

Asse stradale di collegamento tra gli svincoli di Prato Est e Prato Ovest – "Declassata di Prato"  
Raddoppio di Viale Leonardo da Vinci nel tratto compreso tra Via Marx e Via Nenni mediante la realizzazione di un sottopasso

PROGETTO DEFINITIVO

COD. FI463

PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:

MANDANTI:

RAGGRUPPAMENTO



MATILDI+PARTNERS

TEMPORANEO PROGETTISTI

IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Ing. Andrea Renso – TECHNITAL  
Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2413

IL PROGETTISTA:

**GRUPPO DI PROGETTAZIONE:**  
COORDINAMENTO PROGETTAZIONE, PROGETTAZIONE STRADALE, GEOTECNICA ED OPERE IN SOTTERRANEO:  
Ing. Marcello Mancone – POLITECNICA  
ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5723

IL GEOLOGO:

Geol. Pietro Accolti Gil – POLITECNICA  
Ordine Geologi Regione Toscana n° 728

**STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE:**  
Arch. Paola Gabrielli – POLITECNICA  
ordine Architetti Provincia di Bologna n. 2921

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Marcello Mancone – POLITECNICA  
ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5723

**CANTIERIZZAZIONE E FASI ESECUTIVE:**  
Ing. Alessio Gori – POLITECNICA  
ordine ingegneri Provincia di Firenze n.5969

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO:

Ing. Raffaele Franco Carso

**IDROLOGIA ED IDRAULICA:**  
Ing. Alessandro Cecchelli – POLITECNICA  
ordine ingegneri Provincia di Grosseto n.760

PROTOCOLLO:

DATA:

**COLLABORATORI DI PROGETTO:**  
Ing. Massimo Palermo – POLITECNICA  
Arch. Valentina Iaia – POLITECNICA  
Geom. Franco Mariotti – POLITECNICA  
Geom. Angela Pantiferi – POLITECNICA

02 – GEOLOGIA, GEOTECNICA E SISMICA  
02.01 – Indagini geognostiche e ambientali  
Relazione indagini geofisiche

CODICE PROGETTO

NOME FILE

PROGR. ELAB.

REV.

SCALA:

PROGETTO

LIV. PROG.

N. PROG.

02.06\_P00\_GEO0\_GEO\_RE05\_A

02.06

DPFI10 D 1901

CODICE ELAB. P00GEO0GEORE05

A

-

D						
C						
B						
A	EMISSIONE	12/2019	POLITECNICA	S.TRONCONI	M.MANCONE	A.RENSO
REV.	DESCRIZIONE	DATA	SOCIETA'	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

# DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



**PROJECT:**

Asse stradale di collegamento tra gli svincoli di Prato Est e Prato Ovest – Raddoppio di viale Leonardo da Vinci (“Declassata di Prato”) nel tratto compreso tra Via Marx e Via Nenni mediante la realizzazione di un sottopasso. Progetto definitivo

**LOCATION:**

via Leonardo da Vinci - Comune di Prato (PO)

**CLIENT:**

ANAS S.P.A.

**OBJECT:**

INDAGINI GEOFISICHE



**Tecno In Ref.:** R.C. 160/18  
**Revision n.:** 00  
**Date:** dicembre 2018  
**Description:** emissione

**Redacted by:** Dr. Geol. Luca Dubbiosi  
**Reviewed by:** Dr. Geol. Giovanni Antonucci  
**Approved by:** Dr. Geol. Lucio Amato  
**Document code:** 160\_18\_ANAS CQ - Prato - INDAGINI GEOFISICHE

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INDAGINI DOWN-HOLE</b>	<b>3</b>
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	3
2.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	6
2.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	7
2.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE	10
2.4.1	S01_DH	11
2.4.2	S05_DH	16
2.5	DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO $V_{S,EQ}$	21
	<b>ALLEGATO</b>	<b>22</b>

## 1 PREMESSA

La presente relazione geofisica fa parte della documentazione inerente l'affidamento dei servizi di indagine geognostica e geofisica propedeutici alla realizzazione del "Raddoppio di viale Leonardo da Vinci, nel tratto stradale tra gli svincoli di Prato est e Prato ovest".

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

- n.2 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 ( $V_{s,eq}$ ).

L'opera in progetto ricade nel comune di Prato (PO).

Le indagini in oggetto sono state effettuate nel mese di novembre 2018.

## 2 INDAGINI DOWN-HOLE

### 2.1 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. 2.1.1).

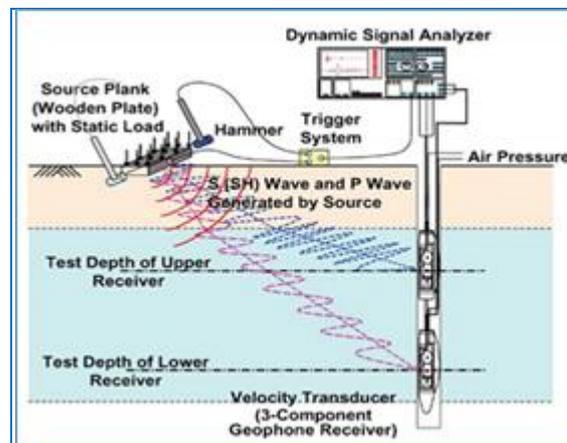


Fig. 2.1.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

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 ( $\nu$ )**, **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. 2.1.2), in cui, si osserva distintamente il primo arrivo dell'onda di compressione.

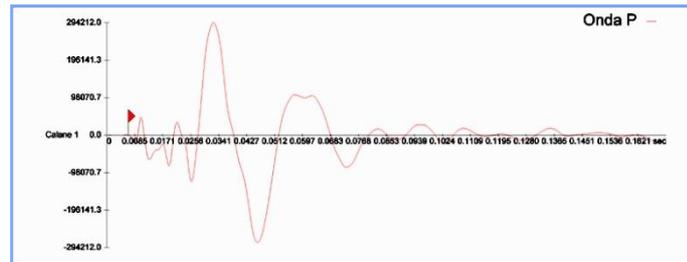


Fig. 2.1.2 - Esempio di onda P e di lettura del primo tempo di arrivo.

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. 2.1.3).

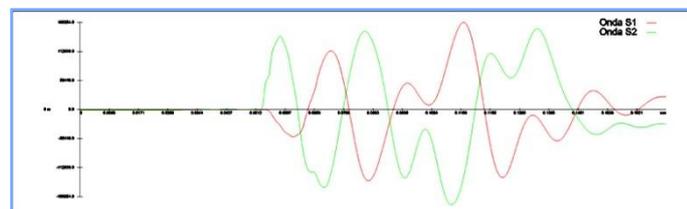


Fig. 2.1.3 - Esempio di onda S e di inversione di fase necessaria per l'individuazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio (onda SH).

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.

## 2.2 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 "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 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, 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.
- 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.2** prospezioni sismiche in foro tipo "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) p.c.
So1_DH	35	1667449,838	4859849,114	51,22
So5_DH	35	1667883,470	4859516,087	50,61

*Tab. 2.3.1 – Raddoppio di viale Leonardo da Vinci - Proto. Indagini sismiche down-hole. Elenco coordinate.*

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 riportano le schede con la descrizione degli orizzonti stratigrafici, rinvenuti nei perfori investigati dalle prove down-hole. Per quanto concerne, invece, la documentazione fotografica, si rimanda all'allegato presente in calce alla relazione.

Per quanto concerne la documentazione fotografica inerente le prove sismiche e le attività di prospezione geofisica eseguite in campo, si rimanda alle schede allegate.

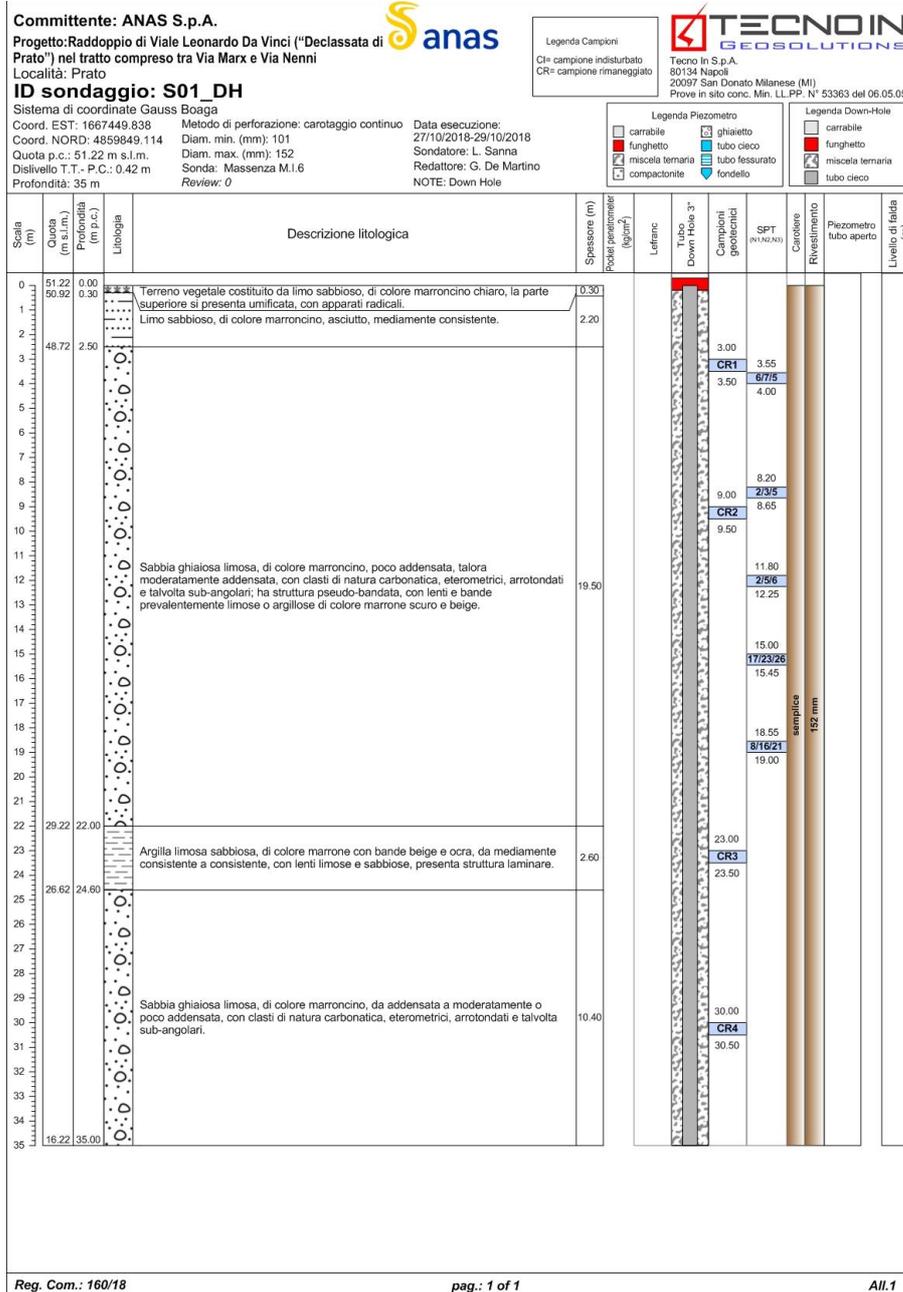


Fig. 2.3.1 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Stratigrafia del sondaggio So1\_DH.

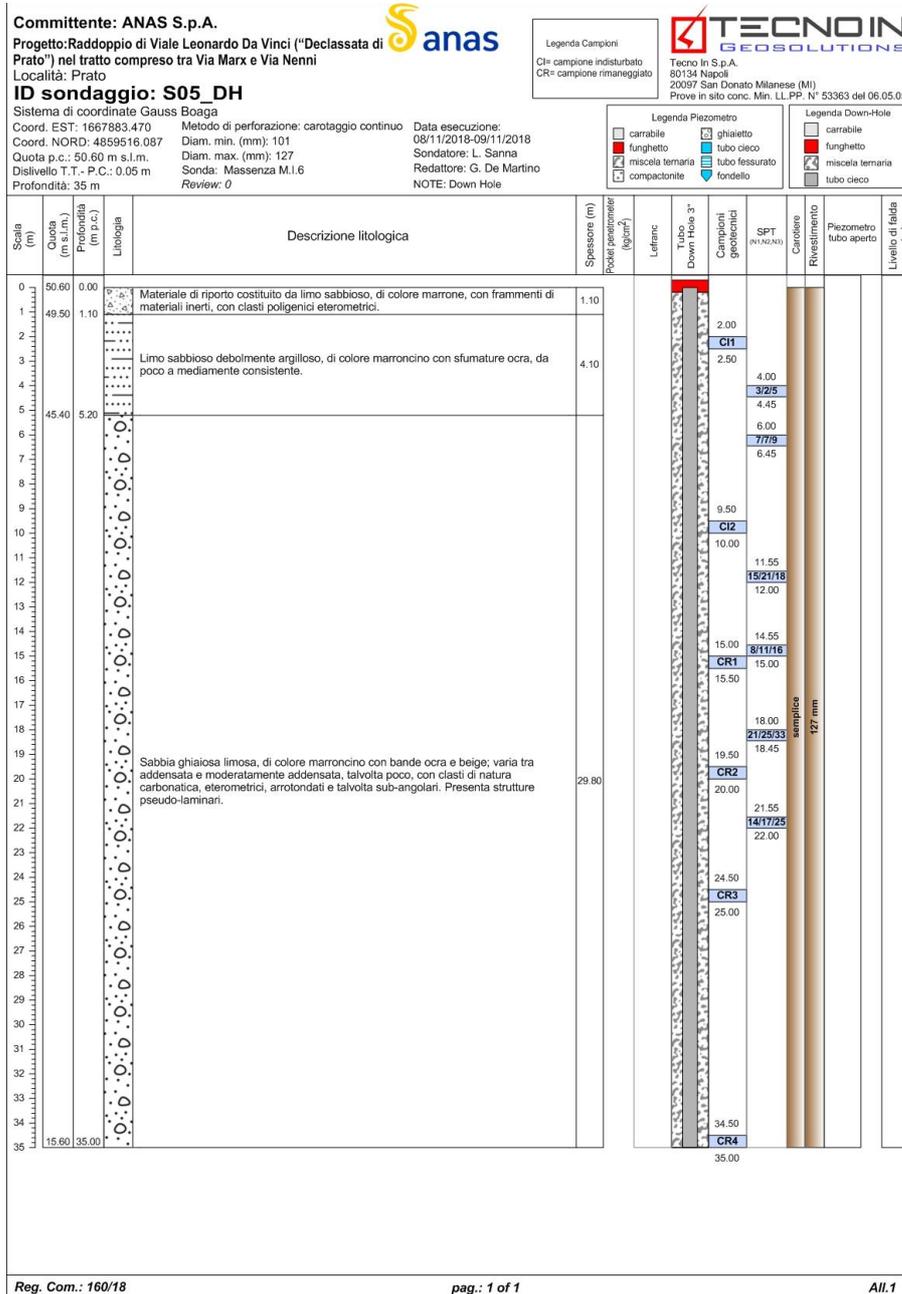


Fig. 2.3.2 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Stratigrafia del sondaggio S05\_DH.

#### 2.4 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:

- 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 elastici<sup>1</sup> ovvero del coefficiente di Poisson ( $\nu$ ) e dei parametri elastici G, E, K.

---

<sup>1</sup> Il valore dei pesi di volume (o gamma naturale), è stato attribuito in base ai risultati delle prove di laboratorio in corso d'opera.

2.4.1 S<sub>01</sub>\_DH

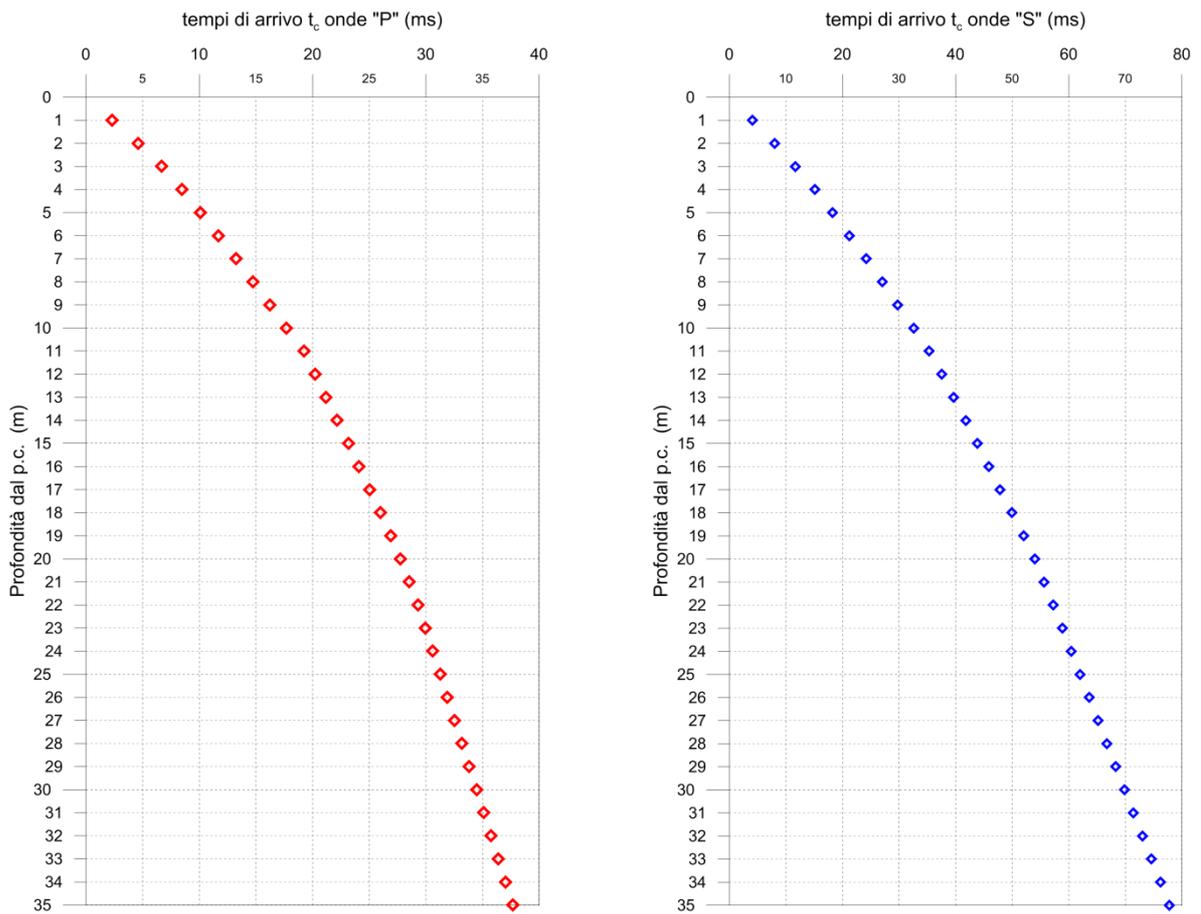


Fig. 2.4.1 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c.  
 A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

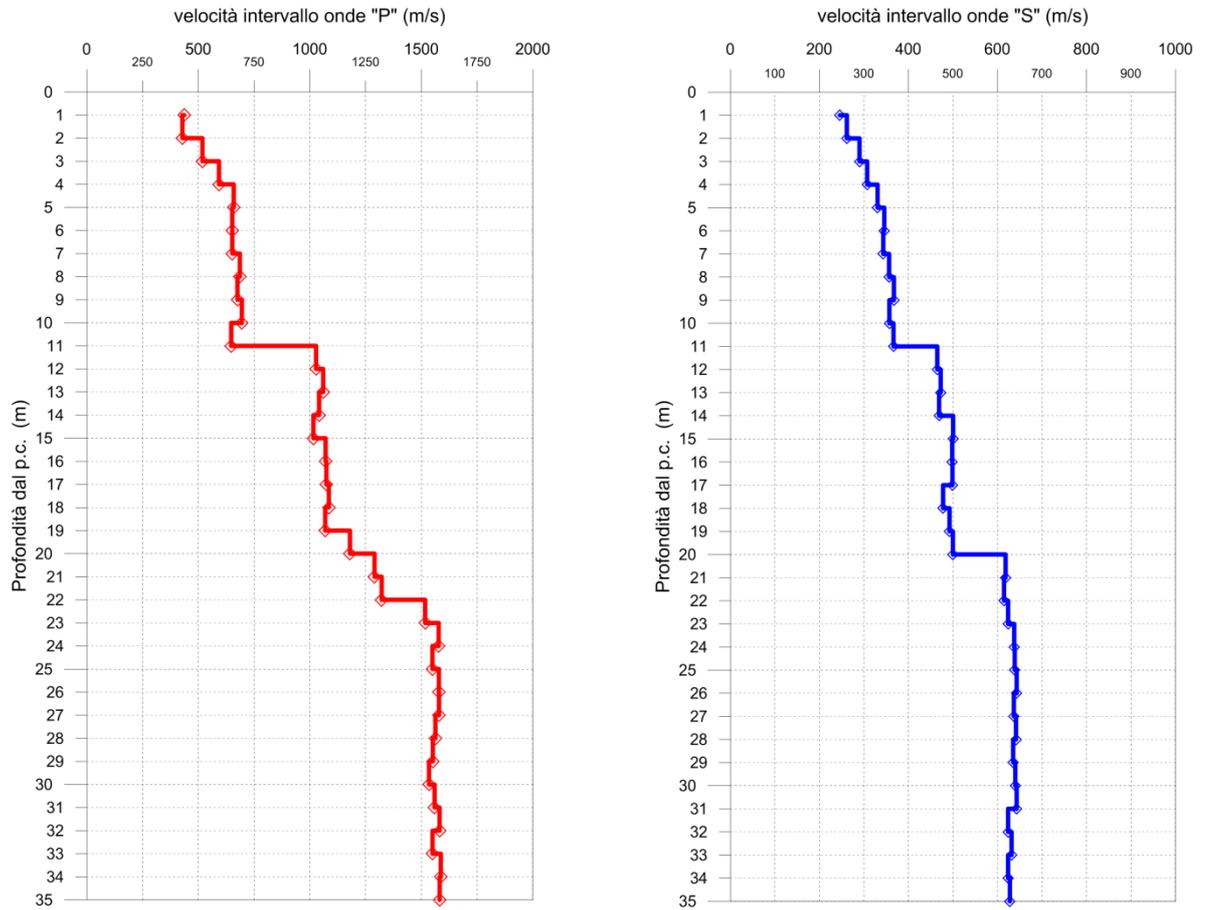


Fig. 2.4.2 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità.  
A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t <sub>o</sub> "P" (ms)	tempi osservati t <sub>o</sub> "S" (ms)	tempi corretti t <sub>c</sub> "P" (ms)	tempi corretti t <sub>c</sub> "S" (ms)	velocità intervallo Vp (m/s)	velocità intervallo Vs (m/s)	Vp/Vs	Poisson (n)	γ <sub>n</sub> gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	5.13	9.10	2.29	4.07	436	246	1.8	0.27	1.9	115	291	209
2	6.51	11.36	4.60	8.03	428	262	1.6	0.20	1.9	130	313	175
3	8.01	14.04	6.66	11.68	518	290	1.8	0.27	1.9	160	406	297
4	9.47	16.86	8.47	15.08	592	307	1.9	0.32	1.9	179	472	427
5	10.86	19.62	10.08	18.22	658	331	2.0	0.33	2.0	213	568	561
6	12.30	22.34	11.67	21.19	652	346	1.9	0.30	2.0	233	608	517
7	13.77	25.12	13.24	24.15	652	343	1.9	0.31	2.0	234	611	529
8	15.17	27.83	14.72	27.00	686	357	1.9	0.31	2.0	252	662	596
9	16.62	30.48	16.22	29.75	675	367	1.8	0.29	2.0	266	686	544
10	18.03	33.22	17.67	32.57	695	357	1.9	0.32	2.0	253	667	619
11	19.54	35.90	19.23	35.32	647	367	1.8	0.26	2.0	266	672	474
12	20.50	38.02	20.22	37.50	1028	465	2.2	0.37	2.0	425	1167	1514
13	21.43	40.11	21.18	39.64	1060	472	2.2	0.38	2.0	446	1229	1651
14	22.38	42.22	22.16	41.80	1041	469	2.2	0.37	2.0	442	1213	1590
15	23.36	44.20	23.15	43.81	1016	500	2.0	0.34	2.0	498	1335	1390
16	24.28	46.19	24.10	45.83	1070	498	2.1	0.36	2.0	492	1339	1612
17	25.21	48.18	25.04	47.85	1074	499	2.2	0.36	2.0	498	1356	1642
18	26.13	50.26	25.97	49.95	1085	478	2.3	0.38	2.0	459	1266	1756
19	27.05	52.28	26.91	51.99	1069	492	2.2	0.37	2.0	482	1317	1632
20	27.90	54.27	27.76	54.00	1180	500	2.4	0.39	2.0	495	1376	2095
21	28.67	55.88	28.54	55.63	1290	618	2.1	0.35	2.0	764	2065	2308
22	29.42	57.50	29.30	57.26	1322	615	2.2	0.36	2.0	748	2038	2462
23	30.08	59.10	29.97	58.87	1517	624	2.4	0.40	2.0	770	2154	3529
24	30.71	60.66	30.61	60.45	1577	637	2.5	0.40	2.0	809	2268	3873
25	31.35	62.22	31.26	62.02	1549	639	2.4	0.40	2.0	816	2282	3712
26	31.99	63.77	31.89	63.58	1578	643	2.5	0.40	2.0	831	2329	3898
27	32.62	65.34	32.53	65.16	1579	637	2.5	0.40	2.0	811	2276	3903
28	33.26	66.89	33.17	66.72	1562	642	2.4	0.40	2.0	819	2292	3765
29	33.90	68.46	33.82	68.30	1551	635	2.4	0.40	2.0	811	2271	3755
30	34.55	70.02	34.47	69.86	1534	640	2.4	0.39	2.0	816	2275	3597
31	35.19	71.57	35.12	71.42	1559	643	2.4	0.40	2.0	827	2312	3759
32	35.82	73.17	35.75	73.03	1582	624	2.5	0.41	2.0	778	2191	3965
33	36.47	74.75	36.40	74.61	1550	632	2.5	0.40	2.0	802	2247	3759
34	37.09	76.35	37.03	76.22	1587	624	2.5	0.41	2.0	786	2215	4039
35	37.73	77.94	37.66	77.81	1582	628	2.5	0.41	2.0	788	2218	3955

Tab. 2.4.1 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Indagine down-hole So1\_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.

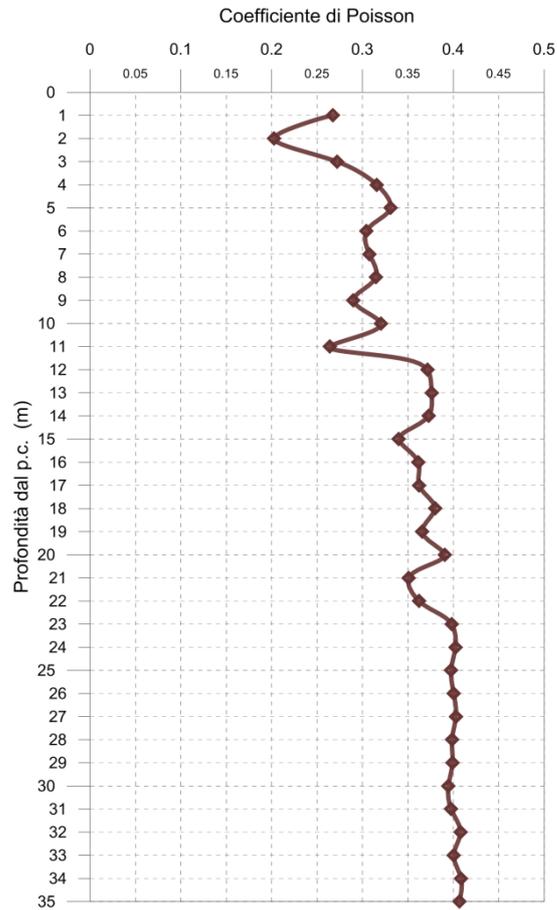


Fig. 2.4.3 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

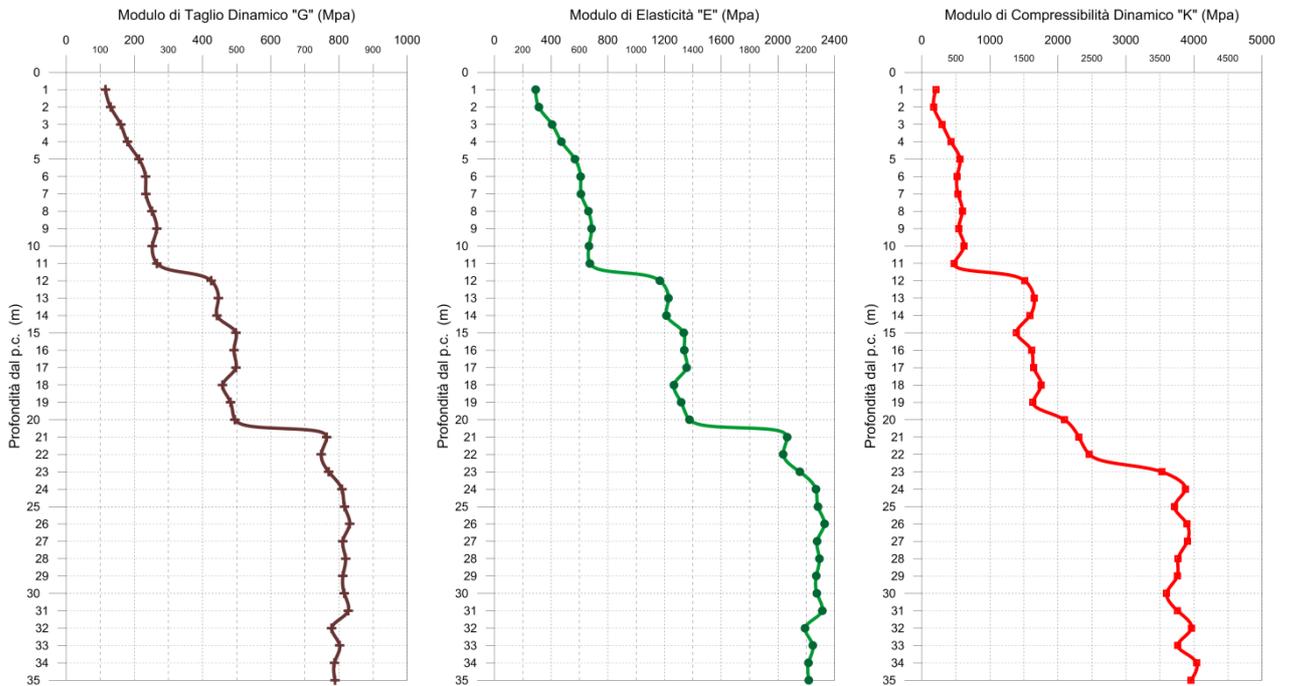


Fig. 2.4.4 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c.  
 Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c.  
 A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in 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)		$(V_P)_{medio}$ m/s	$(V_S)_{medio}$ m/s
	da	a		
1°	1,0	4,0	472	265
2°	4,0	11,0	651	346
3°	11,0	20,0	1.053	482
4°	20,0	35,0	1.515	630

Tab. 2.4.2 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Indagine down-hole So1\_DH.  
 Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

2.4.2 S05\_DH

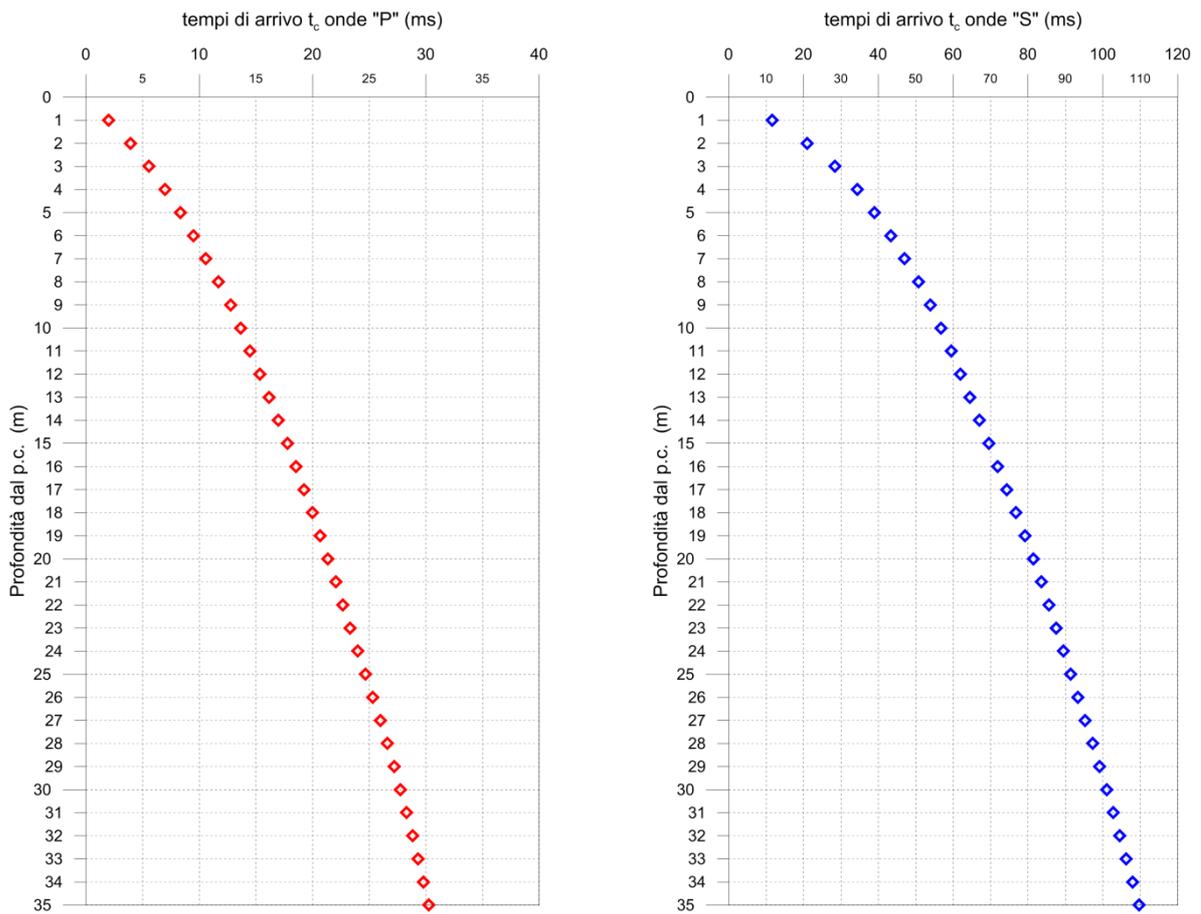


Fig. 2.4.5 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c.  
A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

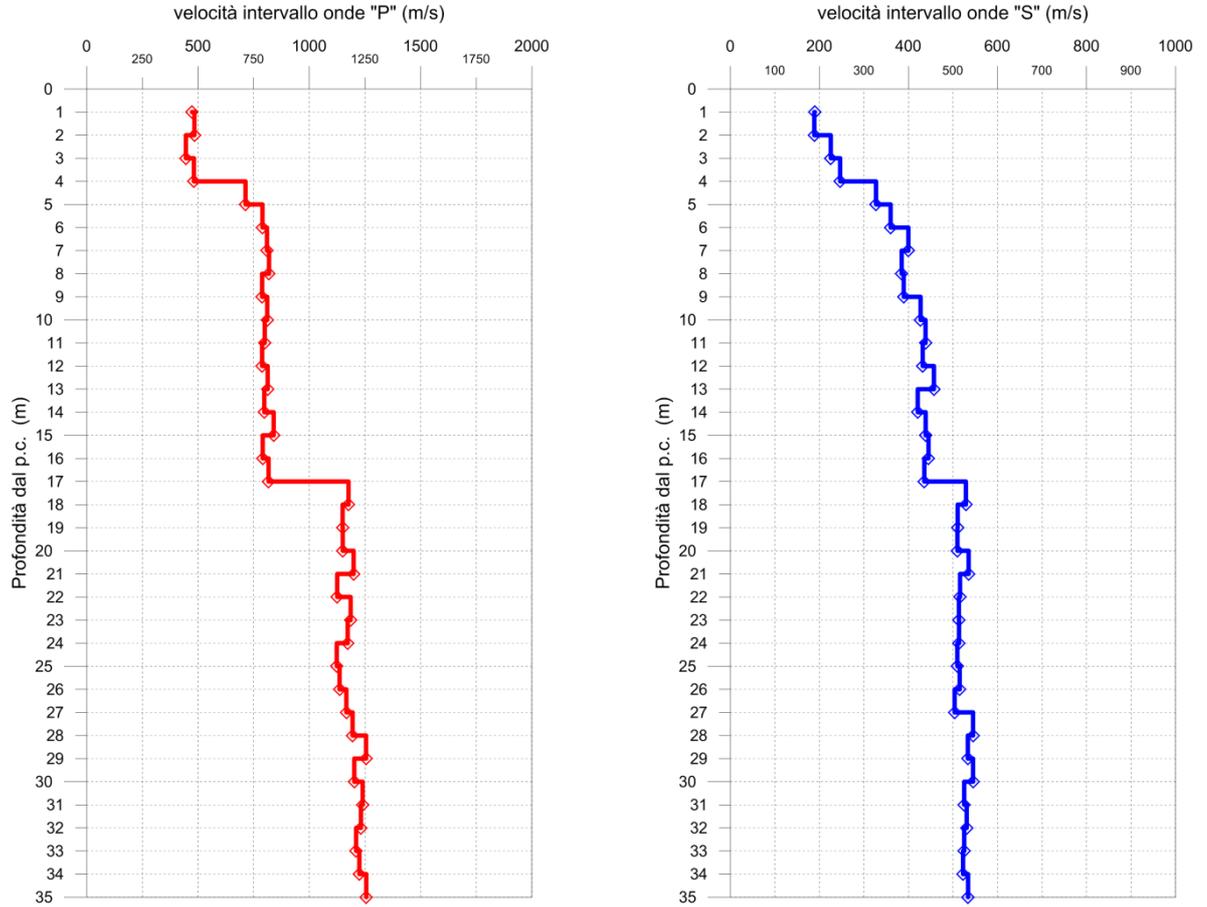


Fig. 2.4.6 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità.  
A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t <sub>o</sub> "P" (ms)	tempi osservati t <sub>o</sub> "S" (ms)	tempi corretti t <sub>c</sub> "P" (ms)	tempi corretti t <sub>c</sub> "S" (ms)	velocità intervallo V <sub>p</sub> (m/s)	velocità intervallo V <sub>s</sub> (m/s)	V <sub>p</sub> /V <sub>s</sub>	Poisson (n)	γ <sub>n</sub> gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	4.73	11.79	2.12	5.27	473	190	2.5	0.40	1.90	68	192	333
2	5.96	14.93	4.21	10.56	484	188	2.6	0.41	1.90	67	190	355
3	7.70	18.38	6.41	15.29	445	226	2.0	0.33	1.90	97	257	248
4	9.50	21.89	8.50	19.58	481	247	2.0	0.32	1.98	121	319	298
5	10.78	24.68	10.01	22.91	713	327	2.2	0.37	1.98	212	580	725
6	11.97	27.29	11.36	25.89	789	360	2.2	0.37	1.98	256	702	892
7	13.15	29.68	12.64	28.54	810	400	2.0	0.34	1.98	317	847	876
8	14.33	32.19	13.90	31.23	819	385	2.1	0.36	1.97	292	793	931
9	15.57	34.69	15.19	33.86	788	389	2.0	0.34	1.97	299	799	825
10	16.77	36.98	16.45	36.26	811	427	1.9	0.31	1.99	363	950	824
11	18.00	39.22	17.71	38.59	800	439	1.8	0.29	1.99	383	984	763
12	19.25	41.50	18.99	40.94	788	432	1.8	0.29	2.01	375	965	748
13	20.47	43.66	20.23	43.15	813	457	1.8	0.27	2.02	422	1071	771
14	21.71	46.01	21.49	45.55	798	421	1.9	0.31	2.08	369	964	832
15	22.89	48.27	22.68	47.84	840	439	1.9	0.31	2.08	400	1050	932
16	24.14	50.50	23.95	50.11	790	445	1.8	0.27	2.07	410	1040	746
17	25.36	52.77	25.18	52.41	817	436	1.9	0.30	2.06	391	1018	854
18	26.20	54.65	26.04	54.32	1176	529	2.2	0.37	2.01	562	1544	2029
19	27.07	56.60	26.92	56.29	1149	511	2.3	0.38	2.02	527	1450	1966
20	27.93	58.55	27.79	58.26	1150	510	2.3	0.38	2.00	520	1434	1951
21	28.76	60.41	28.63	60.14	1199	535	2.2	0.38	1.99	570	1568	2102
22	29.65	62.34	29.52	62.08	1125	516	2.2	0.37	1.99	530	1448	1813
23	30.49	64.28	30.37	64.04	1186	513	2.3	0.38	1.99	525	1453	2099
24	31.33	66.22	31.23	65.99	1172	514	2.3	0.38	2.01	530	1465	2055
25	32.22	68.18	32.12	67.96	1123	510	2.2	0.37	2.02	525	1439	1848
26	33.10	70.11	33.00	69.90	1136	515	2.2	0.37	2.03	539	1477	1902
27	33.96	72.09	33.86	71.89	1166	504	2.3	0.39	2.01	510	1413	2054
28	34.79	73.92	34.70	73.73	1194	545	2.2	0.37	2.00	594	1626	2061
29	35.58	75.79	35.50	75.61	1255	533	2.4	0.39	1.99	566	1574	2378
30	36.42	77.62	36.33	77.45	1202	545	2.2	0.37	2.00	594	1629	2097
31	37.22	79.52	37.14	79.36	1240	525	2.4	0.39	2.02	557	1550	2361
32	38.03	81.40	37.96	81.24	1232	531	2.3	0.39	2.05	578	1601	2342
33	38.86	83.30	38.78	83.15	1210	525	2.3	0.38	2.04	563	1558	2235
34	39.67	85.21	39.60	85.06	1225	523	2.3	0.39	2.02	552	1532	2295
35	40.47	87.08	40.40	86.94	1256	534	2.4	0.39	2.03	579	1608	2430

Tab. 2.4.3 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Indagine down-hole So<sub>5</sub>\_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.

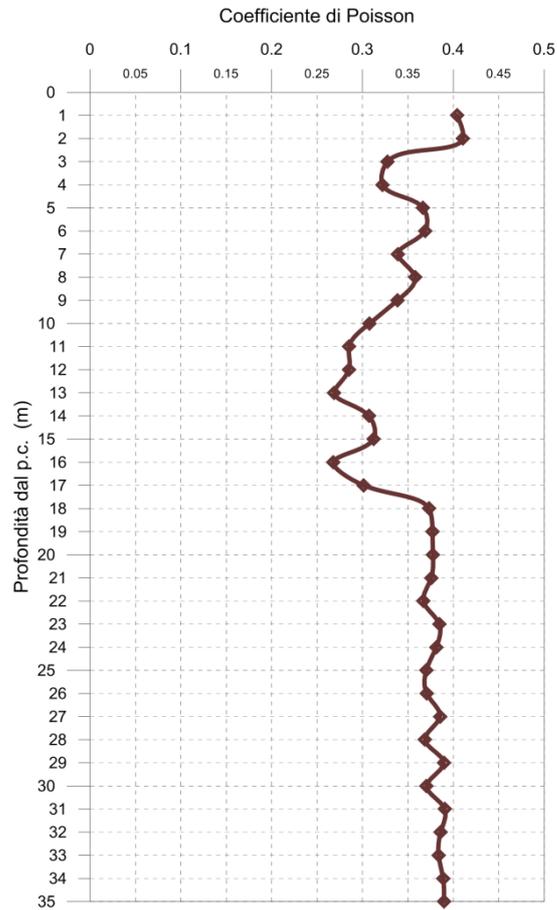


Fig. 2.4.7 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

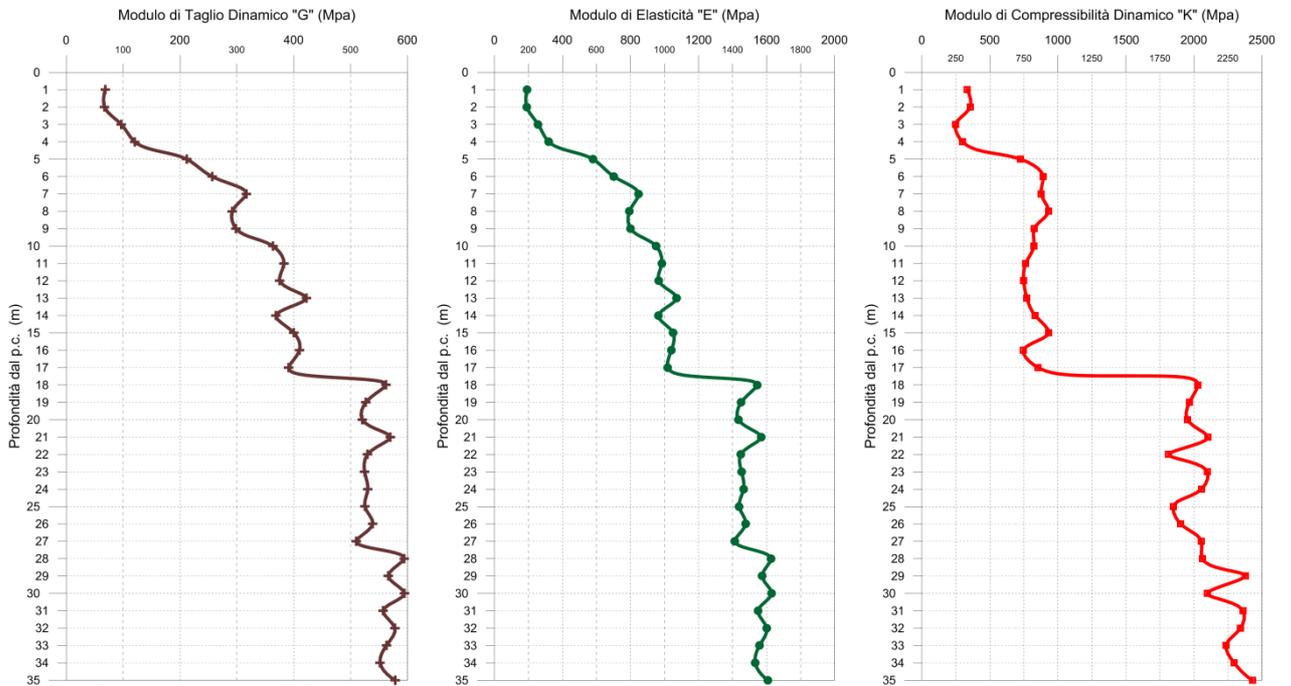


Fig. 2.4.8 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c.  
 Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c.  
 A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in 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)		$(V_P)_{\text{medio}}$ m/s	$(V_S)_{\text{medio}}$ m/s
	da	a		
1°	1,0	3,0	468	196
2°	3,0	5,0	556	262
3°	5,0	9,0	771	365
4°	9,0	17,0	801	431
5°	17,0	35,0	1.183	521

Tab. 2.4.4 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Indagine down-hole So5\_DH.  
 Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

## 2.5 DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO $V_{S,eq}$

Al fine di classificare il sottosuolo dal punto di vista sismico, nonché 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 seguente:

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

dove:

$h_i$  è lo spessore dell' $i$ -esimo strato;

$V_{S,i}$  è la velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;

$N$  rappresenta il numero di strati;

$H$  è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da valori di  $V_S$  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  $V_{S,30r}$  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 $V_{S,eq}$
So1_DH	436 m/s
So5_DH	396 m/s

Tab. 2.5.1 – Raddoppio viale Leonardo da Vinci - Prato. Tabella riepilogativa del valore  $V_{S,eq}$ .

## ALLEGATO

### DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Committente: **ANAS SPA**

Commissa: **Accordo quadro Gara DG37/16**

Oggetto: *Asse stradale di collegamento tra gli svincoli di Prato est e Prato ovest.  
Raddoppio di viale Leonardo da Vinci ("Declassata di Prato") nel tratto  
compreso tra via Marx e via Nenni*

Reg.comm.: 160/18

Località: *Prato (PO)*



**TECNO IN S.p.A.**

Via G. Marcora 52  
20097 San Donato Milanese (MI)

---

## **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**

Prova "down-hole": S01\_DH (sismica in foro)



Fase energizzazione onde P



Fase energizzazione onde SH

Committente: **ANAS SPA**

Commessa: **Accordo quadro Gara DG37/16**

Oggetto: *Asse stradale di collegamento tra gli svincoli di Prato est e Prato ovest.  
Raddoppio di via Leonardo da Vinci ("Declassata di Prato") nel tratto  
compreso tra via Marx e via Nenni*

Reg.comm.: 160/18

Località: *Prato (PO)*



**TECNO IN S.p.A.**

Via G. Marcora 52  
20097 San Donato Milanese (MI)

---

## **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**

Prova "down-hole": S05\_DH (sismica in foro)



Fase energizzazione onde P



Fase energizzazione onde SH