

COMUNE DI EMPOLI - (FI)

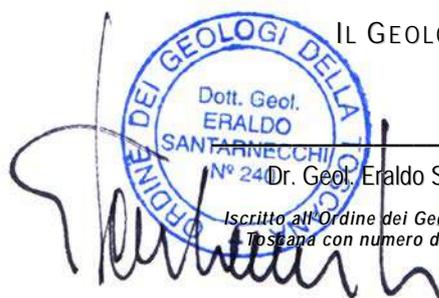
REALIZZAZIONE DI IMPIANTO SPORTIVO DI ATLETICA

VIA RAFFAELLO SANZIO

RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA
(D.M. 17/01/2018 –D.P.G.R. 1/R-2022)

COMMITTENTE:	COMUNE DI EMPOLI
GEOLOGO:	DR. GEOL. ERALDO SANTARNECCHI
DATA:	LUGLIO 2022

IL GEOLOGO



Dr. Geol. Eraldo Santarneckchi

Isritto all'Ordine dei Geologi della Regione Toscana con numero di riferimento 240

Dr. ERALDO SANTARNECCHI - Geologo
Via Armando Diaz, 171 - 56024 PONTE A EGOLA (PI)
Tel: 0571/485277 - cell: 348-3884941 e-mail: info@studiolithos.net
pec: e.santarneckchi@pec.geologitoscana.net

Sommario

RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA	1
1 - PREMESSA	1
2– SISMICITA'	1
2.1- <i>Categorie del suolo di fondazione.....</i>	3
2.1.2 - Indagine sismica DOWN HOLE	5
2.2 - <i>Parametri sismici.....</i>	6
3– VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE	8

ALLEGATI

- **TAV. 1** – planimetria con ubicazione indagini geognostiche
- **Allegato 1** – Elaborati indagine sismica "Down Hole".

RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA

1 - PREMESSA

La presente **relazione sulla modellazione sismica** viene redatta su committenza del Comune di Empoli (FI) a supporto del progetto della realizzazione di un nuovo impianto sportivo di atletica in Via Raffaello Sanzio.

Nella presente perizia si riportano i risultati dell'indagine sismica in foro "Down Hole" realizzata in sito (vedi allegato) e la definizione di parametri e coefficienti sismici eseguita facendo riferimento all'approccio semplificato che si basa sull'individuazione della categoria di sottosuolo secondo quanto meglio specificato dalla normativa tecnica di riferimento emanata in attuazione dell'articolo 83 del DPR 380/2001.

La campagna sismica realizzata in sito è in accordo con quanto dettato dall'Allegato A del Regolamento 1R-2022, paragrafo 3, punto 1.2 in relazione alla volumetria della struttura in esame (volume totale superiore a 6000 mc – **classe di indagine n. 4**).

2- SISMICITA'

Il territorio del Comune di **Empoli**, classificato sismico ai sensi del D.M. 19.03.1982, in seguito all'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 23.03.2003 e successivamente con Del.G.R.T. n°421 del 26/05/2014 della Regione Toscana, viene inserito nella **zona sismica 3** alla quale corrisponde un'accelerazione di picco orizzontale del suolo ag, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, di **0.15 ag/g**.

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 e successive NTC 2018, invece, la stima della pericolosità sismica viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più tramite un criterio "zona dipendente".

L'azione sismica di progetto in base alla quale valutare il rispetto dei diversi "stati limite" presi in considerazione, viene definita partendo dalla "pericolosità di base" del sito di intervento, che rappresenta l'elemento essenziale di conoscenza per la determinazione dell'azione sismica.

La pericolosità sismica di un sito è descritta dalla probabilità che in un fissato lasso di tempo, in un detto sito si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato. In base a quanto riportato nelle NTC, tale lasso di tempo, espresso in anni, è denominato "*periodo di riferimento*" V_R , legato alla "*vita nominale*" dell'edificio in progetto V_N ($V_R = V_N \times C_u$ dove C_u è il coefficiente d'uso legato alla categoria dell'edificio), e la probabilità è denominata "*probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento*" P_{VR} .

Per descrivere la pericolosità sismica in un generico sito con un livello di precisione sufficiente, sia in termini geografici che in termini temporali, i risultati dello studio di pericolosità sismica devono essere forniti:

- a) in corrispondenza dei punti di un reticolo ("reticolo di riferimento") i cui nodi, individuati in termini di latitudine e longitudine, debbono distare di un passo $\leq 0,05^\circ$;
- b) per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno TR ricadendo in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi;
- c) in termini di valori di accelerazione orizzontale massima a_g e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sottosuolo rigido affiorante.

In particolare, i caratteri del moto sismico sul sito di riferimento rigido orizzontale sono descritti dalla distribuzione sul territorio nazionale delle seguenti grandezze, sulla base delle quali sono compiutamente definite le forme spettrali per la generica P_{VR} .

a_g = accelerazione massima al sito;

F_o = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

TC* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

Il valore di a_g viene desunto direttamente dalla pericolosità di riferimento, attualmente fornita dall' INGV, mentre F_o e TC^* vengono calcolati in modo che gli spettri di risposta elastici in accelerazione, velocità e spostamento forniti dalle NTC approssimino al meglio i corrispondenti spettri di risposta elastici in accelerazione, velocità e spostamento derivanti dalla pericolosità di riferimento.

Lo scuotimento del suolo così individuato deve essere corretto per tenere conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali del sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e della morfologia di superficie (con la determinazione della categoria di sottosuolo specifica del sito e dei coefficienti di amplificazione topografica **S_T** e stratigrafica **S_s**).

2.1- Categorie del suolo di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II delle NTC (vedi tabella 1), si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s .

I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove ovvero, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito,

quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propaga-zione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{seq} = \frac{H}{\sum_{I=1,N} h_i/V_{S_i}}$$

In cui H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS 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, ottenendo pertanto la seguente espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{I=1,N} h_i/V_i}$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $< 10^{-6}$) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori; NSPT, c_u e V_s sono i valori rappresentativi degli strati considerati.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , 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.

C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> 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.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,</i> 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 e 180 m/s.
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 30 m.

Tabella 1

Nel caso specifico per l'individuazione della categoria di suolo e quindi per l'individuazione del parametro Vs30 è stata eseguita un' **indagine sismica in foro (down hole)**. Nel paragrafo successivo vengono riportati i risultati ottenuti con tale indagine.

2.1.2 - Indagine sismica DOWN HOLE

L'indagine sismica è stata svolta attraverso l'esecuzione di una prova sismica in foro eseguita nel perforo del sondaggio geognostico, opportunamente rivestito per consentire la corretta esecuzione di tale indagine.

Per l'ubicazione si rimanda alla planimetria di TAV.1 allegata.

Rimandando per tutti i dettagli dell'indagine alla visione degli elaborati allegati, si riporta sinteticamente che il modello conseguito dall'elaborazione di tale indagine geofisica individua un **valore di Vs30 pari a 233 m/s al quale corrisponde una categoria di suolo sismico di tipo C** così come indicato nella tab. 3.2.II del D.M. 17/01/18.

In allegato 1 vengono riportati i risultati e l'elaborazione completa dell'indagine down hole eseguita.

2.2 - Parametri sismici

Procediamo adesso alla determinazione dei parametri sismici funzionali alla verifica degli stati limite. Nella tabella seguente vengono riassunti i dati di ingresso legati alla tipologia costruttiva dell'opera in esame.

TIPO DI COSTRUZIONE	2
VITA NOMINALE V_N	≥ 50 anni
CLASSE D'USO	III
COEFFICIENTE D'USO C_U	1,5
VITA O PERIODO DI RIFERIMENTO $V_r = V_N \times C_U$	≥ 50

Tabella 3

Partendo da questi dati, dalle valutazioni legate alle caratteristiche stratigrafiche e morfologiche dell'area in oggetto che portano alla determinazione del fattore riduttivo **S** (vedi tabella di seguito), una volta definiti i nodi del reticolo sismico di riferimento, arriviamo alla definizione dei parametri sismici di seguito riportati.

Sito in esame.

latitudine: 43,715736
longitudine: 10,92808
Classe: 3
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 20275	Lat: 43,7054	Lon: 10,8620	Distanza: 5433,396
Sito 2 ID: 20276	Lat: 43,7069	Lon: 10,9311	Distanza: 1009,403
Sito 3 ID: 20054	Lat: 43,7569	Lon: 10,9290	Distanza: 4578,963
Sito 4 ID: 20053	Lat: 43,7554	Lon: 10,8599	Distanza: 7033,661

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 75 anni
Coefficiente c_u : 1,5

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 45 [anni]
ag: 0,051 g
Fo: 2,572
Tc*: 0,254 [s]

Danno (SLD):
Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 75 [anni]
ag: 0,061 g
Fo: 2,605
Tc*: 0,268 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):
Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 712 [anni]
ag: 0,141 g
Fo: 2,453
Tc*: 0,292 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):
Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 1462 [anni]
ag: 0,179 g
Fo: 2,414
Tc*: 0,299 [s]

Coefficienti Sismici

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,650
St: 1,000
Kh: 0,015
Kv: 0,008
Amax: 0,751
Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,018
Kv: 0,009
Amax: 0,895
Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,490
Cc: 1,580
St: 1,000
Kh: 0,050
Kv: 0,025
Amax: 2,054
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,440
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,062
Kv: 0,031

Amax: 2,527
Beta: 0,240

3– VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE

Secondo quanto riporta il D.M. 17/01/2018 la verifica della suscettibilità alla liquefazione può essere omessa quando le accelerazioni massime Amax attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) siano minori di 0,1g. tenuto conto che:

$$\mathbf{Amax = ag \times S = ag \times Ss \times St}$$

In questo caso ag (SLV) risulta pari a 0,141g, con Ss = 1,5 e St = 1,0, quindi risulta:

$$\mathbf{Amax = 0,141 \times 1,5 \times 1,0 = 0,2115 \text{ g}}$$

Considerato inoltre che i terreni presenti dalla superficie fino a circa 7,5 m di profondità hanno una composizione limoso-argillosa prevalente, e che la nuova struttura sarà fornita di una fondazione sorretta da pali di grande diametro spinti fino a -12 m di profondità entro lo strato sabbioso dotato di buon addensamento, **si possono escludere problemi di liquefazione dei terreni**, perché le fondazioni profonde forniranno un appoggio sicuro e stabile anche nell'eventualità (per altro assai remota, data la composizione dei terreni e l'assenza di una falda superficiale) di fenomeni di liquefazione.

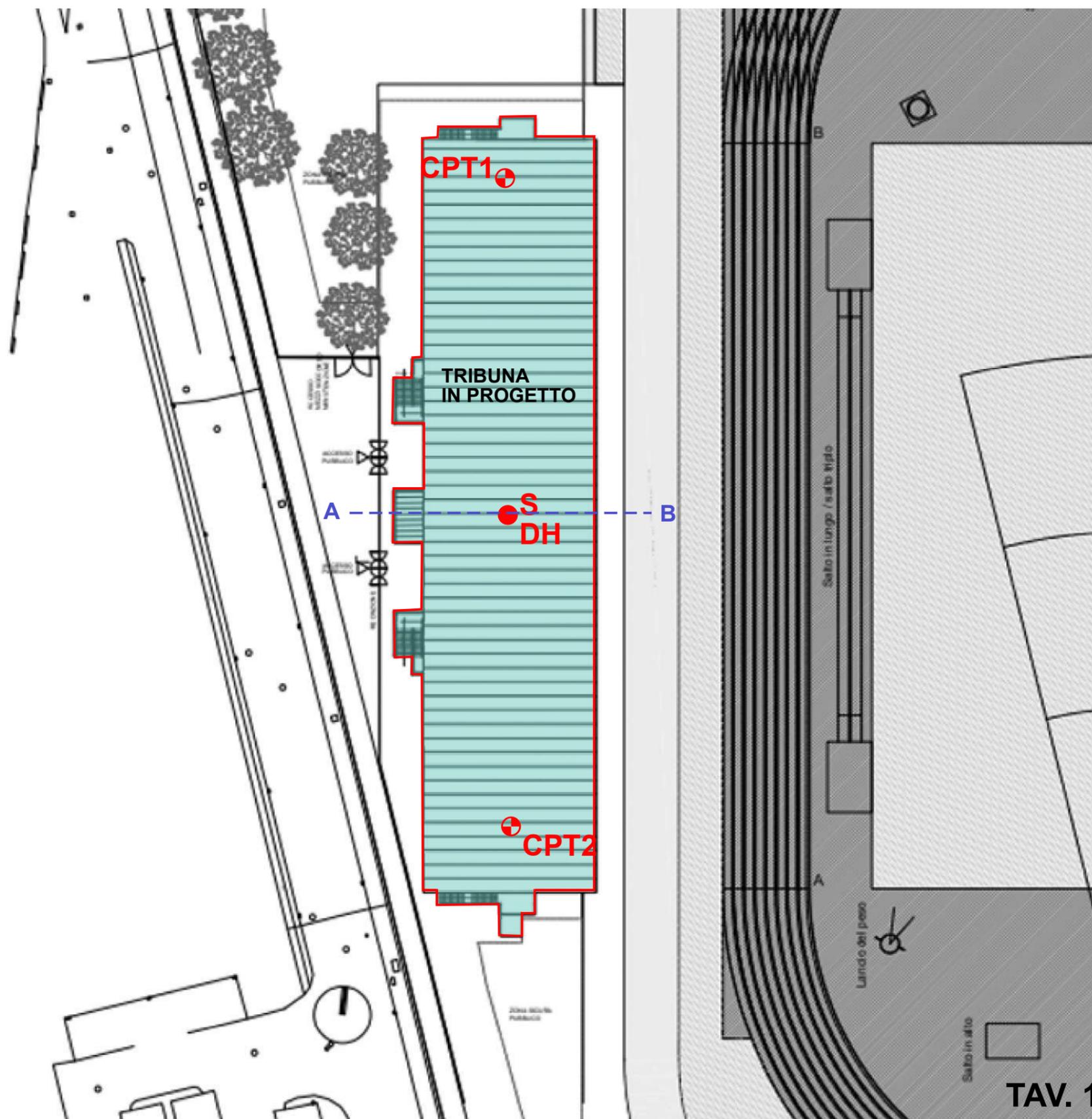
Ponte a Egola, Luglio 2022

Il Geologo
Dott. Geol.
ERALDO
SANTARNECCHI
Dr. Geol. Eraldo Santarnecki
iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione
Toscana con numero di riferimento 240



PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

scala 1:500



LEGENDA	
	sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prelievo campioni e prova down hole
	ubicazione prove penetrometriche statiche
	traccia sezione litostratigrafica e geotecnica



IGETECMA s.n.c. Istituto Sperimentale di Geotecnica e Tecnologia dei Materiali

Laboratorio autorizzato con D.M. n. 54143 del 07/11/2005 ai sensi della Circolare 08/09/10 n. 7618/STC

Esecuzione e certificazione prove geotecniche – settore A

Laboratorio autorizzato con D.M. n. 162 del 19/04/2011 ai sensi dell'art. 20 della L. n. 1086/71

Prove e controlli su strutture e materiali da costruzione – settore A

Rapporto di Prova n°155-22-S

Montelupo Fiorentino 6/05/2022

SETTORE: Geofisica
COMMITTENTE: COMUNE DI EMPOLI
CANTIERE: Via Raffaello Sanzio, Empoli (FI)
RICHIEDENTE:
RIFERIMENTO: R.P.E. n°201-22

Indice:

- 1 Scopo dell'indagine (Pag.1)
- 2 Correlazione fra velocità delle onde sismiche e parametri elastico-dinamici (Pag.2)
- 3 Indagine sismica Down-Hole (Pag.4)
 - 3.1 Procedure di campagna (Pag.4)
 - 3.2 Metodo di elaborazione dei dati (Pag.5)
- 4 Sismica a rifrazione con onde P e SH (Pag.5)
 - 4.1 Procedure di campagna (Pag.5)
 - 4.2 Metodo di elaborazione dei dati (Pag.6)
- 5 Presentazione dei dati (Pag.7)
- 6 Risultati dell'indagine (Pag.7)
- 7 Normativa sismica e calcolo del parametro VSeq (Pag.9)
- 8 Caratteristiche della strumentazione (Pag.10)

Il Direttore del Laboratorio

Ing. F. Politi



Il Tecnico

Geol. A. Farolfi

1 Scopo dell'indagine

Su incarico del COMUNE DI EMPOLI, il giorno 6/05/2022, è stata eseguita una indagine geofisica composta da una prova Down Hole (S1), con registrazione di onde P e SH, spinta fino alla profondità di 32 m, in Via Raffaello Sanzio, Empoli (FI). Scopo dell'indagine è stata la caratterizzazione sismostratigrafica dei terreni, il calcolo dei parametri elastico-dinamici e della categoria di suolo ai fini della normativa sismica.

2 Correlazione fra velocità delle onde sismiche e parametri elastico-dinamici

Secondo i principi dell'elasticità dei materiali e le leggi che associano le deformazioni subite da un corpo agli sforzi ad esso applicati, è possibile stabilire relazione che forniscono i parametri elastici di un materiale conoscendo i valori di velocità delle onde sismiche di compressione P e di taglio S.

Poiché le tensioni e le deformazioni che si generano sotto l'azione del campo d'onda sismico sono di modesta entità, anche il terreno e le rocce sollecitate in questo ambito possono essere considerati in prima approssimazione come materiali omogenei, isotropi ed elastici, ed è quindi applicabile la legge di Hook (proporzionalità tra lo sforzo applicato σ_{ij} e la deformazione prodotta ϵ_{kl}) espressa come:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

nella quale le costanti di proporzionalità C_{ijkl} sono dette Moduli Elastici. Tali costanti definiscono le proprietà dei materiali, ed assumendo materiali isotropi ed elastici, diminuiscono da 81 a 5, di cui quattro hanno un preciso significato fisico (G , E , K , ν), mentre λ rappresenta una semplificazione nelle formule.

In senso più generale possono essere definite le costanti di Lamè λ e μ come caratteristiche elastiche indipendenti dalle direzioni lungo cui vengono applicate le tensioni o lungo cui vengono registrate le deformazioni. Queste due costanti sono definite dalle relazioni:

$$\lambda = (\nu E) / ((1 + \nu) (1 - 2\nu)) \quad \mu = E / 2 (1 + \nu)$$

Analogamente i due moduli E e ν possono essere espressi in funzione delle costanti di Lamè:

$$E = \mu (3\lambda + 2\nu) / (\lambda + \mu) \quad \nu = \lambda / 2 (\lambda + \mu)$$

Dimensionalmente i moduli elastici G , E , K e le due costanti di Lamè esprimono il rapporto tra una forza ed una superficie e sono quindi delle pressioni, mentre il rapporto di Poisson è adimensionale.

La costante E viene definita come rapporto tra sollecitazione e conseguente deformazione longitudinale rappresenta il modulo elastico del materiale (Modulo di Young). E' importante sottolineare che in campo dinamico si parla di modulo elastico dinamico, non statico, proprio perché tale modulo è ricavato dalle velocità delle onde sismiche.

La misura della resistenza del materiale al taglio viene definita come il rapporto tra deformazione e sforzo applicato, ed è chiamata Modulo di Taglio, G .

Il rapporto tra la tensione idrostatica e la deformazione cubica definisce il Modulo di compressione volumetrica o Bulk, **k**. Il Modulo di Poisson **v** è definito come rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale. Un'ultima costante entra a far parte delle relazioni tra caratteristiche elastiche e velocità, la densità **ρ** del materiale.

Le velocità sismiche possono essere espresse tramite le costanti elastiche con le seguenti relazioni:

$$V_p = ((K + 4/3 G) / \rho)^{1/2}$$

$$V_s = (G / \rho)^{1/2}$$

Pertanto avendo determinato i valori di **V_p** e **V_s** ed il valore **ρ** della densità del materiale attraversato, è possibile calcolare i valori delle costanti elastiche dinamiche che caratterizzano i terreni esaminati con le seguenti relazioni.

$$v = (V_p^2 - 2 V_s^2) / (2 (V_p^2 - V_s^2))$$

$$G = \rho V_s^2$$

$$E = 2 \rho V_s^2 (1 + v)$$

$$K = (2 \rho V_s^2 (1 + v)) / (3 (1 - 2 v))$$

Merita di essere ricordato infine che i parametri ricavati da misure dinamiche, cioè mediante l'utilizzo delle velocità delle onde sismiche, hanno in genere valori superiori a quelli ricavati da prove statiche di laboratorio proprio per il diverso campo di sforzo applicato e deformazione raggiunta: le intense ma brevi sollecitazioni provocate dalla propagazione delle onde sismiche si mantengono, infatti, nel campo elastico delle deformazioni del materiale, per cui sebbene in teoria il modulo di Poisson 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.

Il rapporto fra **V_p** e **V_s** non è costante e dipende dallo stato di saturazione e dalla pressione interstiziale dei pori, in Tabella I sono riportati valori medi delle **V_p** per i principali litotipi e il range di **V_s** relative comprese fra i rapporti di **V_p/V_s** di 1.9 e 3.5; questi valori sono da ritenere indicativi in quanto in particolari condizioni il rapporto **V_p/V_s** può aumentare.

Materiale	V P m/s	V SH m/s	
		VP/VSH 1.9 - 3.5	VP/VSH 1.9 - 3.5
Detrito superficiale alterato	300 - 600	86 - 158	171 - 316

Ghiaia, pietrisco, sabbia asciutta	500 - 900	143 - 263	257 – 474
Sabbia bagnata	600 - 1800	171 - 316	514 – 947
Argilla	900 - 2700	257 - 474	771 – 1421
Acqua	1430 - 1680	-	-
Arenaria	1800 - 4000	514 - 947	1143 – 2105
Scisti argillosi	2500 - 4200	714 - 1316	1200 – 2211
Calcare	2000 - 6000	571 - 1053	1714 – 3158
Sale	4200 - 5200	1200 - 2211	1486 – 2737
Granito	4000 - 6000	1143 - 2105	1714 - 3158
Rocce metamorfiche	3000 - 7000	857 - 1579	2000 - 3684

Tabella I – Velocità nei principali materiali.

3 Indagine sismica Down-Hole

3.1 Procedure di campagna

Per la registrazione delle onde di compressione e delle onde di taglio in profondità viene utilizzato un geofono da pozzo munito di un ricevitore costituito da tre sensori sensibili alle componenti del moto lungo tre direzioni: uno verticale e due orizzontali ortogonali fra loro.

Il geofono da pozzo, munito di un sistema teleguidato di orientazione azimutale e di ancoraggio meccanico alle pareti del rivestimento, viene calato all'interno del foro di sondaggio, preventivamente attrezzato con un tubo di rivestimento, e ad intervalli determinati vengono registrati i treni d'onda prodotti dalle energizzazioni poste in superficie. Energizzando su una piastra posta a diretto contatto con il terreno vengono generate predominanti onde P di compressione, mentre per le onde SH di taglio si utilizza una trave di legno posta a diretto contatto col terreno, gravata dal peso di un automezzo, che viene colpita lateralmente: le battute destra e sinistra vengono sommate con polarità scambiata in modo da migliorare l'individuazione dell'onda di taglio polarizzata in senso orizzontale che viene generata, si può così avere un completo controllo nell'analisi del treno d'onda che attraversa i terreni da investigare. In questo modo per ogni punto di energizzazione si hanno due treni d'onda diversi: uno per le onde P e l'altro per le onde SH.

Un'unità esterna di controllo gestisce le fasi di ancoraggio e registrazione del geofono da pozzo, mentre le tracce sismiche relative ad ogni intervallo di profondità vengono registrate mediante un sismografo digitale per la loro successiva elaborazione. La distanza sorgente-boccaforo è stata fissata in 1.9 m, il passo delle registrazioni è stato di 1 m.

In Allegato sono riportate le registrazioni di campagna separate per onde P e SH, per le prove down-hole.

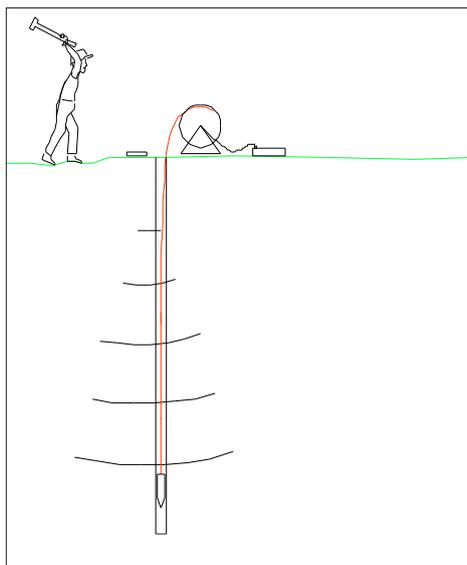


Fig. 1 – Schema del sistema d'acquisizione

3.2 Metodo di elaborazione dei dati

Questa tecnica di prospezione sismica prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione P e di taglio SH tra il punto di energizzazione posto in superficie ed il punto di ricezione situato in profondità nel foro di sondaggio.

I tempi letti sui sismogrammi devono poi essere corretti poiché le onde sismiche non percorrono tragitti verticali tra la sorgente in superficie ed il sensore nel foro, ma inclinati rispetto alla verticale: indicando con t_z il tempo d'arrivo, con d la distanza orizzontale tra sorgente ed il boccaforo e con z la profondità del sensore, il tempo di arrivo corretto t_c alla profondità z sarà dato dalla relazione:

$$t_c = t_z * \cos (\alpha z)$$

$$\alpha z = \arctang (d / z)$$

La velocità delle onde P e delle onde SH viene calcolata mediante la pendenza della dromocrona.

Tali valori di velocità vengono quindi diagrammati per visualizzare le variazioni di velocità con la profondità, ed utilizzati per ricavare i moduli dinamici, secondo le formule di paragrafo 1. Dalla variazione delle velocità e dei parametri elastici con la profondità si risale al tipo di materiale in cui sta passando il treno d'onda a quella profondità.

In Allegato sono riportati i grafici delle dromocrone corrette e delle velocità delle onde P e delle onde SH rispetto alla profondità, e le Tabelle numeriche con i moduli elastici dinamici (rapporto di Poisson ν , modulo di Taglio G, di Young E, di rigidità volumetrica K espressi in MPa); i valori di peso di volume utilizzati nei calcoli sono stimati sulla base delle litologie.

4 Presentazione dei dati

Nella presente relazione vengono forniti i seguenti elaborati:

1. Ubicazione delle indagini, Pag. 8

2. Down Hole, Pag 9 – Pag 14
3. Documentazione fotografica, Pag. 15

6 Risultati dell'indagine

Down Hole S1 (32 m): le variazioni di velocità sono riferibili ad un diverso grado di addensamento all'interno dei depositi presenti.

Il diverso comportamento fra le velocità delle onde di compressione e di taglio è riferibile ad una diversa resistenza dei materiali alla compressione ed al taglio e alle variazioni delle pressioni interstiziali dei fluidi.

7 Normativa sismica e calcolo del parametro $V_{s,eq}$

Le norme NTC 2018 definiscono i criteri di classificazione del sottosuolo, che devono essere effettuati sulla base delle condizioni stratigrafiche (spessori e caratteristiche dei materiali) ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = H / S_{i=1,N} (h_i/Vs_i)$$

h_i spessore dell'i-esimo strato;

Vs_i velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Le categorie di suolo sono riportate in tabella II.

Categorie di Suolo di Fondazione
A
Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti, con spessore massimo pari a 3 m.
B
Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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
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.
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 e 180 m/s.
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 30 m.

Tabella II – Categorie di suolo di fondazione

“Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche” (NTC 2018). Il valore di V_{seq} calcolato nella prova Down Hole, calcolato da piano campagna fino alla profondità di 30 m e da 2m a 32 m è rispettivamente 233 m/s e 255 m/s.

8 Caratteristiche della strumentazione

Il sistema di acquisizione modulare della Geometrics così configurato:

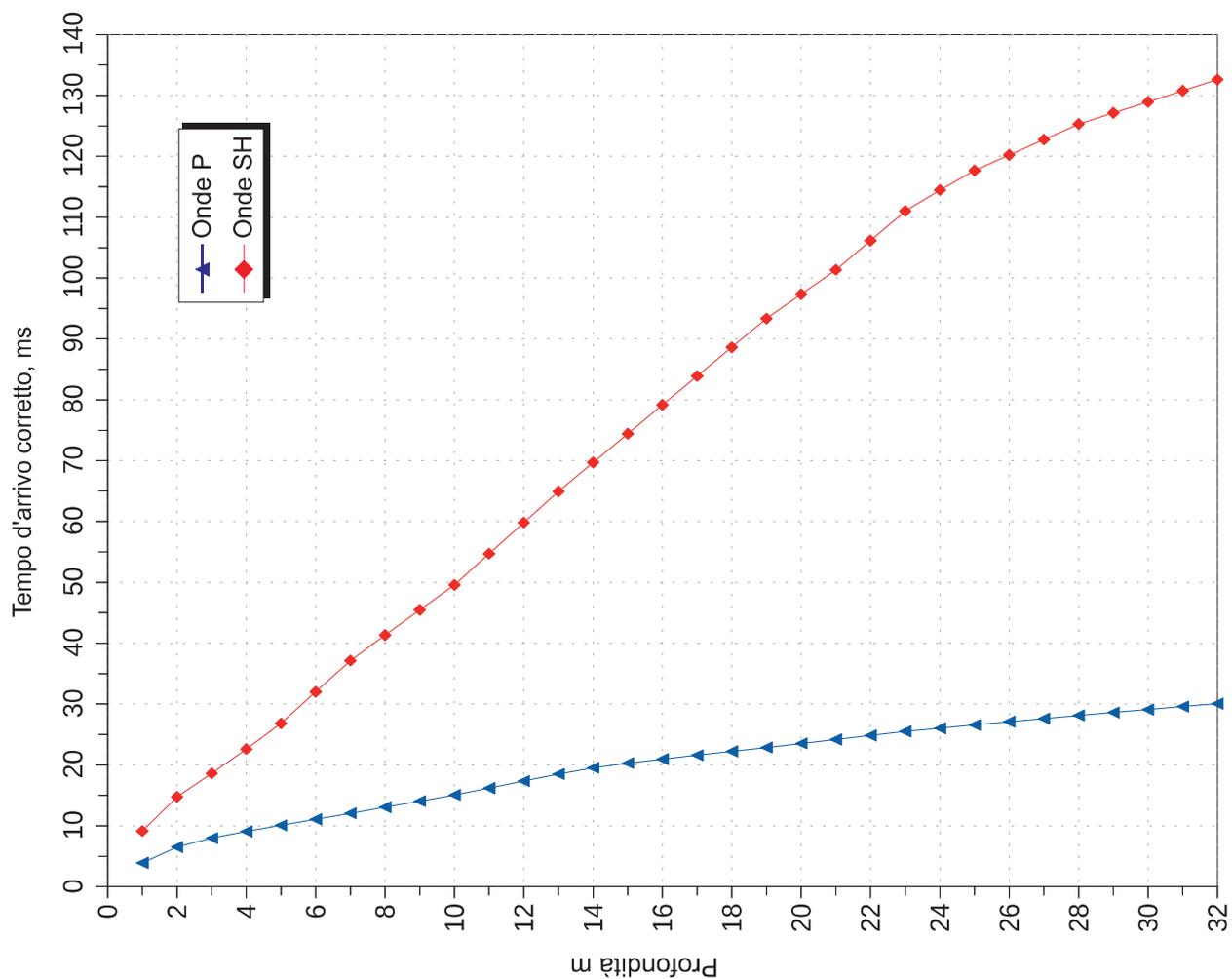
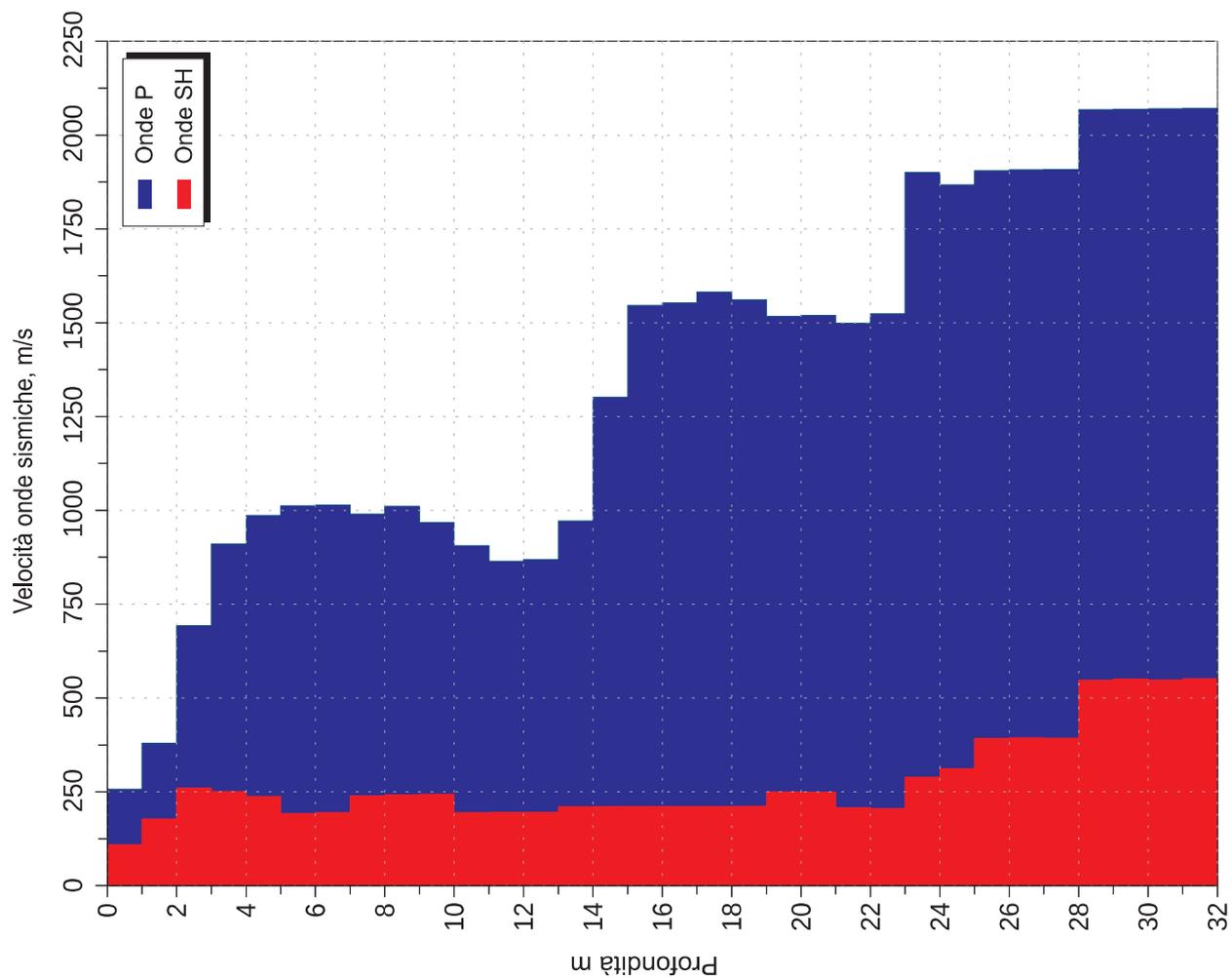
Sismografo GEODE 48 canali (2 moduli a 24 canali) con Controller Stratavisor NZC:

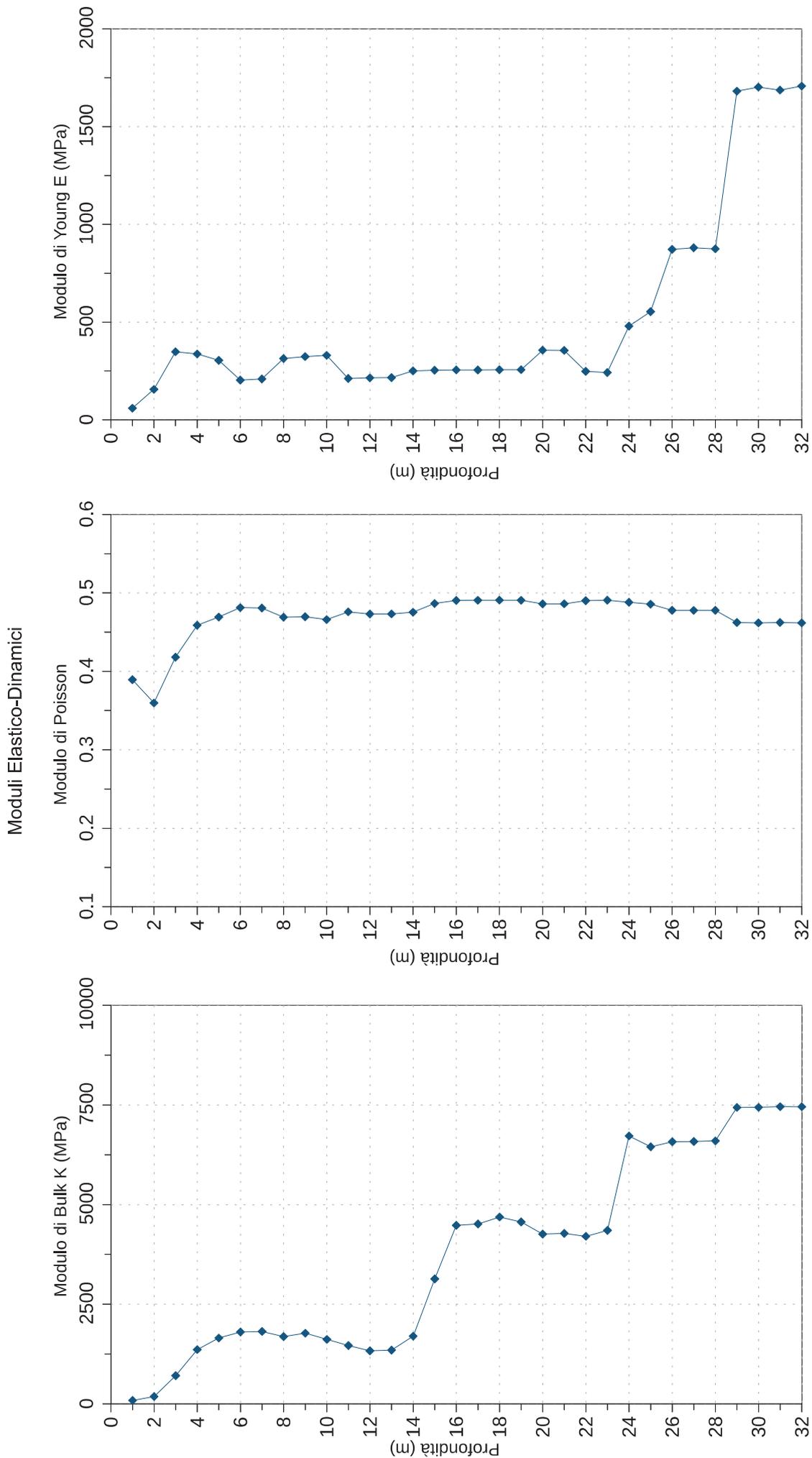
4. risoluzione segnale A/D 24 bit
5. escursione dinamica 144 dB, 110 dB istantanea a 2 ms
6. passo di campionamento da 0.02 a 16 ms indipendente dal tempo d'acquisizione
7. fino a 64.000 campioni per traccia
8. distorsione 0.0005% a 2ms, 1.75 – 208 Hz
9. amplificazione del segnale da 0 a 36 dB
10. filtri anti-aliasing a 90 dB della frequenza di Nyquist
11. filtri digitali low-cut, high-cut, notch
12. precisione trigger in sommatoria 1/32 del passo di campionamento
13. pre-trigger fino a 4096 campioni, delay sino a 1.000 ms
14. salvataggio dati in formato SEG-2 su hard-disk incorporato
15. Geofono da pozzo a con 2 terne di geofoni con frequenza propria di 10 Hz e spaziatura 1 m
16. sistema di starter (trigger) mediante accelerometro
17. energizzazione mediante mazza da 5 Kg

Dati - S1

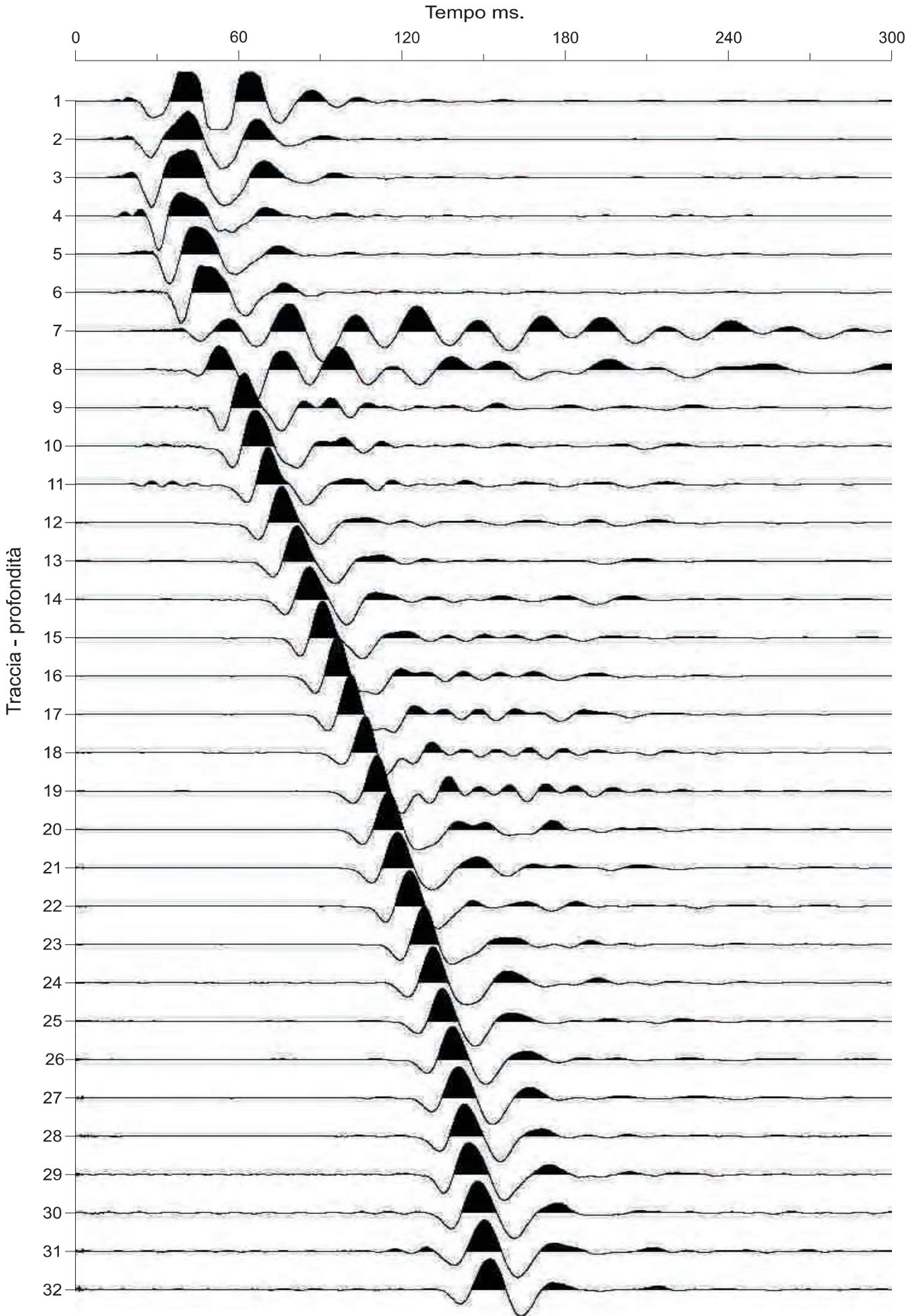
Z m	Tp ms	Ts ms	Tp Corr. ms	Ts Corr. ms	VP m/sec.	VS m/sec.	ρ t / m ³	ν -	G MPa	E MPa	K MPa
0 - 1	8.7	20.5	3.9	9.1	257	109	1.80	0.39	21	60	90
1 - 2	9.2	20.9	6.5	14.8	380	178	1.81	0.36	57	156	185
2 - 3	9.6	22.4	8.0	18.6	692	260	1.82	0.42	123	348	709
3 - 4	10.1	25.3	9.1	22.6	910	251	1.83	0.46	115	337	1363
4 - 5	10.9	28.9	10.1	26.8	986	237	1.84	0.47	104	305	1652
5 - 6	11.7	33.7	11.1	32.0	1012	193	1.85	0.48	69	203	1804
6 - 7	12.5	38.6	12.1	37.1	1014	195	1.86	0.48	71	209	1818
7 - 8	13.5	42.6	13.1	41.3	990	239	1.87	0.47	107	314	1690
8 - 9	14.4	46.6	14.1	45.5	1011	242	1.88	0.47	110	323	1774
9 - 10	15.4	50.5	15.1	49.6	967	244	1.89	0.47	113	330	1618
10 - 11	16.5	55.6	16.2	54.7	906	194	1.90	0.48	72	212	1465
11 - 12	17.6	60.7	17.4	59.8	865	195	1.91	0.47	73	215	1332
12 - 13	18.7	65.7	18.5	64.9	868	196	1.92	0.47	73	217	1350
13 - 14	19.7	70.4	19.5	69.7	971	210	1.92	0.48	85	250	1699
14 - 15	20.5	75.1	20.3	74.4	1301	211	1.92	0.49	85	254	3136
15 - 16	21.1	79.8	20.9	79.2	1546	211	1.92	0.49	86	256	4477
16 - 17	21.7	84.5	21.6	83.9	1553	211	1.92	0.49	86	255	4514
17 - 18	22.4	89.2	22.2	88.6	1582	212	1.92	0.49	86	257	4690
18 - 19	23.0	93.9	22.9	93.3	1561	212	1.92	0.49	86	257	4566
19 - 20	23.6	97.8	23.5	97.3	1517	250	1.92	0.49	120	357	4261
20 - 21	24.3	101.8	24.2	101.4	1520	250	1.92	0.49	120	355	4276
21 - 22	25.0	106.6	24.8	106.2	1499	208	1.92	0.49	83	248	4205
22 - 23	25.6	111.4	25.5	111.0	1524	206	1.92	0.49	81	242	4350
23 - 24	26.1	114.9	26.0	114.5	1901	290	1.92	0.49	161	479	6724
24 - 25	26.7	118.1	26.6	117.7	1868	311	1.92	0.49	186	553	6451
25 - 26	27.2	120.6	27.1	120.2	1905	392	1.92	0.48	295	872	6577
26 - 27	27.7	123.1	27.6	122.8	1907	394	1.92	0.48	298	880	6585
27 - 28	28.2	125.6	28.1	125.3	1909	393	1.92	0.48	296	875	6599
28 - 29	28.7	127.4	28.6	127.1	2067	547	1.92	0.46	575	1682	7439
29 - 30	29.2	129.2	29.1	129.0	2069	551	1.92	0.46	582	1703	7441
30 - 31	29.7	131.1	29.6	130.8	2070	548	1.92	0.46	577	1687	7458
31 - 32	30.1	132.9	30.1	132.6	2071	552	1.92	0.46	584	1707	7457

Z	Profondità	ρ	Densità
Tp	Tempo di arrivo onde di compressione	ν	Modulo di Poisson
Ts	Tempo di arrivo onde di taglio	G	Modulo taglio
Tp Corr.	Tempo di arrivo corretto onde di compressione	E	Modulo di Young
Ts Corr.	Tempo di arrivo corretto onde di taglio	K	Modulo di rigidità volumetrica
Distanza sorgente-boccaforo: 2.0 m			





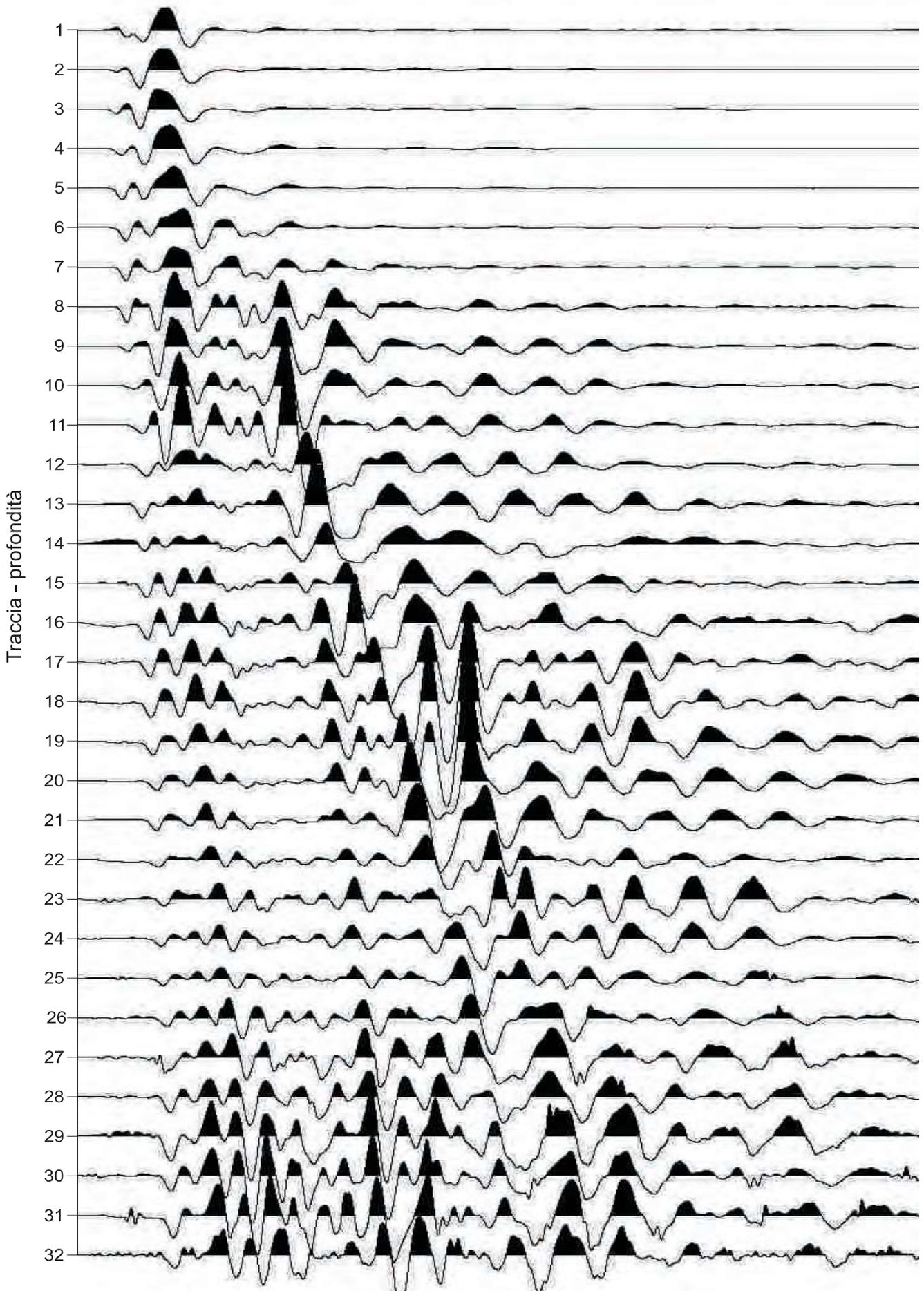
S1 - Onde SH - Somma geofoni orizzontali



S1 - Onde P - geofono verticale

Tempo ms.

0 60 120 180 240 300



Documentazione fotografica S1

