

COMUNE DI LUCCA (LU)



Indagine sismica down hole per la realizzazione di nuovo parcheggio interrato presso piazza Martiri della Libertà

Comm.te:
Amm. Comunale di Lucca

Settembre 2025

Indagine sismica down hole per la realizzazione di nuovo parcheggio interrato presso Piazza Martiri della Libertà

Comm.te:
Amm. Comunale di Lucca

PREMESSA

La presente relazione illustra i risultati di una indagine sismica "down hole" eseguita, su incarico della committenza, presso Piazza Martiri della Libertà nel comune di Lucca.

Le misure sono state effettuate all'interno di un sondaggio geognostico attrezzato per l'esecuzione di prove down-hole, queste sono state eseguite nel tratto compreso tra 39 m di profondità ed il piano di campagna.

GENERALITÀ SULLE PROSPEZIONI SISMICHE DOWN HOLE

Nel metodo sismico down hole (DH) viene misurato il tempo necessario per le onde P e S di spostarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di un foro di sondaggio opportunamente rivestito (figura 1).

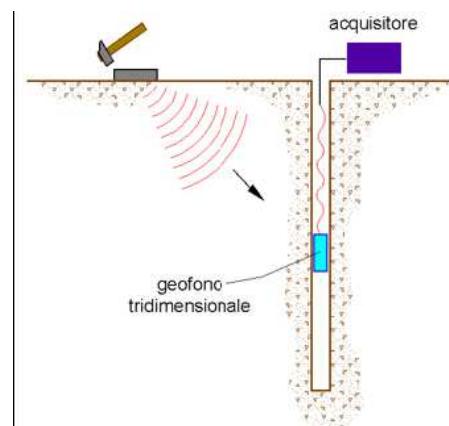


Figura 1 – Schema down hole ad un solo ricevitore

Le componenti indispensabili per una misura DH 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), direzionali e dotati di un sistema di ancoraggio alle pareti del tubo-foro;
- 3) un sismografo multi-canale, in grado di registrare le forme d'onda in modo digitale e di registrarle su memoria di massa;
- 4) un trasduttore (trigger) per l'identificazione dell'istante di partenza della sollecitazione dinamica mediante massa battente.

Durante la perforazione, per ridurre l'effetto di disturbo nel terreno, i fori vengono sostenuti mediante rivestimento o di fanghi bentonici e il loro diametro viene mantenuto piuttosto piccolo (mediamente $\phi < 15$ cm).

I fori vengono poi rivestiti mediante tubazioni, generalmente in PVC pesante da piezometri $\phi 80$ mm, e riempiti con una malta a ritiro controllato, generalmente composta di acqua, cemento e talvolta bentonite rispettivamente in proporzione di 100, 30 e 5 parti in peso.

Prima di iniziare l'indagine è opportuno assicurarsi che il foro sia libero da strozzature e che il tubo di rivestimento non presenti lesioni.

La sorgente consiste in una piastra (di alluminio, acciaio, legno, ...) per l'energizzazione delle onde V_p che, dopo avere opportunamente predisposto il piano di appoggio, viene adagiata in superficie ad una distanza di 1,5 – 3,0 m; alla stessa distanza è posta la trave di battuta per l'energizzazione dell'onda V_s , orientata in direzione ortogonale ad un raggio uscente dall'asse foro.

Alla sorgente (mazza di battuta od esplosivo) è agganciato il trasduttore di velocità o l'interruttore meccanico utilizzato come trigger.

A questo punto il ricevitore viene assicurato alla parete del tubo di rivestimento in PVC mediante il dispositivo ad aria compressa integrato nel geofono tridimensionale, e le sorgenti vengono colpiti rispettivamente in senso verticale (per generare onde di compressione P) e lateralmente (generando onde di taglio SH); al momento dell'energizzazione, con massa battente da almeno 5 kg, parte la registrazione del segnale di trigger e dei ricevitori.

Eseguite le registrazioni, la profondità dei ricevitori viene modificata e la procedura sperimentale ripetuta.

Interpretazione - Metodo diretto

Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde.

Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro (figura 2), r la distanza fra la sorgente e la tripletta di sensori, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

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

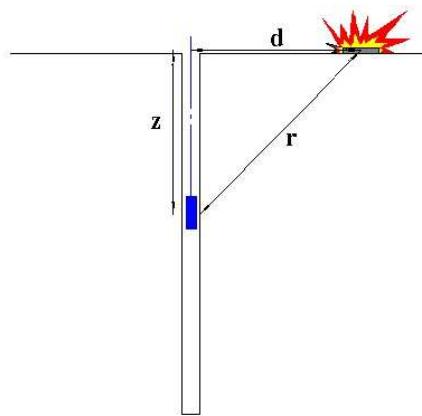


Figura 2 – Schema di down hole con metodo diretto

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico t_{corr} - z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali (figura 3).

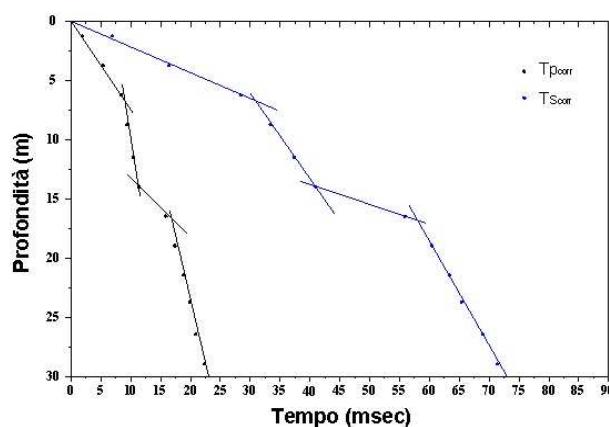


Figura 3 – Grafico delle dromocronie

Ottenuti graficamente i sismostrati si ottengono la densità media, funzione della velocità e della profondità, e i seguenti parametri:

1) coefficiente di Poisson medio:

$$\nu = (0,5 (Vp/Vs)^2 - 1) / ((Vp/Vs)^2 - 1)$$

2) modulo di Young medio:

$$E = Vs^2 \gamma ((3Vp^2 - 4Vs^2) / (Vp^2 - Vs^2))$$

3) modulo di compressibilità volumetrica medio:

$$K = \gamma (Vp^2 - 4/3 Vs^2)$$

Interpretazione - Metodo intervallo

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi (figura 4) posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (velocità d'intervallo).

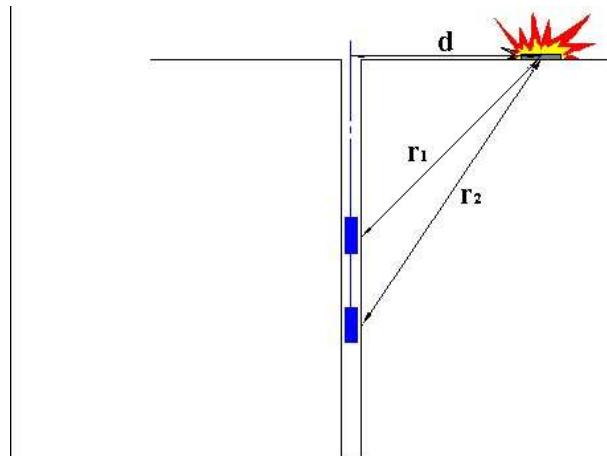


Figura 4 – Schema di down hole con metodo intervallo

Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di pseudo-intervallo, consentendo un'apparente migliore definizione del profilo di velocità.

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la 1.0) e la velocità di intervallo delle onde P e S, con relativo grafico (figura 6), con la formula seguente:

$$v_{p, s} = \frac{r_2 - r_1}{t_{2\text{corr}} - t_{1\text{corr}}}$$

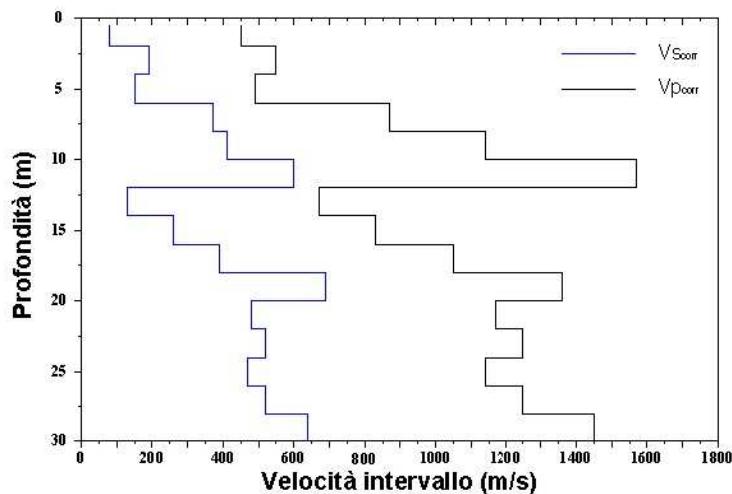


Figura 6 – Profilo delle velocità sismiche con metodo intervallo

Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

I limiti del metodo intervallo sono :

- esso non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- non è applicabile nel caso in cui $t_{2\text{corr}} < t_{1\text{corr}}$.

ATTREZZATURA E METODOLOGIE IMPIEGATE

Per l'indagine in oggetto si è impiegata un'attrezzatura *AMBROGEO "ECHO 12-24/2002 Sismic Unit"*, avente le seguenti caratteristiche:

- . numero di canali: 24
- . sampler interval: 0,296 msec
- . A/D conversion: 16 bit
- . input impedance: 1KOhm
- . Gain: 10 dB – 100 dB (step 1 dB)
- . saturation tension: +/- 2,3 V
- . saturation level: 100 dB

- . distortion: 0,01%
- . sampler:
 - 25 msec (191 punti)
 - 50 msec (383 punti)
 - 100 msec (1530 punti)
 - 200 msec (3060 punti)
 - 400 msec (6121 punti)
 - 1000 msec
- . sampling: 130 micro/sec
- . filter low pass: 50/950 Hz, step 1 Hz
- . digital filter low pass: 1000-50
- . digital filter high pass: 0-250
- . frequency response: 7-950 Hz, filter at 950 Hz
- . dynamic range: 93 dB
- . noise: 0,66 uV RMS, gain = 55 dB
- . crosstalk: 52 dB, gain = 55 dB
- . power: 12 V.

Il software di acquisizione dati è "ECHO 2002" vers. 7.00.

L'attrezzatura è completata da geofono down hole tridimensionale con bombola di aria compressa per il "packer" di ancoraggio, mazza di battuta da 8 Kg con interruttore starter e/o cannoncino per cartucce industriali con geofono starter per le onde *Sp*, cavo trigger da 200 m montato su rullo e trave di battuta per le onde *Sh*.

Le energizzazioni sono state eseguite a 3.00 m dall'asse del foro con rilievo delle onde sismiche *Sp* ed *Sh*. Il canale 1 del sismografo è stato utilizzato per l'acquisizione delle onde *Vp*, con tempo di acquisizione 200 msec, mentre i canali 2 e 3 sono stati utilizzati per l'acquisizione delle onde *Vs* collegandosi ai due sensori ortogonali del geofono tridimensionale, con tempo di acquisizione 200 msec.

L'acquisizione è iniziata da - 39 m da p.c., fino alla quota di -1 m da p.c.

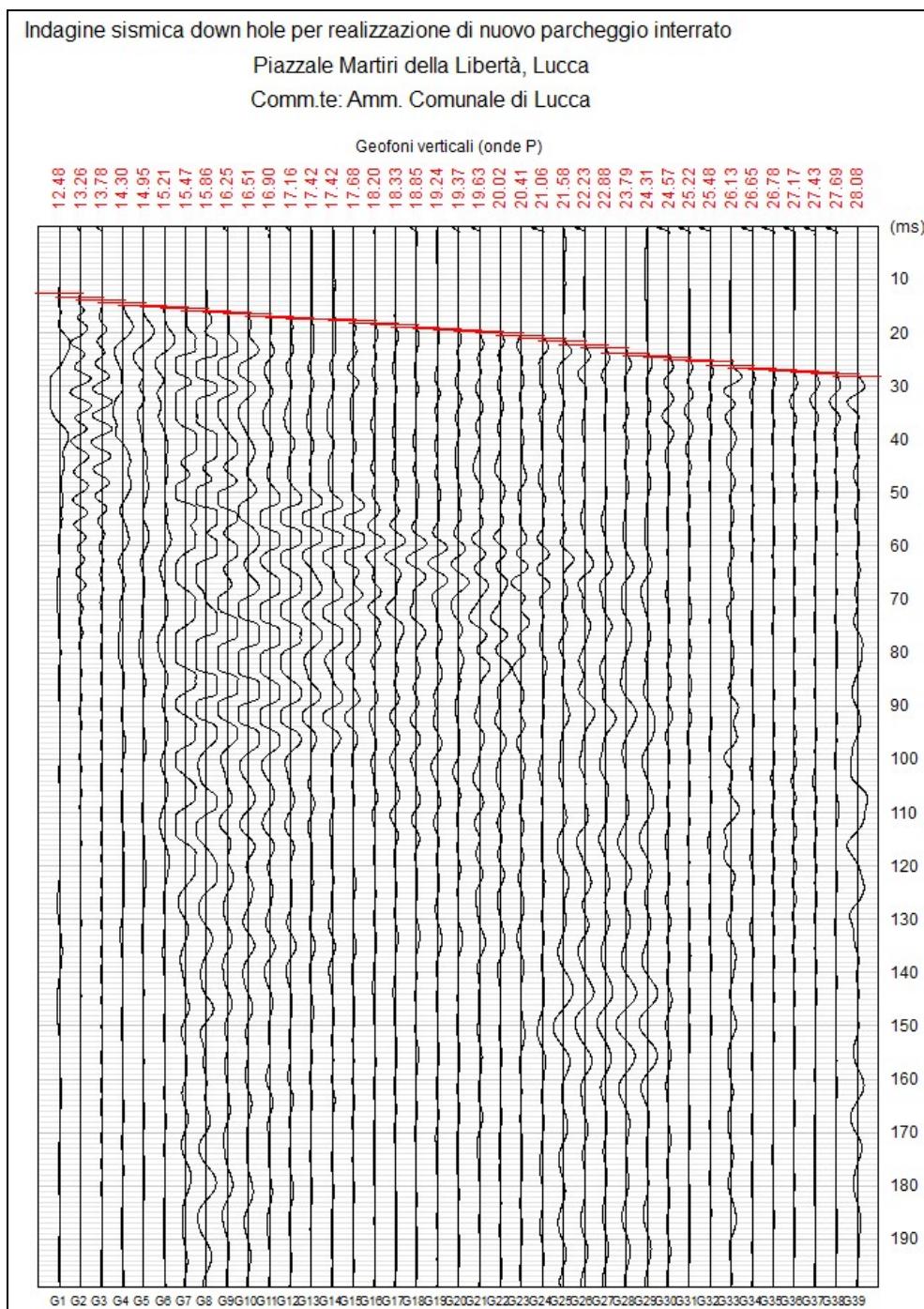
INTERPRETAZIONE DEI DATI

Per l'interpretazione dei dati è stato utilizzato il software *Intersism 2.0* della *geo&soft international*. Tale programma è in grado di operare direttamente con i dati della strumentazione *Ambrogeo* (*.dat *.sgy) per la definizione dei tempi di primo arrivo ed il successivo tracciamento delle *dromocrone* (*travel-time curves*).

Il calcolo è stato eseguito con il metodo dell'intercetta, che nel caso specifico si è dimostrato efficace ed adatto. Nelle pagine che seguono sono quindi riportati i diagrammi relativi alle dromocrone (primi arrivi) relativi alle onde P ed onde S,

la ricostruzione stratigrafica che ne deriva, e l'interpretazione completa dei dati sismici.

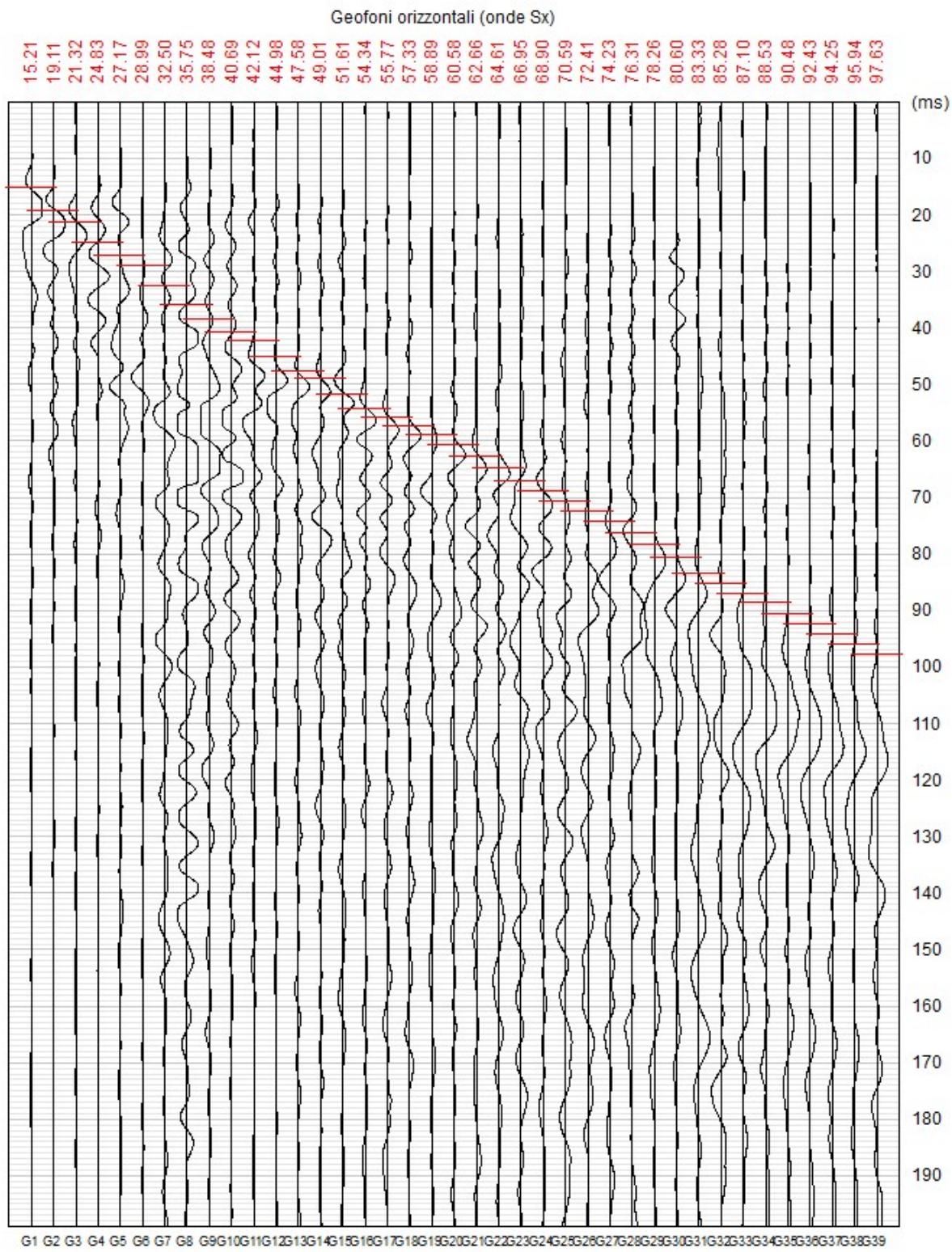
Si ricorda che la stratigrafia sismica può non corrispondere esattamente con quella geologica e geotecnica, dato che essa considera maggiormente le caratteristiche elastiche e di addensamento dei terreni piuttosto che la stratigrafia caratteristica.



Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato

Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

Comm.te: Amm. Comunale di Lucca

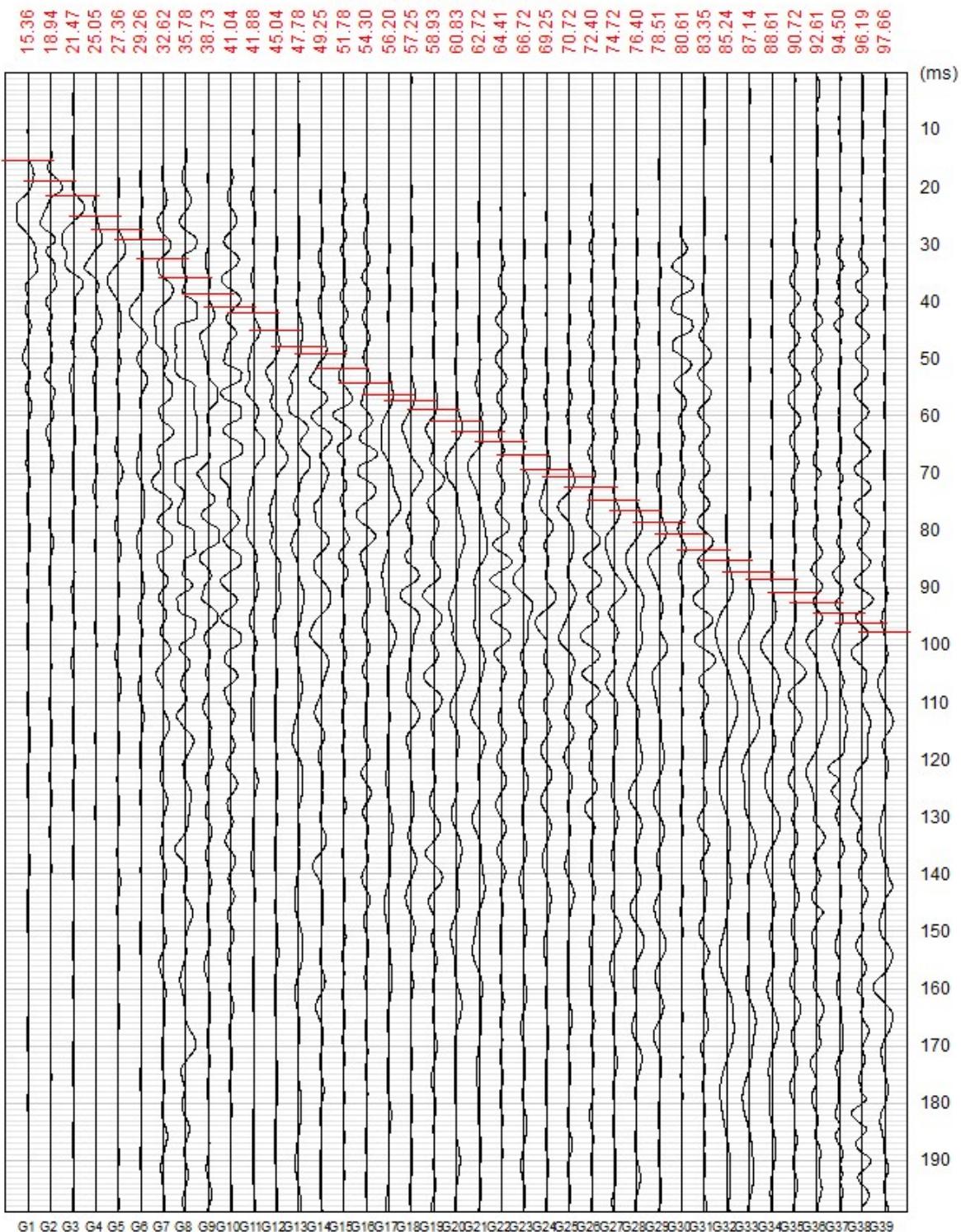


Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato

Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

Comm.te: Amm. Comunale di Lucca

Geofoni orizzontali (onde Sy)

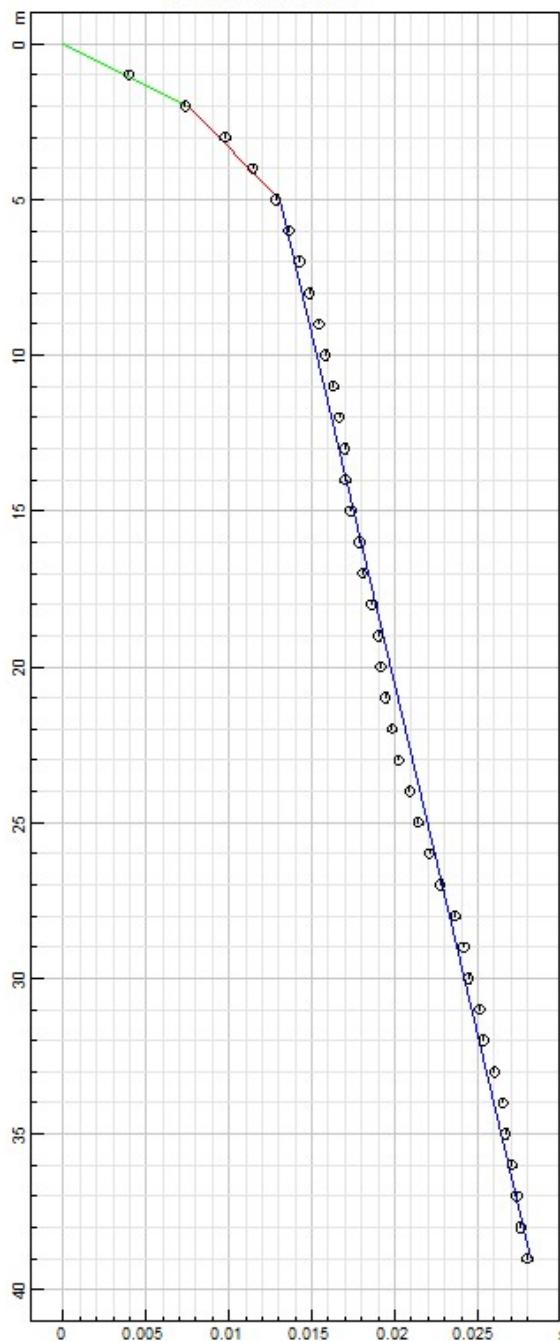


Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato

Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

Comm.te Amm. Comunale di Lucca

Dromocrona onde P

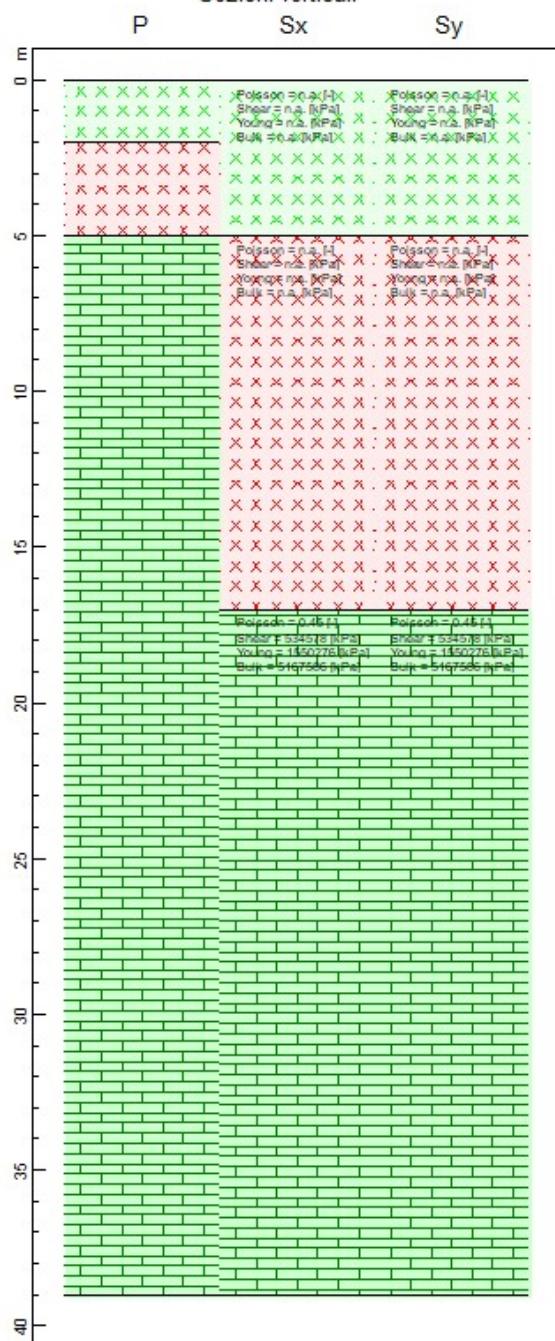


P	265 m/s
Sx	201 m/s
Sy	200 m/s

P	541 m/s
Sx	397 m/s
Sy	397 m/s

P	2254 m/s
Sx	517 m/s
Sy	517 m/s

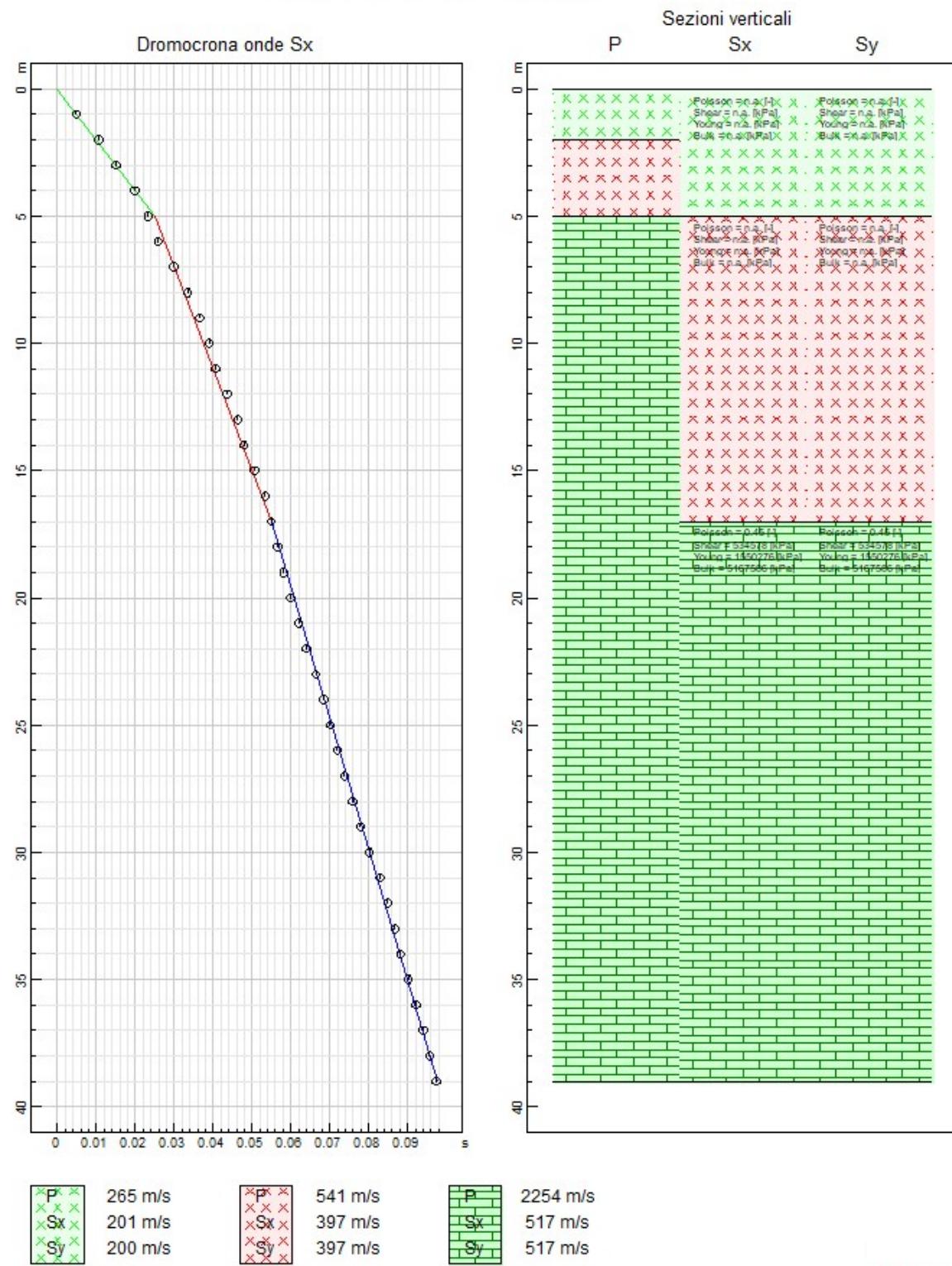
Sezioni verticali



Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato

Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

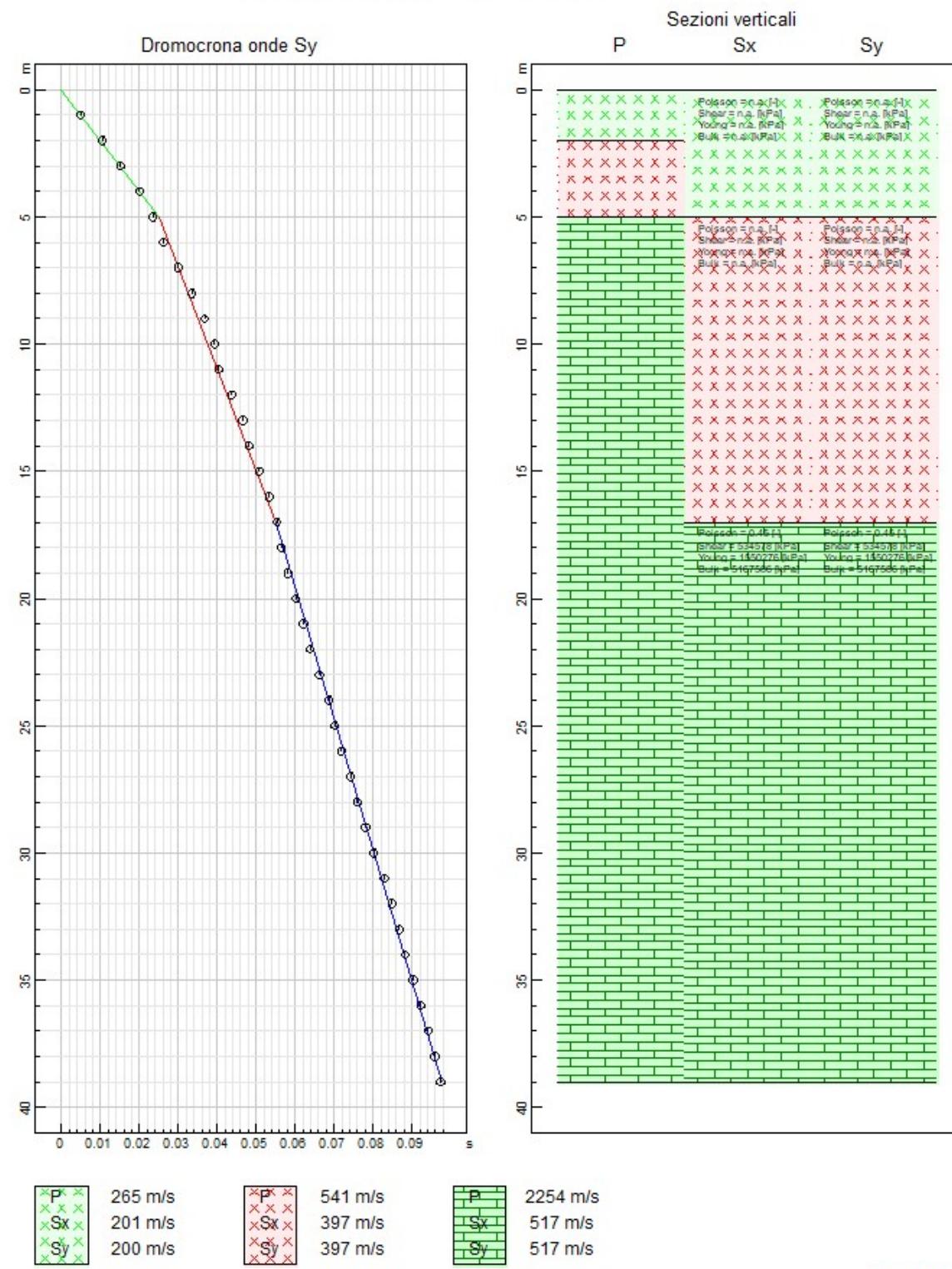
Comm.te: Amm. Comunale di Lucca



Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato

Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

Comm.te: Amm. Comunale di Lucca



ANALISI SISMICA DOWN-HOLE

Indagine sismica down hole per realizzazione di nuovo parcheggio interrato
Piazzale Martiri della Libertà, Lucca

Comm.te: Amm. Comunale di Lucca

DISTANZA DELLO SPARO DA BOCCA FORO

Distanza = 3.00 [m]

PRIMI ARRIVI

N° Geof.	Profondità [m]	Onde P [ms]	Onde S (X) [ms]	Onde S (Y) [ms]	Onde P (corretti) [ms]	Onde S (X) (corretti) [ms]	Onde S (Y) (corretti) [ms]
1	1.00	12.48	15.21	15.36	3.95	4.81	4.86
2	2.00	13.26	19.11	18.94	7.36	10.60	10.51
3	3.00	13.78	21.32	21.47	9.74	15.08	15.18
4	4.00	14.30	24.83	25.05	11.44	19.86	20.04
5	5.00	14.95	27.17	27.36	12.82	23.30	23.46
6	6.00	15.21	28.99	29.26	13.60	25.93	26.17
7	7.00	15.47	32.50	32.62	14.22	29.87	29.99
8	8.00	15.86	35.75	35.78	14.85	33.47	33.50
9	9.00	16.25	38.48	38.73	15.42	36.51	36.74
10	10.00	16.51	40.69	41.04	15.81	38.97	39.31
11	11.00	16.90	42.12	41.88	16.30	40.64	40.41
12	12.00	17.16	44.98	45.04	16.65	43.64	43.70
13	13.00	17.42	47.58	47.78	16.97	46.36	46.55
14	14.00	17.42	49.01	49.25	17.03	47.92	48.16
15	15.00	17.68	51.61	51.78	17.34	50.61	50.77
16	16.00	18.20	54.34	54.30	17.89	53.41	53.37
17	17.00	18.33	55.77	56.20	18.05	54.92	55.34
18	18.00	18.85	57.33	57.25	18.59	56.55	56.47
19	19.00	19.24	58.89	58.93	19.00	58.17	58.21
20	20.00	19.37	60.58	60.83	19.16	59.91	60.15
21	21.00	19.63	62.66	62.72	19.43	62.03	62.09
22	22.00	20.02	64.61	64.41	19.84	64.02	63.82
23	23.00	20.41	66.95	66.72	20.24	66.39	66.16
24	24.00	21.06	68.90	69.25	20.90	68.37	68.71
25	25.00	21.58	70.59	70.72	21.43	70.09	70.22
26	26.00	22.23	72.41	72.40	22.08	71.93	71.93
27	27.00	22.88	74.23	74.72	22.74	73.78	74.26
28	28.00	23.79	76.31	76.40	23.65	75.88	75.97
29	29.00	24.31	78.26	78.51	24.18	77.84	78.09
30	30.00	24.57	80.60	80.61	24.45	80.20	80.21
31	31.00	25.22	83.33	83.35	25.10	82.94	82.96
32	32.00	25.48	85.28	85.24	25.37	84.91	84.87
33	33.00	26.13	87.10	87.14	26.02	86.74	86.78
34	34.00	26.65	88.53	88.61	26.55	88.19	88.27
35	35.00	26.78	90.48	90.72	26.68	90.15	90.38

36	36.00	27.17	92.43	92.61	27.08	92.11	92.29
37	37.00	27.43	94.25	94.50	27.34	93.94	94.19
38	38.00	27.69	95.94	96.19	27.60	95.64	95.89
39	39.00	28.08	97.63	97.66	28.00	97.34	97.37

VELOCITA' ONDE P

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]
1	2	265
2	5	541
3	39	2254

PARAMETRI ONDE SX

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Poisson [-]	Shear [kPa]	Young [kPa]	Bulk [kPa]
1	5	201	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
2	17	397	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3	39	517	0.45	534578	1550276	5167585

PARAMETRI ONDE SY

Strato	Profondità [m]	Velocità [m/s]	Poisson [-]	Shear [kPa]	Young [kPa]	Bulk [kPa]
1	5	200	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
2	17	397	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3	39	517	0.45	534578	1550276	5167585

Dai dati riportati nelle tavole e nei tabulati allegati si fa riferimento a valori delle velocità delle onde Sh pari a circa 200 m/s per uno spessore di circa 5.0 m; al di sotto, e fino ad una profondità di circa 17.0 da p.c. si evidenzia un aumento della velocità delle onde trasversali con valori pari a circa 397 m/s. Dalla profondità di 17.0 m e fino a fine indagine si sono registrati valori della velocità delle onde trasversali crescenti fino a circa 517 m/s.

Per quanto riguarda i valori della velocità delle onde P, queste risultano pari a circa 265 m/s per i primi 2.0 m da p.c.; dalla suddetta profondità e fino alla profondità di 5.0 m da p.c. si osserva un aumento della velocità delle onde longitudinali con valori pari a circa 541 m/s. a Dalla profondità di 5.0 m e fino a fine indagine si è registrato un importante aumento della velocità delle onde P fino a valori di circa 2200 m/s.

Si precisa che l'acquisizione delle onde longitudinali risulta essere piuttosto disturbata dalla presenza di attività antropiche presenti nella zona ed al traffico anche di mezzi pesanti.

Si rimanda alla valutazione del progettista circa la definizione della categoria di suolo di fondazione in funzione della tipologia e delle caratteristiche dell'opera prevista.

Altopascio, settembre 2025.

MAPPO GEOGNOSTICA s.r.l.
Loc. Biagioni, 60 - 55010 SPIANATE (LU)
Tel. 0583.20799 - Fax 0572.930069
C.F.P. 0002015370460
-Reg. Imprese di Lucca 02019570460
Capitale versato € 12.000,00