

SISTEMA TANGENZIALE DI LUCCA

Viabilità Est di Lucca comprendente i collegamenti
tra Ponte a Moriano ed i caselli dell'autostrada A11
del Frizzone e di Lucca Est - 1° Stralcio

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

I PROGETTISTI:

Ing. Vincenzo Marzi
Ordine Ing. di Bari n. 3594

Ing. Giuseppe Danilo Malgeri
Ordine Ing. di Roma n. A34610

Geol. Serena Majetta
Ordine Geologi del Lazio n. 928

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Geom. Fabio Quondam

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

Ing. Achille Devitofranceschi

PROTOCOLLO

DATA

GEOLOGIA

Documentazione indagini geofisiche

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG. N. PROG.	DPT005_D_1601_T00_GEO0_GEO_RE06_A.DOC			
LO601A	D 1601	CODICE ELAB.	T00GEO0GEORE06	A	-
D					
C					
B					
A	EMISSIONE				
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

DOCUMENTAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:

SISTEMA TANGENZIALE DI LUCCA - VIABILITÀ EST DI LUCCA COMPRENDENTE I COLLEGAMENTI TRA PONTE A MORIANO ED I CASELLI DELL'AUTOSTRADA A11 DEL FRIZZONE E DI LUCCA EST - 1° STRALCIO. PROGETTO DEFINITIVO - FASE I.

LOCATION:

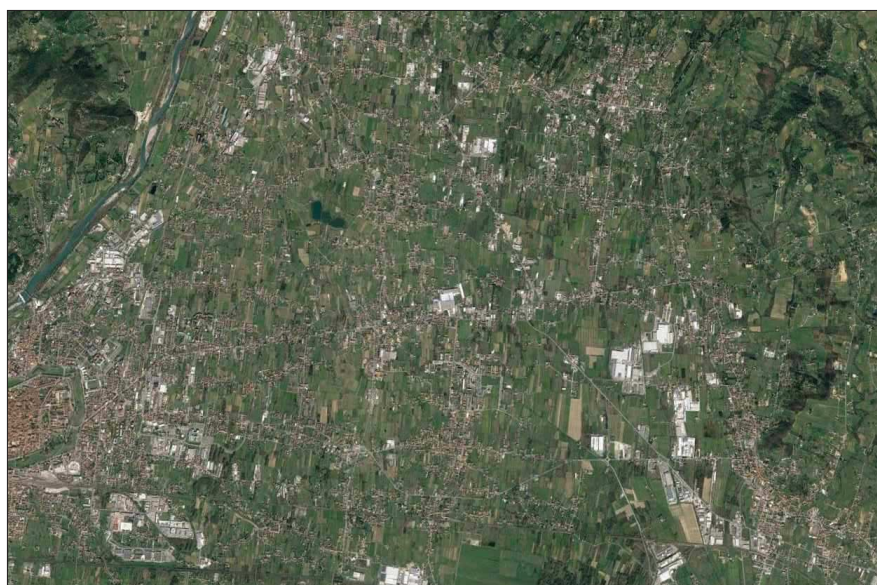
COMUNI DI LUCCA, CAPANNORI (LU) E PORCARI (LU)

CLIENT:

ANAS S.p.A.

OBJECT:

INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 134/18

Revision n.: 00

Date: agosto 2018

Description: emissione

Redacted by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci

Reviewed by: Dr.ssa Geol. Maria Giovanna Camuti

Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato

Document code: 134-18_geofisica

INDICE

1	PREMESSA	2
2	INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	3
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA	3
2.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	4
2.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	6
2.4	DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI	11
2.5	RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	12
2.5.1	BS1a	13
2.5.2	BS1b	16
2.5.3	BS2a	19
2.5.4	BS2b	22
2.5.5	BS4	25
2.5.6	BS5a	28
2.5.7	BS5b	31
2.5.8	BS6a	34
2.5.9	BS6b	37
2.5.10	BS6c	40
2.5.11	BS7a	43
2.5.12	BS7b	47
3	INDAGINI DOWN-HOLE	51
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	51
3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	54
3.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	55
3.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE	63
3.4.1	S2-DH	64
3.4.2	S15-DH	70
3.4.3	S20-DH	76
3.5	DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO $V_{S,EQ}$	82

1 PREMESSA

La presente relazione geofisica fa parte della documentazione inerente l'affidamento dei servizi di indagine geognostica e geofisica propedeutici alla realizzazione del Sistema Tangenziale della città di Lucca.

Nell'ambito dei lavori summenzionati, sono state eseguite le seguenti prove:

- n.14 prospezioni sismiche a rifrazione tomografiche.
- n.3 indagini sismiche in foro down-hole.

Le prove sismiche in foro con metodologia down-hole sono state finalizzate al calcolo della velocità equivalente delle onde di taglio ($V_{s,eq}$).

Il comune in cui ricade l'opera è Lucca.

Le indagini in oggetto sono state effettuate nei mesi di luglio ed agosto 2018.

2 INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

2.1 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA

Il metodo sismico a rifrazione è un metodo non invasivo che si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche (P o S) generate in superficie da una sorgente sismica e captate da ricevitori, anch'essi in superficie, disposti su un allineamento a diverse distanze dalla sorgente. Le onde elastiche sono, quindi, rilevate da un array di geofoni, infissi al suolo, con spaziatura regolare.

I tempi di primo arrivo, correlati alle diverse distanze sorgente-ricevitore, permettono la stima (calcolo) delle geometrie del sottosuolo (disposizione morfologica delle interfacce) e delle velocità di propagazione delle onde sismiche.

La generazione delle onde elastiche avviene presso una base sismica (Fig. 2.1.1), operando con energizzazioni ripetute in modo da ottenere un segnale caratterizzato da un rapporto segnale-rumore soddisfacente. Tale geometria è necessaria per l'utilizzo successivo dell'algoritmo tomografico.

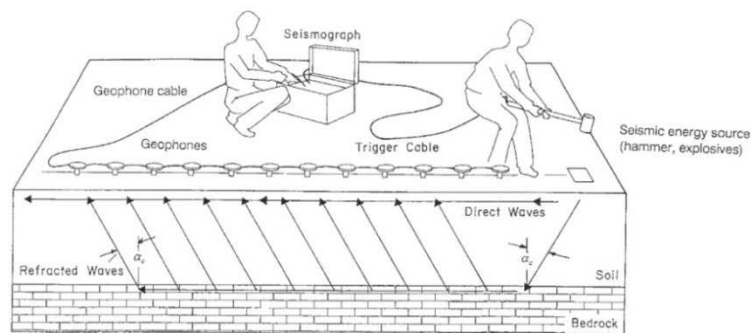


Fig. 2.1.1 - Schema esecutivo della sismica a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 - 00).

Come riportato nella figura seguente, l'indagine eseguita con la metodologia della tomografia sismica a rifrazione necessita di un numero non inferiore a sette tiri di cui n.4 esterni alla base e n.3 interni alla base stessa (Fig. 2.1.2).

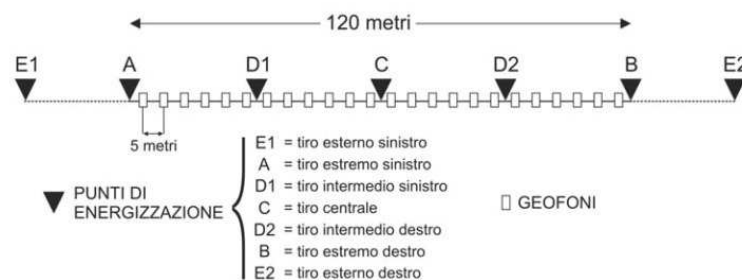


Fig. 2.1.2 - Tomografia sismica. Disposizione siti di energizzazione.

I sistemi energizzanti (sia per la generazione delle onde P sia delle onde SH) devono essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.

Per la generazione in onde P, la sorgente è generalmente costituita da un cannoncino industriale (tipo "minibang") ed eventualmente la mazza sismica.

Il sistema sorgente per le onde SH è generalmente costituito da un parallelepipedo di forma tale da poter essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa pesante. In fase d'installazione, il parallelepipedo è gravato di un carico statico aggiuntivo in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.

2.2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Di seguito sono riportate le specifiche della strumentazione utilizzata per l'esecuzione delle indagini sismica a rifrazione:

Geofoni, a componente verticale, con frequenza pari a 14 Hz, ed a componente orizzontale, con frequenza pari a 10 Hz, della **OYO GEOSPACE**.

Trigger, costituito da un dispositivo, collegato al sistema di acquisizione, che permette di avviare la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il sistema di "innescò" è stato realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente e attivato dall'impatto, nell'istante in cui la massa battente colpisce la sorgente.

Sistema di energizzazione, costituito, per la generazione delle onde P da una sorgente impattiva costituita da un martello da 10 kg e un piattello metallico posto al suolo nonché da un energizzatore *minibang* equipaggiato con cartucce industriali calibro 8.

Per le onde SH, è stato adoperato un parallelepipedo in polietilene ad alta densità contrastato mediante appropriata zavorra ed utilizzata la massa battente descritta in precedenza.

I segnali sismici, sono stati acquisiti mediante un sismografo **MAE X610S** a 24 bits, di cui sono riportate le caratteristiche principali:

- Convertitori: risoluzione 24 bit, tecnologia sigma-delta
- Range dinamico: 144 dB (teorico)
- Distorsione massima: +/-0.0010%
- Banda passante: 2Hz-30KHz
- Common mode rejection: 110 dB a 60 Hz
- Diafonia: -120dB a 20 Hz
- Soglia di rumore dell'amplificatore programmabile: 27nV
- Precisione del trigger: 1/30 del tempo di campionatura
- Guadagno di preamplificazione: 24 e 36 dB
- Delay: da 0 a 100 sec ad intervalli di 1 campione a passo
- Tipo di guadagno: Automatico (AGC)
- Range massimo segnale in ingresso: +/-5V
- Impedenza di ingresso a 1000 campioni /secondo 20Mohm
- Livelli di amplificazione: 0 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB, 24 dB, 30 dB, 36 dB impostabili singolarmente per ogni canale o per gruppi di canali liberamente organizzabili
- Filtro anti-alias: -3dB,80% della frequenza di Nyquist,-80dB
- Intervalli di campionamento: 1/30, 1/15, 1/7.5, 1/3.75, 0.5, 1.0, 2.0, 10.0, 20.0 ms
- Numero di campioni per evento: impostabile da 1024 a 21800 con incrementi di 512
- Interfacce disponibili: LAN, USB, VGA
- Canali: configurazioni da 24, 48 o 72. Possibilità di utilizzare da 1 al numero massimo di canali installati per ogni acquisizione
- Auto-calibrazione interna dei convertitori prima di ogni acquisizione
- Filtri digitali: selezionati automaticamente in base alla frequenza di campionatura
- Test geofoni: verifica automatica per individuare interruzioni dei cavi oppure geofoni rotti o in corto.

2.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.14** prospezioni sismiche a rifrazione tomografiche la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riportano i dettagli di ciascuna prospezione sismica a rifrazione:

Codice indagine	Lungh. (m)	Sistema di riferimento GAUSS - BOAGA			
		Coord. iniziale EST	Coord. iniziale NORD	Coord. finale EST	Coord. finale NORD
BS1a	115	1623265,52	4860031,15	1623238,97	4859919,27
BS1b	115	1623327,44	4860020,05	1623324,59	4859904,99
BS2a	115	1623615,62	4859486,08	1623581,91	4859376,04
BS2b	115	1623709,92	4859298,94	1623794,83	4859221,32
BS4	115	1624749,38	4857748,34	1624811,13	4857680,15
BS5a	115	1625371,93	4856032,15	1625380,29	4856146,83
BS5b	115	1625318,33	4856200,71	1625255,63	4856297,10
BS6a	115	1628652,89	4854753,07	1628601,91	4854856,15
BS6b	115	1628767,10	4854384,15	1628716,12	4854487,23
BS6c	115	1628806,75	4854241,41	1628782,83	4854353,90
BS7a-1	115	1624877,09	4855257,56	1624762,96	4855242,26
BS7a-2	115	1624756,71	4855242,98	1624642,20	4855232,29
BS7b-1	115	1625023,43	4855195,98	1624908,18	4855196,71
BS7b-2	115	1625109,71	4855221,20	1624993,36	4855196,06

Tab. 2.3.1 – Tangenziale di Lucca. Indagini sismiche a rifrazione tomografiche.

Le modalità esecutive per effettuare l'elaborazione tomografica, differiscono dalla sismica convenzionale per il maggior numero di registrazioni che sono realizzare al fine di coprire in maniera omogenea l'intera sezione sismica in tutti i settori e fino alle profondità adeguate senza lasciare tratti scoperti o disomogenei.

Posizionati i geofoni sul terreno, essi sono collegati con appositi morsetti al cavo multipolare che viene connesso al sismografo. Ultimata l'installazione sono effettuati alcuni tiri di prova per tarare i parametri di acquisizione del sismografo stesso.

Effettuate le operazioni di verifica e taratura della strumentazione, si procede all'acquisizione dei segnali su ciascun punto prestabilito ed alla memorizzazione dei dati sia sulla memoria del sismografo sia sul pen drive.



Fig. 2.3.1 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS1a. Profilo.



Fig. 2.3.2 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS1b. Profilo.



Fig. 2.3.3 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS2a. Profilo.



Fig. 2.3.4 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS2b. Profilo.



Fig. 2.3.5 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS4. Profilo.



Fig. 2.3.6 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS5a. Profilo.



Fig. 2.3.7 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS5b. Profilo.



Fig. 2.3.8 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS6a. Profilo.



Fig. 2.3.9 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS6b. Profilo.



Fig. 2.3.10 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS6c. Profilo.



Fig. 2.3.11 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS7a. Profilo.



Fig. 2.3.12 - Tangenziale di Lucca. Indagine sismica a rifrazione tomografica BS7b. Profilo.

2.4 DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI

I dati acquisiti in campo sono stati sottoposti ad una fase di pre-processing avvalendosi del software **IXSeg2Segy** della **INTERPEX**. Tale fase è consistita nell'applicazione del DC removal, di filtraggio passa-banda e nell'ottimizzazione del guadagno.

Ultimata questa fase, si è proceduto con la determinazione dei primi tempi d'arrivo (*first break peak - F.B.P.*) sia delle onde P sia delle onde SH. Per ciascun file dati acquisito in campo, è stato creato un file txt contenente i tempi d'arrivo espressi in millisecondi (ms). Tutti i file relativi ai tempi d'arrivo sono confluiti in un foglio di calcolo al fine di poter restituire le cosiddette *dromocrone* ovvero la rappresentazione dei diagrammi *tempi-distanze* della sezione sismica.

Al fine di eseguire l'elaborazione, in termini di velocità di propagazione delle onde elastiche, sono stati ricavati tre file ascii relativi, rispettivamente, al numero e disposizione delle sorgenti (file *source*), al numero e disposizione dei geofoni (file *receiver*) ed ai tempi d'arrivo (file *observations*). Tali file costituiscono l'input per il software tomografico utilizzato **SeisOpt@2D** della **Optim™ software & data solutions**.

Il metodo tomografico utilizzato, si basa su un metodo di ottimizzazione non-lineare, noto come metodo di ottimizzazione numerica simulata (*simulated annealing*), utilizzato per ricavare un modello di velocità delle onde sismiche, ad elevata risoluzione, dalla misurazione dei tempi di arrivo delle onde P ed SH.

Il metodo citato è un processo basato sul metodo di Monte-Carlo che può combinare i tempi di arrivo delle onde in un modello di velocità. Tale modello può essere considerato superiore ai più sofisticati metodi d'inversione non-lineare. L'algoritmo compie un'elaborazione impostando un modello con una variazione casuale del parametro d'interesse, sino a che il modello sismico sintetico dei tempi di arrivo delle onde sismiche calcolate non collima con i tempi di arrivo osservati.

Processi iterativi fanno in modo di far convergere la soluzione riducendo, ad ogni iterazione, lo scarto eliminando quelle soluzioni i cui errori oltrepassano l'errore totale ammesso dall'algoritmo di calcolo.

In definitiva, il processo di ottimizzazione adottato troverà la soluzione testando diverse migliaia di soluzioni possibili prima di arrivare alla soluzione ottimale proposta che è quella, come detto in precedenza, in cui i tempi di arrivo calcolati coincidono, a meno di uno scarto ridotto, con quelli osservati.

In pratica, i software adottati, che si basano sul principio del *simulated annealing*, pervengono ad un modello ottimizzato delle velocità utilizzando, in input, i soli tempi di primo arrivo delle onde sismiche e la geometria dell'array (distanze e variazioni di quota) non richiedendo informazioni preliminari sulla geometria della struttura sotterranea. L'algoritmo, come già accennato in precedenza, esegue ripetute modellizzazioni dirette laddove un nuovo modello proposto è accettato o rigettato in base ad un criterio di probabilità tenendo in considerazione l'andamento globale dei tempi di arrivo.

2.5 RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

Al termine del processo di elaborazione descritto nel paragrafo precedente, effettuato mediante software di elaborazione tomografica, sono state ottenute le relative pseudosezioni sismiche in onde P ed SH. Queste sono riportate esprimendo i dati di velocità delle onde di compressione e di taglio, mediante isolinee e campitura a falsi colori.

I profili sismici **BS7a** e **BS7b**, sono scaturiti dall'elaborazione di singole basi (rispettivamente BS7a-1, BS7a-2, BS7b-1, BS7b-2), realizzate in roll-along, ed elaborate assieme in modo da fornire pseudosezioni senza soluzione di continuità.

Di seguito, per ciascuna indagine, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

- dromocrone ottenute dalla lettura dei primi tempi d'arrivo delle onde P ed SH;
- pseudosezioni sismiche;
- analisi dei dati in velocità di propagazione delle onde elastiche per l'individuazione dei principali sismostrati presenti.

2.5.1 BS1a

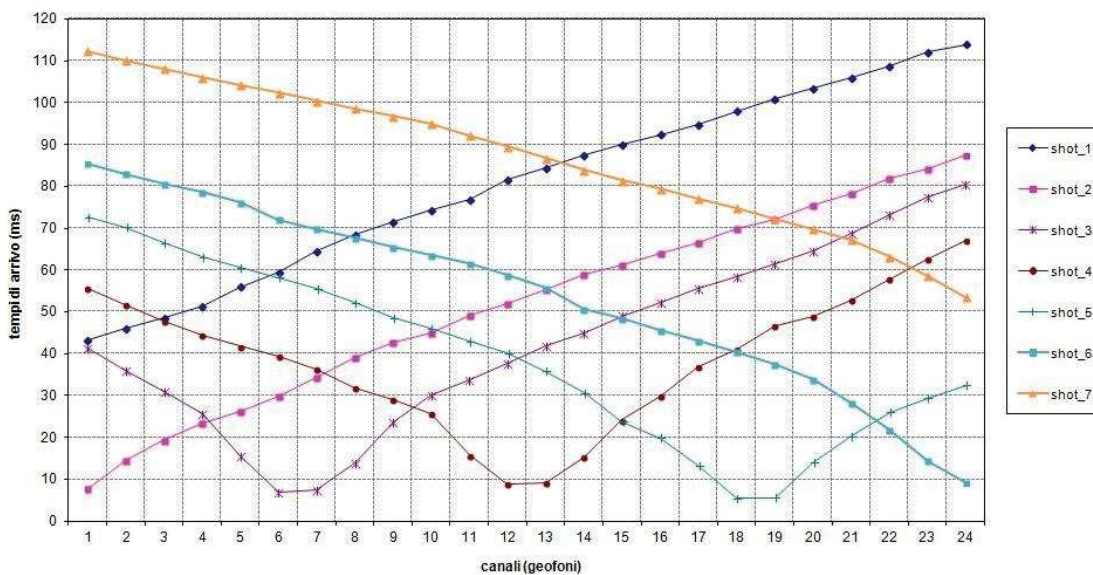


Fig. 2.5.1 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS1a. Dromocrone.

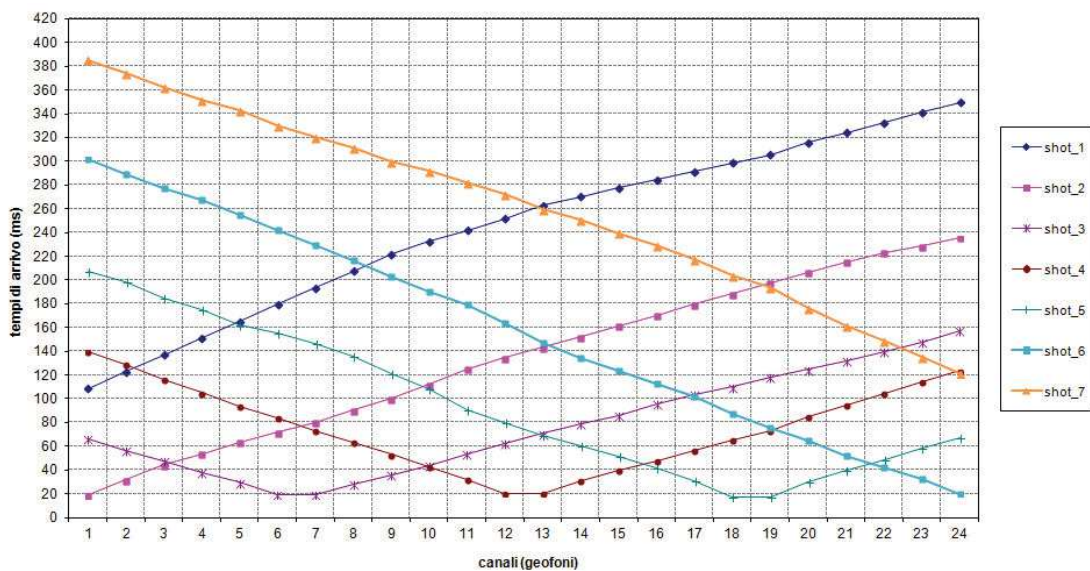


Fig. 2.5.2 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS1a. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS1a** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 5 m e 10 m circa dal p.c. Esso è costituito da alluvioni con ciottoli e ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio "S" compresa tra 260 e 360 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 14 e 15 m circa dal p.c. Esso è costituito da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 360 e 450 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiore a 450 m/s, segna il passaggio al terzo ed ultimo sismostrato individuato, costituito da terreni più consistenti rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di velocità delle onde S crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono i 700 m/s.

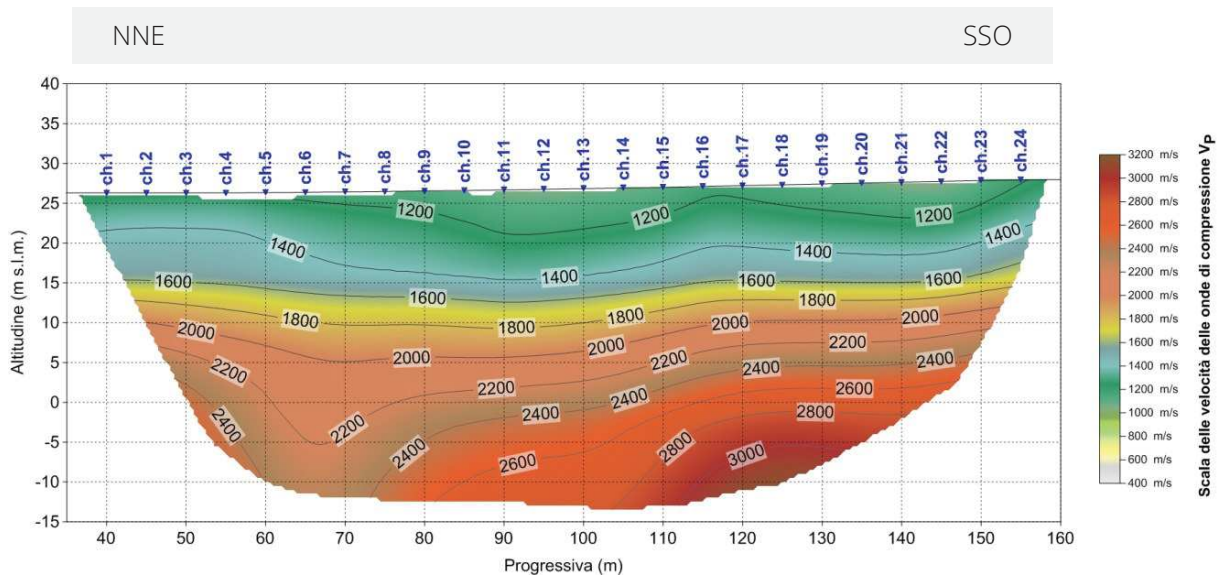


Fig. 2.5.3 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS1a.

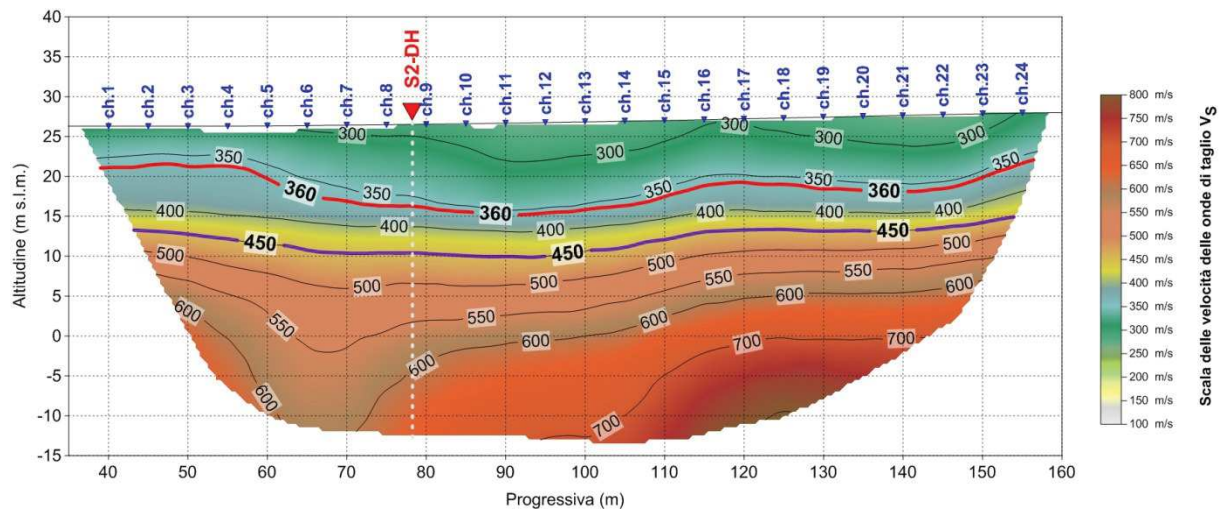


Fig. 2.5.4 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS1a.

2.5.2 BS1b

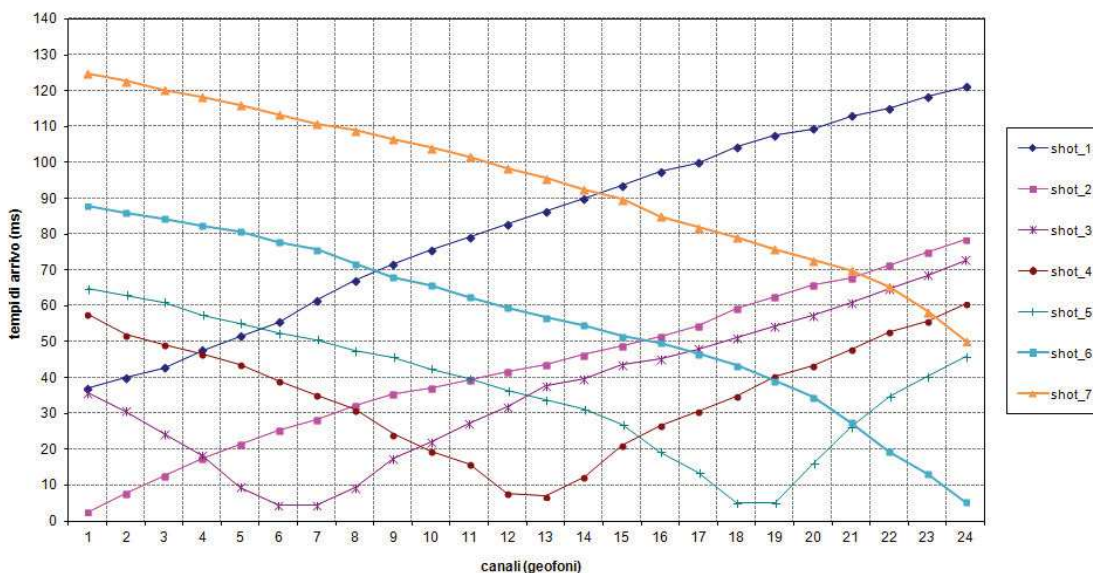


Fig. 2.5.5 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS1b. Dromocrone.

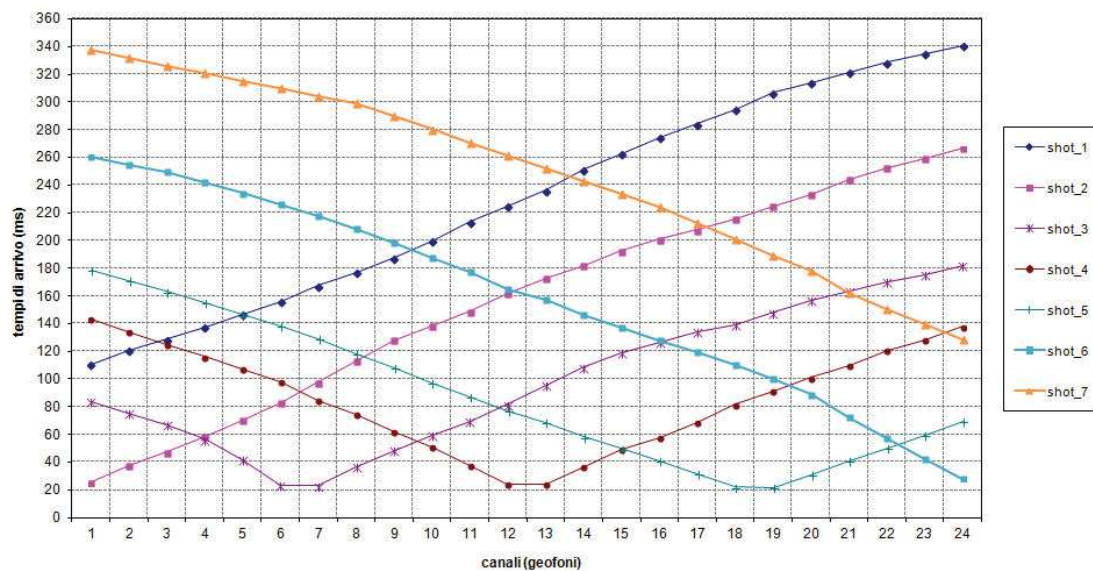


Fig. 2.5.6 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS1b. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS1b** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 4 m e 10 m circa dal p.c. Esso è costituito da alluvioni con ciottoli e ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde di taglio "S", compresa tra 190 e 360 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 12 m e 32 m dal p.c. Esso è costituito da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. L'approfondimento del sismostrato, risultante dal processo di inversione tomografica, evidenziata nella parte mediana dalla pseudosezione, potrebbe essere dovuto alla presenza di un paleo alveo. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 360 e 420 m/s.

Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la base della pseudosezione sismica. Esso è costituito da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da velocità delle onde S superiori a 420 m/s, con valori di V_s crescenti con la profondità.

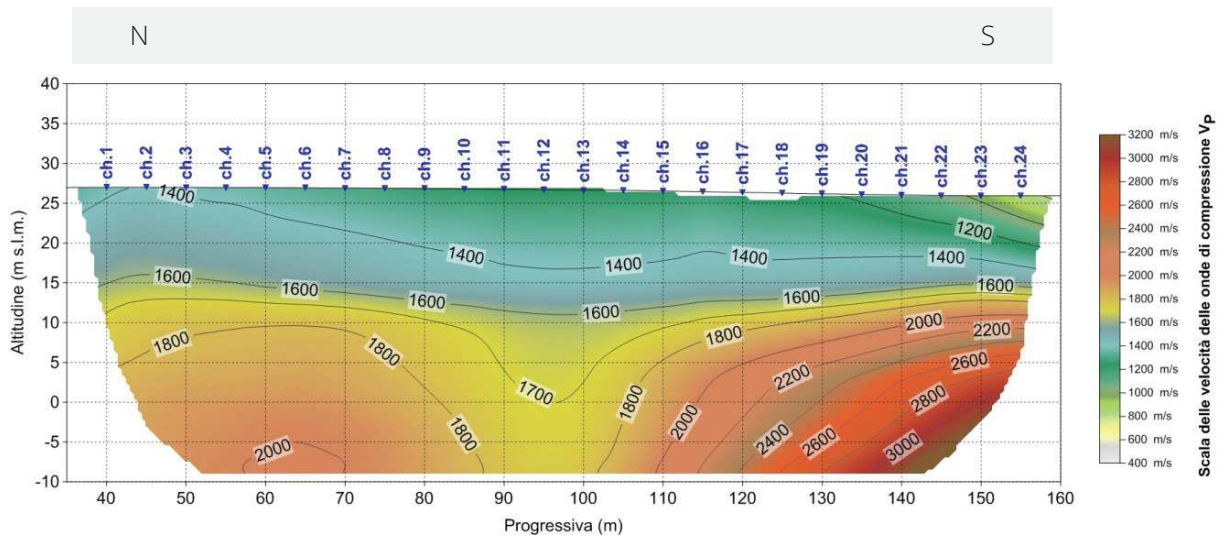


Fig. 2.5.7 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS1b.

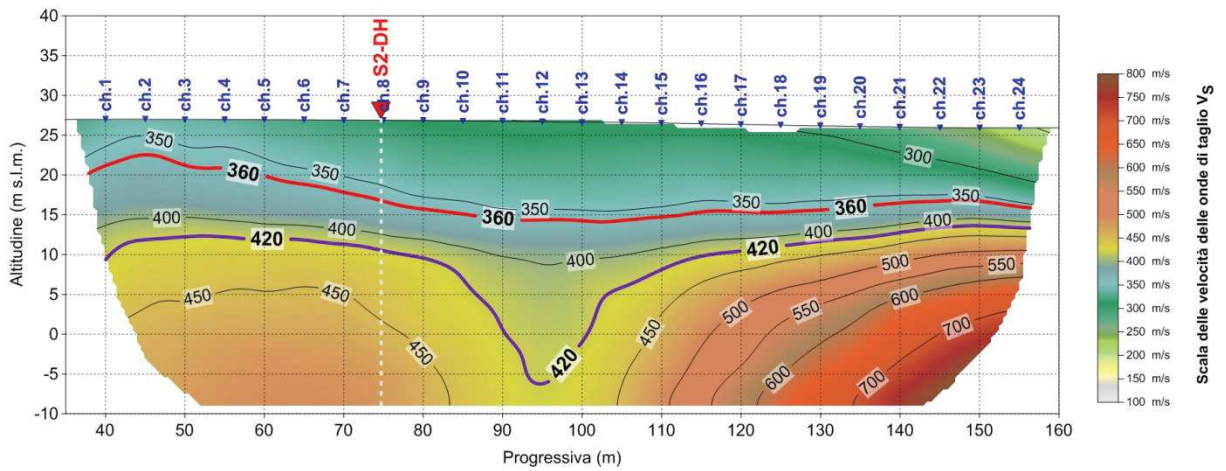


Fig. 2.5.8 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS1b.

2.5.3 BS2a

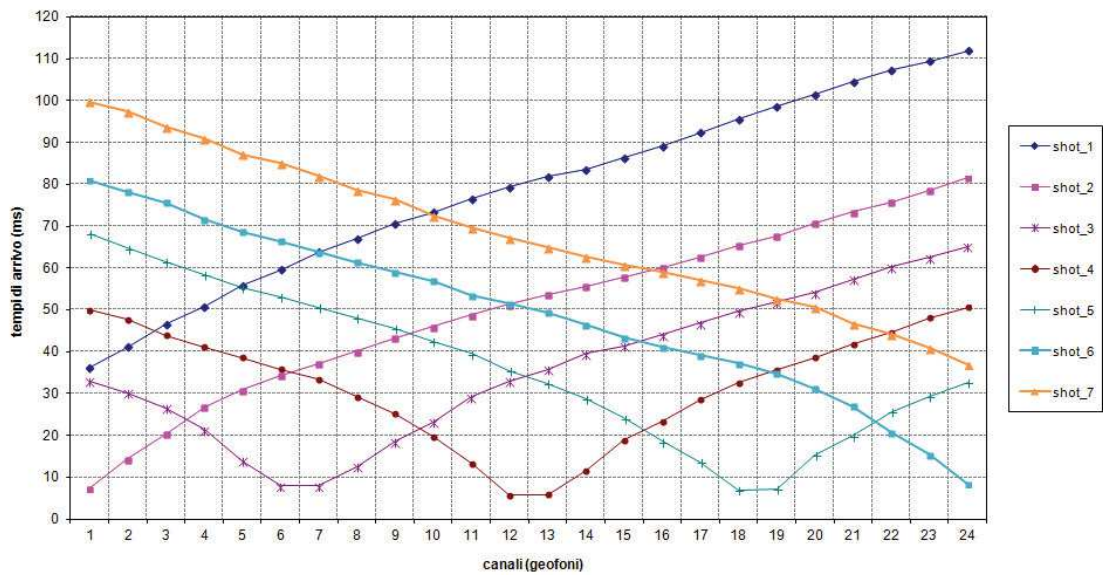


Fig. 2.5.9 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS2a. Dromocrone.

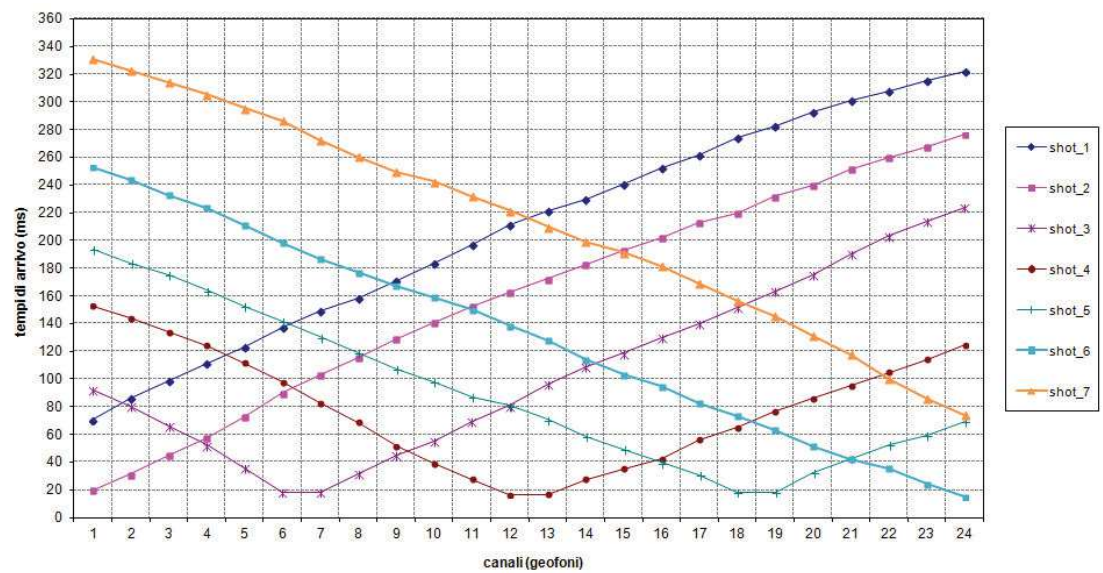


Fig. 2.5.10 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS2a. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS2a** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 6 m e 8 m circa dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S superiore ai 300 m/s e fino a 380 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità media di circa 13 m dal p.c. Esso è costituito dalle citate alluvioni ciottolose e ghiaiose, in matrice sabbiosa medio grossolana limosa, che passano gradualmente ad un deposito di origine fluvio-lacustre, costituito da ghiaie in matrice sabbiosa medio grossolana. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 380 e 480 m/s.

La seconda interfaccia, segna il passaggio a terreni più consistenti rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di V_s superiori ai 480 m/s e crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, oltrepassano gli 800 m/s.

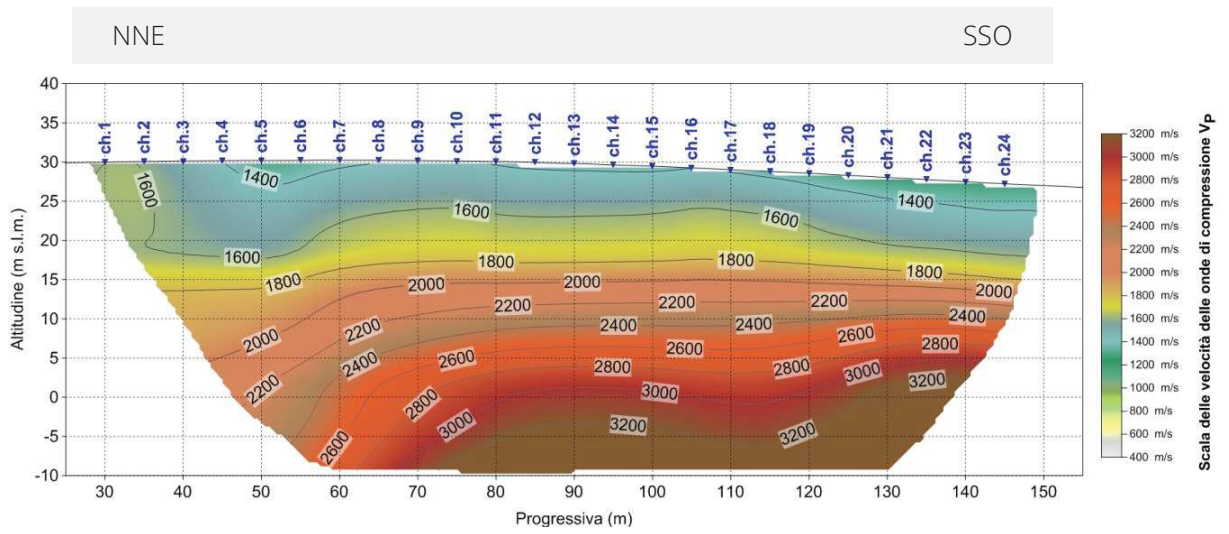


Fig. 2.5.11 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS2a.

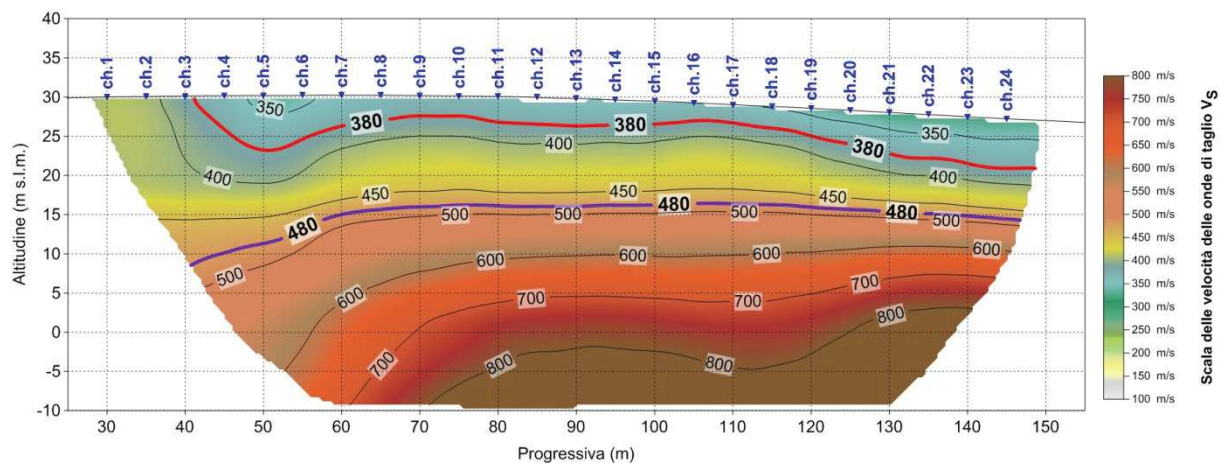


Fig. 2.5.12 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS2a.

2.5.4 BS2b

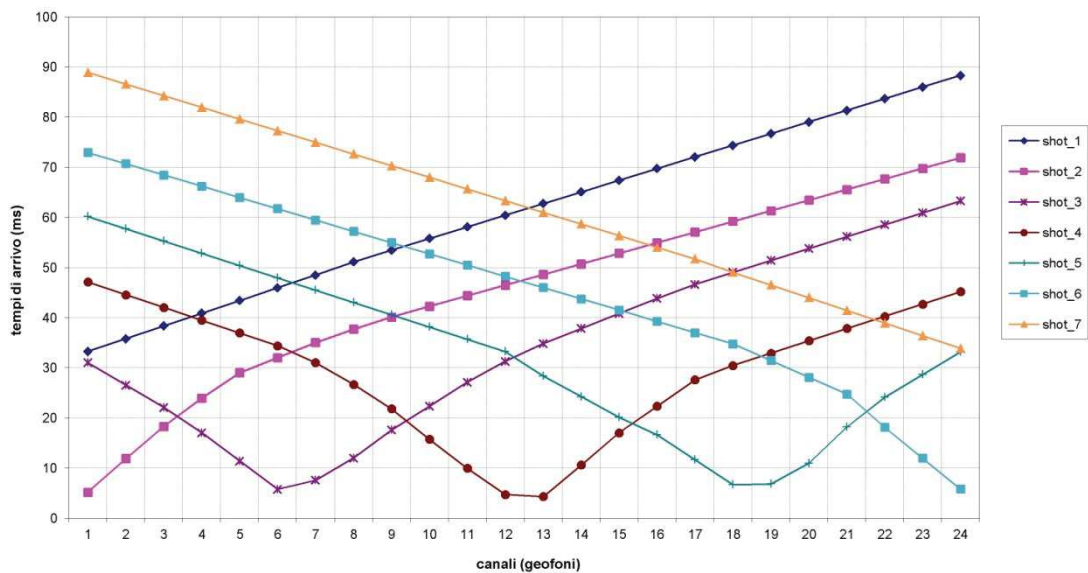


Fig. 2.5.13 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS2b. Dromocrone.

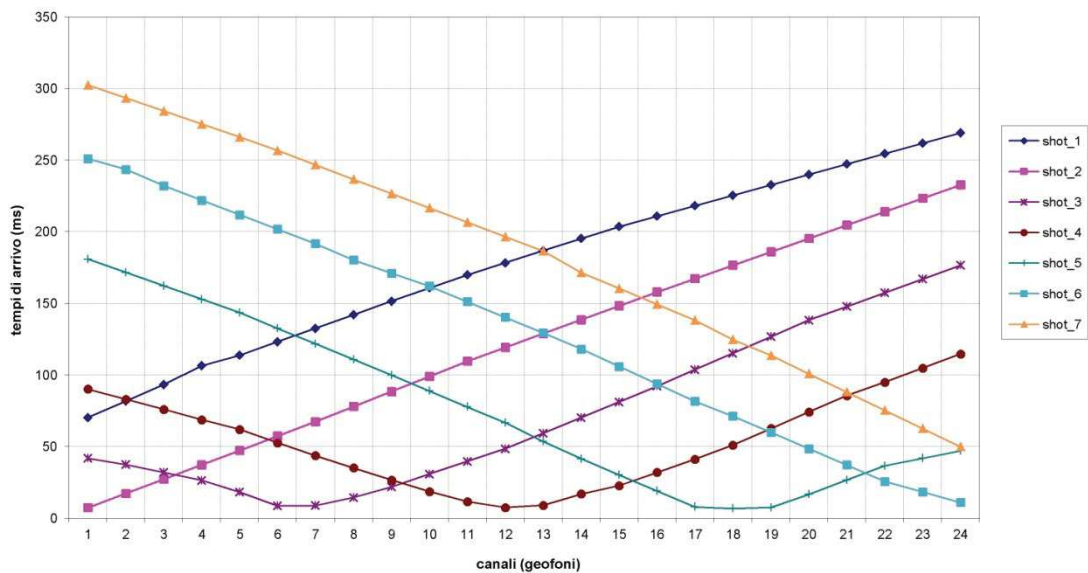


Fig. 2.5.14 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS2b. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS2b** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 6 e 14 m dal p.c. Esso è costituito da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa che passano ad una ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 220 e 350 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 15 e 22 m circa dal p.c. Esso è costituito da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 350 e 500 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiori a 500 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono 600 m/s.

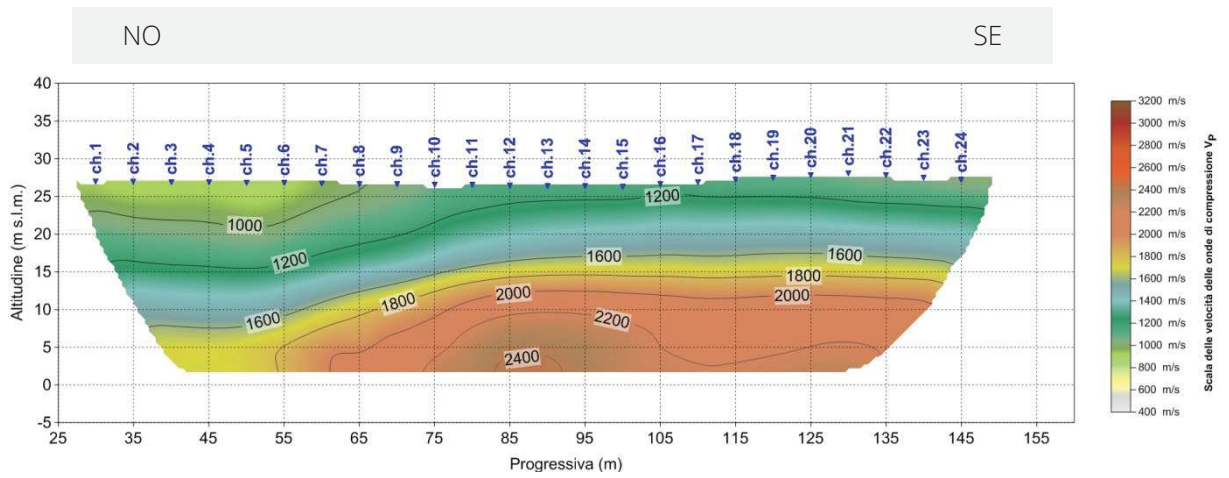


Fig. 2.5.15 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS2b.

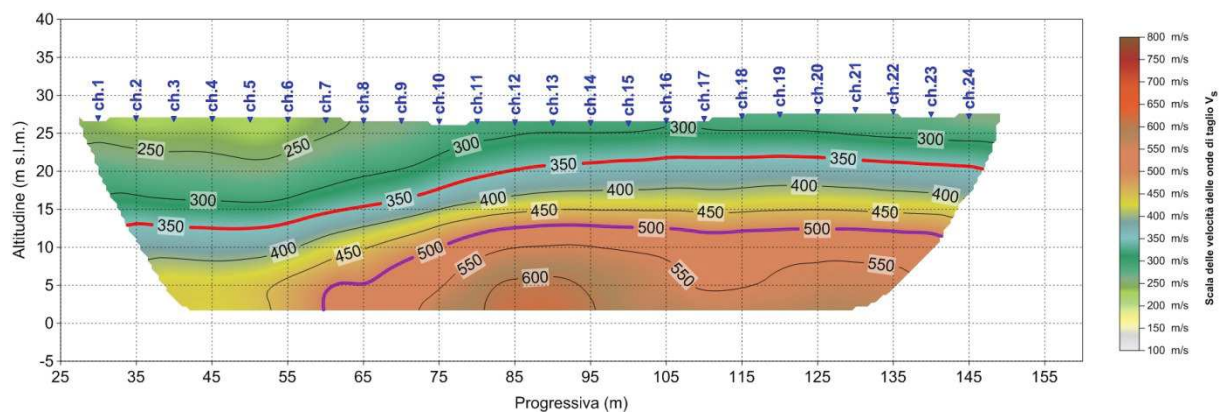


Fig. 2.5.16 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS2b.

2.5.5 BS4

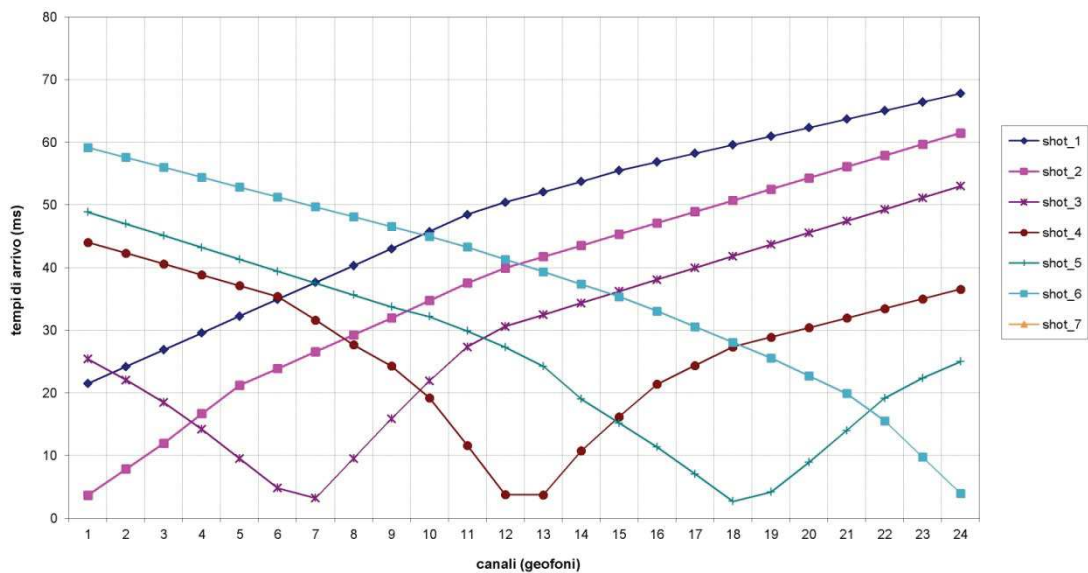


Fig. 2.5.17 - Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS4. Dromocrone.

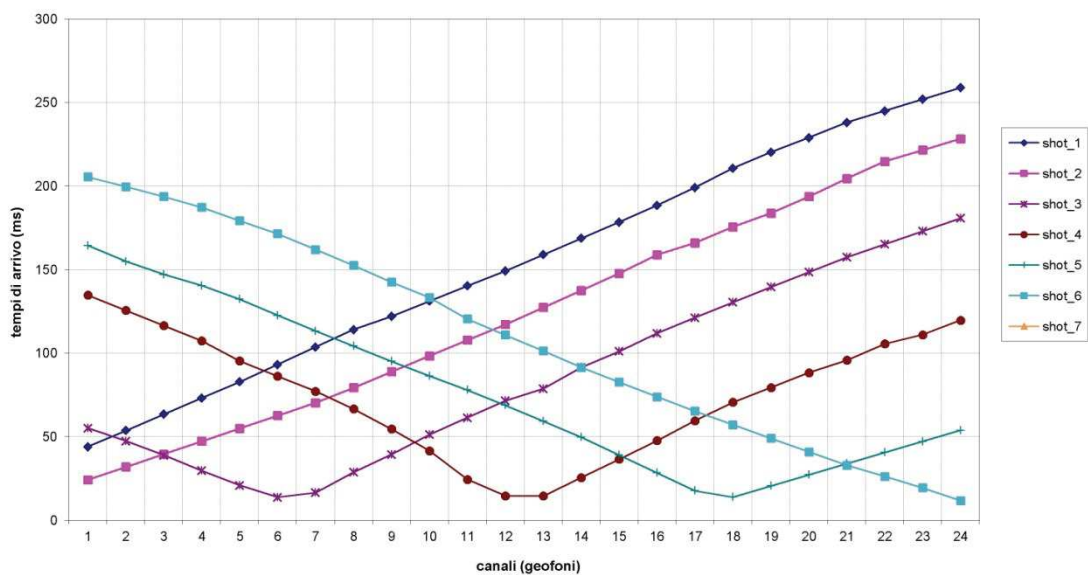


Fig. 2.5.18 - Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS4. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS4** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 3 e 11 m circa dal p.c. Esso è costituito da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa e ghiaie in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 290 e 400 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra un minimo di 9 m e un massimo di 19 m dal p.c. Esso è costituito dalle citate ghiaie in matrice sabbiosa medio grossolana limosa, che passano ad argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 400 e 500 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiore a 500 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono i 600 m/s.

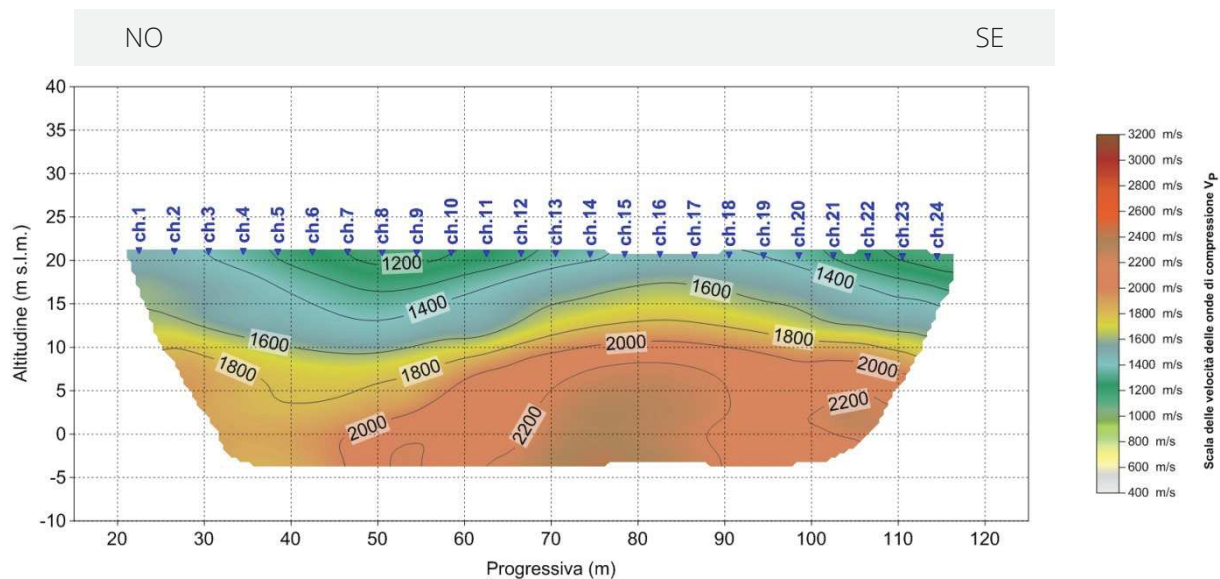


Fig. 2.5.19 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS4.

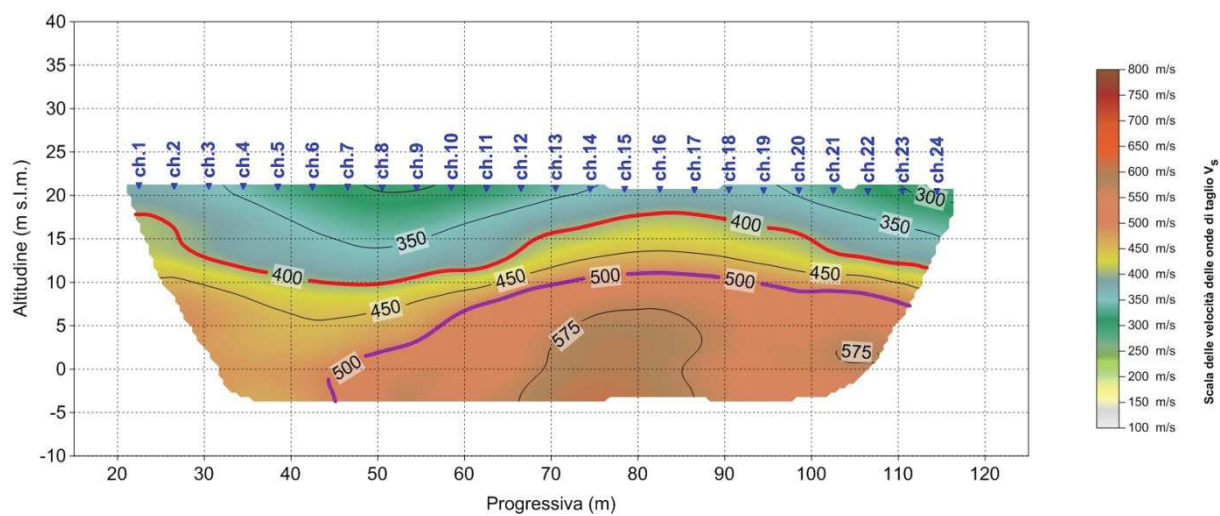


Fig. 2.5.20 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS4.

2.5.6 BS5a

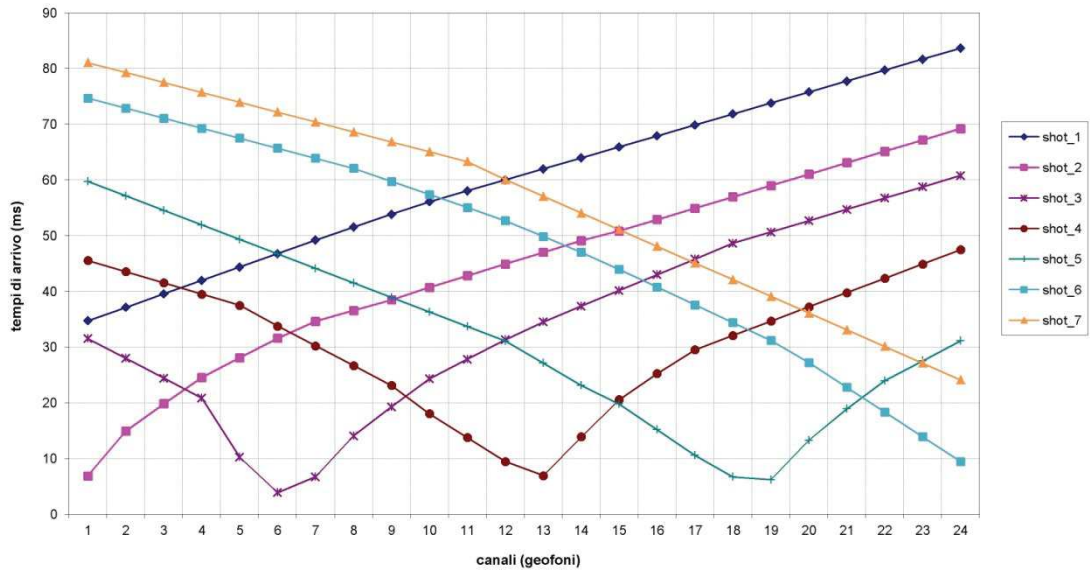


Fig. 2.5.21 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS5a. Dromocrone.

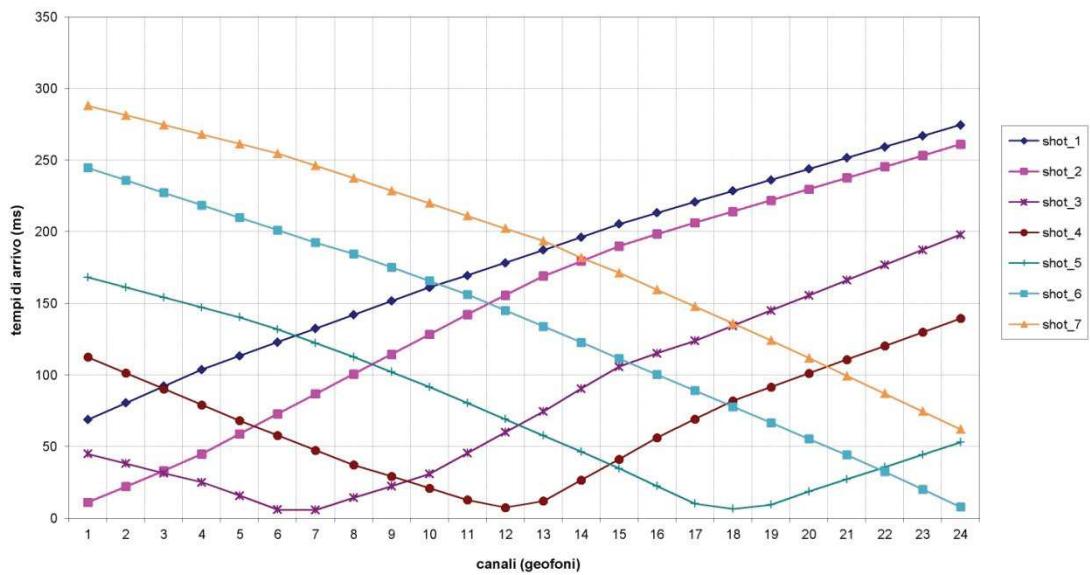


Fig. 2.5.22 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS5a. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS5a** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità massima variabile pari a 11 m circa dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 190 e 350 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 7 e 19 m circa dal p.c. Esso è costituito dalle citate alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana, che passano gradualmente ad un deposito di origine fluvio-lacustre costituito da ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 350 e 500 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiori a 500 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono i 590 m/s.

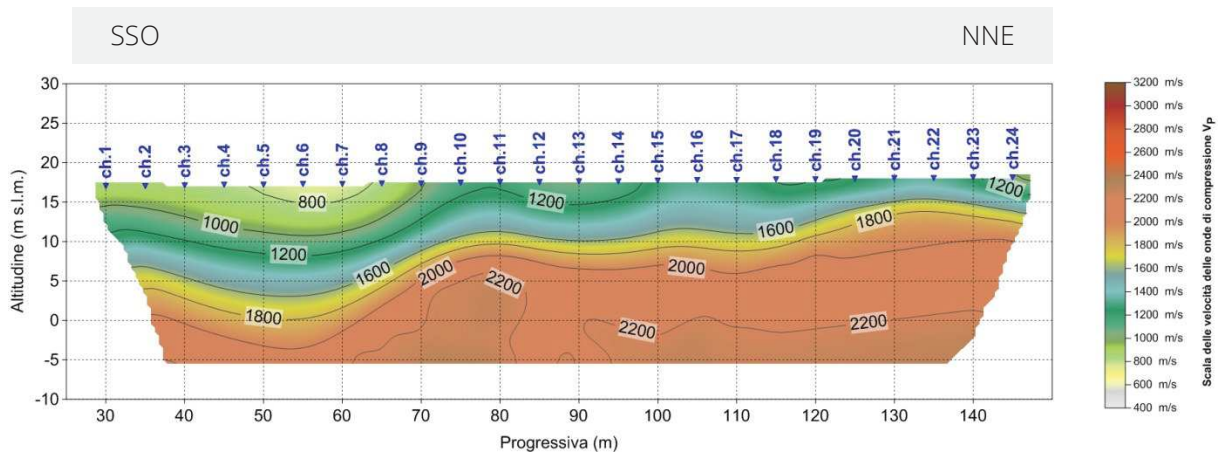


Fig. 2.5.23 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS5a.

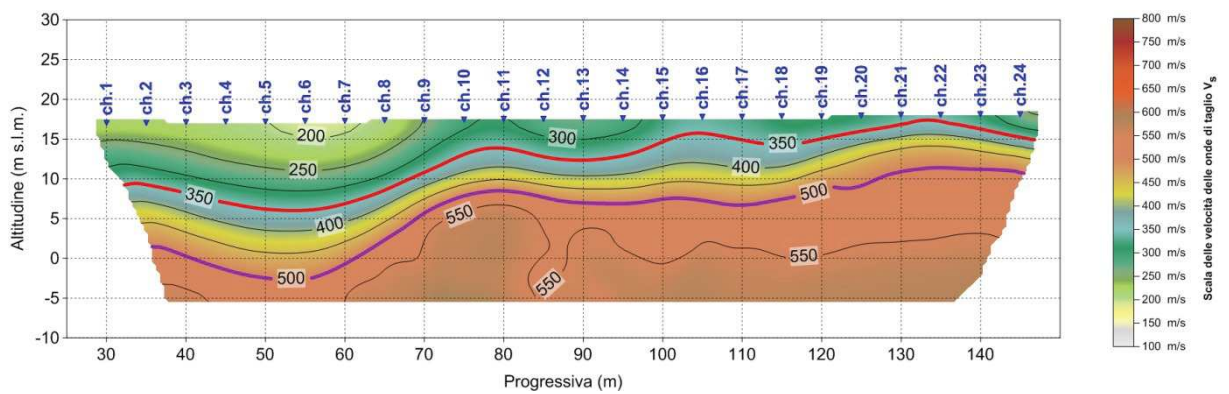


Fig. 2.5.24 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS5a.

2.5.7 BS5b

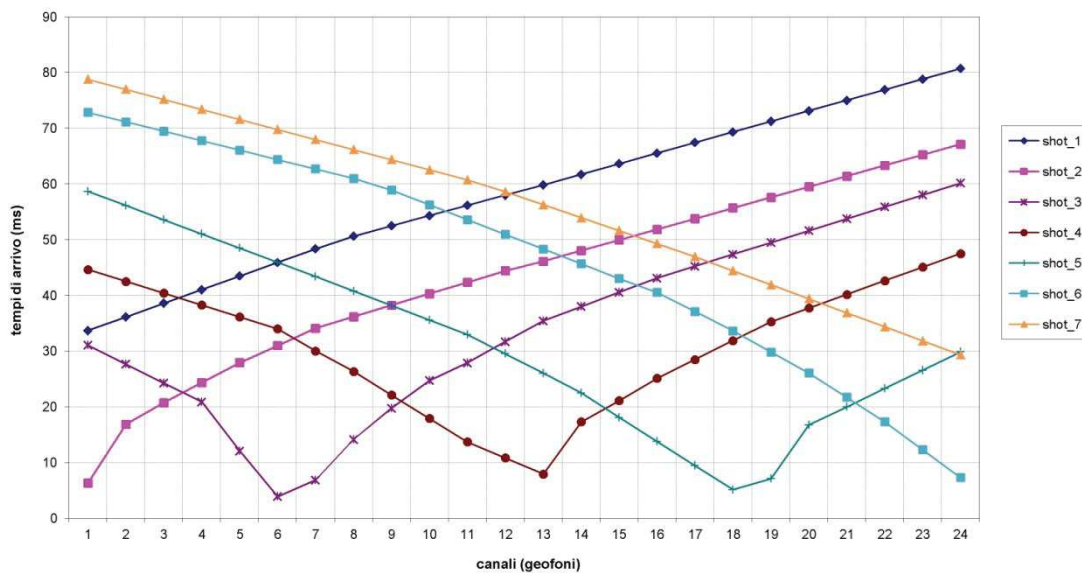


Fig. 2.5.25 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS5b. Dromocrone.

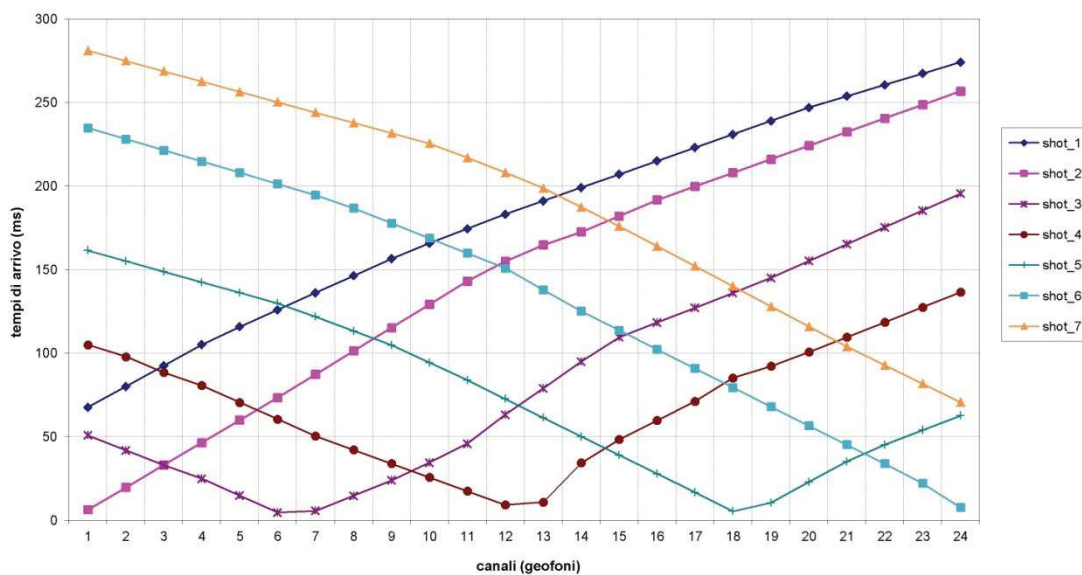


Fig. 2.5.26 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS5b. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS5b** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra un minimo di 9 e un massimo di 14 m dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 190 e 400 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità di circa 17 m dal p.c. Esso è costituito dalle citate alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana, che passano gradualmente ad un deposito di origine fluvio-lacustre costituito da ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 400 e 500 m/s.

La seconda interfaccia segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono i 530 m/s.

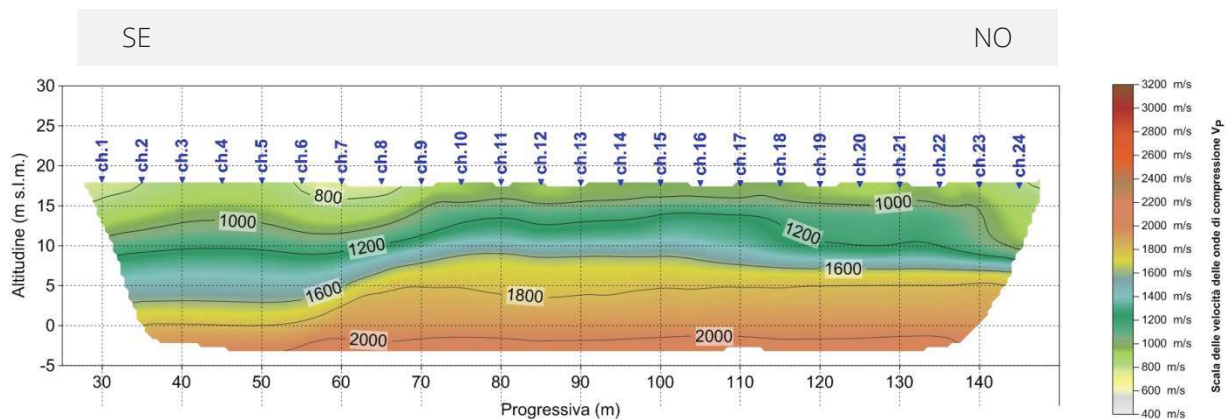


Fig. 2.5.27 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS5b.

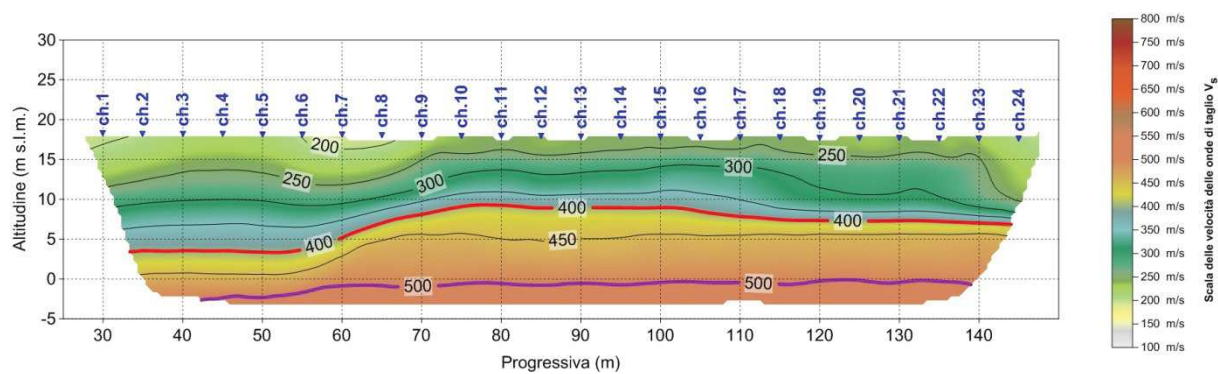


Fig. 2.5.28 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS5b.

2.5.8 BS6a

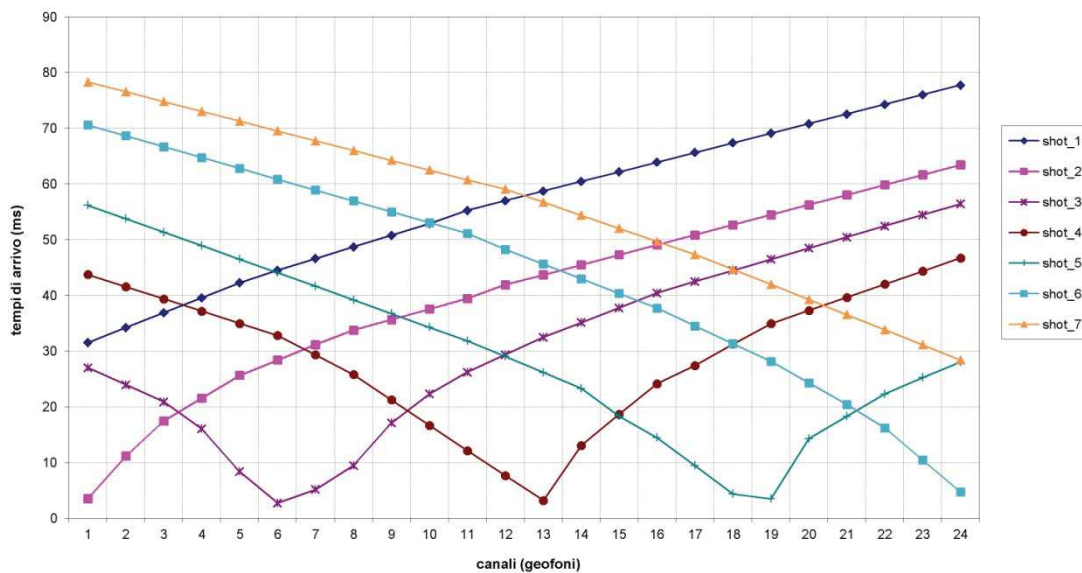


Fig. 2.5.29 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS6a. Dromocrone.

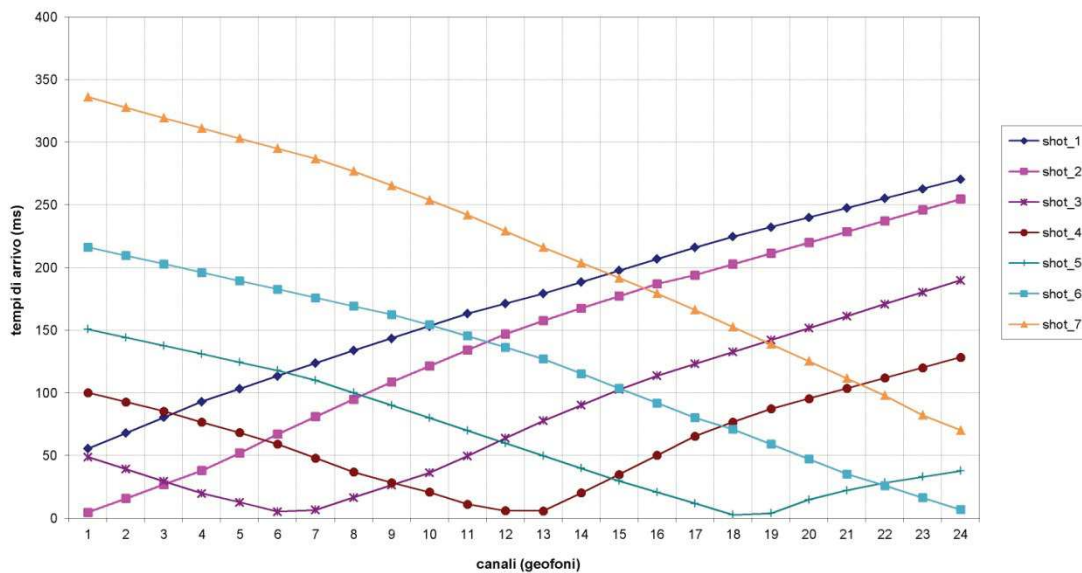


Fig. 2.5.30 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS6a. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS6a** ha permesso di evidenziare quattro sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità massima variabile compresa tra 5 m e 6 m dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 190 e 220 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 15 m e 34 m circa dal p.c. Esso è costituito da ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa che passa ad argilla e limi localmente sabbiosi e debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 220 e 380 m/s.

Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la terza interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 22 m e 36 m circa dal p.c. Esso è costituito da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 380 e 475 m/s.

La terza interfaccia, caratterizzata da una V_s superiore a 475 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, risultano di poco inferiori ai 600 m/s.

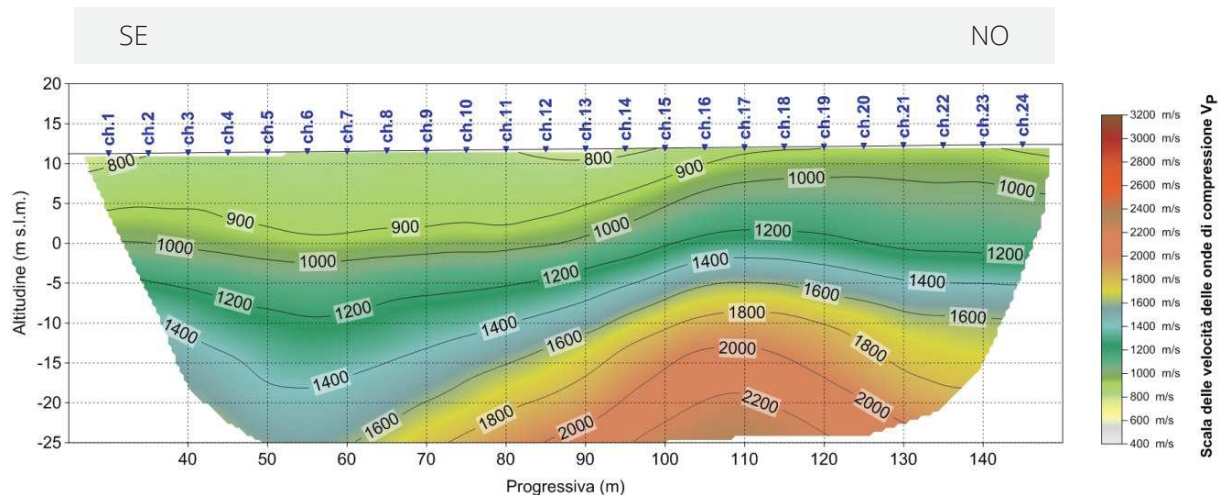


Fig. 2.5.31 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS6a.

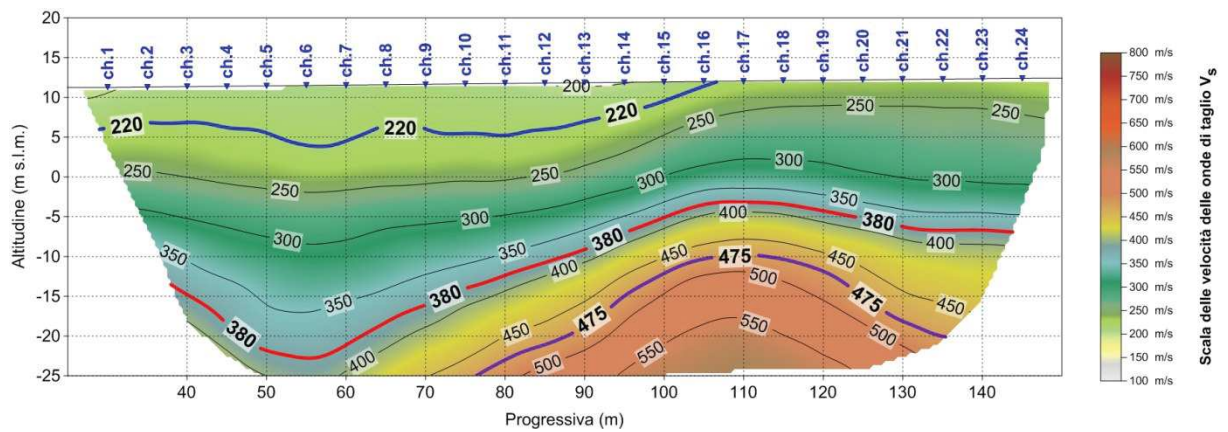


Fig. 2.5.32 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS6a.

2.5.9 BS6b

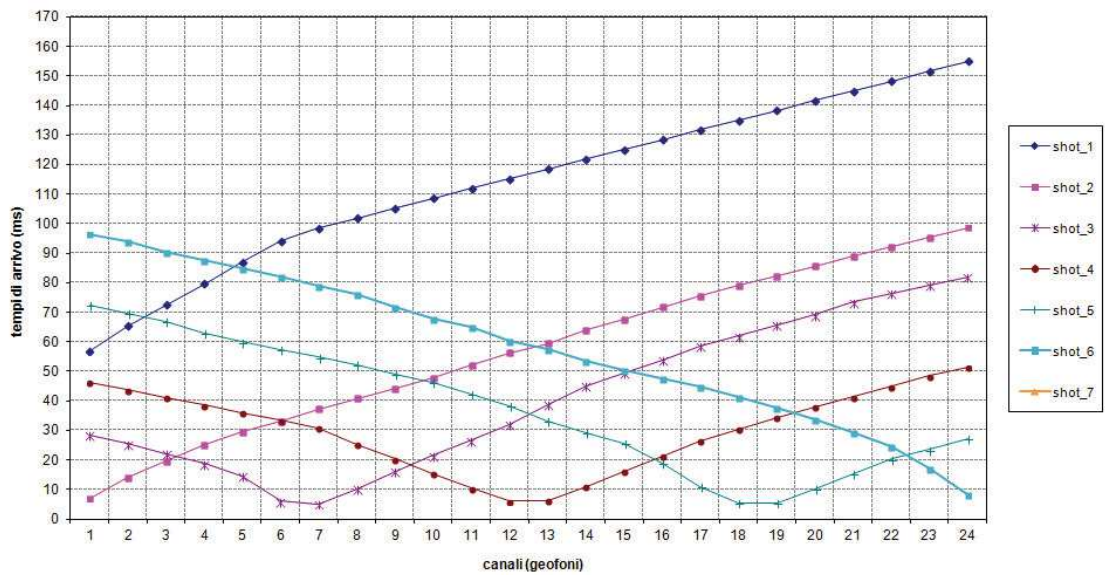


Fig. 2.5.33 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS6b. Dromocrone.

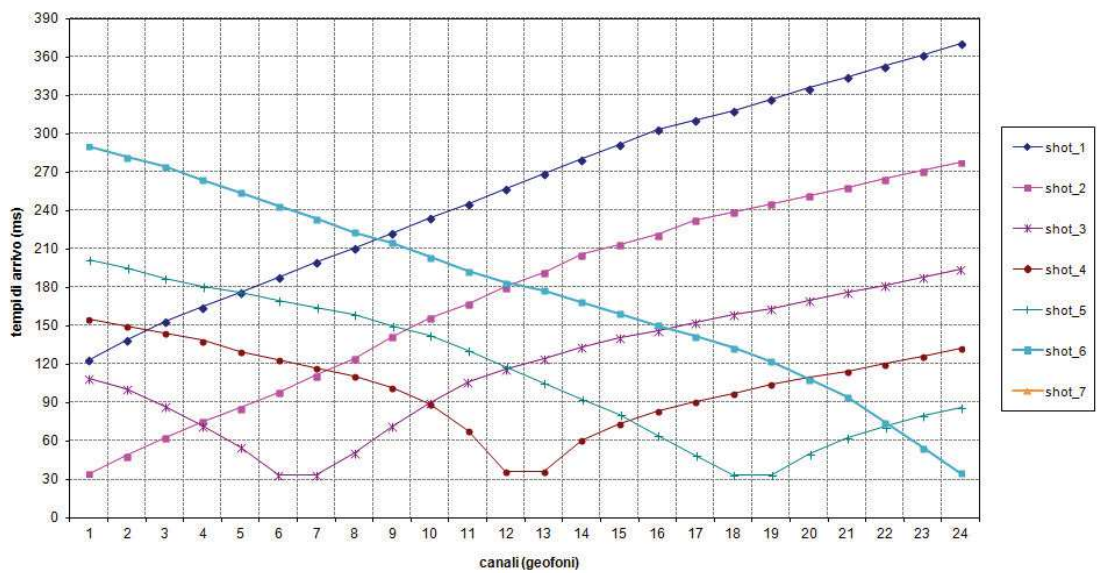


Fig. 2.5.34 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS6b. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS6b** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca mediamente ad una profondità compresa tra 5 m e 6 m circa dal p.c., approfondendosi verso la parte finale del profilo. Esso è costituito dal deposito di "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 230 e 360 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità mediamente compresa tra 15 m e 25 m circa dal p.c. Esso è costituito da alluvioni con ciottoli e ghiaia in matrice sabbioso limosa, che passano gradualmente a ghiaie in matrice sabbiosa medio grossolana limoso argillose. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 360 e 475 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiori a 475 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati dalle citate ghiaie in matrice sabbiosa medio grossolana limoso argillose e da argille e limi localmente sabbiosi debolmente ghiaiosi), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, raggiungono e di poco superano i 650 m/s.

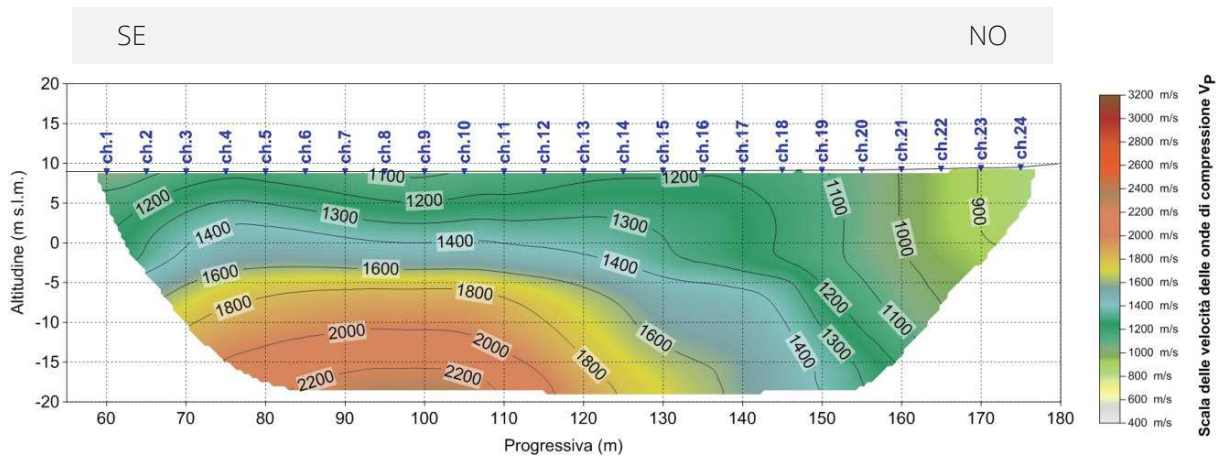


Fig. 2.5.35 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS6b.

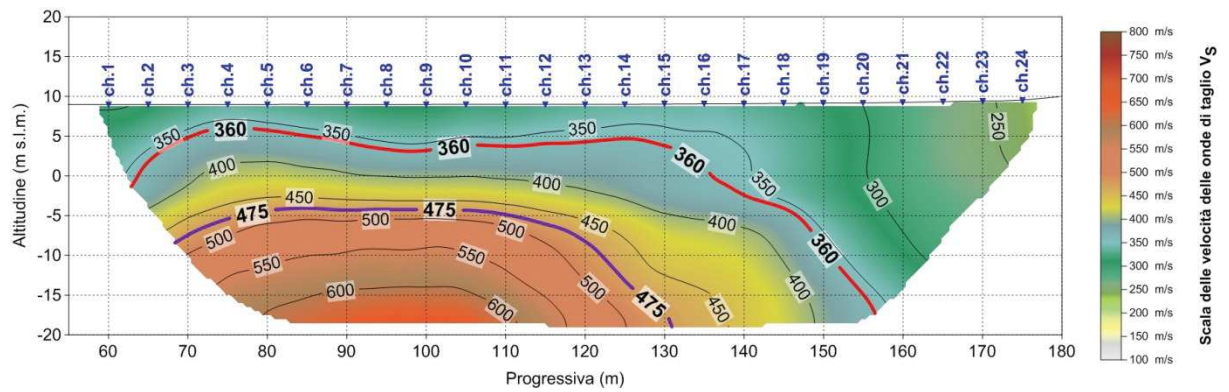


Fig. 2.5.36 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS6b.

2.5.10 BS6c

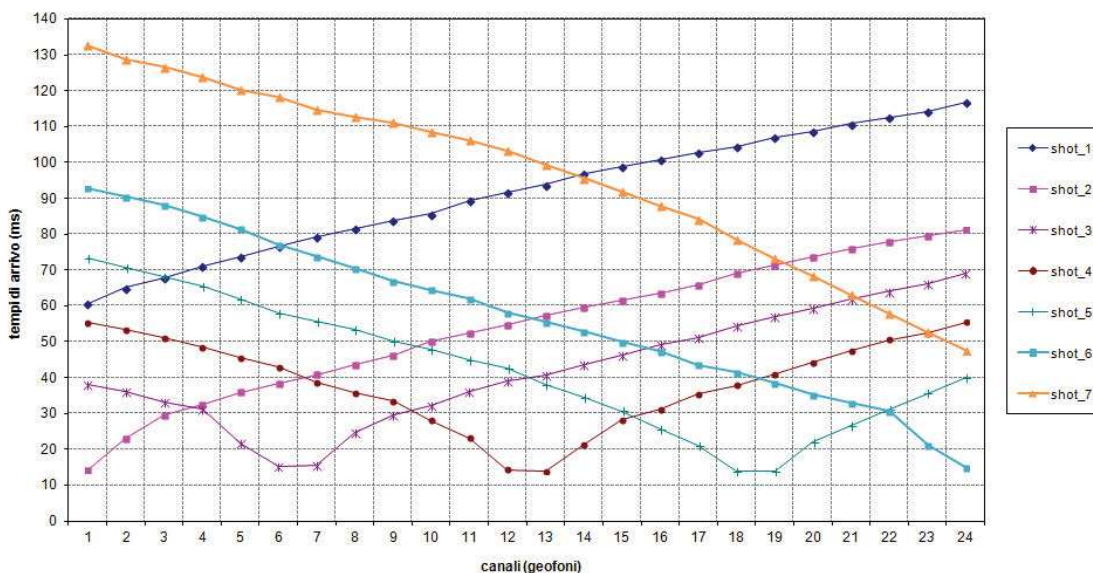


Fig. 2.5.37 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS6c. Dromocrone.

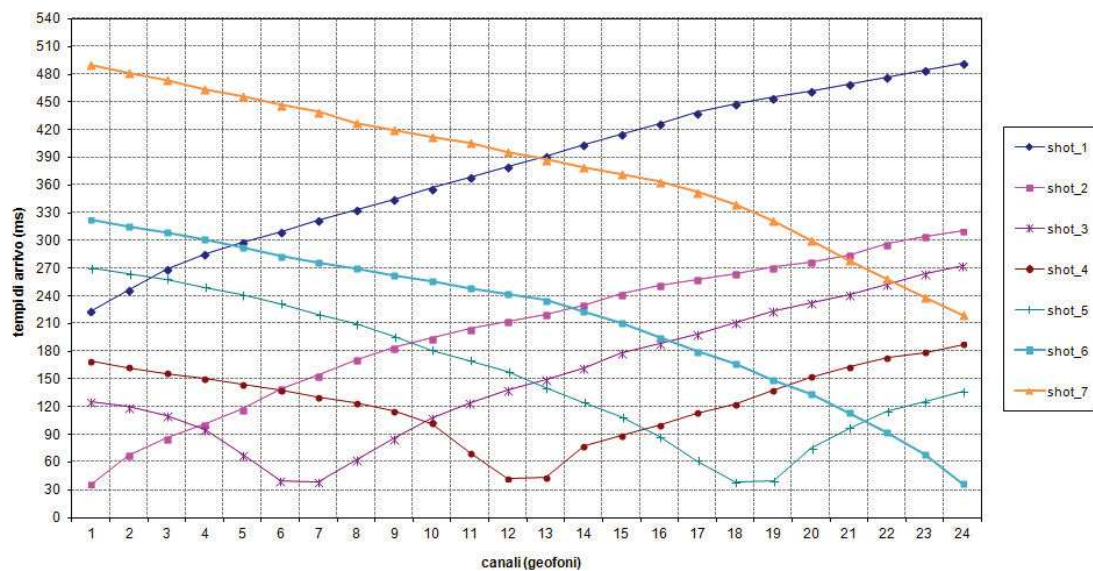


Fig. 2.5.38 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS6c. Dromocrone.

La pseudosezione elaborata per il profilo sismico **BS6c** ha permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 12 m e 14 m circa dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 240 e 365 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 20 m e 25 m circa dal p.c. Esso è costituito dalle citate alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 365 e 470 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiore a 470 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati dai terreni alluvionali ghiaiosi e ciottolosi e da un passaggio a sabbie medio grossolane e limo con ghiaia), con valori della velocità delle onde S crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, si attestano di poco al di sopra dei 600 m/s.

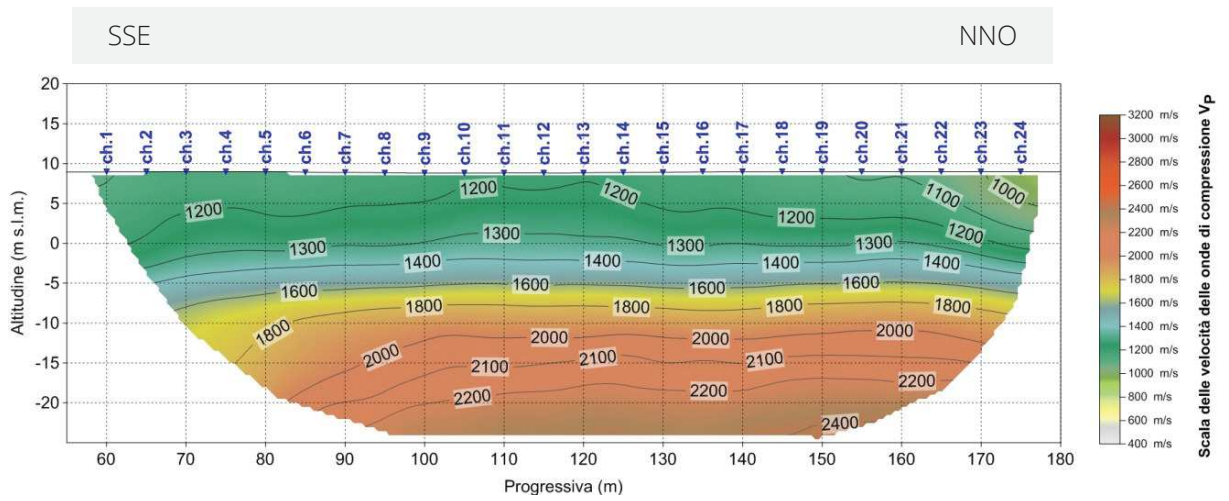


Fig. 2.5.39 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS6c.

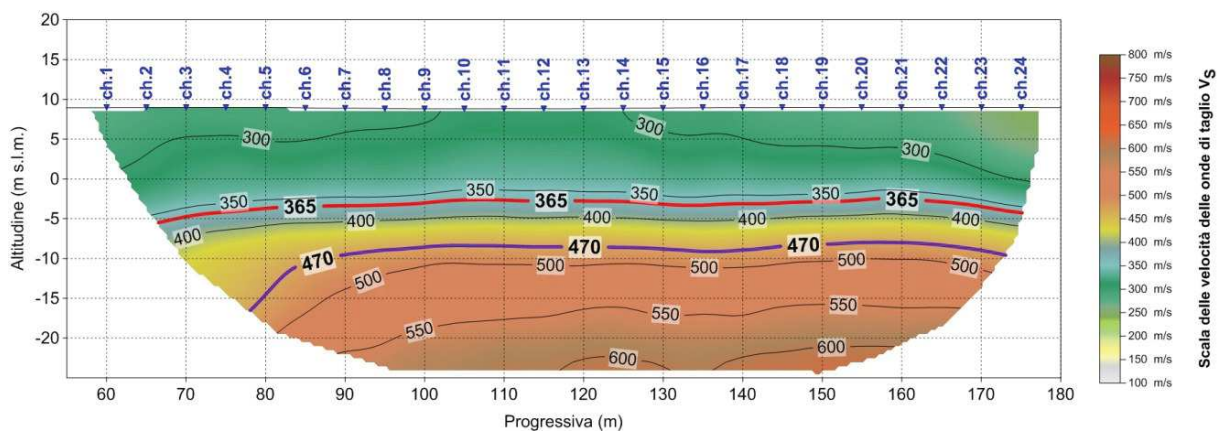


Fig. 2.5.40 – Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS6c.

2.5.11 BS7a

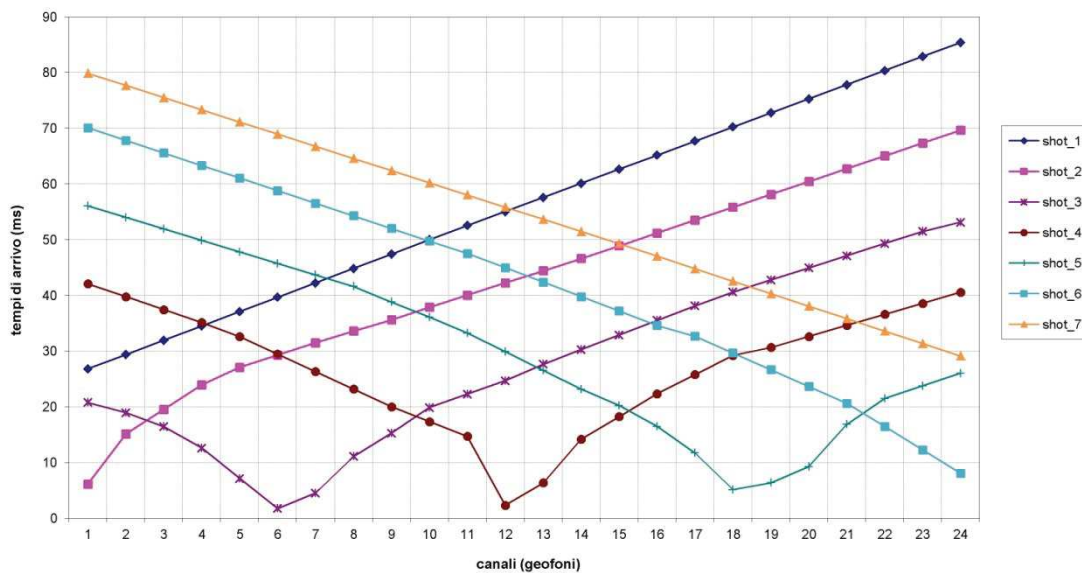


Fig. 2.5.41 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS7a-1. Dromocrone.

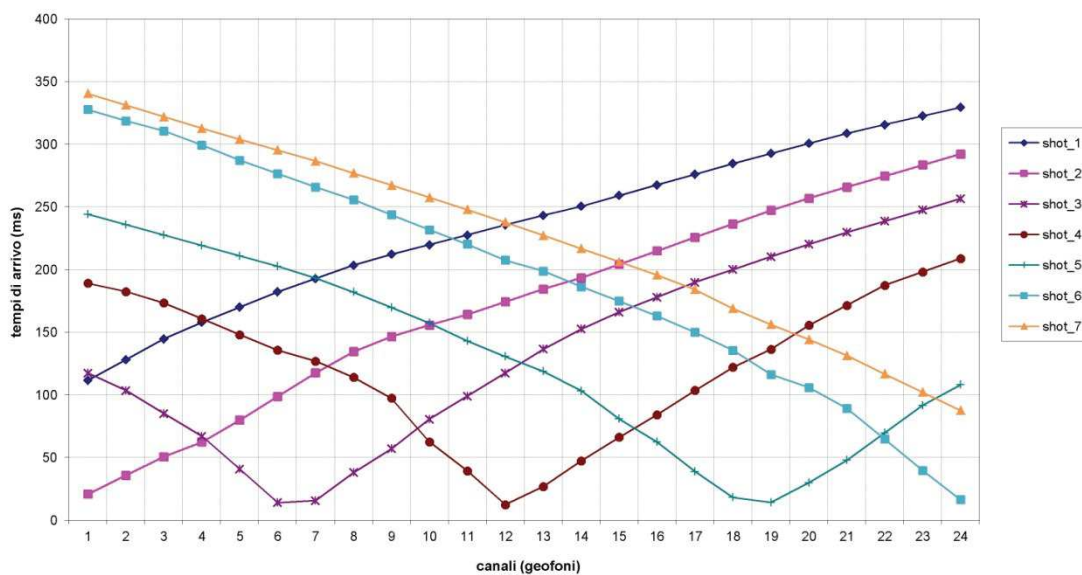


Fig. 2.5.42 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS7a-1. Dromocrone.

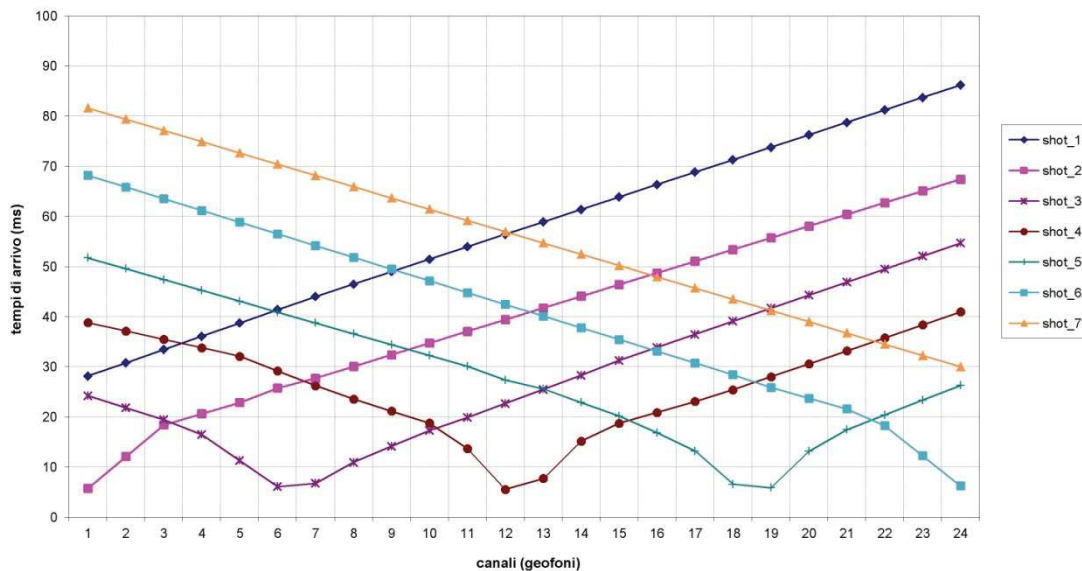


Fig. 2.5.43 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS7a-2. Dromocrone.

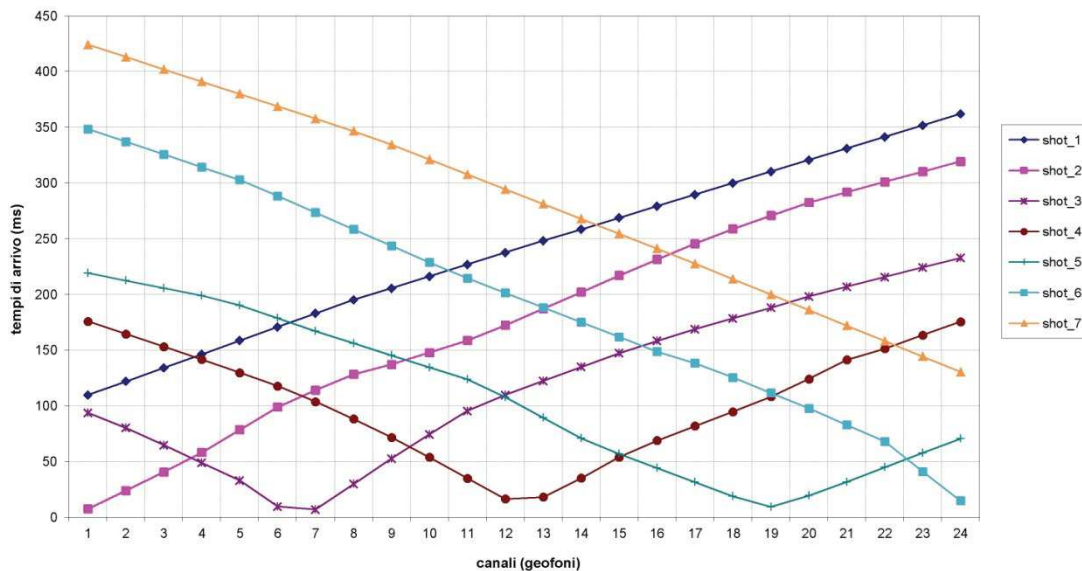


Fig. 2.5.44 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS7a-2. Dromocrone.

Il profilo sismico **BS7a** è costituito da due basi (**BS7a-1** e **BS7a-2**), il cui dataset è stato elaborato in un'unica fase. Pertanto, le risultanze scaturite dal processing dei dati sono state rappresentate sotto forma di un profilo singolo.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **BS7a** hanno permesso di evidenziare il seguente modello sismostratigrafico.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra 9 m e 11 m circa dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (costituito da limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 160 e 350 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità mediamente di circa 15 m dal p.c. Esso è costituito da ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 350 e 400 m/s.

La seconda interfaccia, caratterizzata da una V_s superiore a 450 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati da sabbia limosa localmente argillosa con ghiaia che passa ad argille e limi sabbiosi), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, superano i 500 m/s.

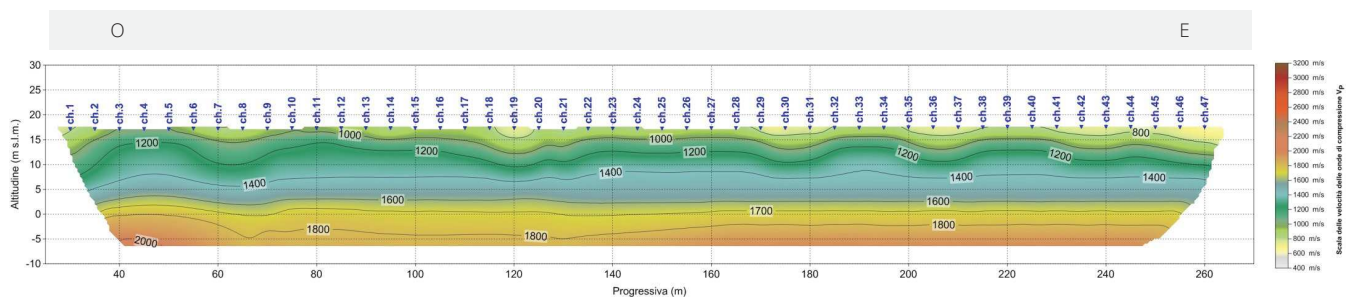


Fig. 2.5.45 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS7a (BS7a-1 e BS7a-2).

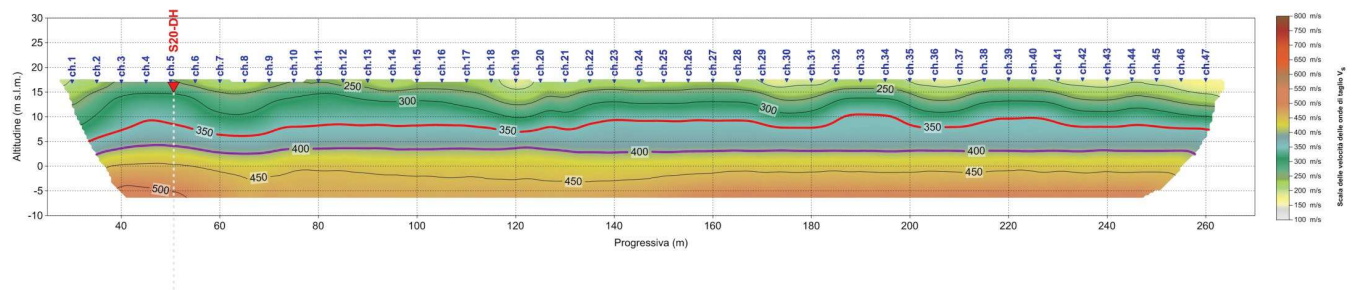


Fig. 2.5.46 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS7a (BS7a-1 e BS7a-2).

2.5.12 BS7b

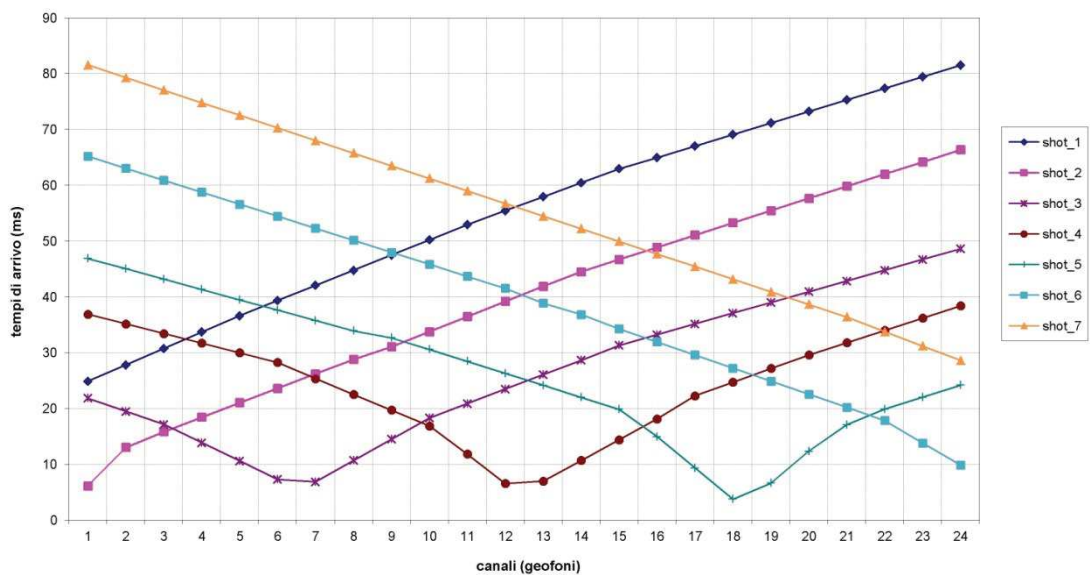


Fig. 2.5.47 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS7b-1. Dromocrone.

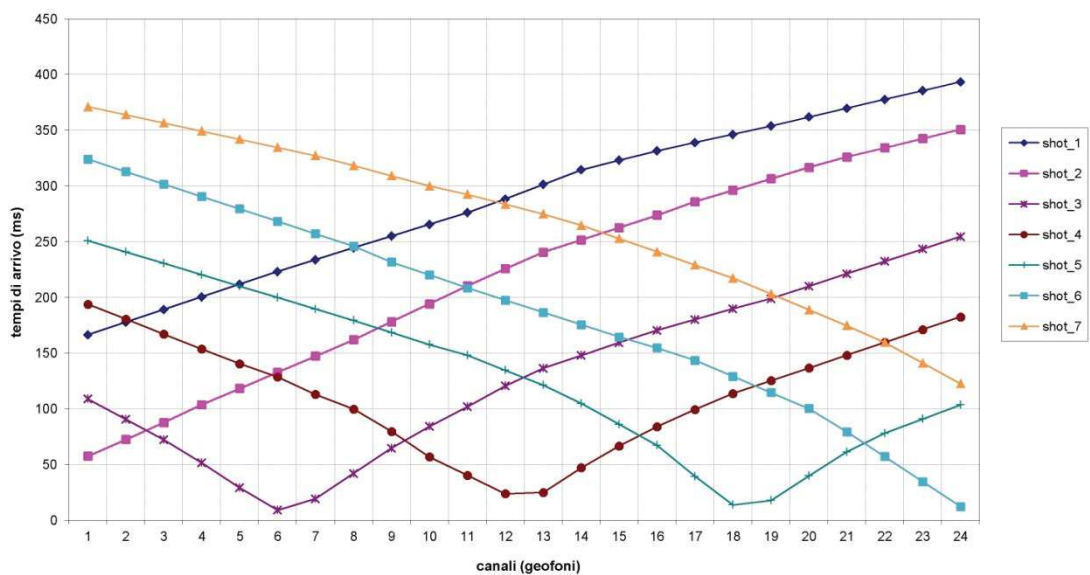


Fig. 2.5.48 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS7b-1. Dromocrone.

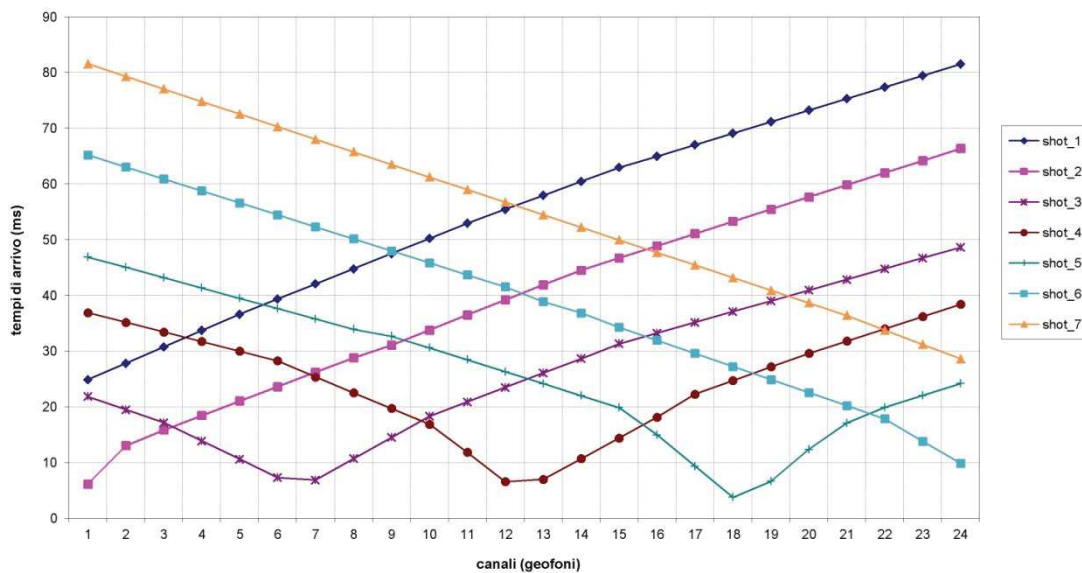


Fig. 2.5.49 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde P. Profilo BS7a-2. Dromocrone.

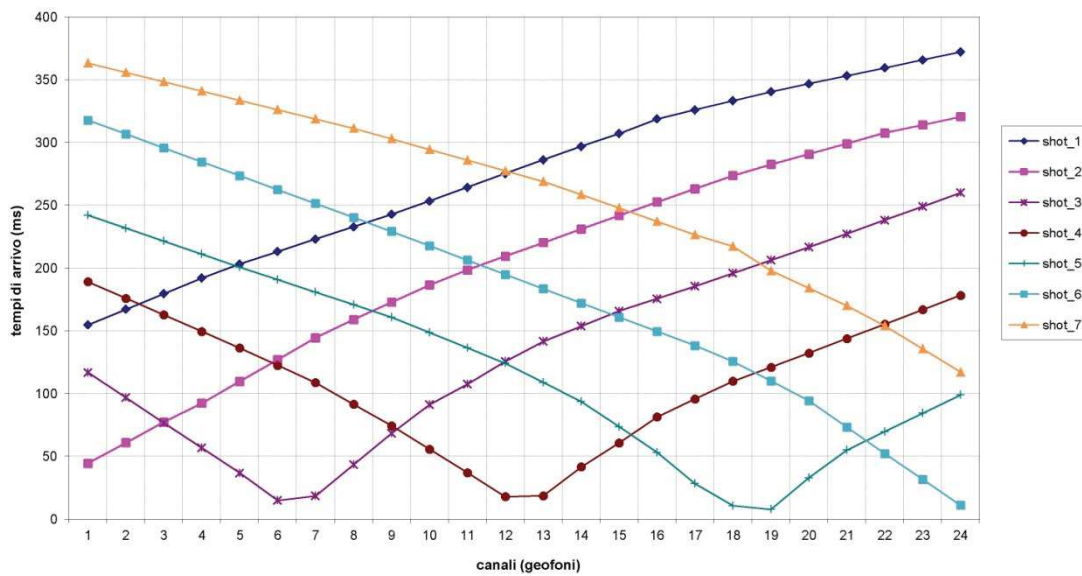


Fig. 2.5.50 – Tangenziale di Lucca. Tomografia sismica in onde S. Profilo BS7a-2. Dromocrone.

Il profilo sismico **BS7b** è costituito da due basi (**BS7b-1** e **BS7b-2**), le cui risultanze, in fase di processing e restituzione, sono state rappresentate sotto forma di un singolo profilo tomografico.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **BS7b** hanno permesso di evidenziare quattro sismostrati.

Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile compresa tra un minimo di 4 m e un massimo di 6 m circa dal p.c. Esso è costituito dal deposito del "Bellettone" (costituito da limi sabbiosi e argillosi di colore marrone) e da alluvioni ciottolose e ghiaiose in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 210 e 350 m/s.

Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità variabile compresa tra 9 e 10 m dal p.c. Esso è costituito da ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 350 e 400 m/s.

Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la terza interfaccia, posta ad una profondità mediamente di circa 22 m dal p.c. Esso è costituito da ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana limosa. Il sismostrato in oggetto è caratterizzato da una velocità delle onde S compresa tra 400 e 500 m/s.

La terza interfaccia, caratterizzata da una V_s superiori a 500 m/s, segna il passaggio a terreni più consistenti, rispetto a quelli sovrastanti (caratterizzati dalle citate ghiaia in matrice sabbiosa medio grossolana), con valori di V_s crescenti con la profondità che, alla base della pseudosezione, di circa 540 m/s.

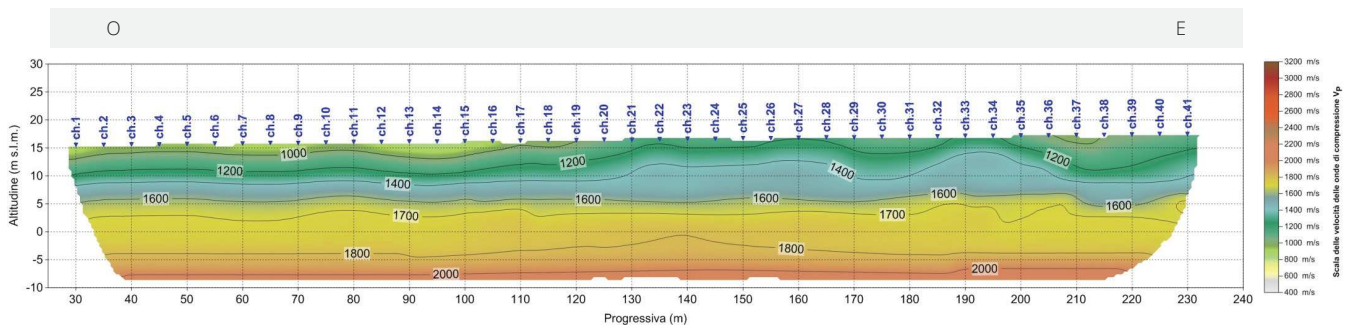


Fig. 2.5.51 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS7b (BS7b-1 e BS7b-2).

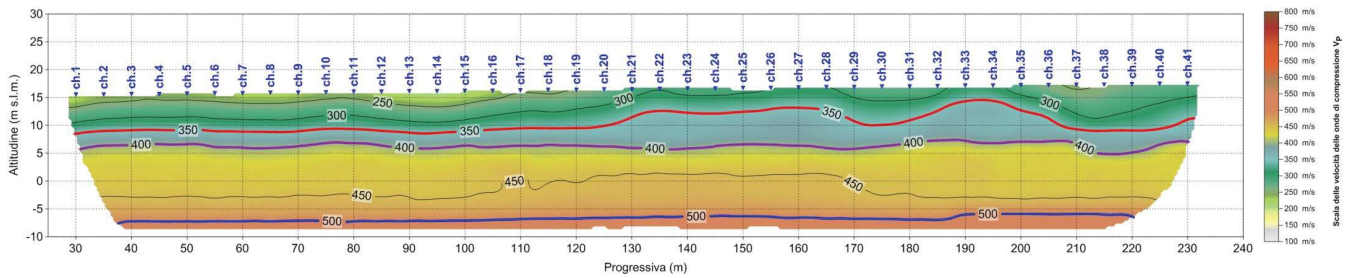


Fig. 2.5.52 - Tangenziale di Lucca. Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS7b (BS7b-1 e BS7b-2).

3 INDAGINI DOWN-HOLE

3.1 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI

Il metodo sismico in foro down-hole consente di determinare il tempo di propagazione delle onde elastiche di compressione e di taglio, P ed S , generate in superficie mediante l'uso di una massa battente, all'interno delle varie unità litologiche che si incontrano lungo una perforazione. In fase esecutiva, per il rilievo delle onde elastiche, si utilizza un sistema di ricezione costituito da geofoni opportunamente assemblati (geofono da pozzo), che viene fissato a profondità man mano crescenti contro le pareti di un perforo, opportunamente condizionato, mediante un sistema pneumatico (Fig. 3.1.1).

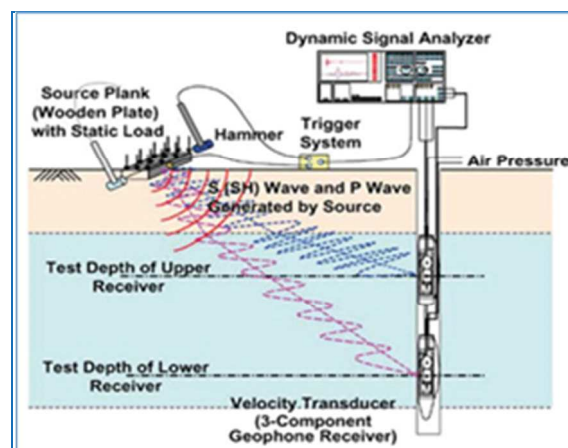


Fig. 3.1.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

La rilevazione delle onde P e delle onde S , nota la profondità dell'apparato di misurazione, permette di determinare le relative velocità di propagazione e di calcolare i moduli elastici dinamici dei litotipi, assunti i valori dei pesi di volume che li caratterizzano.

A differenza della sismica a rifrazione, che misura i tempi di arrivo delle onde sismiche dopo che queste hanno subito fenomeni di rifrazione e/o di riflessione, il metodo down-hole, misurando il tempo di arrivo delle onde elastiche man mano che queste penetrano negli strati più profondi, ha il vantaggio di non avere come condizione necessaria l'aumento della velocità con la profondità; pertanto è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nel pacco di litotipi attraversati dall'indagine.

Se la sorgente energizzante è molto prossima all'asse del perforo e le superfici di discontinuità sono perpendicolari a tale asse, il raggio sismico che dalla sorgente si muove verso i geofoni, non subirà alcuna deviazione nell'attraversare le suddette discontinuità.

Se, invece, sia per motivi logistici sia per evitare che l'onda elastica si trasmetta lungo il materiale di condizionamento, la sorgente energizzante viene a trovarsi ad una certa distanza dall'asse del perforo, i tempi di arrivo delle onde devono essere corretti in modo da riportarli ai valori che si sarebbero riscontrati qualora il raggio avesse viaggiato secondo un tragitto verticale.

In fase di elaborazione, per una prima valutazione del grado di disomogeneità delle litologie lungo il profilo verticale, si usa determinare la "velocità intervallo", ovvero la velocità con cui viaggerebbe il fronte d'onda lungo l'asse verticale tra due posizioni consecutive del ricevitore, intervallate da un determinato spessore, rappresentate mediante un diagramma del tipo *step plot*. Successivamente, si determina il profilo di velocità reale lungo la verticale per il pozzo, sia per le onde *P* che per le onde *S*, nell'ipotesi che il sottosuolo sia localmente stratificato. In tal modo, sono costruiti diagrammi "tempi di arrivo corretti - profondità" per procedere all'individuazione di *dromocrone*, laddove ciascuno dei segmenti individua un intervallo di profondità entro cui la velocità dell'onda sismica è costante.

Infine, dalla conoscenza dei valori di velocità di propagazione delle onde *P* ed *S*, in ogni strato, e noti i valori del peso di volume naturale, è possibile determinare i valori dei moduli elastici dinamici tra cui i principali sono il *modulo di Poisson* (ν), *modulo di Taglio* *G* ed il *modulo di Elasticità* o *modulo di Young* (*E*) ed *il modulo di Compressibilità* (*K*).

Modulo di Poisson	$\nu = \frac{0.5 * (V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1}$	(1)
Modulo di Taglio	$G = \gamma \cdot V_s^2$	(2)
Modulo di Elasticità	$E = V_s^2 \cdot \gamma \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$	(3)
Modulo di Compressibilità	$K = \gamma \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$	(4)

Al termine della prova si è proceduto all'elaborazione dei dati avvalendosi dei seguenti software specialistici:

- IXSeg2Segy per la visualizzazione dei segnali acquisiti;
- GEOSTRU – Software down-hole per la lettura dei tempi di arrivo ed il calcolo delle velocità intervallo.

L'interpretazione della prospezione down-hole è avvenuta seguendo l'iter descritto:

- analisi dei segnali nel dominio delle frequenze e filtraggio del segnale stesso (se necessario);
- lettura dei tempi di arrivo delle onde P ed S per le singole registrazioni.

Per quanto concerne le registrazioni ottenute da energizzazione applicata in verticale, è stato determinato il primo arrivo in onde P come mostrato nella figura seguente (Fig. 3.1.2), in cui, si osserva distintamente il primo arrivo dell'onda di compressione.



Fig. 3.1.2 - Esempio di onda P e di lettura del primo tempo di arrivo.

Nelle registrazioni ottenute energizzando con percussione orizzontale, per ciascuna profondità d'indagine, sono state sovrapposte le misure conseguenti alla "battuta diretta o destra" (SH-A) e alla "battuta coniugata o inversa o sinistra (SH-B).

Tale metodica ha consentito, tramite l'inversione di fase dell'onda SH, di identificare con maggiore facilità l'onda di taglio e di determinare, con maggior esattezza, il tempo di arrivo (Fig. 3.1.3).

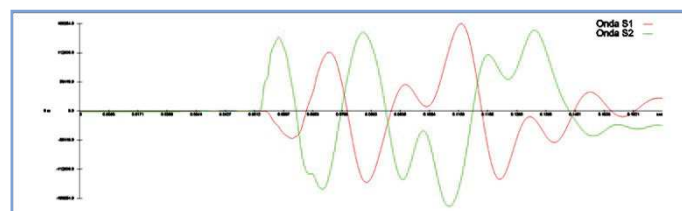


Fig. 3.1.3 - Esempio di onda S e dell'inversione di fase necessaria per l'individuazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio (onda S).

Inoltre, le suddette battute sono state tra loro sottratte in modo da esaltare l'onda di taglio. Con tale metodica le onde di compressione, provocate durante l'energizzazione, con la differenza "battuta diretta-battuta coniugata", si riducono in ampiezza laddove le onde SH (che invertono in polarità a seconda della direzione di battuta) tenderanno, invece, a sommarsi aumentando così d'ampiezza. In definitiva, le metodologie descritte, hanno consentito di individuare più agevolmente il tempo di arrivo delle onde S.

3.2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Di seguito sono riportate le specifiche della strumentazione utilizzata per la prova down-hole:

- Geofono da pozzo modello "3D Twin Borehole Geophone" della **AMBROGEO**, costituito da una coppia di sensori tridimensionali, distanziati tra loro 1 metro, ciascuno dei quali è composto da una terna di trasduttori di velocità (geofoni) da 10 Hz, orientati secondo una terna cartesiana ortonormale, di cui n.1 sensore verticale (per la rilevazione delle onde P) e n.2 orizzontali (per la rilevazione delle onde SH), questi ultimi due disposti a 90° l'uno con l'altro.
- Trigger, costituito da un dispositivo, collegato al sistema di acquisizione, che permette di avviare la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il sistema di "innesco" è stato realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente e attivato dall'impatto, nell'istante in cui la massa battente colpisce la sorgente.
- Sistema di energizzazione, costituito da una sorgente impattiva. Per la generazione delle onde di compressione è stato utilizzato un martello da 10 kg e un piattello metallico posto al suolo, mentre per la generazione delle onde di taglio è stato utilizzato un parallelepipedo in polietilene ad alta densità, reso solidale con il terreno mediante un carico verticale, sollecitata alle due estremità dalla massa battente (martello). Tale sistema è in grado di produrre onde di taglio polarizzate nel piano orizzontale.

I segnali sismici, sono stati acquisiti mediante un sismografo **MAE X610S** a 24 bits, le cui sono state riportate in precedenza.

3.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.3** prospezioni sismiche down-hole la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riporta il dettaglio per ciascuna indagine:

Codice indagine	Profondità dal p.c. (m)	Sistema di riferimento GAUSS - BOAGA		
		Coord. EST	Coord. NORTH	Quota (ortometrica)
S2-DH	40	1623280,64	4860001,34	28,50
S15-DH	40	1628712,72	4854495,27	10,30
S20-DH	40	1624653,87	4855242,03	16,40

Tab. 3.3.1 – Tangenziale di Lucca. Indagini sismiche down-hole.

Le indagini sono state eseguite sino alle profondità riportate in tabella, acquisendo i segnali relativi ad onde elastiche, mediante un sistema di rilevamento composto da 2 triplette di geofoni, distanziate di 1 metro, ognuna equipaggiata con un geofono a componente verticale (per la rilevazione delle onde *P*) e 2 geofoni a componente orizzontale (per la rilevazione delle onde *S*). Questi ultimi risultano disposti, all'interno del dispositivo, in maniera da formare un angolo di 90°. Tale disposizione, consente l'acquisizione e, successivamente, la corretta determinazione delle onde *S*, a prescindere dall'orientamento nel foro del sistema di rilevamento rispetto al punto di battuta.

Di seguito, si riporta la stratigrafia dei perfori investigati.

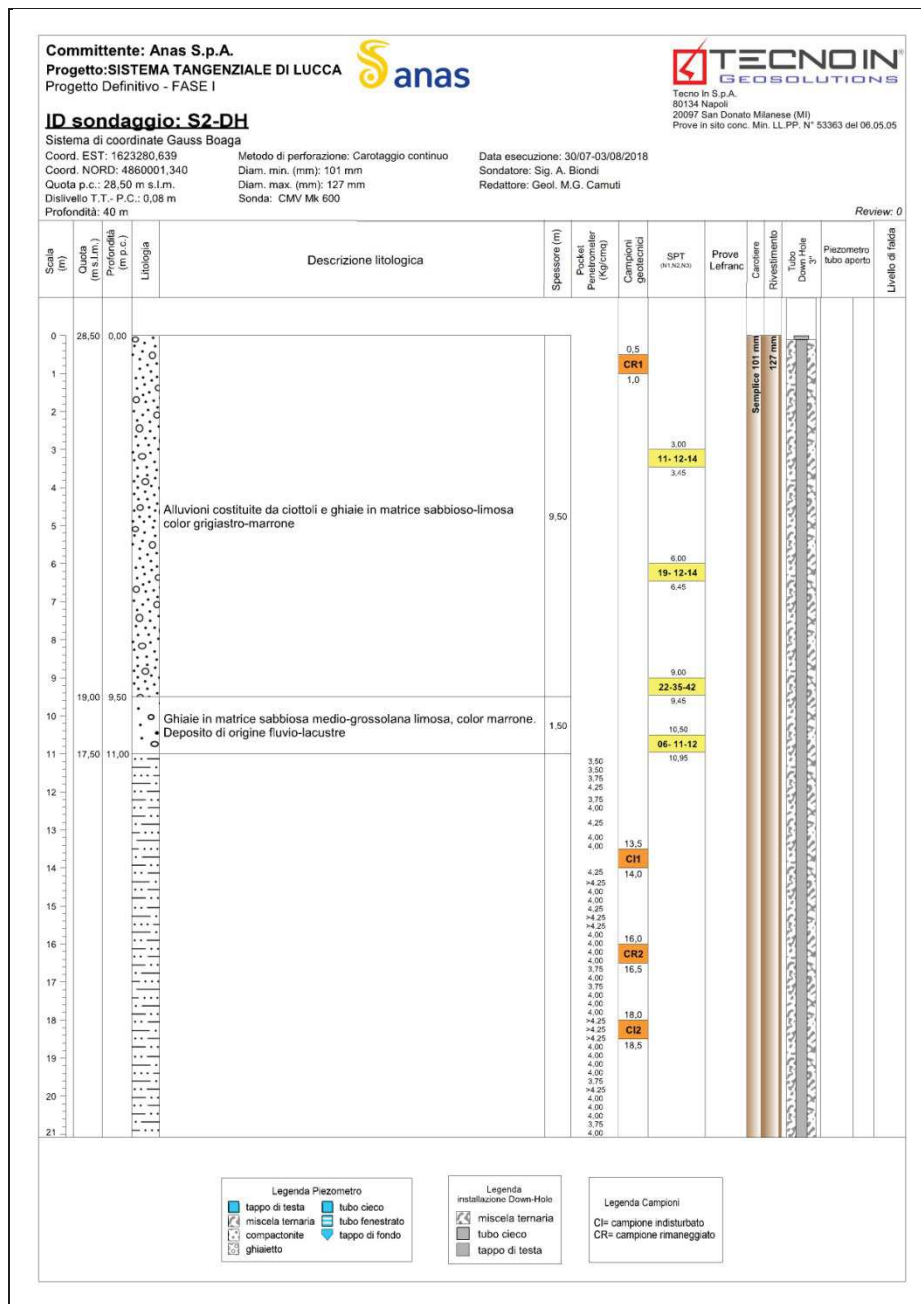


Fig. 3.3.1 – Tangenziale di Lucca. Stratigrafia del sondaggio S2-DH (pag. 1 di 2).

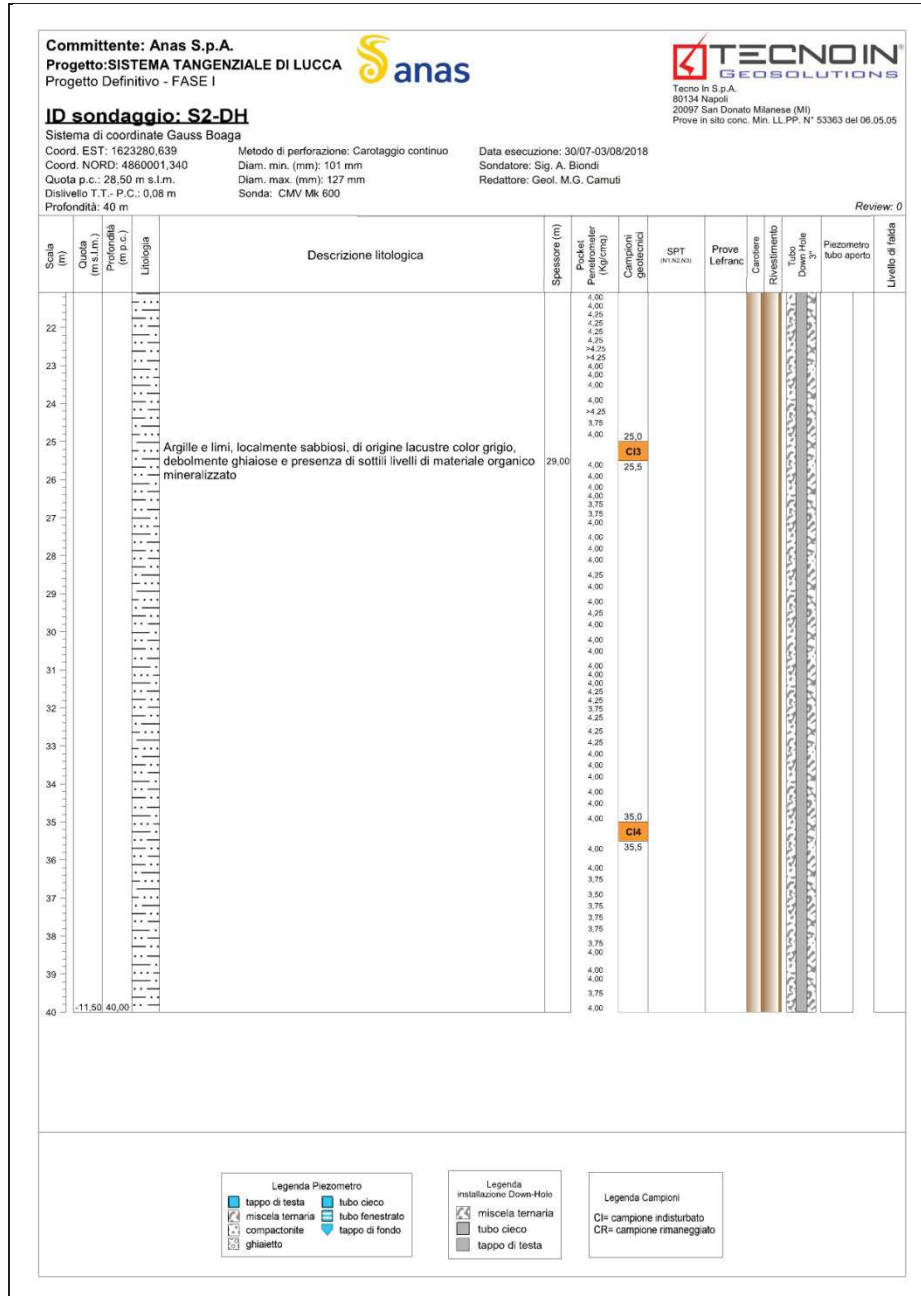


Fig. 3.3.2 – Tangenziale di Lucca. Stratigrafia del sondaggio S2-DH (pag. 2 di 2).

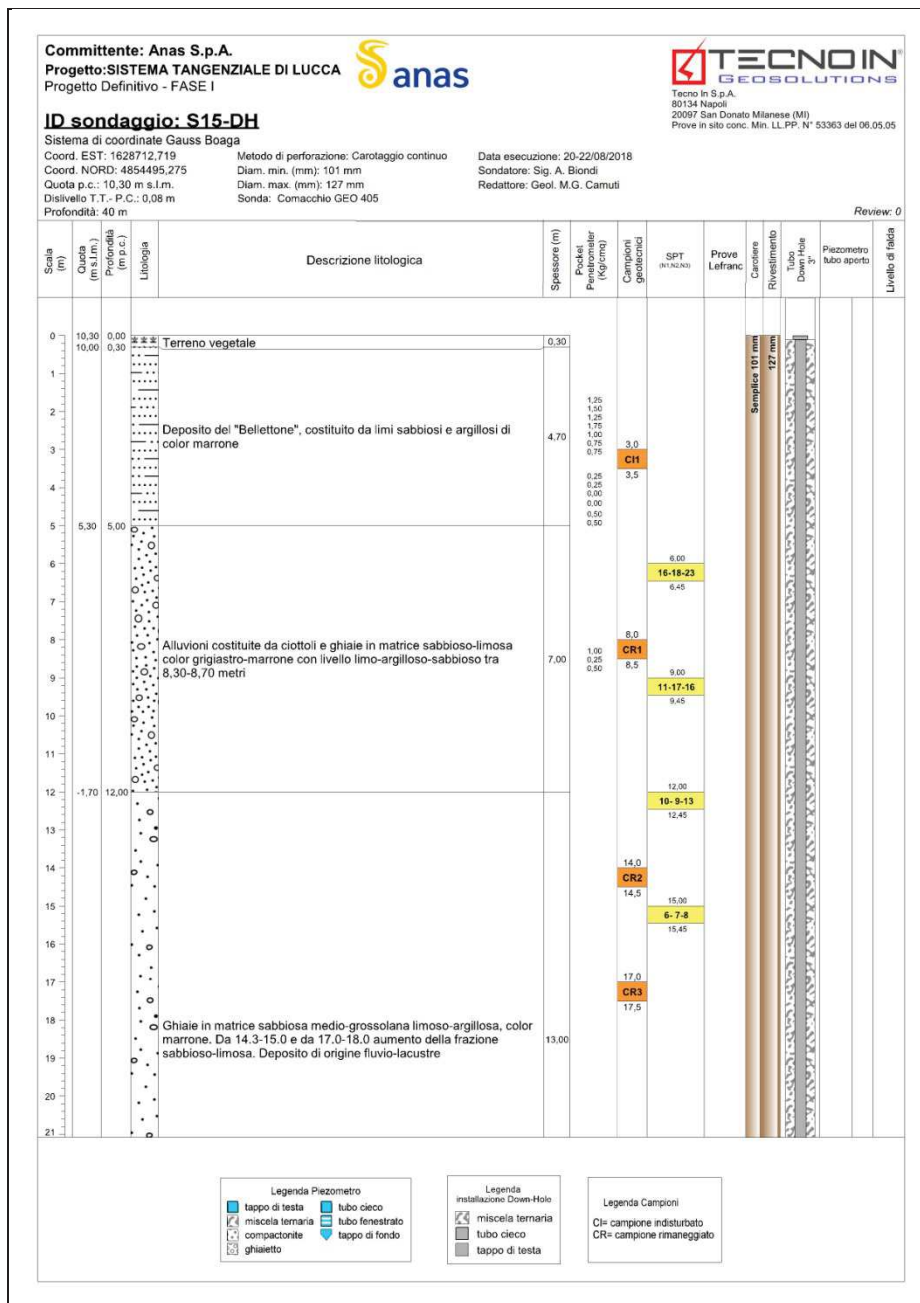


Fig. 3.3.3 – Tangenziale di Lucca. Stratigrafia del sondaggio S15-DH (pag. 1 di 2).

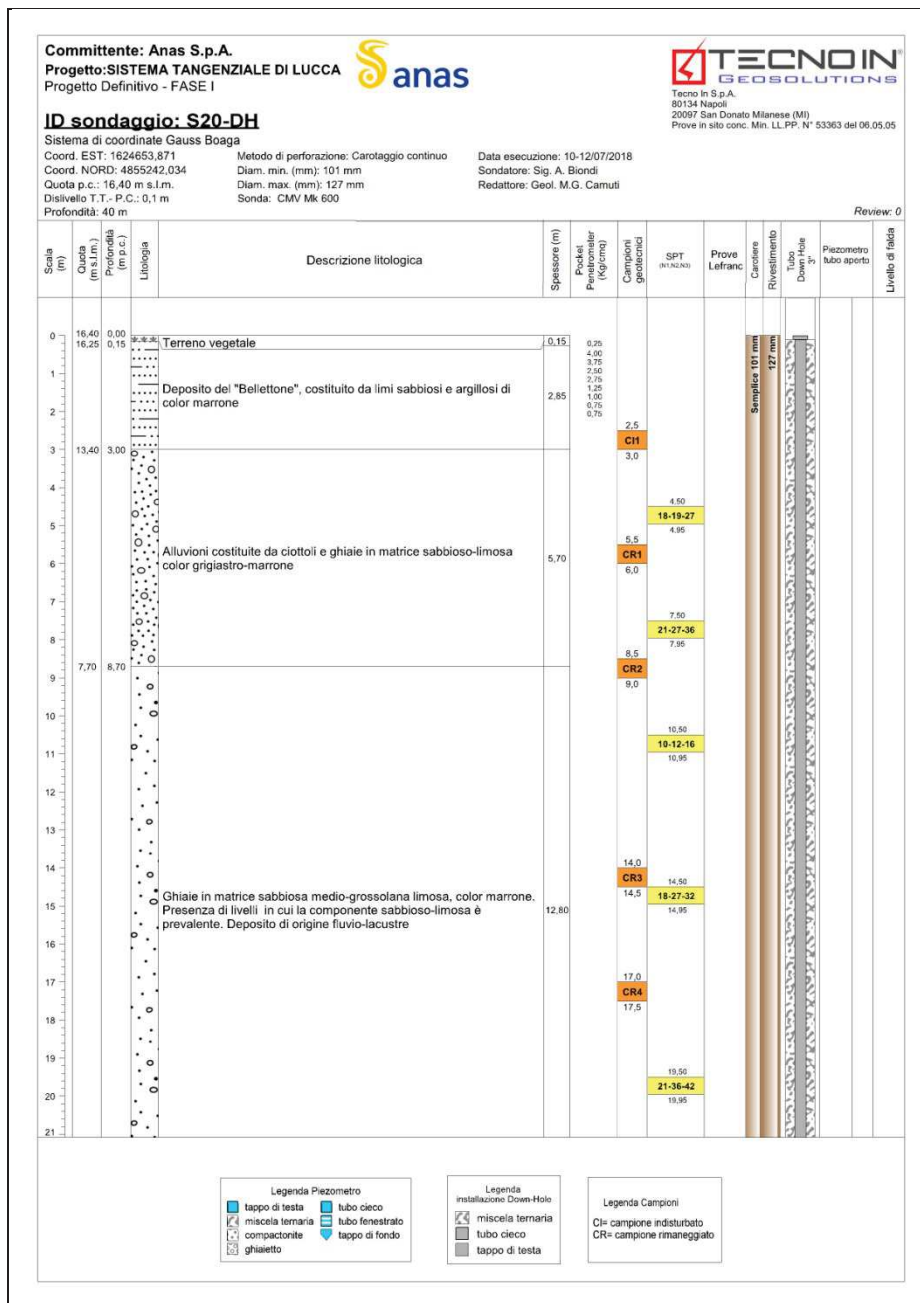


Fig. 3.3.5 – Tangenziale di Lucca. Stratigrafia del sondaggio S20-DH (pag. 1 di 2).

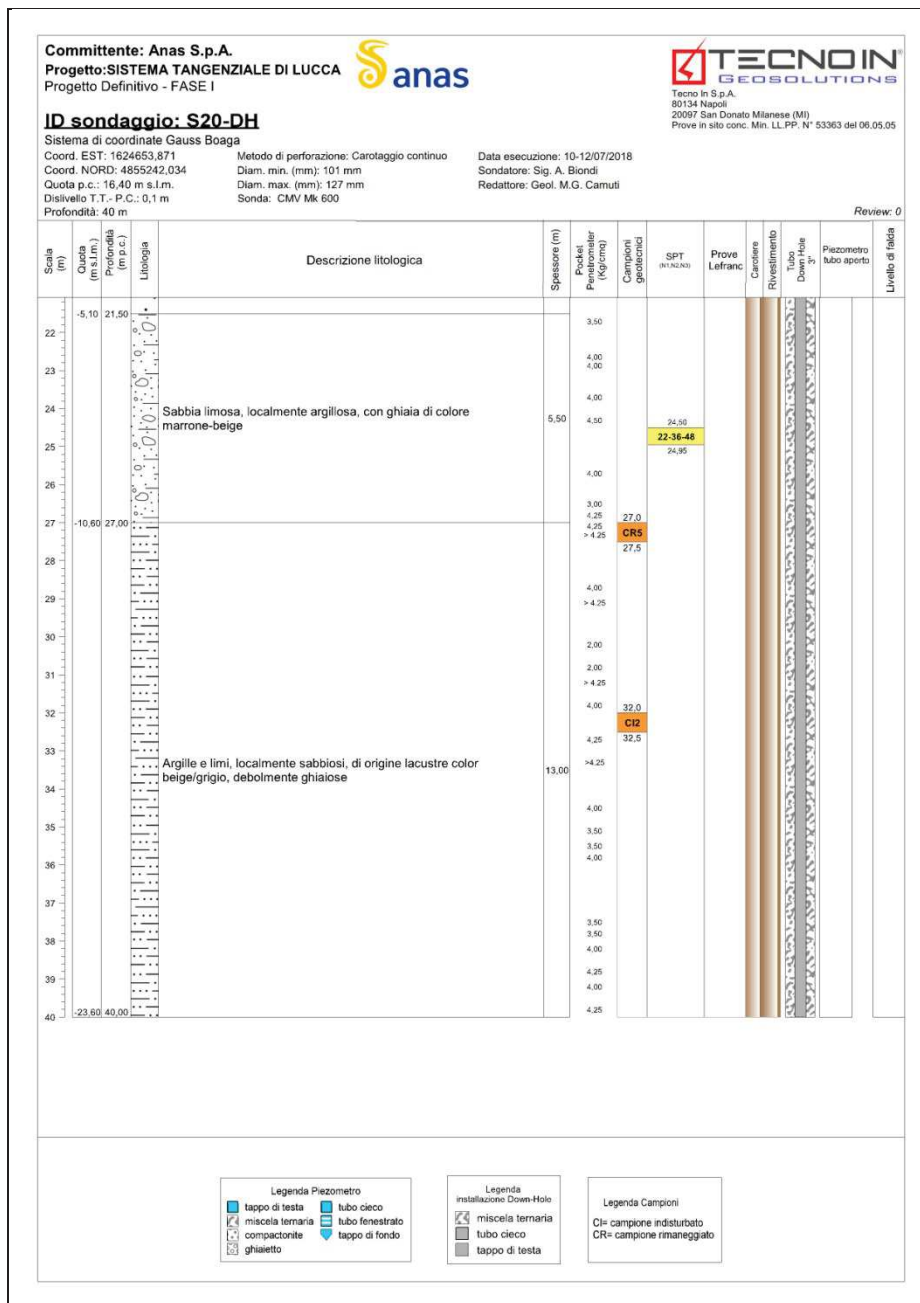


Fig. 3.3.6 – Tangenziale di Lucca. Stratigrafia del sondaggio S20-DH (pag. 2 di 2).



Fig. 3.3.7 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S2-DH.



Fig. 3.3.8 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S15-DH.



Fig. 3.3.9 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S20-DH.

3.4 RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

Per la prova in oggetto, sono stati visualizzati i singoli sismogrammi per la determinazione dei tempi di arrivo delle onde "P" ed "SH" (picking) ed, al termine del processo di lettura, nota la profondità dei sensori, sono state calcolate le velocità di propagazione delle onde elastiche, per ogni intervallo di profondità.

Si è, quindi, proceduto all'elaborazione dei dati secondo il duplice criterio descritto nei paragrafi precedenti, ossia adottando il metodo diretto ed il metodo intervallo, riportando, nel primo caso, i diagrammi "tempi di arrivo verticale (o corretti) – profondità" ovvero le dromocrone, in cui i valori di velocità "media" sono stati determinati in base al coefficiente angolare dei singoli tratti "congruenti" di dromocrona.

Secondo il metodo intervallo, è stata stimata la velocità intervallo delle onde sismiche, riportando in grafico il diagramma "velocità intervallo – profondità".

Di seguito, oltre ai citati diagrammi, si riportano le tabelle numeriche riepilogative contenenti: 1) i valori dei tempi letti e corretti misurati; 2) le velocità calcolate, per ciascun intervallo di profondità, sia delle onde P che delle onde S; 3) la profondità, la distanza e le altre caratteristiche geometriche del sistema di ricezione.

I siti di energizzazione sono stati posizionati nei pressi del perforo ed i segnali sismici sono stati acquisiti posizionando il geofono da pozzo a passi di un metro e vincolando lo stesso alle pareti del perforo mediante espansione di un sistema di pistoni.

Di seguito, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

- tracce sismiche delle onde P ed S registrate alle diverse quote stazione;
- determinazione dei tempi di arrivo delle onde P ed S;
- determinazione della velocità di propagazione delle onde P ed S, per ogni metro di profondità;
- determinazione dei valori dei moduli elastici¹ ovvero del coefficiente di Poisson (ν) e dei parametri elastici G, E, K.

¹ Il valore dei pesi di volume (o gamma naturale), è stato attribuito in base alle prove di laboratorio.

3.4.1 S2-DH

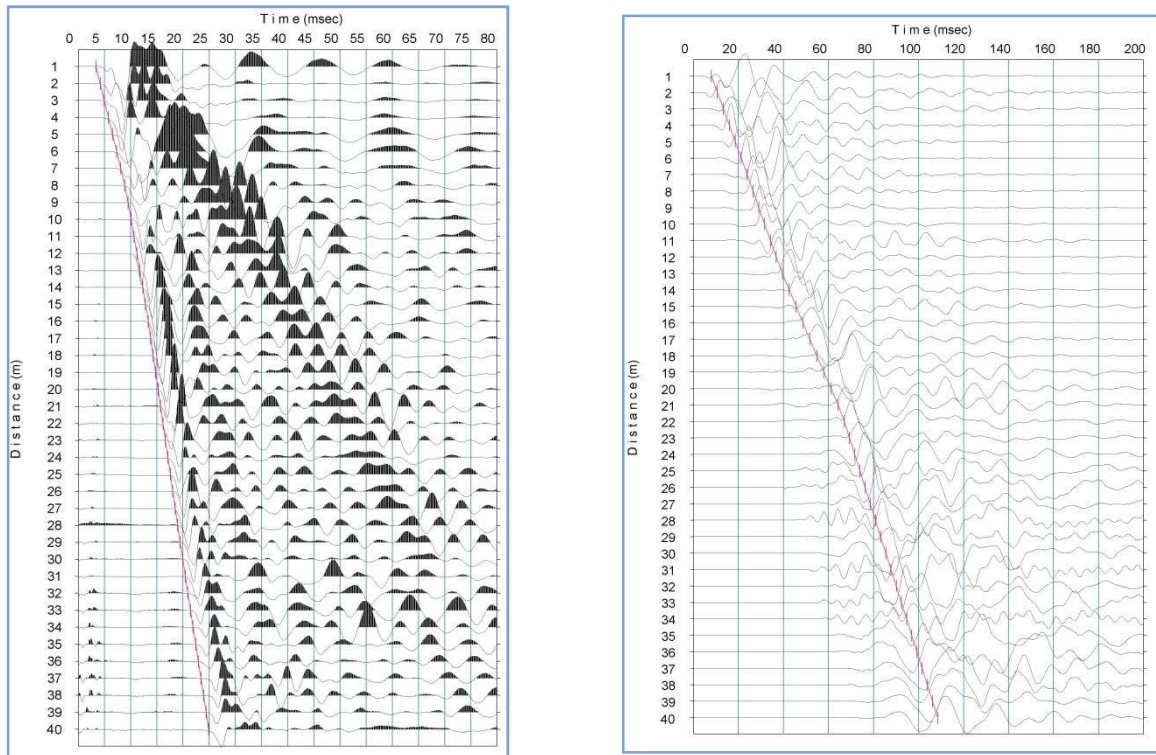


Fig. 3.4.1 - Sismogramma onde P (a sinistra), sismogramma onde SHA ed SHB (a destra).

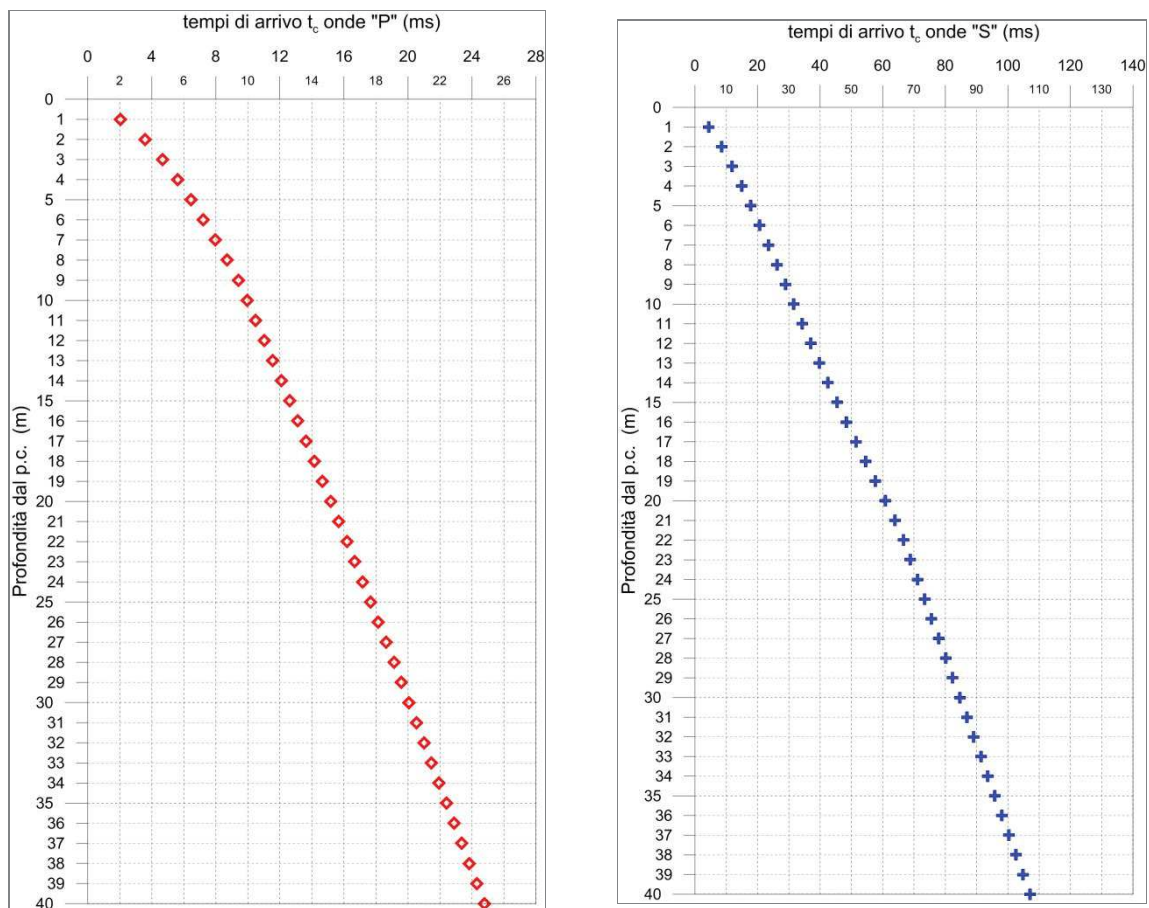


Fig. 3.4.2 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

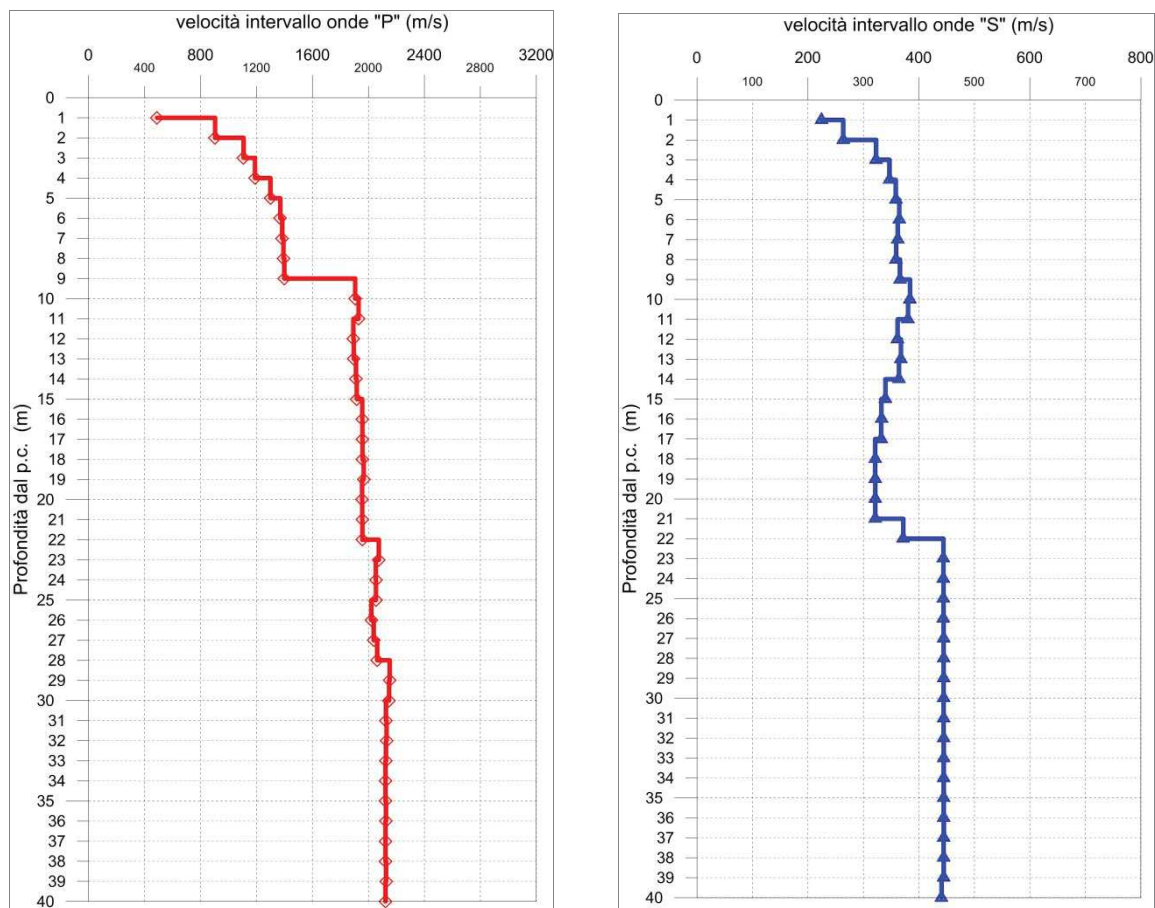


Fig. 3.4.3 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t ₀ "P" (ms)	tempi osservati t ₀ "S" (ms)	tempi corretti t _c "P" (ms)	tempi corretti t _c "S" (ms)	velocità intervallo Vp (m/s)	velocità intervallo Vs (m/s)	Vp/Vs	Poisson (n)	γ _n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	3,69	8,03	2,05	4,46	488	224	2,2	0,37	1,80	91	248	308
2	4,46	10,68	3,57	8,54	904	264	3,4	0,45	1,80	125	363	1303
3	5,23	13,32	4,68	11,92	1107	323	3,4	0,45	1,80	188	545	1955
4	6,01	15,97	5,62	14,95	1190	347	3,4	0,45	1,80	217	630	2258
5	6,74	18,62	6,45	17,83	1300	358	3,6	0,46	1,80	231	674	2733
6	7,44	21,26	7,22	20,63	1370	365	3,8	0,46	1,80	239	699	3058
7	8,14	23,96	7,96	23,42	1384	362	3,8	0,46	1,80	235	689	3132
8	8,85	26,69	8,70	26,23	1392	359	3,9	0,46	1,80	232	679	3181
9	9,55	29,38	9,42	28,98	1398	366	3,8	0,46	1,80	241	705	3199
10	10,07	31,95	9,96	31,60	1905	384	5,0	0,48	1,85	273	807	6351
11	10,58	34,56	10,49	34,24	1929	380	5,1	0,48	1,85	268	792	6529
12	11,11	37,30	11,02	37,01	1892	362	5,2	0,48	1,94	254	751	6609
13	11,63	40,00	11,56	39,74	1895	368	5,2	0,48	1,94	262	776	6616
14	12,15	42,73	12,08	42,49	1911	364	5,2	0,48	1,93	256	758	6709
15	12,67	45,66	12,61	45,43	1917	340	5,6	0,48	1,93	222	660	6793
16	13,18	48,65	13,12	48,44	1955	332	5,9	0,49	1,93	213	633	7096
17	13,69	51,65	13,64	51,45	1957	332	5,9	0,49	1,93	213	632	7104
18	14,20	54,76	14,15	54,57	1957	321	6,1	0,49	1,93	199	591	7130
19	14,71	57,86	14,66	57,68	1966	321	6,1	0,49	1,93	199	592	7194
20	15,22	60,96	15,17	60,79	1955	321	6,1	0,49	1,93	199	592	7111
21	15,73	64,07	15,69	63,90	1956	321	6,1	0,49	1,93	199	592	7115
22	16,24	66,75	16,20	66,60	1956	372	5,3	0,48	1,93	267	790	7029
23	16,72	69,00	16,68	68,85	2074	444	4,7	0,48	2,06	406	1199	8323
24	17,20	71,25	17,17	71,11	2053	444	4,6	0,48	2,06	406	1199	8144
25	17,69	73,49	17,66	73,36	2054	444	4,6	0,48	2,06	406	1199	8147
26	18,18	75,74	18,15	75,61	2021	444	4,5	0,47	2,06	407	1199	7870
27	18,67	77,99	18,64	77,87	2038	444	4,6	0,48	2,06	407	1200	8010
28	19,16	80,23	19,13	80,12	2063	444	4,6	0,48	2,06	407	1200	8225
29	19,62	82,48	19,59	82,37	2152	444	4,8	0,48	2,06	407	1202	8999
30	20,09	84,73	20,06	84,62	2148	444	4,8	0,48	2,06	407	1202	8960
31	20,56	86,98	20,53	86,87	2125	444	4,8	0,48	2,06	407	1202	8760
32	21,02	89,22	21,00	89,13	2130	444	4,8	0,48	2,06	407	1202	8801
33	21,49	91,47	21,47	91,38	2125	445	4,8	0,48	2,06	407	1203	8763
34	21,97	93,72	21,94	93,63	2121	445	4,8	0,48	2,06	407	1203	8725
35	22,44	95,96	22,42	95,88	2121	445	4,8	0,48	2,06	407	1203	8726
36	22,91	98,21	22,89	98,13	2126	445	4,8	0,48	2,06	407	1203	8766
37	23,38	100,46	23,36	100,38	2121	445	4,8	0,48	2,06	408	1204	8727
38	23,85	102,71	23,83	102,63	2121	444	4,8	0,48	2,06	407	1202	8728
39	24,32	104,95	24,30	104,88	2126	445	4,8	0,48	2,06	407	1204	8768
40	24,79	107,22	24,77	107,14	2122	441	4,8	0,48	2,06	400	1183	8739

Tab. 3.4.1 – Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S2-DH. Riepilogo dei valori dei tempi di arrivo delle onde P ed S, dei valori delle velocità intervallo delle onde P ed S e dei moduli dinamici.

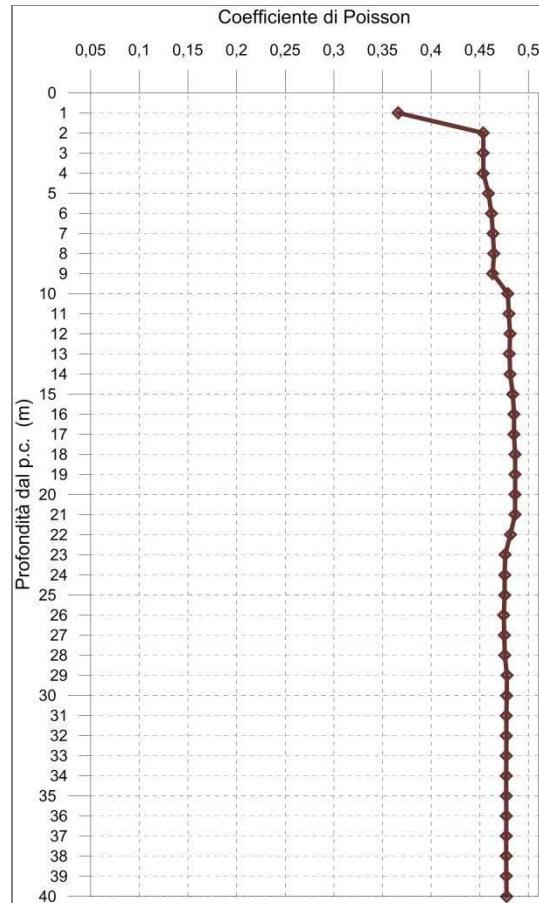


Fig. 3.4.4 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

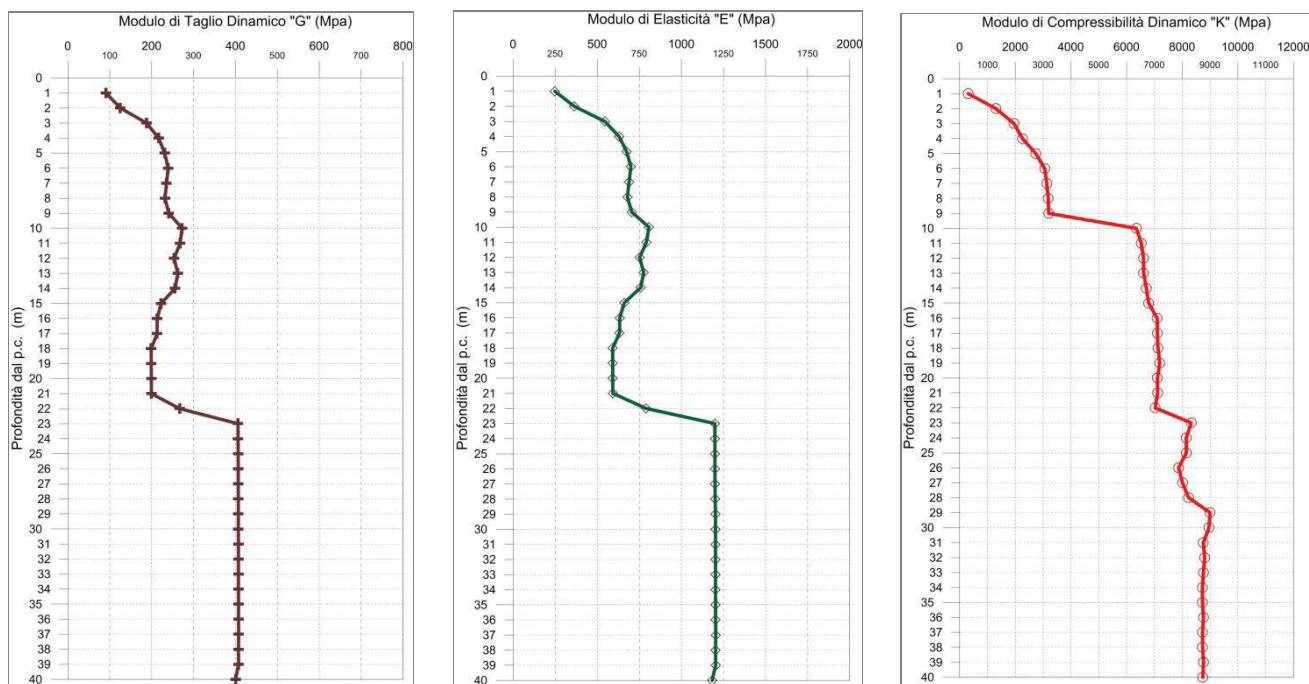


Fig. 3.4.5 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

L'elaborazione della prospezione down-hole ha permesso di suddividere il sottosuolo in n.4 sismostrati aventi le seguenti caratteristiche:

Sismostrato	Profondità dal p.c. (m)		V _P m/s	V _S m/s
	da	a		
1°	1,0	9,0	1.085	326
2°	9,0	11,0	1.887	379
3°	11,0	22,0	1.931	339
4°	22,0	40,0	2.101	444

Tab. 3.4.2 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S2-DH. Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

3.4.2 S15-DH

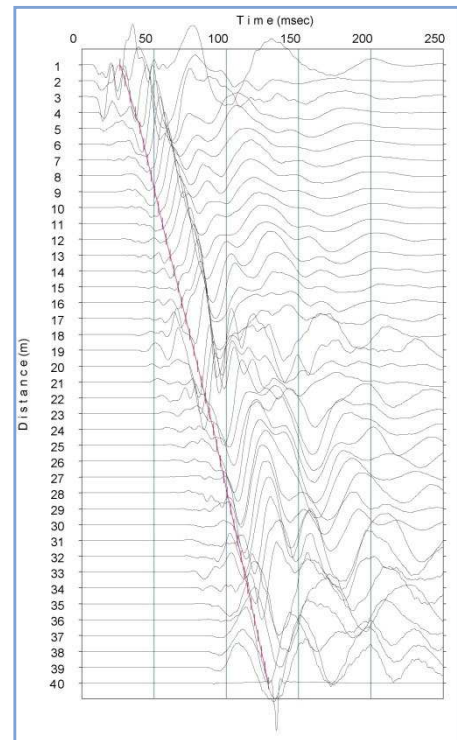
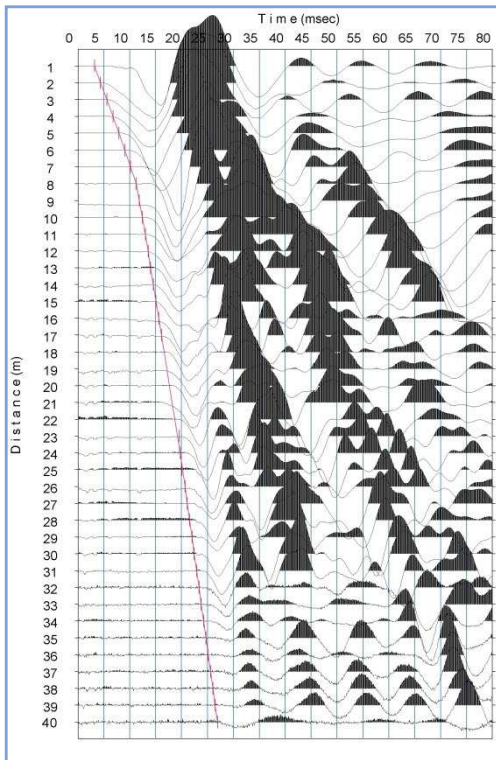


Fig. 3.4.6 - Sismogramma onde P (a sinistra), sismogramma onde SHA ed SHB (a destra).

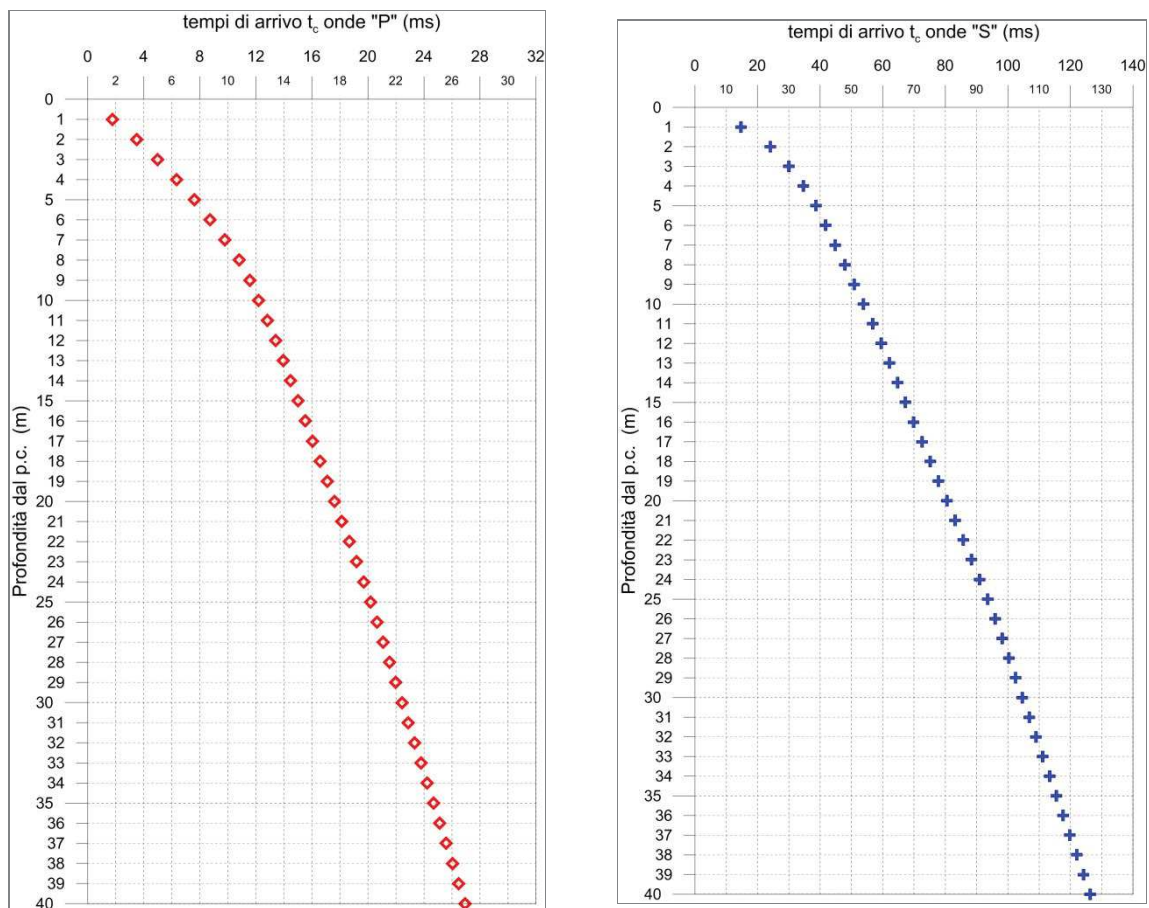


Fig. 3.4.7 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

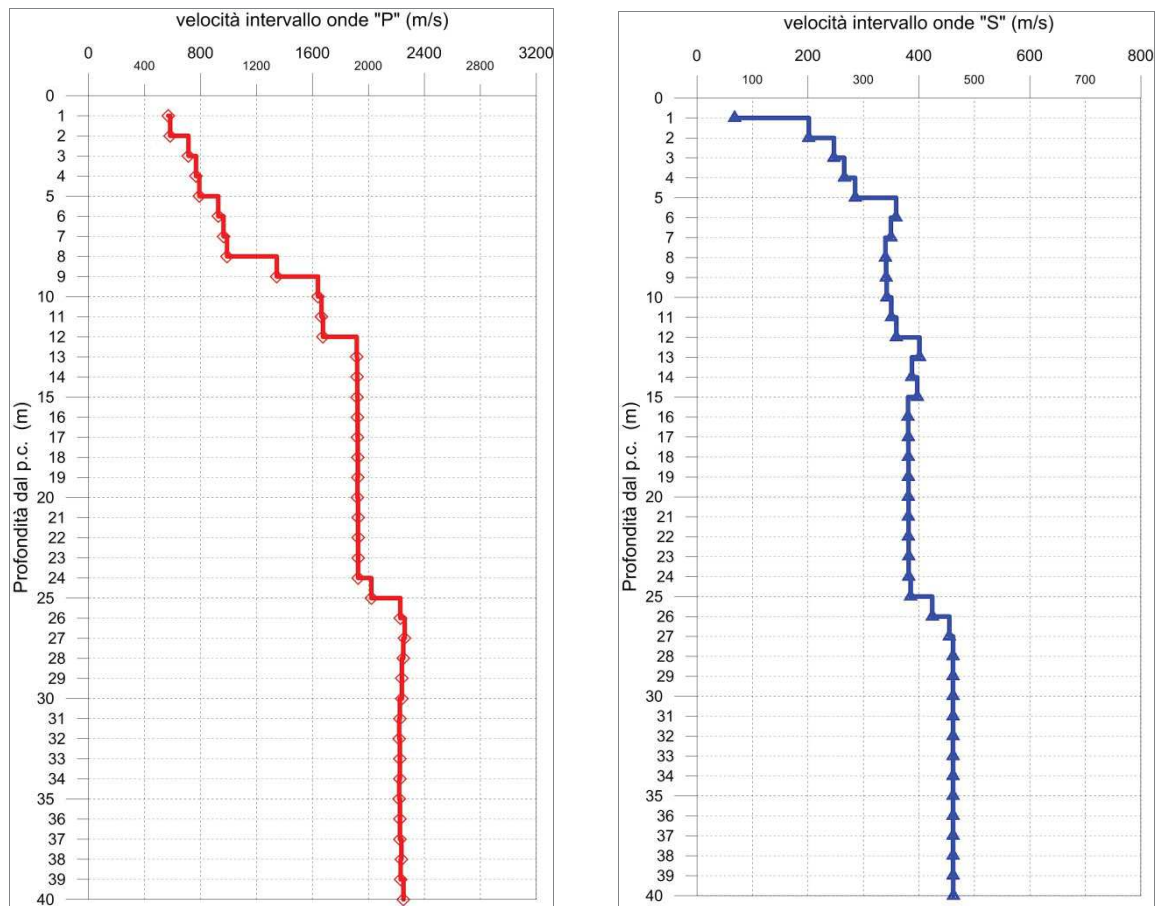


Fig. 3.4.8 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t ₀ "P" (ms)	tempi osservati t ₀ "S" (ms)	tempi corretti t _c "P" (ms)	tempi corretti t _c "S" (ms)	velocità intervallo Vp (m/s)	velocità intervallo Vs (m/s)	Vp/Vs	Poisson (n)	γ _n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	3,17	26,64	1,76	14,77	569	68	8,4	0,49	1,80	8	25	571
2	4,37	30,09	3,49	24,08	583	202	2,9	0,43	1,80	73	209	513
3	5,56	33,55	4,98	30,01	714	247	2,9	0,43	1,80	110	314	770
4	6,76	37,01	6,33	34,66	767	265	2,9	0,43	1,80	127	363	890
5	7,96	40,34	7,62	38,64	791	285	2,8	0,43	1,80	146	417	931
6	9,00	43,03	8,73	41,74	927	359	2,6	0,41	1,70	219	618	1168
7	10,01	45,81	9,79	44,80	964	349	2,8	0,42	1,70	208	591	1302
8	11,00	48,70	10,81	47,87	989	340	2,9	0,43	1,70	196	562	1402
9	11,73	51,59	11,58	50,89	1344	341	3,9	0,47	1,70	198	579	2808
10	12,34	54,48	12,20	53,88	1639	342	4,8	0,48	1,70	199	588	4302
11	12,93	57,31	12,81	56,78	1665	350	4,8	0,48	1,70	208	615	4433
12	13,52	60,07	13,42	59,60	1675	359	4,7	0,48	1,70	219	648	4477
13	14,04	62,54	13,95	62,13	1917	401	4,8	0,48	1,85	297	878	6400
14	14,56	65,11	14,48	64,74	1919	387	5,0	0,48	1,85	277	821	6441
15	15,08	67,62	15,00	67,28	1920	397	4,8	0,48	1,85	291	861	6433
16	15,60	70,23	15,53	69,93	1922	380	5,1	0,48	1,85	268	792	6474
17	16,11	72,85	16,05	72,57	1923	381	5,1	0,48	1,85	268	793	6481
18	16,63	75,47	16,57	75,20	1923	381	5,1	0,48	1,85	268	794	6487
19	17,15	78,08	17,10	77,84	1924	381	5,1	0,48	1,85	268	794	6492
20	17,67	80,70	17,62	80,47	1921	381	5,0	0,48	1,85	269	795	6469
21	18,19	83,31	18,14	83,10	1925	381	5,1	0,48	1,85	269	795	6499
22	18,71	85,93	18,66	85,73	1926	381	5,1	0,48	1,85	269	796	6503
23	19,22	88,55	19,18	88,36	1926	381	5,1	0,48	1,85	269	796	6505
24	19,74	91,16	19,70	90,99	1927	381	5,1	0,48	1,85	269	796	6508
25	20,24	93,76	20,20	93,59	2021	385	5,2	0,48	1,85	274	813	7187
26	20,68	96,11	20,65	95,95	2228	424	5,3	0,48	2,06	370	1097	9735
27	21,13	98,30	21,09	98,15	2259	455	5,0	0,48	2,06	427	1262	9942
28	21,57	100,47	21,54	100,32	2249	462	4,9	0,48	2,06	439	1297	9833
29	22,02	102,63	21,99	102,49	2239	461	4,9	0,48	2,06	439	1297	9743
30	22,46	104,80	22,43	104,66	2239	462	4,9	0,48	2,06	439	1297	9744
31	22,91	106,96	22,88	106,83	2224	462	4,8	0,48	2,06	439	1297	9608
32	23,36	109,12	23,33	109,00	2220	462	4,8	0,48	2,06	439	1297	9565
33	23,81	111,29	23,78	111,17	2225	461	4,8	0,48	2,06	439	1296	9612
34	24,26	113,45	24,23	113,34	2225	462	4,8	0,48	2,06	439	1297	9612
35	24,71	115,62	24,69	115,51	2220	462	4,8	0,48	2,06	439	1297	9568
36	25,16	117,78	25,14	117,68	2225	462	4,8	0,48	2,06	439	1298	9615
37	25,61	119,94	25,58	119,85	2225	462	4,8	0,48	2,06	439	1298	9615
38	26,05	122,11	26,03	122,01	2235	462	4,8	0,48	2,06	439	1298	9708
39	26,50	124,27	26,48	124,18	2230	462	4,8	0,48	2,06	439	1298	9663
40	26,95	126,44	26,93	126,35	2251	462	4,9	0,48	2,06	439	1298	9849

Tab. 3.4.3 – Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S15-DH. Riepilogo dei valori dei tempi di arrivo delle onde P ed S, dei valori delle velocità intervallo delle onde P ed S e dei moduli dinamici.

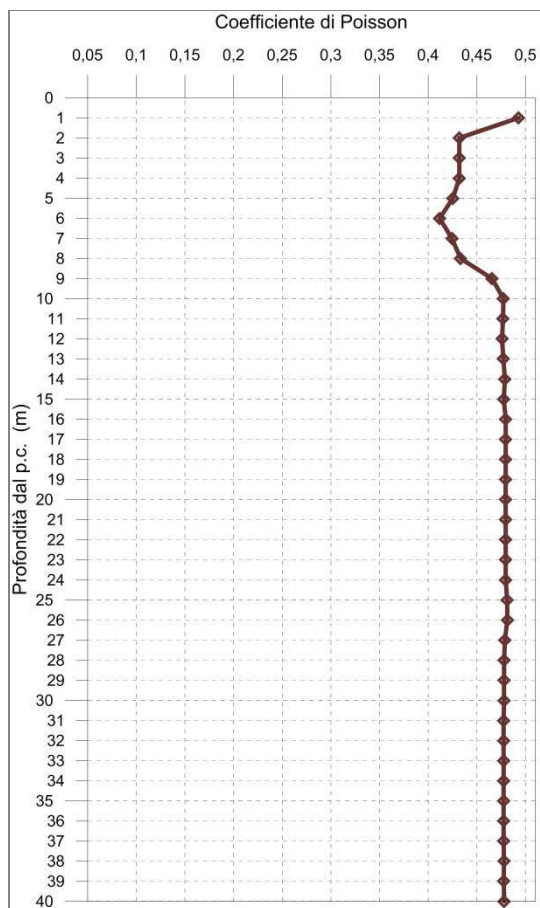


Fig. 3.4.9 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

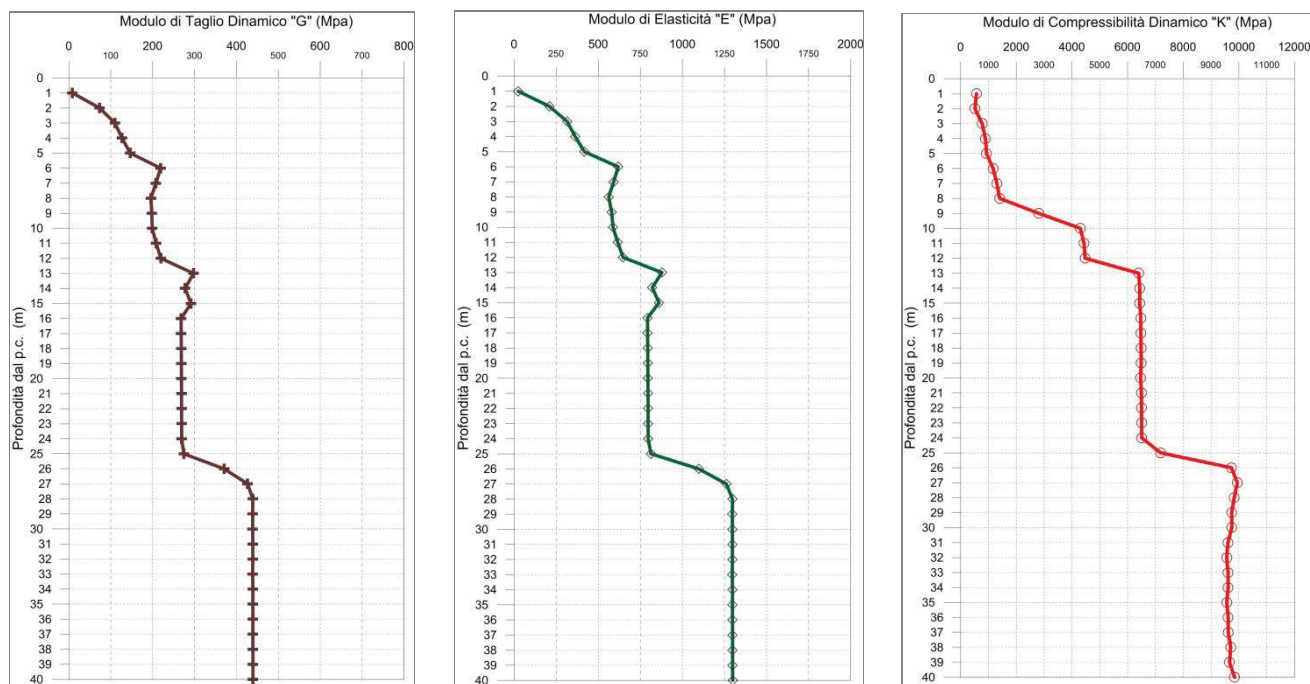


Fig. 3.4.10 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

L'elaborazione della prospezione down-hole ha permesso di suddividere il sottosuolo in n.4 sismostrati aventi le seguenti caratteristiche:

Sismostrato	Profondità dal p.c. (m)		V _P m/s	V _S m/s
	da	a		
1°	1,0	5,0	683	168
2°	5,0	12,0	1.279	336
3°	12,0	24,0	1.760	350
4°	24,0	40,0	2.389	493

Tab. 3.4.4 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S15-DH. Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

3.4.3 S20-DH

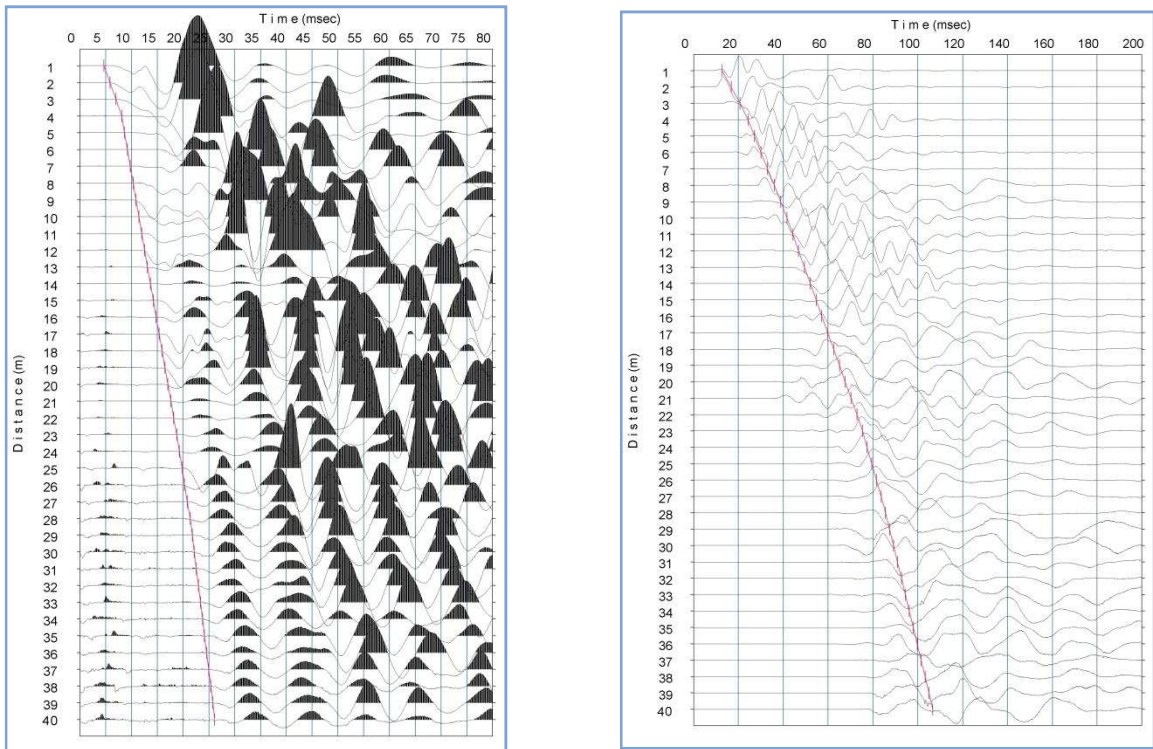


Fig. 3.4.11 - Sismogramma onde P (a sinistra), sismogramma onde SHA ed SHB (a destra).

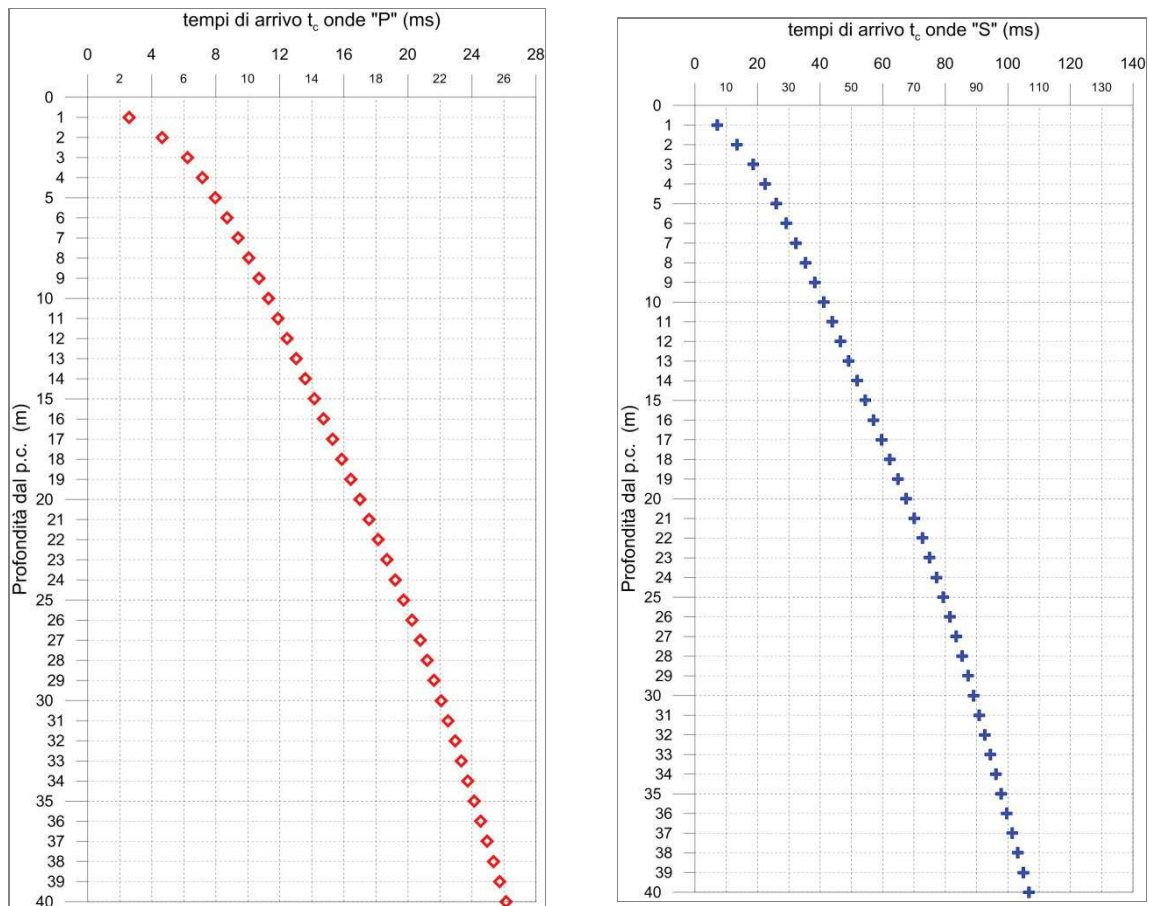


Fig. 3.4.12 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

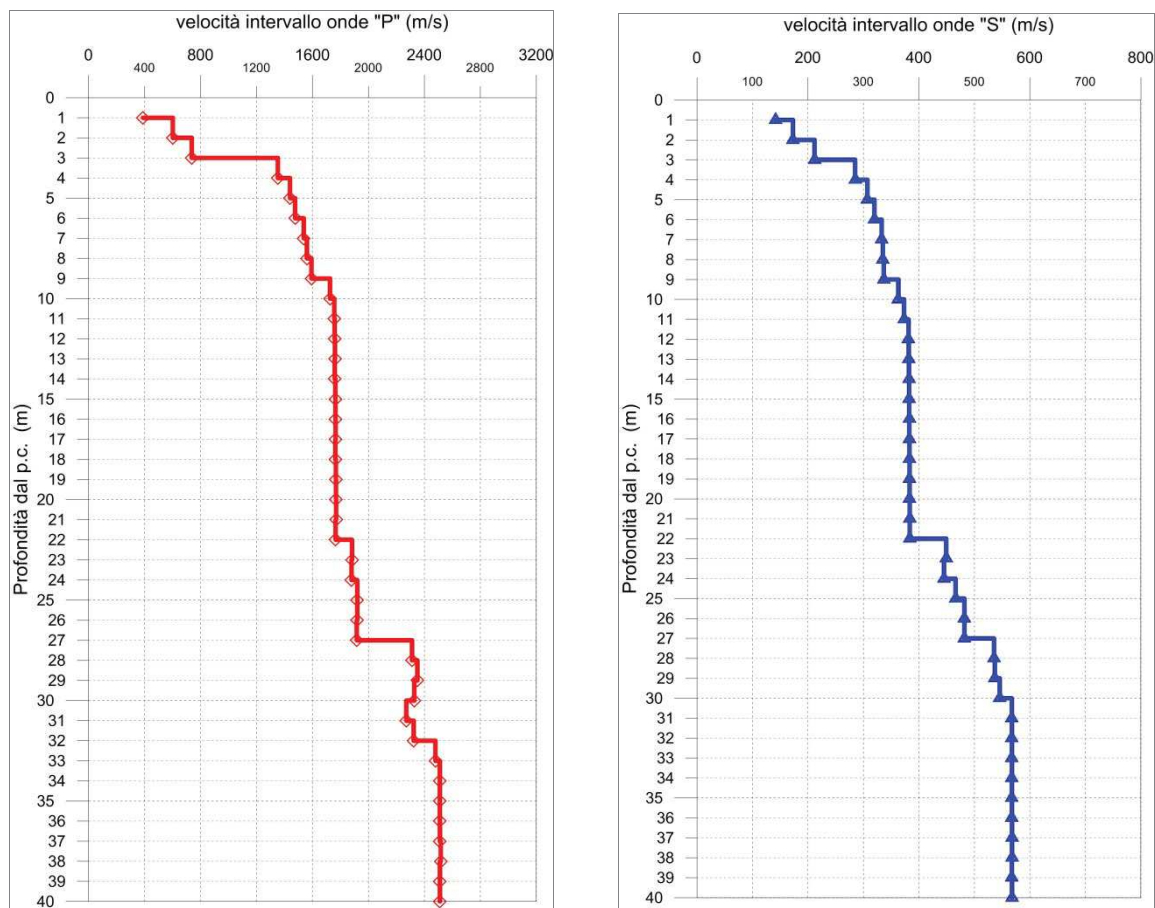


Fig. 3.4.13 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t ₀ "P" (ms)	tempi osservati t ₀ "S" (ms)	tempi corretti t _c "P" (ms)	tempi corretti t _c "S" (ms)	velocità intervallo Vp (m/s)	velocità intervallo Vs (m/s)	Vp/Vs	Poisson (n)	γ _n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	4,65	12,74	2,58	7,07	387	142	2,7	0,42	1,70	34	97	210
2	5,81	16,77	4,65	13,42	602	173	3,5	0,45	1,70	51	148	547
3	6,97	20,80	6,24	18,60	737	212	3,5	0,45	1,70	76	222	821
4	7,65	24,02	7,16	22,49	1352	285	4,7	0,48	1,80	146	432	3096
5	8,31	27,10	7,96	25,96	1440	307	4,7	0,48	1,80	170	502	3505
6	8,96	30,12	8,70	29,22	1476	320	4,6	0,48	1,80	184	543	3675
7	9,60	33,05	9,38	32,31	1538	333	4,6	0,48	1,80	200	589	3991
8	10,23	35,97	10,05	35,36	1560	335	4,7	0,48	1,80	202	596	4112
9	10,84	38,90	10,70	38,37	1592	337	4,7	0,48	1,80	204	602	4290
10	11,42	41,62	11,29	41,16	1725	363	4,8	0,48	1,85	244	720	5182
11	11,98	44,27	11,87	43,87	1756	373	4,7	0,48	1,85	258	761	5357
12	12,54	46,87	12,45	46,51	1758	381	4,6	0,48	1,85	269	793	5360
13	13,11	49,48	13,02	49,15	1760	382	4,6	0,48	1,85	269	795	5374
14	13,67	52,08	13,60	51,78	1759	382	4,6	0,48	1,85	270	797	5364
15	14,24	54,68	14,17	54,41	1764	382	4,6	0,48	1,85	270	798	5394
16	14,80	57,28	14,74	57,03	1765	383	4,6	0,48	1,85	271	799	5401
17	15,37	59,88	15,31	59,65	1766	383	4,6	0,48	1,85	271	800	5407
18	15,93	62,48	15,87	62,27	1763	383	4,6	0,48	1,85	271	801	5391
19	16,49	65,08	16,44	64,88	1767	383	4,6	0,48	1,85	272	801	5416
20	17,06	67,69	17,01	67,50	1768	383	4,6	0,48	1,85	272	802	5419
21	17,62	70,29	17,58	70,11	1768	383	4,6	0,48	1,85	272	802	5422
22	18,19	72,89	18,14	72,72	1766	383	4,6	0,48	1,85	272	803	5404
23	18,72	75,11	18,68	74,95	1883	449	4,2	0,47	1,64	331	973	5371
24	19,25	77,35	19,21	77,20	1879	445	4,2	0,47	1,64	325	956	5360
25	19,77	79,49	19,73	79,35	1919	466	4,1	0,47	1,64	356	1046	5568
26	20,29	81,57	20,25	81,43	1920	482	4,0	0,47	1,64	381	1116	5537
27	20,81	83,64	20,78	83,51	1916	482	4,0	0,47	1,64	381	1117	5515
28	21,24	85,50	21,21	85,38	2311	535	4,3	0,47	2,07	593	1746	10268
29	21,67	87,36	21,64	87,25	2350	537	4,4	0,47	2,07	596	1757	10633
30	22,10	89,19	22,07	89,08	2328	546	4,3	0,47	2,07	616	1813	10397
31	22,54	90,95	22,51	90,85	2270	567	4,0	0,47	2,07	666	1955	9778
32	22,97	92,71	22,94	92,61	2323	567	4,1	0,47	2,07	667	1957	10281
33	23,37	94,47	23,34	94,38	2479	567	4,4	0,47	2,07	667	1963	11830
34	23,77	96,23	23,74	96,14	2510	568	4,4	0,47	2,07	667	1964	12153
35	24,16	97,99	24,14	97,91	2510	568	4,4	0,47	2,07	667	1964	12154
36	24,56	99,76	24,54	99,67	2510	568	4,4	0,47	2,07	667	1965	12155
37	24,96	101,52	24,94	101,43	2510	568	4,4	0,47	2,07	667	1966	12156
38	25,36	103,28	25,34	103,19	2517	568	4,4	0,47	2,07	667	1966	12223
39	25,76	105,04	25,74	104,96	2511	567	4,4	0,47	2,07	666	1964	12159
40	26,15	106,80	26,13	106,72	2511	568	4,4	0,47	2,07	667	1966	12159

Tab. 3.4.5 – Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S20-DH. Riepilogo dei valori dei tempi di arrivo delle onde P ed S, dei valori delle velocità intervallo delle onde P ed S e dei moduli dinamici.

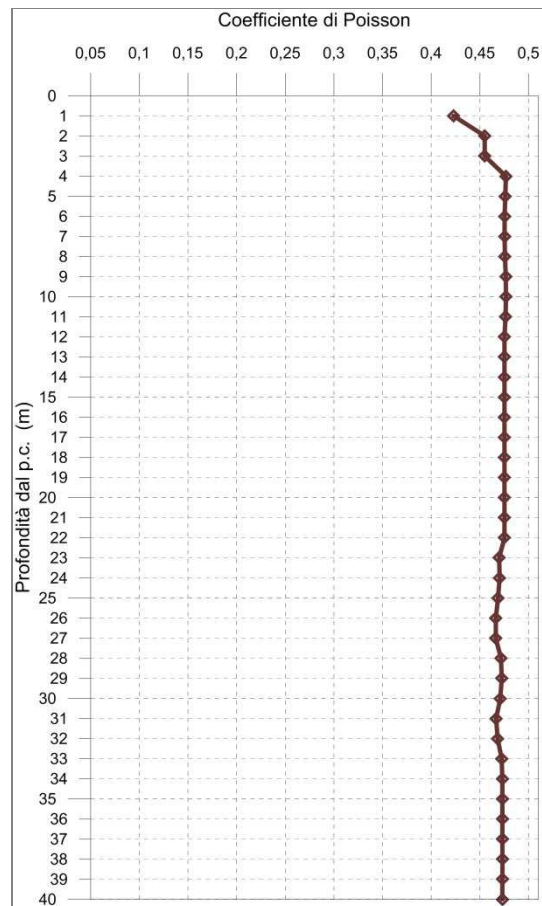


Fig. 3.4.14 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

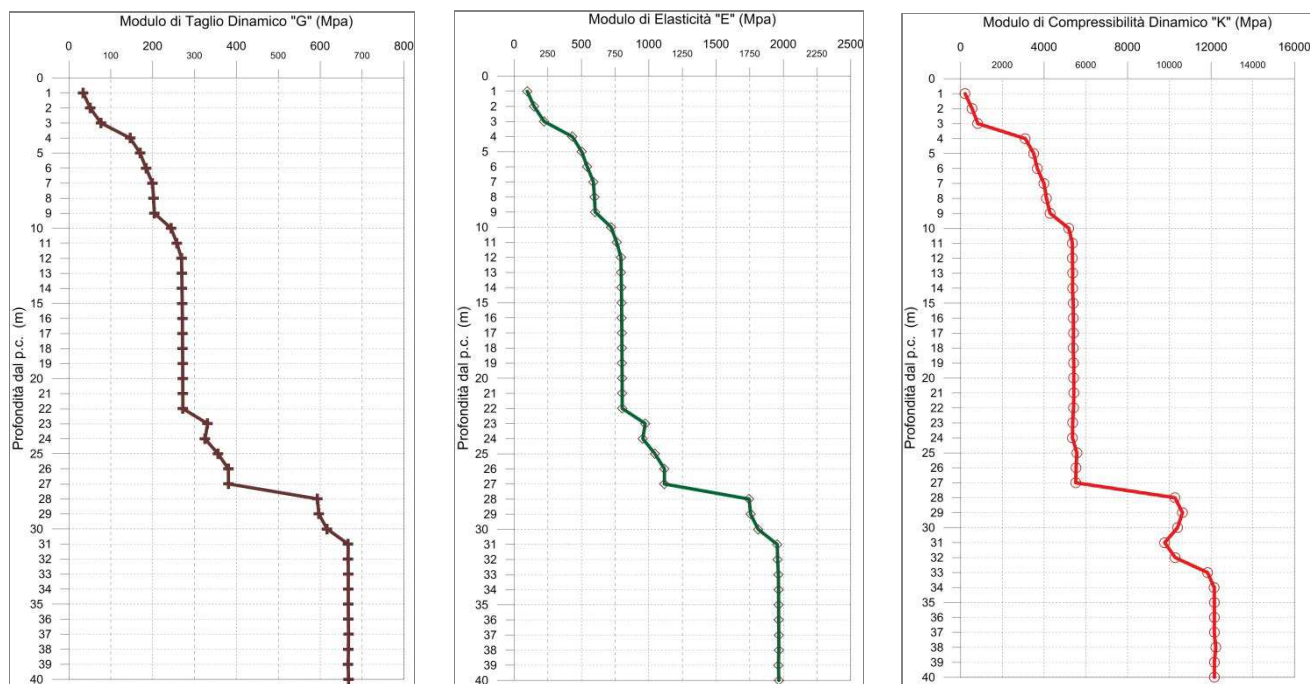


Fig. 3.4.15 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

L'elaborazione della prospezione down-hole ha permesso di suddividere il sottosuolo in n.5 sismostrati aventi le seguenti caratteristiche:

Sismostrato	Profondità dal p.c. (m)		V _P m/s	V _S m/s
	da	a		
1°	1,0	3,0	546	173
2°	3,0	9,0	1.412	315
3°	9,0	22,0	1.752	380
4°	22,0	27,0	1.905	467
5°	27,0	40,0	2.439	562

Tab. 3.4.6 - Tangenziale di Lucca. Indagine down-hole S20-DH. Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

3.5 DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO $V_{S,eq}$

Al fine di classificare il sottosuolo da un punto di vista sismico nonché per definire l'azione sismica di progetto e l'effetto della risposta sismica locale, la normativa europea (EUROCODICE 8) e quelle italiane, dall'OPCM 3274/2003 sino alle recenti "Norme Tecniche per le Costruzioni", approvate con Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018, adottano, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili a determinate categorie, un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S .

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s) è definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$ 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 V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

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 $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Mediante le risultanze scaturite dalle prospezioni geofisiche descritte nel presente elaborato, l'elaborazione dei dati ha permesso di calcolare i seguenti valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$:

Codice indagine	Valore $V_{s,eq}$
S2-DH	359 m/s
S15-DH	312 m/s
S20-DH	345 m/s

Tab. 3.5.1 – Tangenziale di Lucca. Tabella riepilogativa del valore $V_{s,eq}$.