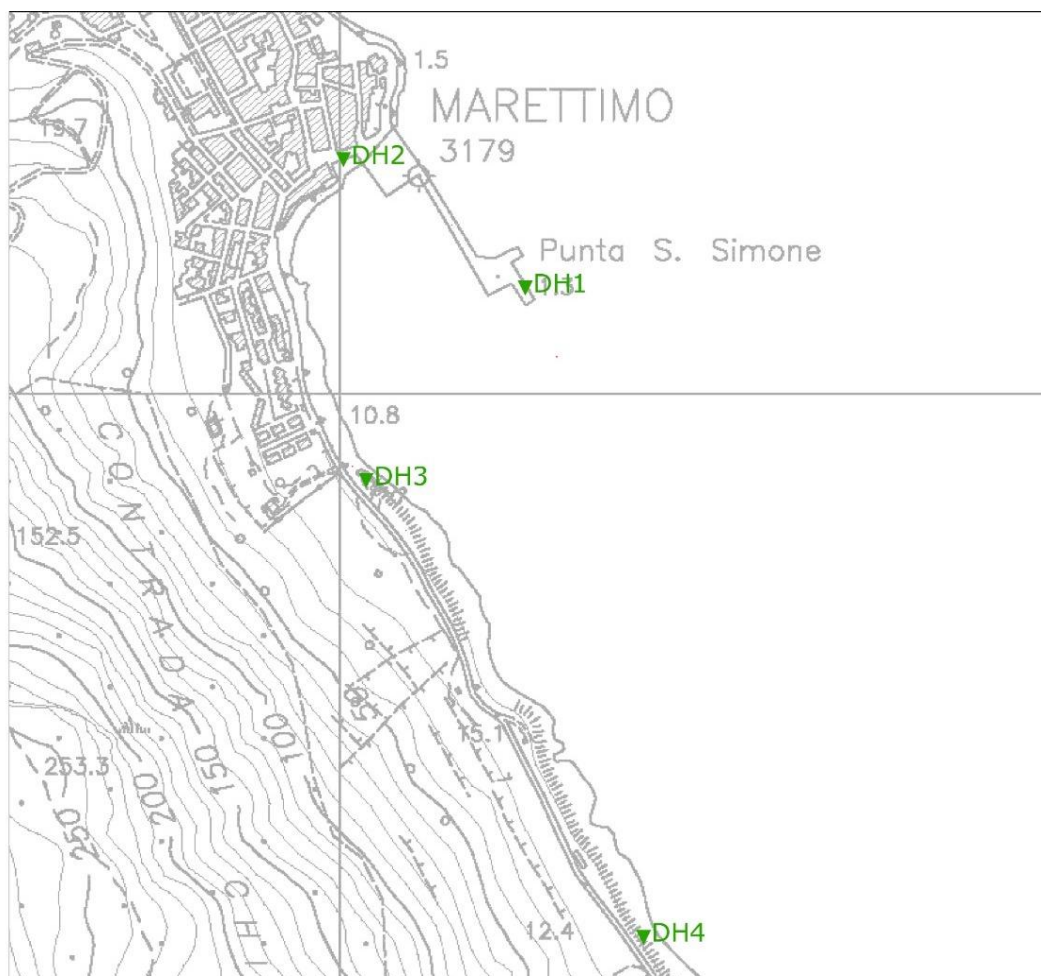
ALLEGATO A: Ubicazione dei sondaggi Down Hole

ALLEGATO B: Rapporti di prova

1. PREMESSE

Il Dott. Geol. Piero Montanelli n.q. di responsabile delle attività geologiche, ha conferito al sottoscritto l'incarico per lo studio geologico relativo al progetto di cui al frontespizio di questo elaborato.

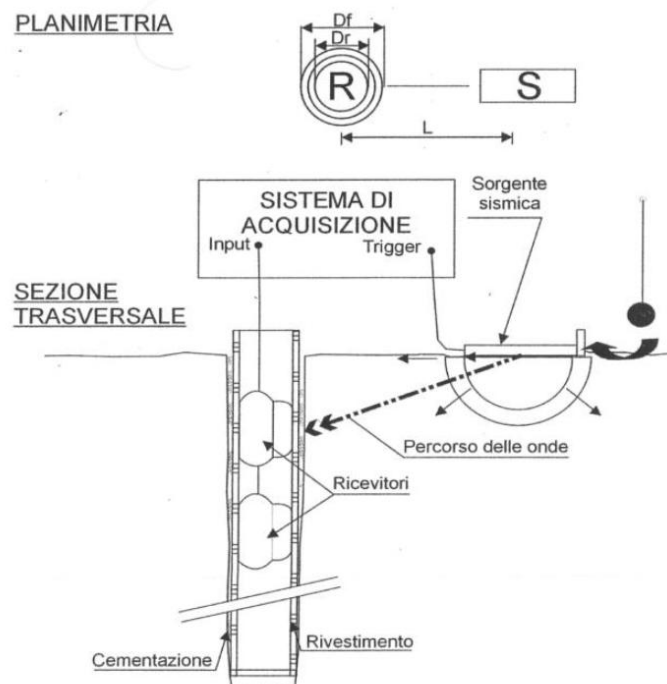
Scopo dello studio è stato quello di eseguire n. 4 prospezioni sismiche in foro al fine di descrivere in modo dettagliato le caratteristiche sismiche di un profilo stratigrafico in risposta alle prescrizioni della normativa sismica vigente NTC 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» - D.M. 17 gennaio 2018.



2. INDAGINE DOWN-HOLE

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 ed 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)..

Le misure si effettuano all'interno di un foro di sondaggio, appositamente attrezzato e condizionato fino alla profondità d'indagine desiderata, mediante un ricevitore multicanale (da tre a cinque geofoni) disposto nel foro a profondità note; valutando 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, tramite semplici formule matematiche ed opportune correzioni geometriche, è possibile ricavare la velocità delle onde P ed SH.



Il grande vantaggio dell'indagine sismica in foro è quello di rilevare anche inversioni di velocità lungo la verticale indagata, superando così i limiti della sismica a rifrazione.

2.1 STRUMENTAZIONE E METODOLOGIA

L'acquisizione dei dati in cantiere è stata eseguita utilizzando il sismografo DoReMi prodotto dalla Sara Electronic Instruments, un sistema ad elevate prestazioni in grado di registrare i segnali provenienti dal geofono da foro SSBH a cinque canali con frequenza centrale di 10 Hz.

Uno dei cinque canali, il verticale, è utilizzato nel modo consueto (onde P), gli altri quattro sensori orizzontali sono assemblati nel corpo sensori con un orientamento 45 gradi l'uno rispetto all'altro, in questo modo le onde SH artificialmente provocate secondo una direttrice arbitraria incideranno in almeno uno dei sensori con un angolo ≤ 45 gradi. Questo garantisce una sufficiente intensità di segnale in qualsiasi condizione. Il geofono da foro, infatti, deve essere riposizionato per ogni quota e ad ogni movimento è suscettibile di una rotazione che sarà sconosciuta e non controllabile dall'operatore in superficie. Ad ogni posizione quindi un geofono dei 4 orizzontali si troverà orientato in modo più efficace degli altri 3.

La sorgente di energia prescelta che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza, con forme d'onda ripetibili e direzionali, è stata una massa di 8 Kg battente su un pesante profilato metallico posto a 2m dal boccaforo; la generazione delle onde di compressione è stata assicurata da colpi verticali mentre per la generazione delle onde SH sono state eseguite le battute su due facce opposte della trave che, grazie al suo peso notevole ulteriormente gravato da quello dell'operatore, è rimasta aderente al terreno per evitare una eccessiva dispersione di energia. Il trigger utilizzato è consistito in un geofono starter accoppiato al profilato metallico.

Le misure sono state acquisite dal fondo foro alla superficie, per l'intera profondità della perforazione (30 m), con un passo di misura di 1 m. L'ancoraggio del geofono alle pareti del foro è stato assicurato da un sistema meccanico che consente, in pochi secondi, la fuoriuscita di un pistone metallico e il successivo sbloccaggio.

I parametri di acquisizione comuni a tutti i punti sono stati:

- intervallo di campionamento 100 μ s;
- numero di campioni acquisiti 1024, per ognuna delle tre tracce;
- tempo di acquisizione 150 ms

Si è inoltre usata costantemente la procedura dello stacking (fino a quattro battute per ogni registrazione) per incrementare il rapporto segnale rumore.

2.2 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE

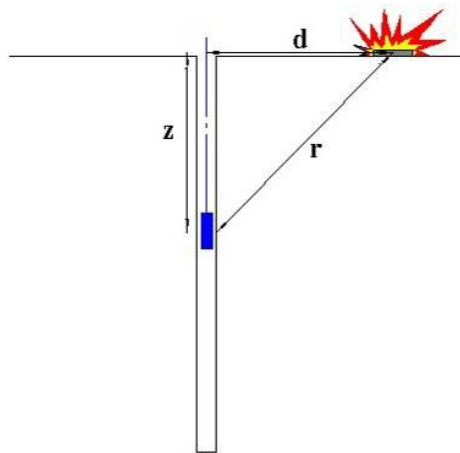
Una volta acquisiti tutti i segnali sismici, la successiva fase di elaborazione dei dati ha previsto l'estrapolazione di tutte le tracce registrate dal geofono verticale, per ogni intervallo di profondità, al fine di creare il dataset relativo alle onde P; analogamente, tramite la funzione di inversione di polarità, è stato ricostruito il dataset relativo alle onde S selezionando le migliori tracce ottenute dalle battute orizzontali opposte, con tale 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 successiva fase del picking sui sismogrammi ottenuti consente di conoscere i tempi di primo arrivo obliqui (t) delle onde longitudinali e trasversali,

successivamente tali tempi sono stati corretti da da obliqui in 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 basso.



Questa è una approssimazione perché non tiene conto delle eventuali rifrazioni tra terreni a velocità differenti, ed è tanto più accettabile quanto più prossima è la sorgente alla base del pozzo e tanto più deboli sono i contrasti di velocità.

Va inoltre ricordato 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 sia perché, soprattutto in profondità, l'istante di primo arrivo delle onde non è talora facilmente individuabile.

Per avere una valutazione del grado di disomogeneità degli strati sono state determinate anche le "velocità di intervallo" V_i , cioè le velocità con le quali viaggerebbe il fronte d'onda lungo l'asse verticale tra due posizioni consecutive di campionamento.

Se si calcolano le distanze verticali $\delta z = z_n - z_{n-1}$ ed i tempi verticali parziali

$\delta t = t_{v_n} - t_{v_{n-1}}$ le velocità saranno date da:

$$V_i = \frac{\delta z}{\delta t_v}$$

Mettendo in un grafico, sia per le onde di compressione che per quelle di taglio, i valori di velocità così determinati in funzione della profondità si ottiene un grafico che evidenzierà il grado di disomogeneità dei litotipi attraversati dalla perforazione.

In allegato sono riportati i seguenti grafici:

- tempi – profondità;
- velocità media – profondità;
- velocità di intervallo-profondità.

Inoltre, per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici e/o di prove di laboratorio su campioni prelevati nei sondaggi geognostici, si forniscono, oltre ai singoli valori di velocità sismica che la prova down-hole è in grado di fornire, i moduli elastici dinamici del terreno:

- modulo di elasticità (modulo di Young);
- modulo di taglio o di rigidità;
- modulo di compressibilità (modulo di Bulk);
- modulo di Poisson.

Il Coefficiente di Poisson (ν), noto come la costante che lega le deformazioni in un corpo, può essere collegato, da un punto di vista bidimensionale, ad uno sforzo di trazione, che causa nel corpo stesso un allungamento in una direzione e un raccorciamento nell'altra, o ad uno sforzo di compressione che, analogamente, determina una contrazione in una direzione e una dilatazione nella direzione opposta. Tale parametro può presentare un range di variazione compreso tra un massimo di 0.5 ed un minimo di 0; il valore di 0.5 è caratteristico di materiali che si

deformano senza cambiamenti di volume (es. acqua), valori leggermente inferiori (0.47 - 0.49) sono tipici di argille o materiali molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali da poco consolidati a sovraconsolidati.

Per le rocce si presentano range di variazioni molto ampi collegati in particolare sia al grado di fratturazione sia alla presenza di cavità, stratificazioni e litologie e comunque tra (0.46 e 0.20).

In funzione di V_p e di V_s il parametro è definito dalla seguente relazione:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

Il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale* E_{din} definisce la *deformazione longitudinale* di un corpo, intesa come il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo stesso; in funzione dei valori della velocità delle onde di compressione V_p , della densità geofisica e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

$$E_{din} = V_p^2 \cdot \rho_{din} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Il *Modulo di Taglio* o di *Rigidità* G_{din} definisce invece la *deformazione tangenziale* di un corpo, intesa come l'angolo di cui ruota il corpo stesso in seguito ad uno sforzo di taglio; in funzione dei valori della velocità delle onde di taglio V_s e della densità geofisica il parametro è definito dalla seguente relazione:

$$E_{din} = V_p^2 \cdot \rho_{din} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

Infine, il *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume* è quel parametro ottenibile se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti i tre assi cartesiani) generando una pressione idrostatica uniforme con la quale si avranno componenti dello sforzo uguali e con deformazione rappresentata da una variazione di volume la quale può essere indicata numericamente dall'inverso del coefficiente di

compressibilità; utilizzando i valori del modulo di elasticità e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

$$K_{\text{din}} = \frac{E_{\text{din}}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$$

I moduli dinamici sono ottenuti mediante prove che sfruttano la relazione per cui il quadrato della velocità di un'onda elastica di taglio che si propaga nel terreno è direttamente proporzionale al rapporto tra il modulo di elasticità tangenziale e la densità del terreno (in un mezzo elastico ideale).

Il vantaggio del modulo dinamico rispetto quello statico consiste nel fatto che la misura non è influenzata dal rimaneggiamento del terreno a seguito del campionamento. Prove di tipo statico dello stesso tipo eseguite su uno stesso tipo di terreno possono dare risultati sensibilmente differenti perché il terreno viene rimaneggiato in maniera diversa ogni volta che la prova viene eseguita.

I moduli dinamici così calcolati risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee, di conseguenza, per i calcoli delle deformazioni nell'ambito geotecnico, possono essere utilizzate delle relazioni sperimentali che permettono di correlare E_{stat} con E_{din} , come quella di *Heerden*:

$$E_{\text{stat}} = 0,075 E_{\text{din}}^{1,56}, \text{ di regola } E_{\text{din}} \approx 2 E_{\text{stat}}$$

Classificazione sismica dei terreni

Le nuove "Norme Tecniche per le Costruzioni" NTC 2018 indicano i criteri per la classificazione del sottosuolo in base alle indagini sismiche. Il parametro considerato è la "velocità equivalente" che viene calcolata in modo perfettamente analogo alla "vecchia" Vs30, ma invece di estendere la media pesata fino ai rigorosi 30 m di profondità, viene portata fino ad una profondità H (che può essere pari a 30 m, ma anche ad un valore minore). A decretare il valore di questa profondità H è il

raggiungimento del “substrato”, caratterizzato da velocità superiori agli 800 m/s. Di seguito le Categorie di sottosuolo inserite nella suddetta norma:

Categoria A - Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

Categoria B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Categoria C - Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

Categoria D - Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.

Categoria E - Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.

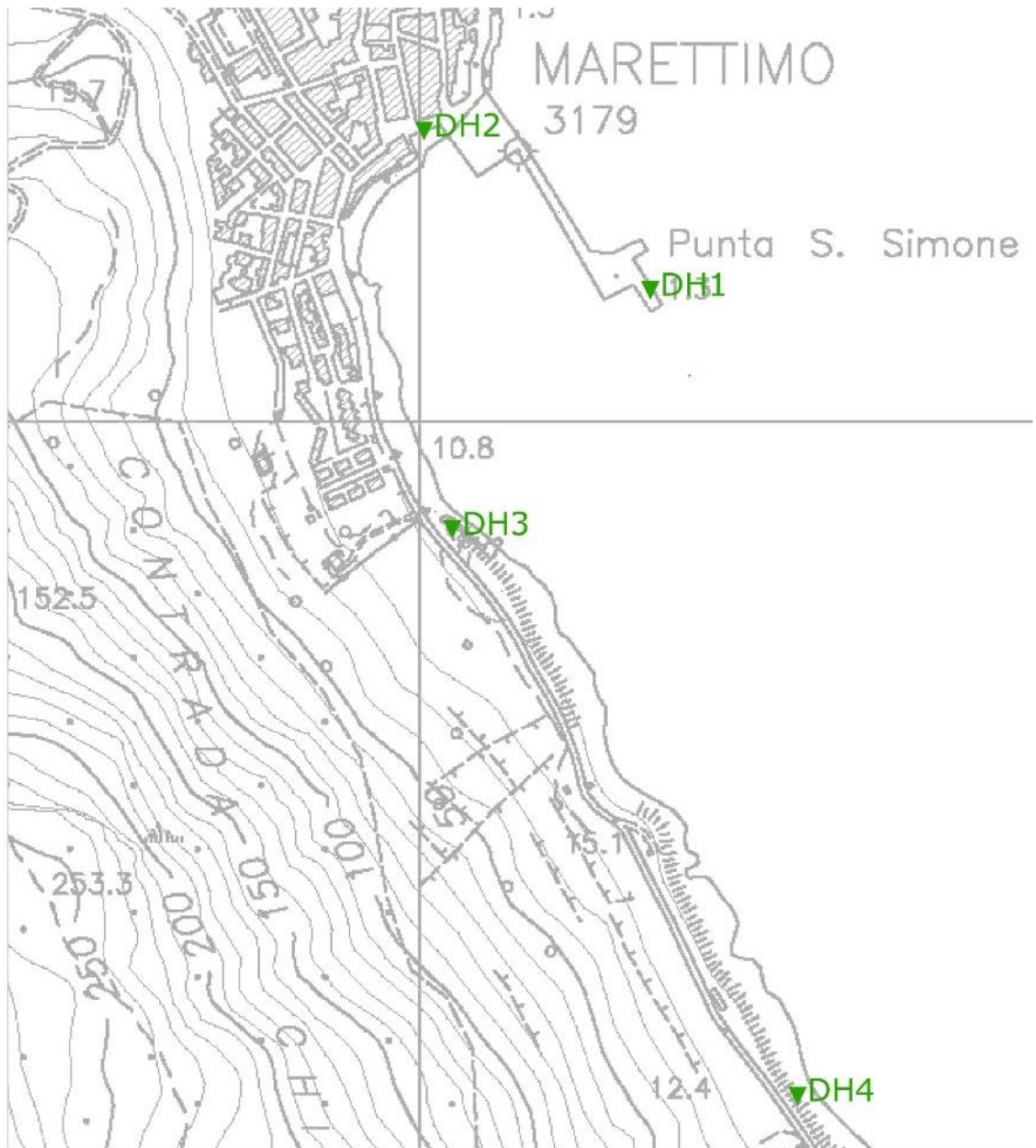
Per velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio si intende la media pesata delle velocità delle onde S negli strati nei primi metri di profondità dal piano di posa della fondazione, secondo la relazione:

$$V_{s, eq} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h(strato)}{V_s(strato)}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo

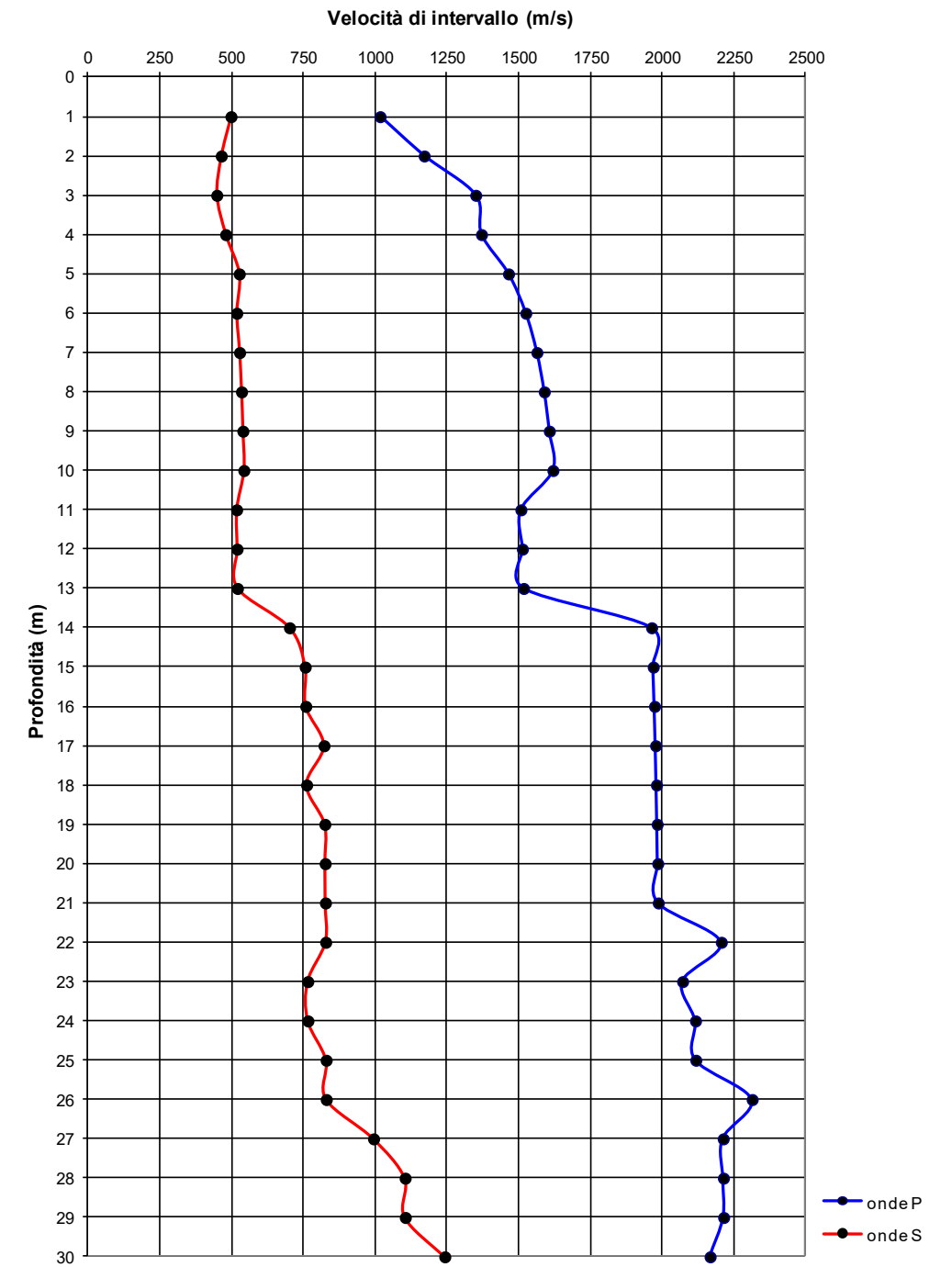
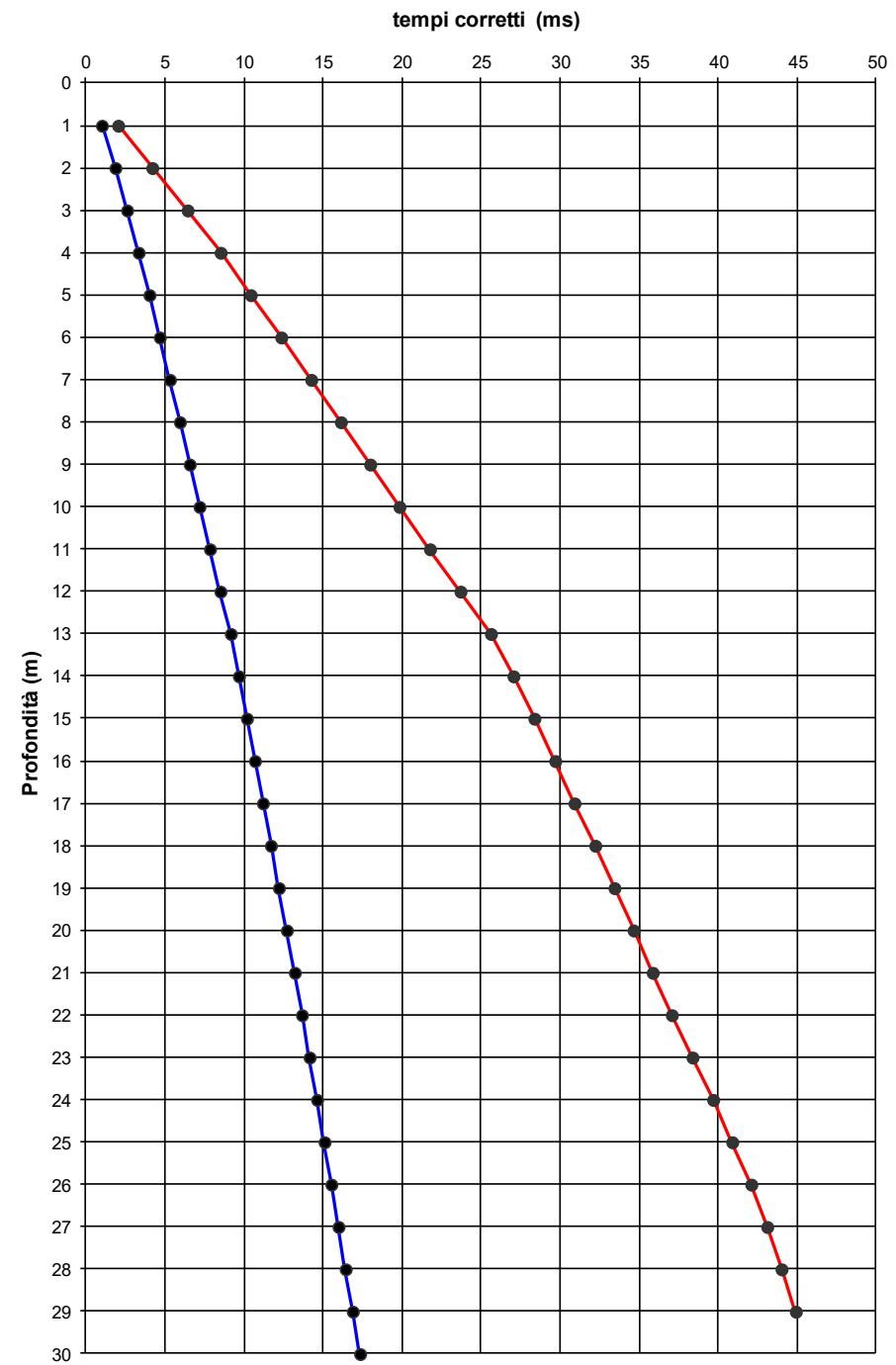
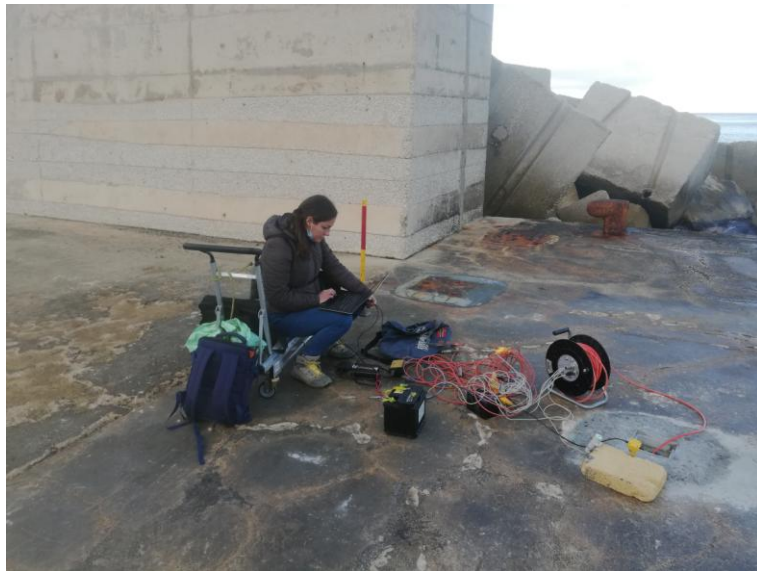
spessore $h(\text{strato})$ e dalla velocità delle onde S $V_s(\text{strato})$. Per H si intende la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

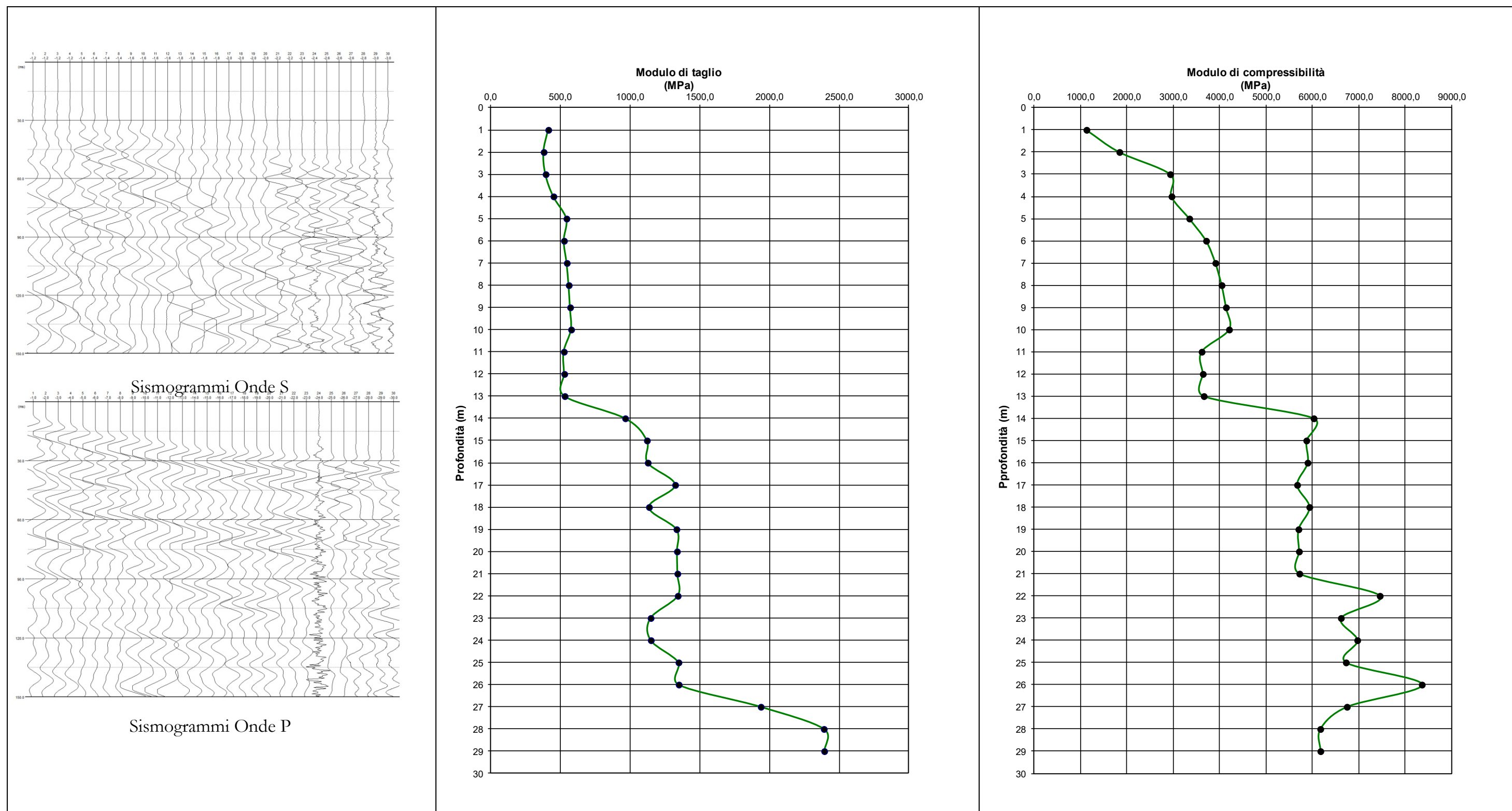
ALLEGATO A: UBICAZIONE INDAGINI SISMICHE DOWN HOLE



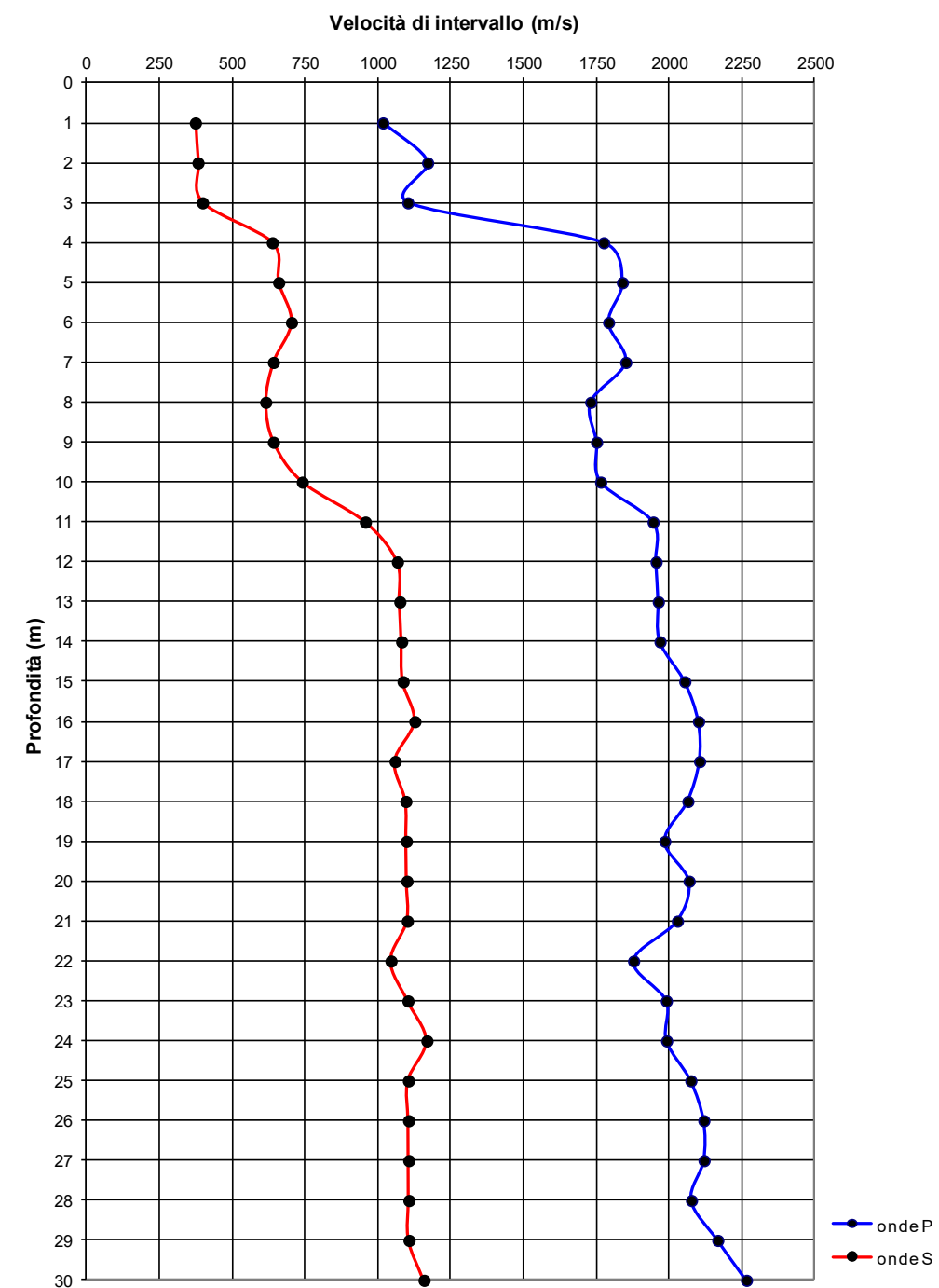
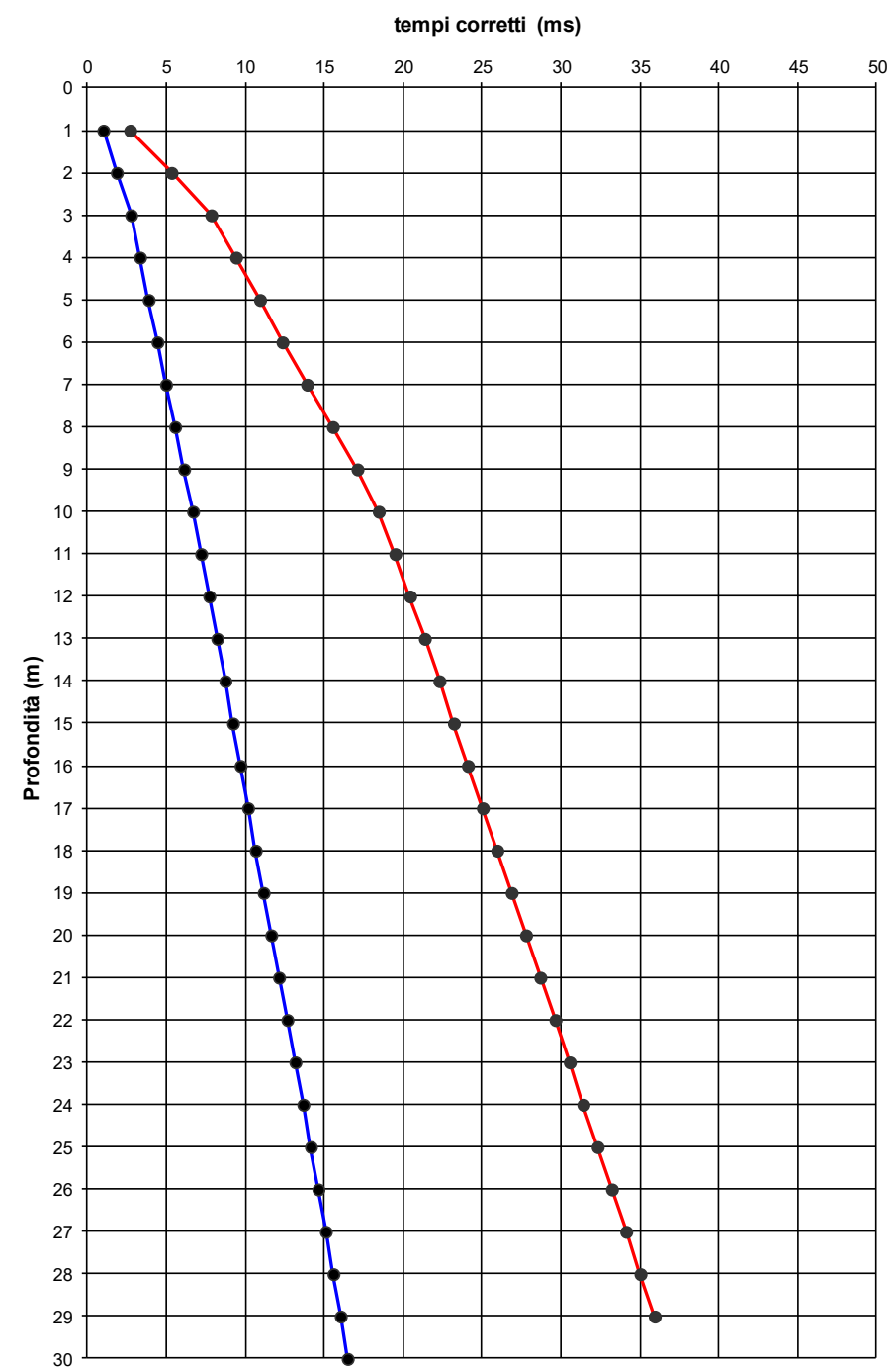
ALLEGATO B: Rapporti di prova

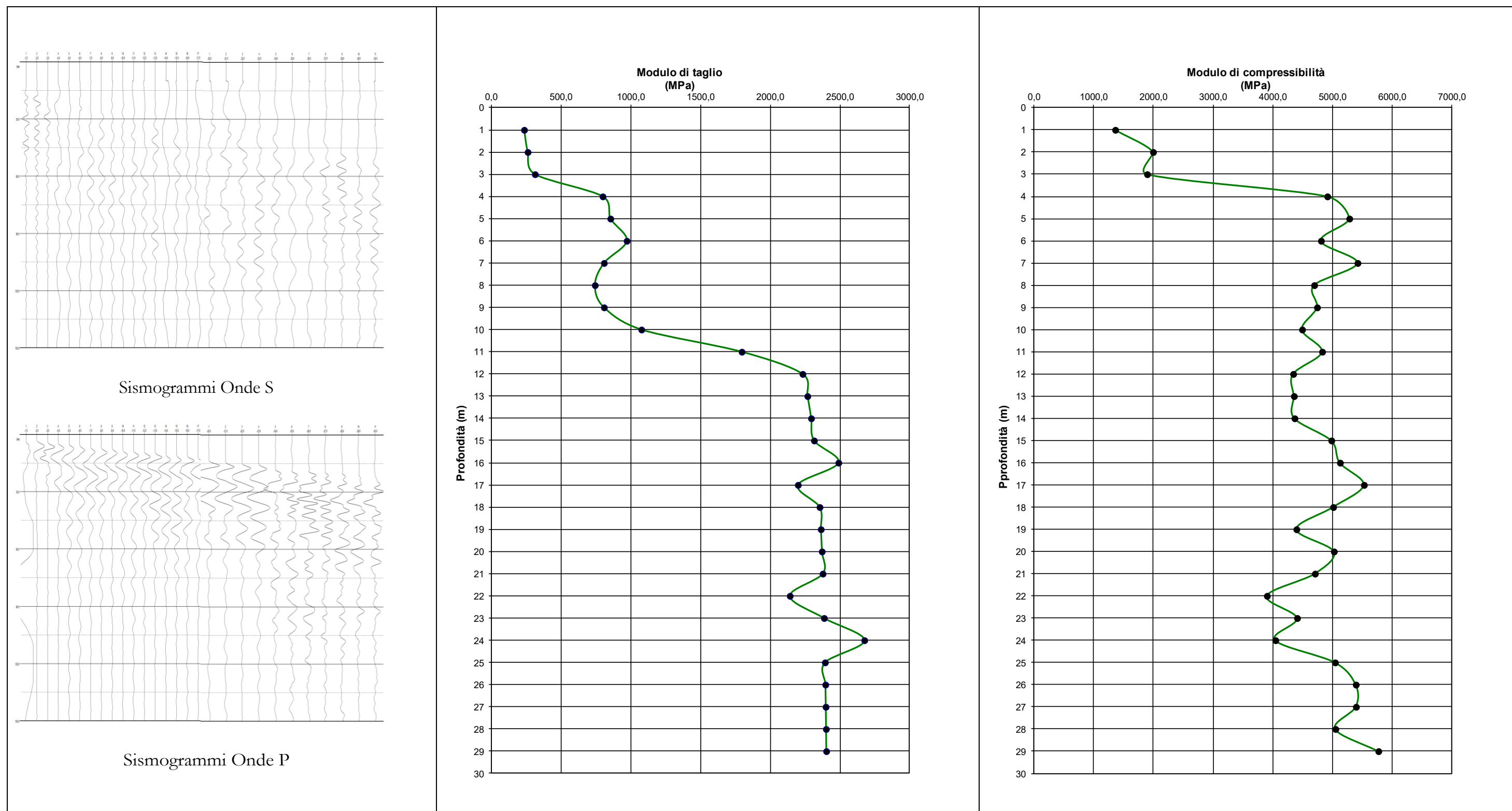
SONDAGGIO SISMICO DH 1



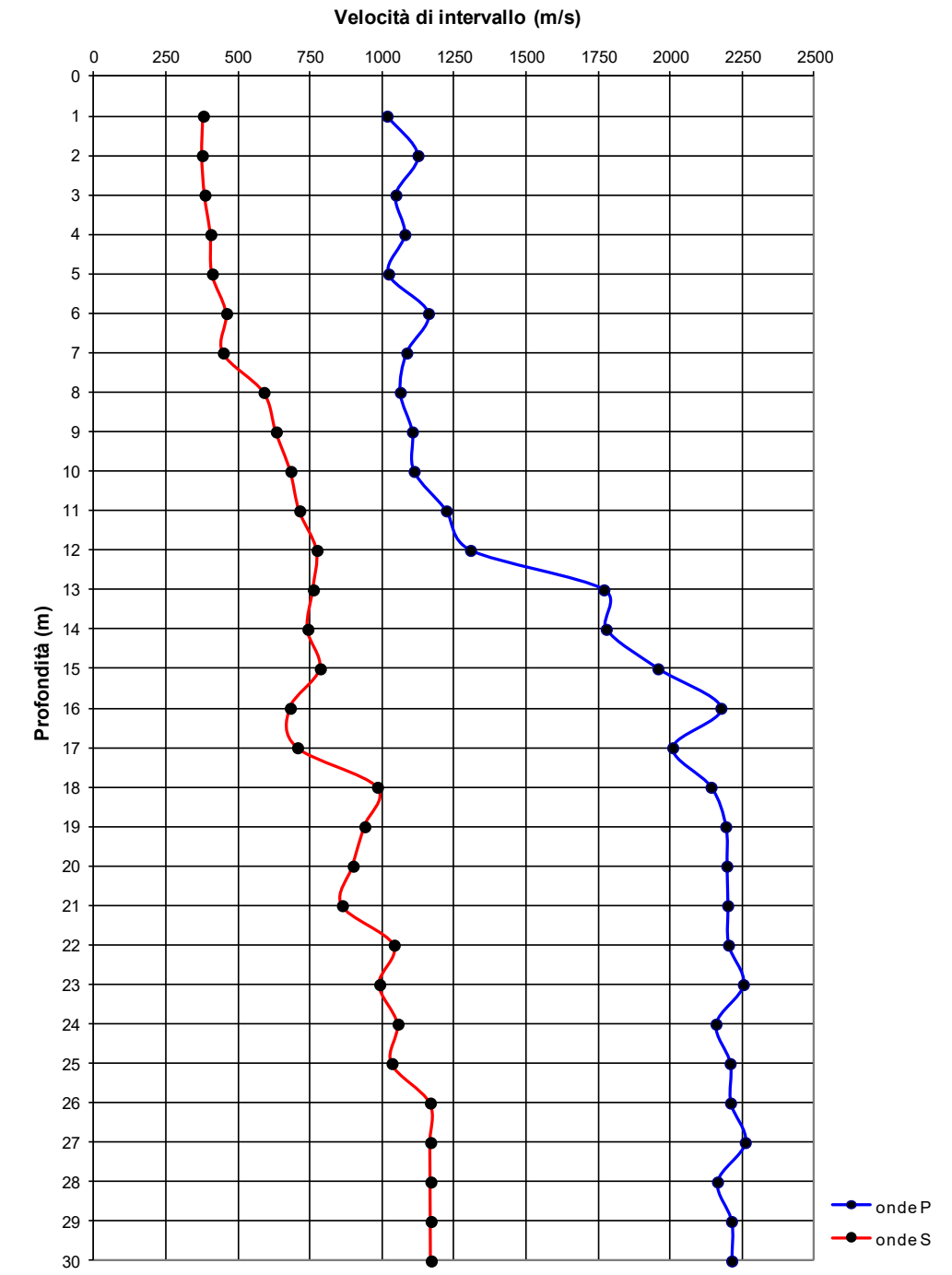
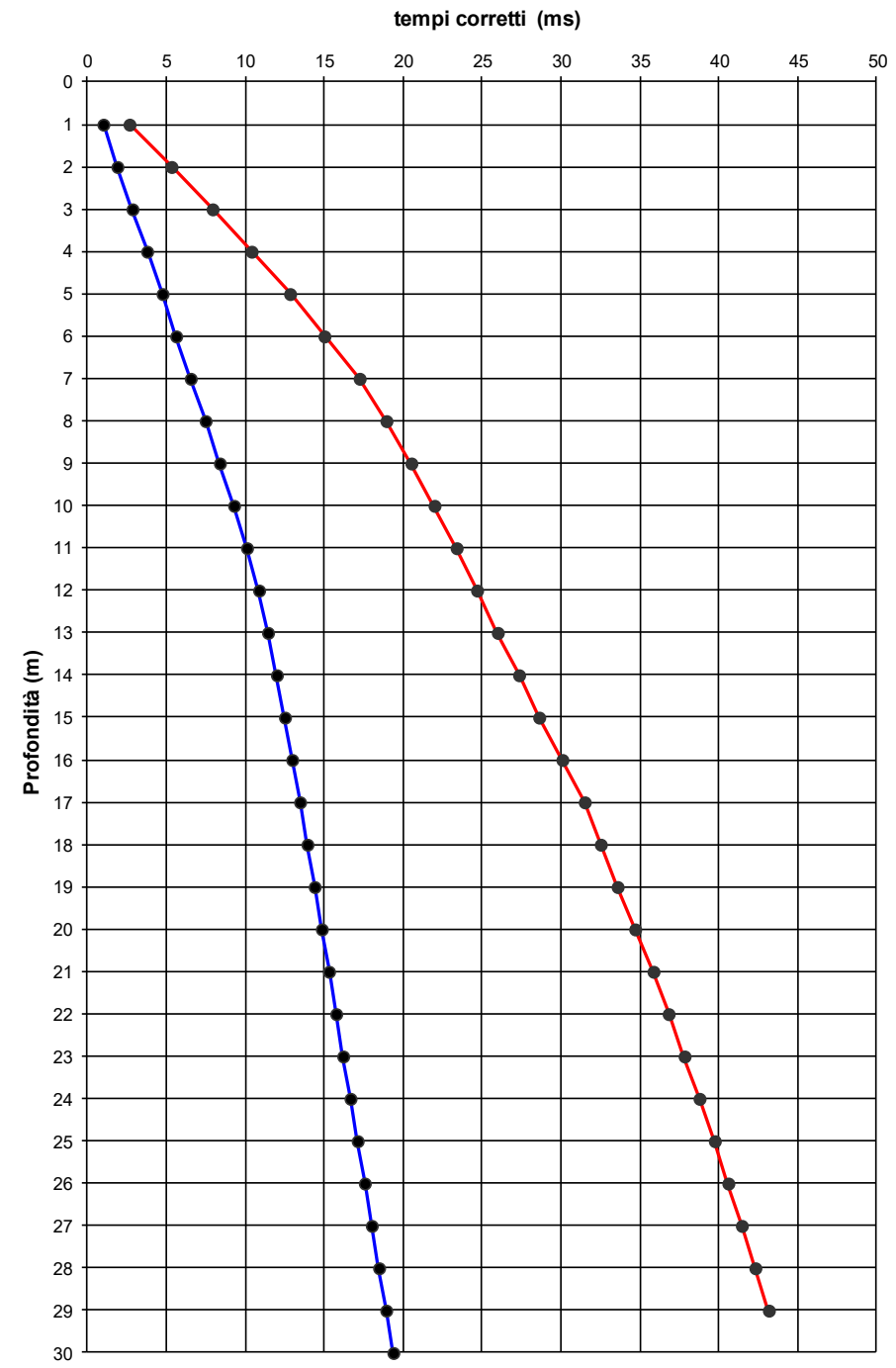


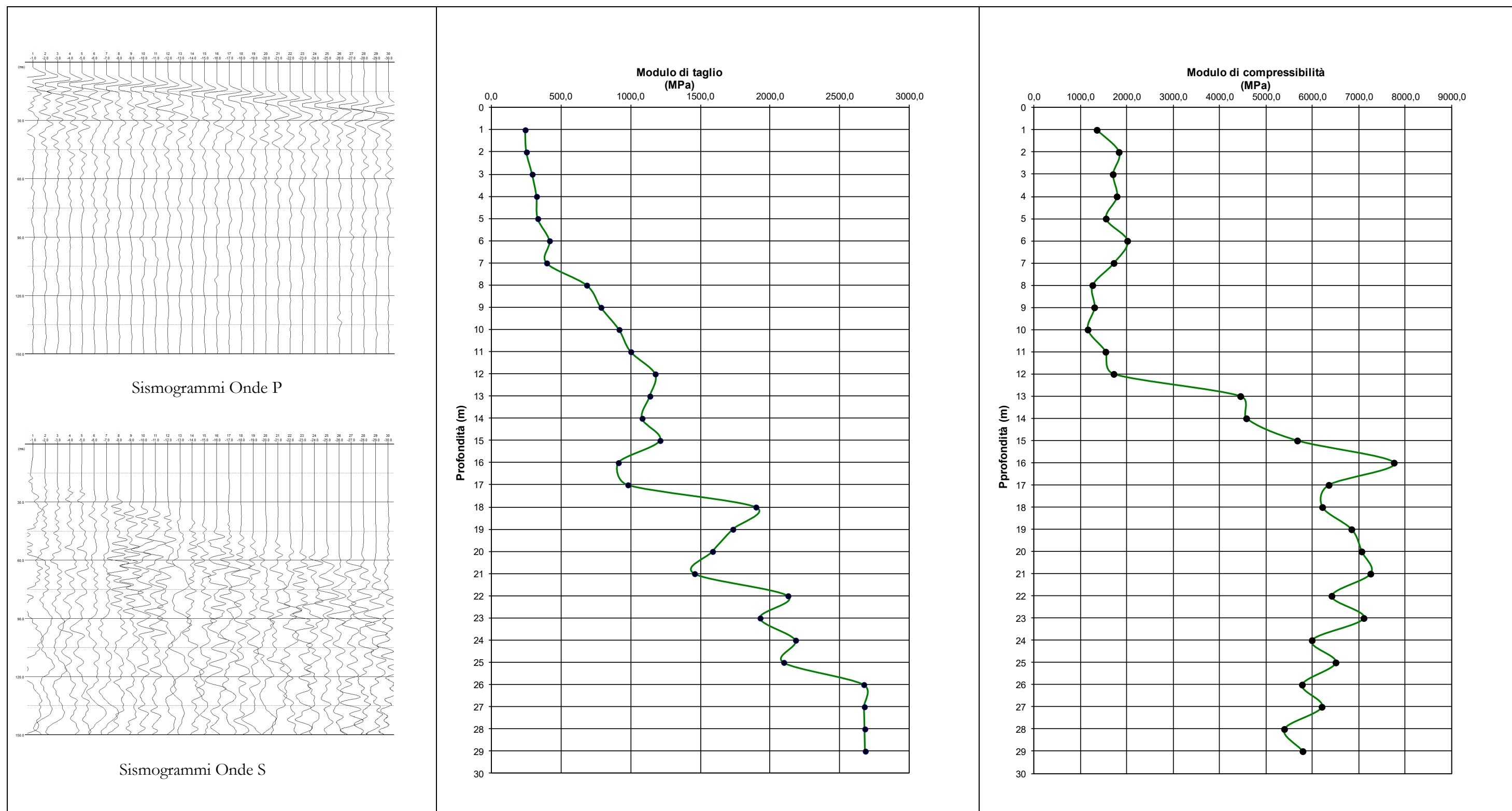
SONDAGGIO SISMICO DH 2





SONDAGGIO SISMICO DH 3





SONDAGGIO SISMICO DH 4

