

S.S. 38 - LOTTO 4: VARIANTE DI TIRANO DALLO SVINCOLO DI STAZZONA (COMPRESO) ALLO SVINCOLO DI LOVERO (CON COLLEGAMENTO ALLA DOGANA DI POSCHIAVO)

**S.S. 38 - LOTTO 4: NODO DI TIRANO -
TRATTA "A" (SVINCOLO DI BIANZONE - SVINCOLO LA GANDA)
E TRATTA "B" (SVINCOLO LA GANDA - CAMPONE IN TIRANO),
AI SENSI DEL PROTOCOLLO D'INTESA DEL 05/11/2007**

PROGETTO ESECUTIVO

 STUDIO CORONA <hr/> Ing. Renato Vaira (Ordine degli Ingg. di Torino e Provincia n° 4663 W)	 Ing. Valerio Bajetti Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-26211	ING. RENATO DEL PRETE <hr/> Ing. Renato Del Prete Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5073	 Arch. Nicoletta Frattini Ordine degli Arch. di Torino e provincia n° A-8433	 Ing. Gabriele Incecchi Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-12102
	 Società designata: GA&M Prof. Ing. Matteo Ranieri Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1137	SETAC Srl Servizi & Engineering Trasporti Ambiente Costruzioni <hr/> Prof. Ing. Luigi Monterisi Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1771	ARKE' INGEGNERIA s.r.l. Via Immacolata Concezione n. 2 - 70124 Bari <hr/> Ing. Gioacchino Angarano Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5970	DOTT. GEOL. DANILLO GALLO <hr/> Dott. Geol. Danilo Gallo Ordine dei Geologi della Regione Puglia n° 588
VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO <hr/> Dott. Ing. Giancarlo LUONGO	RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  Ing. Valerio BAJETTI	GEOLOGO  Dott. Geol. Francesco AMANTIA SCUDERI	IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE  Ing. Gaetano RANIERI	

BC19

GEOLOGIA, GEOTECNICA E SISMICA

BC - GEOTECNICA

Indagini 2019 - Indagini Geofisiche

CODICE PROGETTO PROGETTO LIV. PROG. N. PROG. M 3 2 4 E 1 8 0 1		NOME FILE BC15-P00GE00GETRE05_A.dwg		REVISIONE	SCALA:
CODICE ELAB. P 0 0 G E 0 0 G E T R E 0 7		B			
C					
B	REVISIONE PER ISTRUTTORIA ANAS	FEBBRAIO 2020	DOTT.FRANCESCO AMANTIA	PROF. ING. VITTORIO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
A	EMISSIONE	LUGLIO 2019	DOTT.FRANCESCO AMANTIA	PROF. ING. VITTORIO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

**“S.S. 38 – LOTTO 4: NODO DI TIRANO
TRATTA “A” (SVINCOLO DI BIANZONE – SVINCOLO LA GANDA)
TRATTA “B” (SVINCOLO LA GANDA – CAMPONE IN TIRANO)**

**INDAGINI 2019
INDAGINI GEOFISICHE**

1. PREMESSA

Nel presente rapporto geotecnico vengono riportate le indagini eseguite nella fase di Progettazione Esecutiva

DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

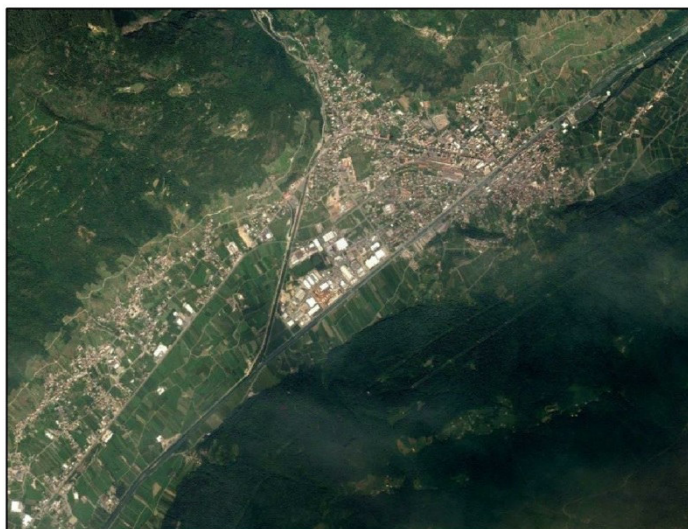


PROJECT:
Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano - Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Svincolo Campione di Tirano)"

LOCATION:
Comune di Tirano (SO)

CLIENT:
ANAS S.P.A.

OBJECT:
INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 244/18
Revision n.: 01
Date: gennaio 2019
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 - Nodo di Tirano - INDAGINI GEOFISICHE

INDICE

1	PREMESSA	3
2	INDAGINI DI TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE	4
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA	4
2.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	5
2.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	7
2.4	DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI	8
2.5	RISULTANZE DELL'INDAGINE DI TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE	9
2.5.1	BS01	10
2.5.2	BS02	13
2.5.3	BS03	16
2.5.4	BS04	19
2.5.5	BS05	22
2.5.6	BS06	25
3	INDAGINI DOWN-HOLE	28
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	28
3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	31
3.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	32
3.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE	39
3.4.1	S02_DH	40
3.4.2	S06_DH	45
3.4.3	S11_DH	50
3.5	DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO $V_{S,EQ}$	55
4	INDAGINE M.A.S.W.	56
4.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	56
4.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	58
4.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	59
4.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE MASW	59
4.4.1	MASW-1	60
4.4.2	MASW-2	64
	ALLEGATO	68

1 PREMESSA

La presente relazione fa parte della documentazione inerente l'affidamento dei servizi di indagine geognostica e geofisica propedeutici alla progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano), tra le località di Bianzone e Tirano (SO).

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

- n.6 prospezioni di tomografia sismica a rifrazione;
- n.3 indagini sismiche in foro down-hole;
- n.2 indagini sismiche di superficie M.A.S.W. (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

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

La provincia in cui ricade l'opera è Sondrio.

Le indagini in oggetto sono state effettuate tra i mesi di dicembre 2018 e gennaio 2019.

2 INDAGINI DI TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE

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, 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.

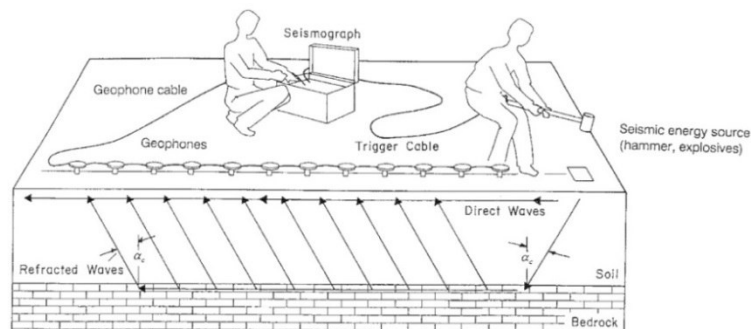


Fig. 2.1.1 - Schema esecutivo della sismica a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 - 00).

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.

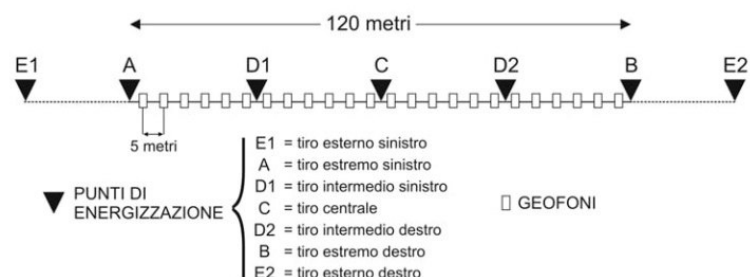


Fig. 2.1.2 - Tomografia sismica. Disposizione siti di energizzazione.

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 addizionale 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.

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 digitale **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.6** prospezioni sismiche a rifrazione la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riportano le specifiche di ciascuna prospezione:

Codice indagine	Lunghezza (m)	Sistema di riferimento GAUSS - BOAGA			
		Coordinata iniziale EST	Coordinata iniziale NORD	Coordinata finale EST	Coordinata finale NORD
BS01	115,0	1590013,825	5117716,520	1590104,495	5117785,519
BS02	115,0	1590156,893	5117827,427	1590240,387	5117904,087
BS03	115,0	1589925,574	5117621,154	1590032,422	5117657,357
BS04	115,0	1589898,114	5117621,698	1589973,792	5117701,141
BS05	115,0	1590510,424	5117968,190	1590604,700	5118026,073
BS06	115,0	1590156,008	5117935,597	1590214,806	5117836,347

Tab. 2.3.1 – Tirano (SO). Indagini di tomografia sismica a rifrazione. Elenco delle coordinate.

La quota ortometrica del piano campagna del profilo BS01, varia da 486,81 m s.l.m., nel punto iniziale, a 487,11 m s.l.m., nel punto finale.

La quota del piano campagna del profilo BS02, varia invece da 486,56 m s.l.m., nel punto iniziale, a 487,10 m s.l.m., nel punto finale.

Il profilo altimetrico della base sismica BS03, presenta una quota del piano campagna variabile da 489,91 m s.l.m., nel punto iniziale, a 494,78 m s.l.m., nel punto finale.

La quota del piano campagna del profilo BS04, varia invece da 480,99 m s.l.m., nel punto iniziale, a 481,28 m s.l.m., nel punto finale.

Per quanto riguarda il profilo BS06, la quota del piano campagna varia da 497,91 m s.l.m., nel punto iniziale, a 503,66 m s.l.m., nel punto finale.

Infine, la quota ortometrica del terreno per il profilo BS06, varia da 481,80 m s.l.m., nel punto iniziale, a 492,19 m s.l.m., nel punto finale.

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 di massa del sismografo sia su supporto esterno (pen drive).

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

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 eseguite 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 DI TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE

Le prospezioni sismiche sono state compiute posizionando al suolo una base sismica composta da 24 canali (geofoni), per una lunghezza pari a 115 m, con equispaziatura tra i geofoni di 5 m.

I dati sono stati acquisiti energizzando in corrispondenza dei siti esterni, in prossimità degli estremi, in funzione della logistica, ed in numero di tiri interni variabile ma, comunque, non inferiore a tre.

Come accennato in precedenza, i tempi di arrivo delle onde P ed SH sono stati adoperati quale input (assieme alla geometria dei tiri di energizzazione e dei geofoni) nel software di elaborazione tomografica per ottenere le relative pseudosezioni sismiche.

Queste sono riportate esprimendo i dati di velocità delle onde di compressione e di taglio calcolati mediante isolinee e campitura a falsi colori.

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 in termini di gradiente geosismico per l'individuazione dei sismostrati.

2.5.1 BS01

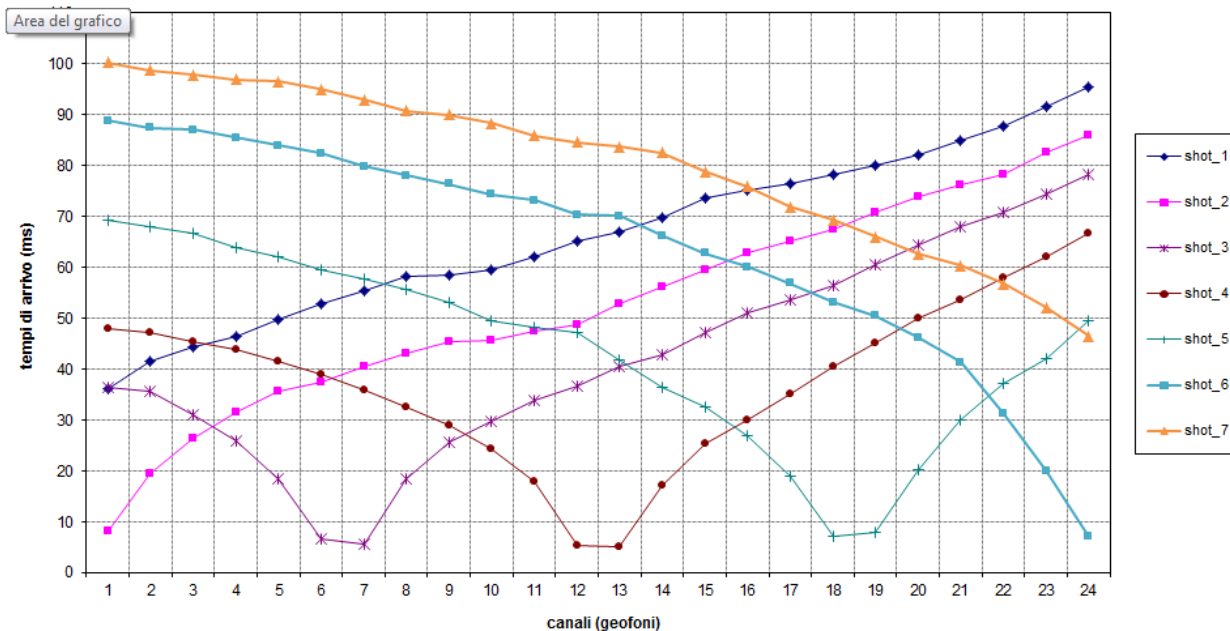


Fig. 2.5.1 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS01. Dromocrone.

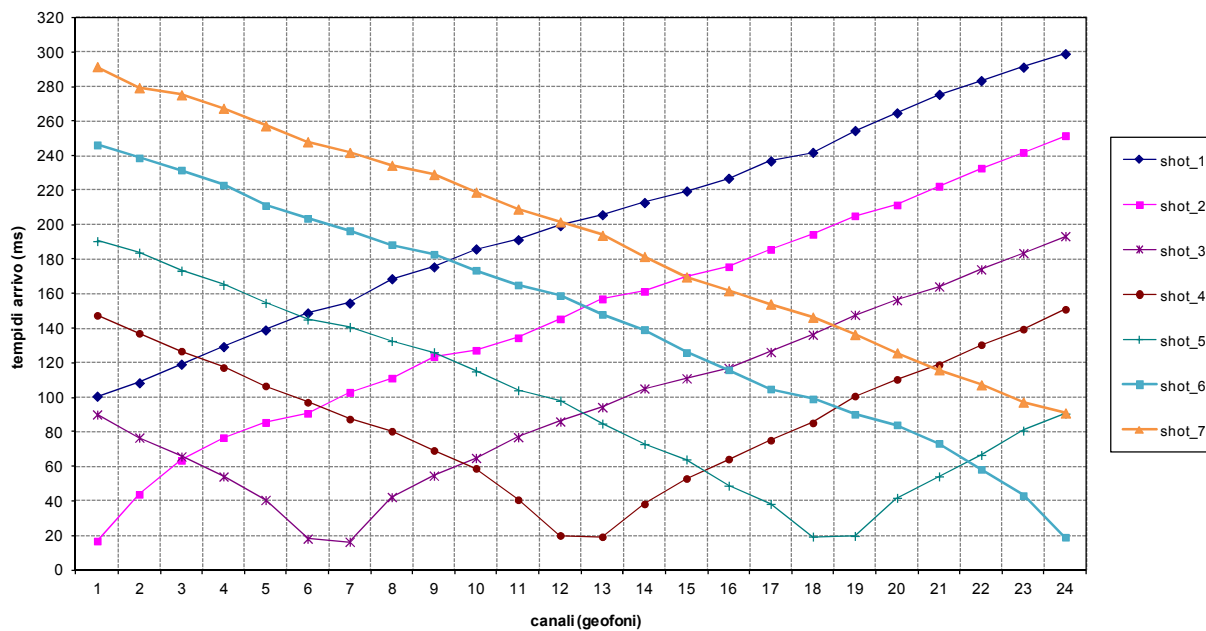


Fig. 2.5.2 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs01. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **Bs01** hanno permesso di evidenziare tre sismostrati. Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità media di 3 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 100 e 250 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 e un massimo di 22 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.000 e 1.800 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 400 e 600 m/s. Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la terza, ad una profondità variabile compresa tra un minimo di 22 e un massimo di 30 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.800 e 2.600 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 600 e 700 m/s.

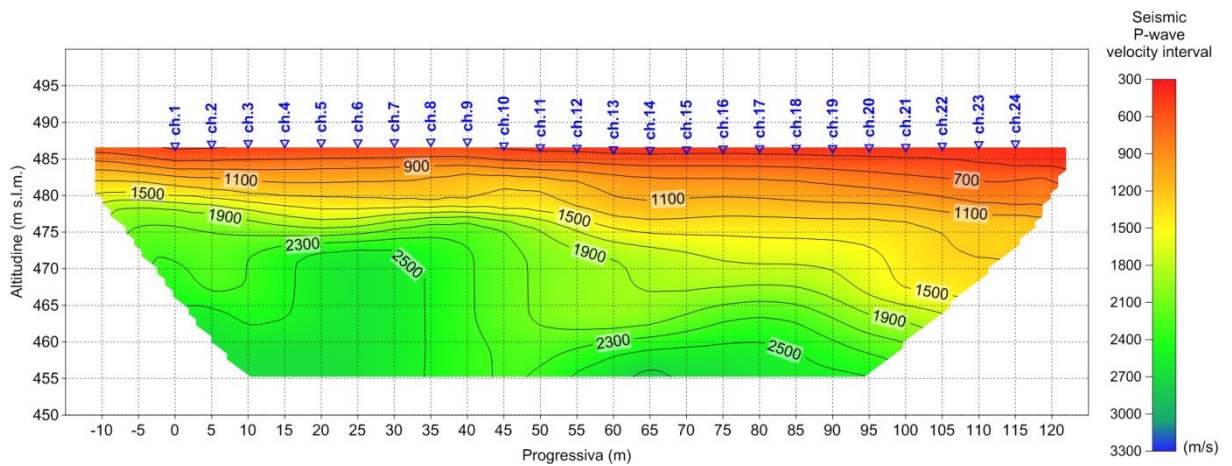


Fig. 2.5.3 - Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS01.

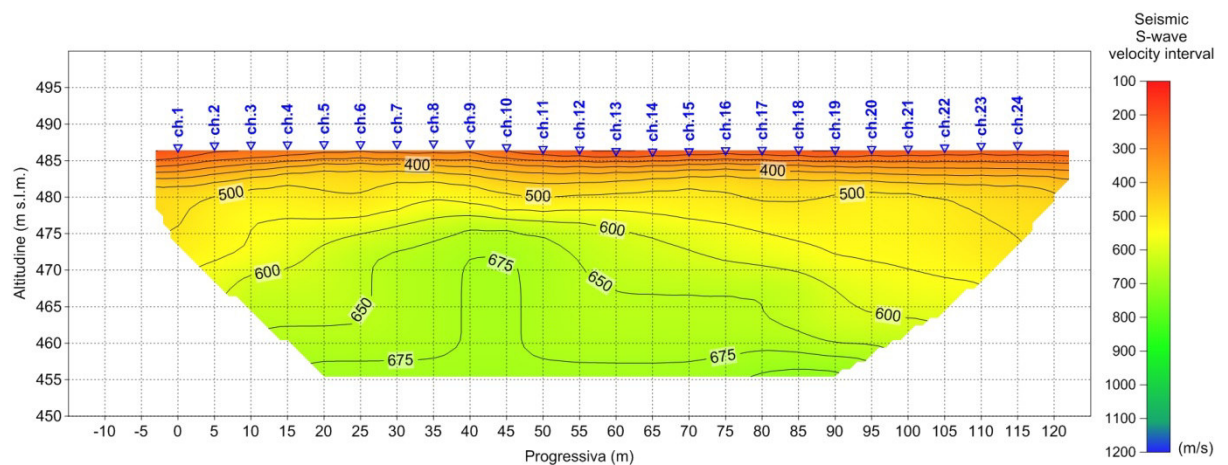


Fig. 2.5.4 - Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS01.

Le litologie che costituiscono i sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiale clastico grossolano, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa.

Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Nel caso specifico, il campo di velocità delle onde P, a profondità superiori di 470 m s.l.m., è relativo ad un "suolo rigido" mentre, per quanto concerne la pseudosezione delle onde di taglio i valori di Vs fanno riferimento ad un "suolo moderatamente rigido" con un rapporto $V_p/V_s > 3$.

Valori di Vs > 800 m/s, si collocano, presumibilmente, a profondità superiori a quelli riportati nella pseudosezione sottostante.

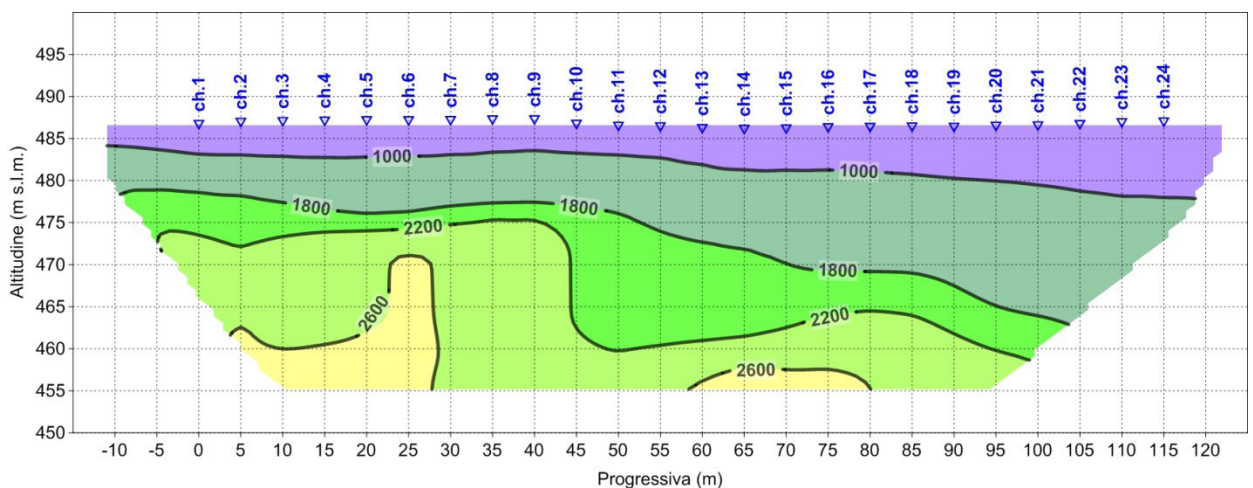


Fig. 2.5.5 - Tirano (SO), Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS01.

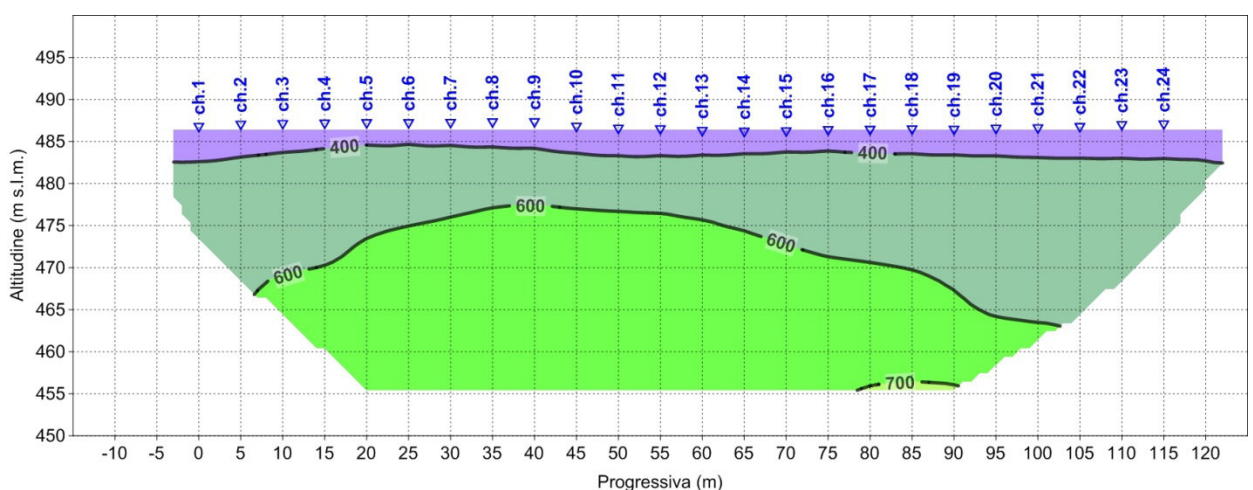


Fig. 2.5.6 - Tirano (SO), Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS01.

2.5.2 BS02

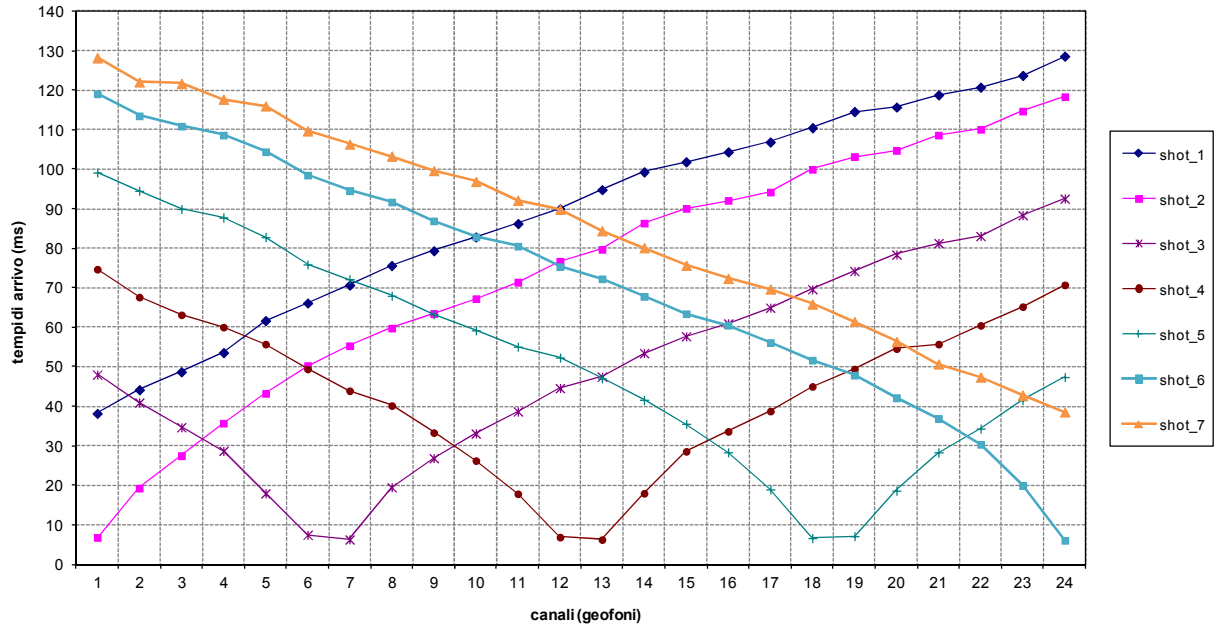


Fig. 2.5.7 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS02. Dromocrone.

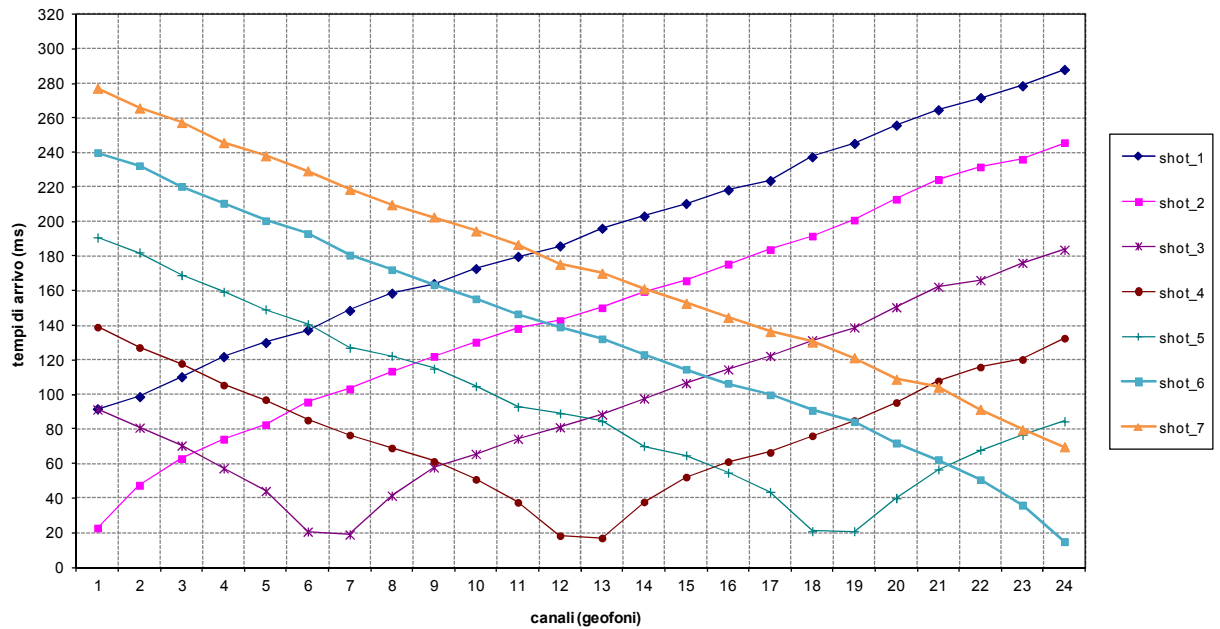


Fig. 2.5.8 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs02. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo simico **Bs02** hanno permesso di evidenziare due 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 5 e un massimo di 8 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 150 e 400 m/s. Il secondo sismostrato è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.000 e 1.800 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 400 e 750 m/s.

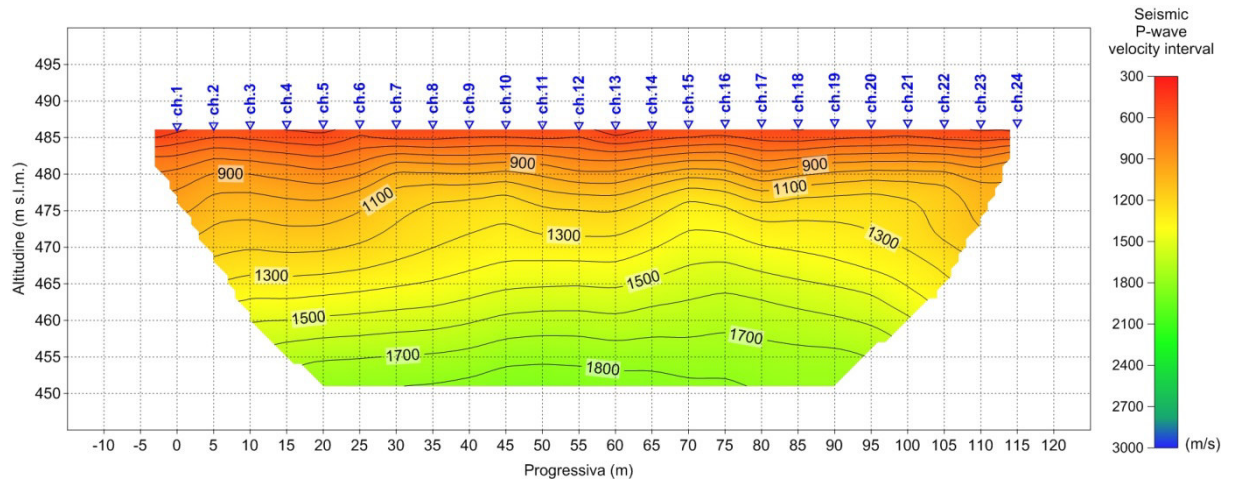


Fig. 2.5.9 - Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS02.

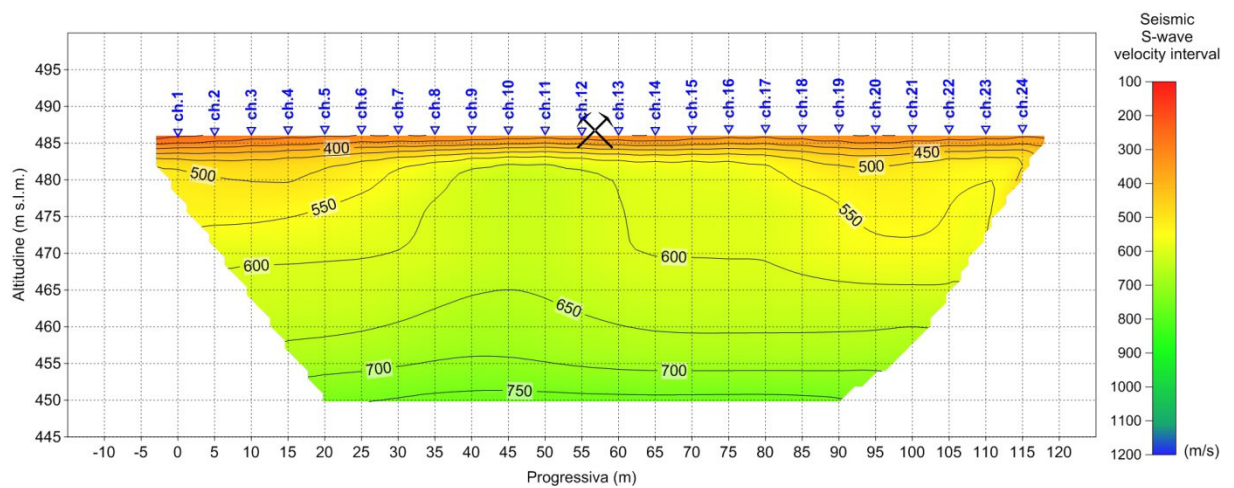


Fig. 2.5.10 - Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS02.

Le litologie che costituiscono i sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiali clastici grossolani, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa. Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Nel caso specifico, il campo di velocità delle onde elastiche è ascrivibile ad un "suolo moderatamente rigido" ovvero con $V_s < 800$ m/s. Il rapporto V_p/V_s ricade nel range usualmente considerato per tali terreni.

Lungo le sezioni sismo stratigrafiche, è stata riportata inoltre la traccia di intersezione con il profilo BS06, che intercetta ortogonalmente il profilo in oggetto BS02, attorno alla progressiva dei 57,5 m.

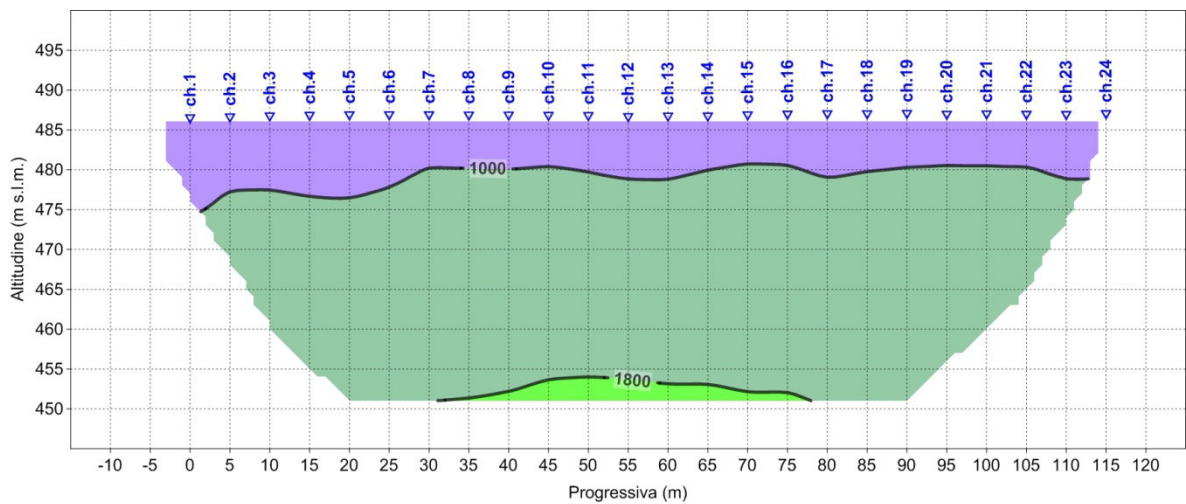


Fig. 2.5.11 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS02.

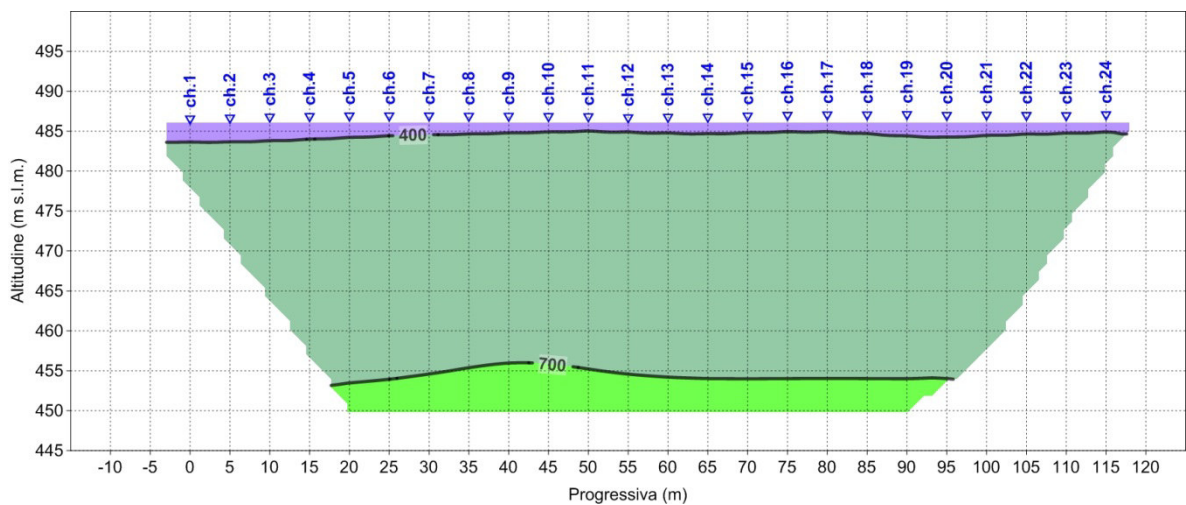


Fig. 2.5.12 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS02.

2.5.3 BS03

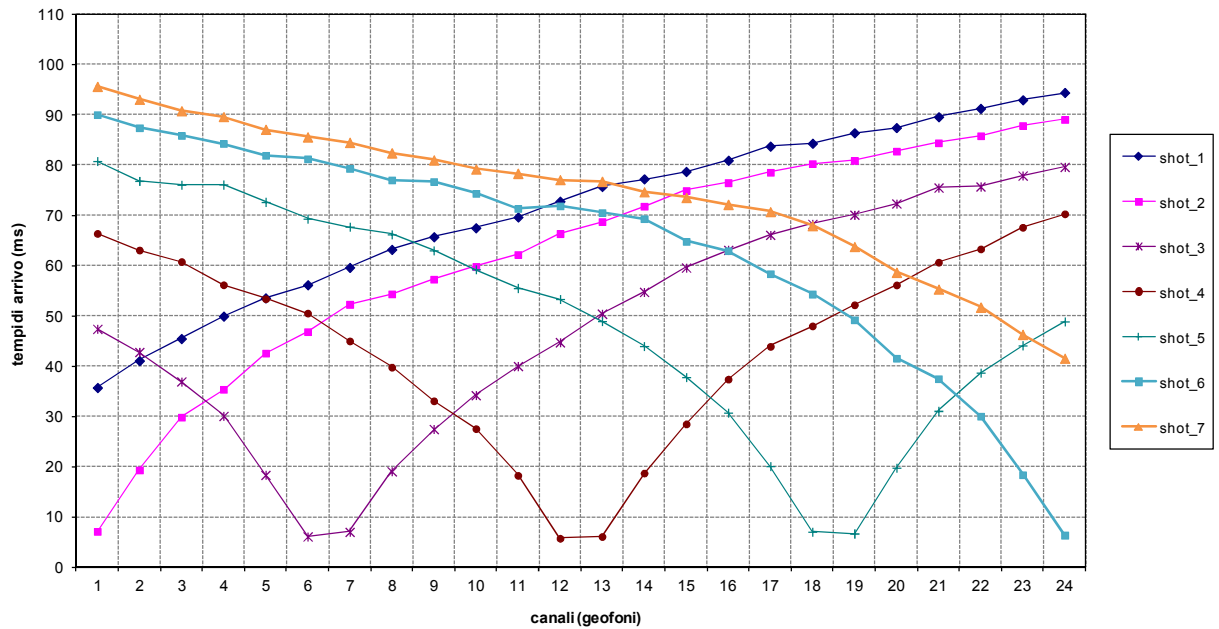


Fig. 2.5.13 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS03. Dromocrone.

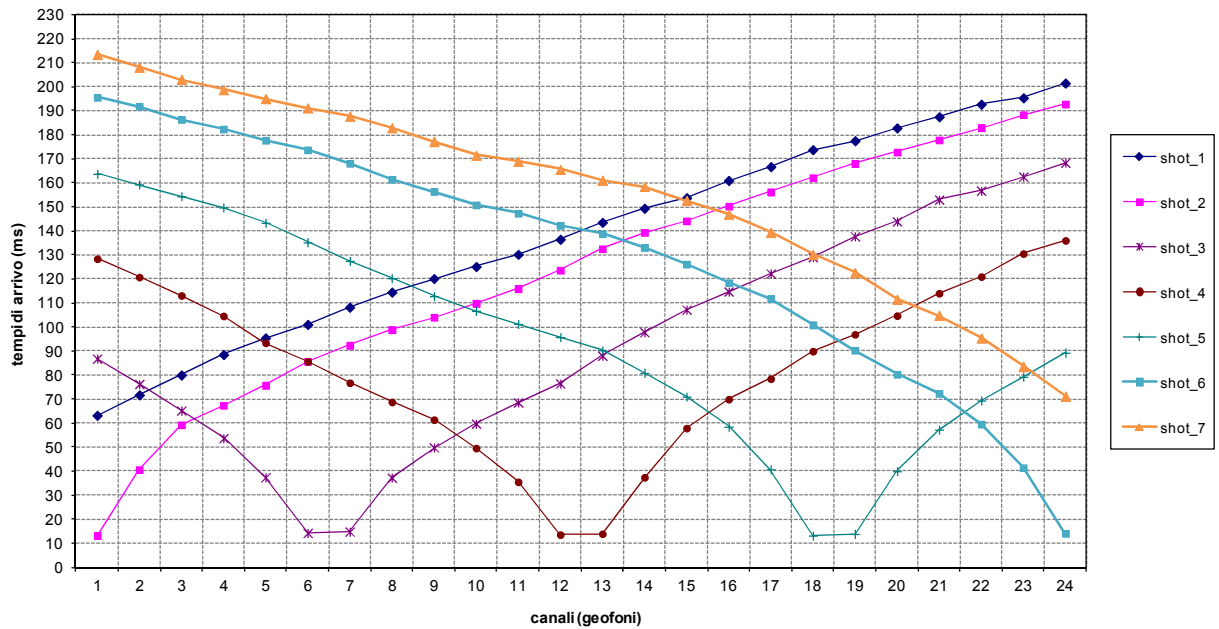


Fig. 2.5.14 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs03. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo simico **Bs03** hanno permesso di evidenziare quattro sismostrati.

Il primo sismostrato è posto tra il piano campagna e la prima interfaccia, che si colloca ad una profondità media di circa 7 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 200 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 17 e un massimo di 19 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 1.000 e 1.800 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 400 e 600 m/s.

Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la terza, ad una profondità media di circa 30 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.800 e 2.800 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 600 e 800 m/s. Infine, l'ultimo sismostrato è compreso tra il terzo interfaccia e la massima profondità raggiunta dalle prospezioni in oggetto. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P superiori a 2.800 m/s e velocità delle onde di taglio superiori agli 800 m/s.

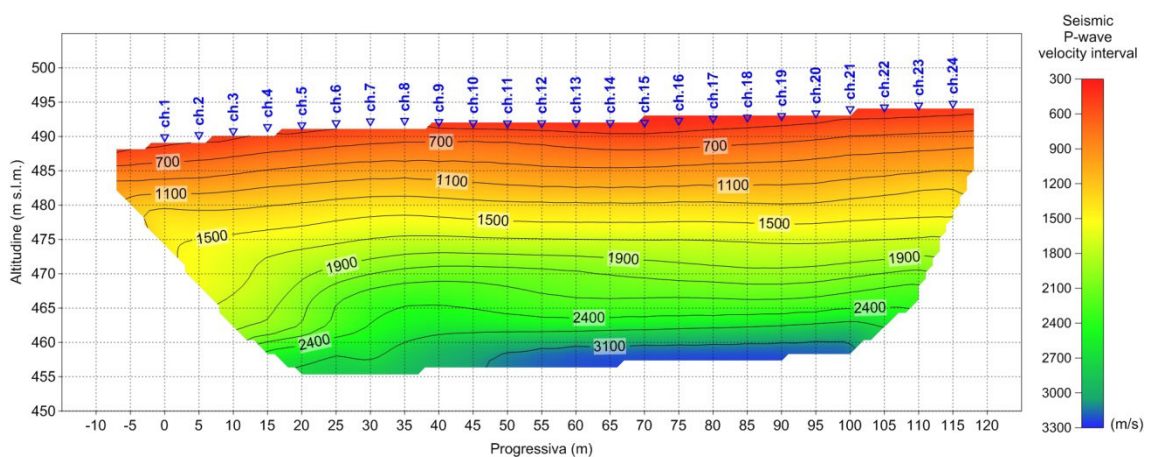


Fig. 2.5.15 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS03.

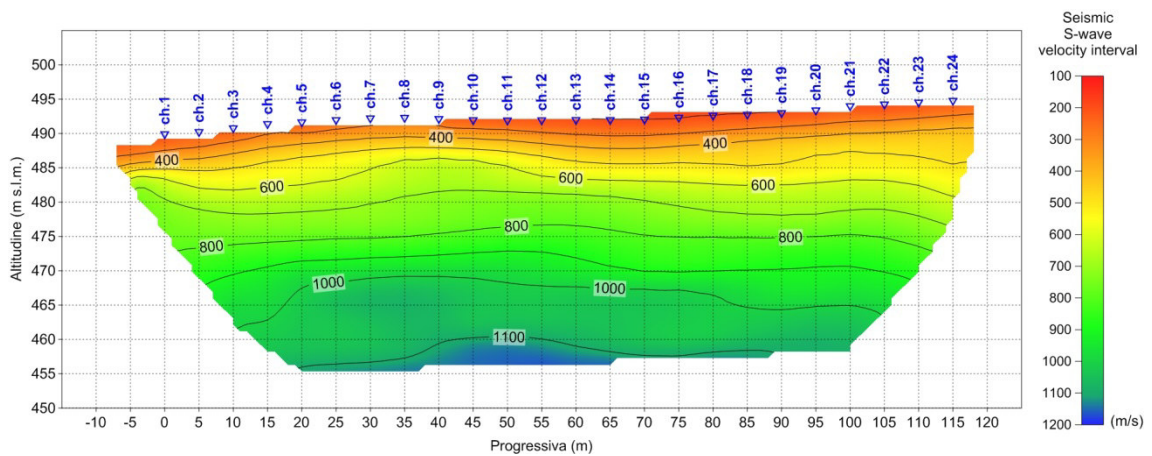


Fig. 2.5.16 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS03.

Le litologie che costituiscono i sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiali clastici grossolani, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa. Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Il substrato sismico, costituito da rocce metamorfiche ascrivibili alla formazione del Tonale, risulterebbe al passaggio nel sismostrato con velocità delle onde sismiche superiori a 2.800 m/s, per le onde P, e 1.100 m/s, per le onde di taglio. I terreni investigati sino ad una profondità pari a circa 475 m s.l.m. sono propri di un "suolo moderatamente rigido" mentre, in profondità, assumono connotazioni di un "suolo rigido" con $V_s > 800$ m/s. Il rapporto V_p/V_s ricade nel range usualmente considerato per tali terreni.

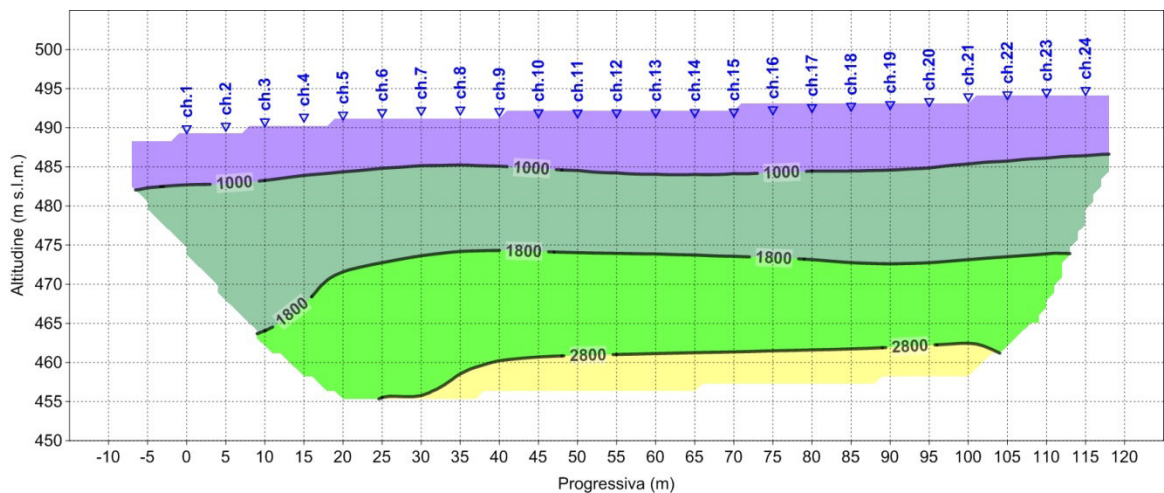


Fig. 2.5.17 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS03.

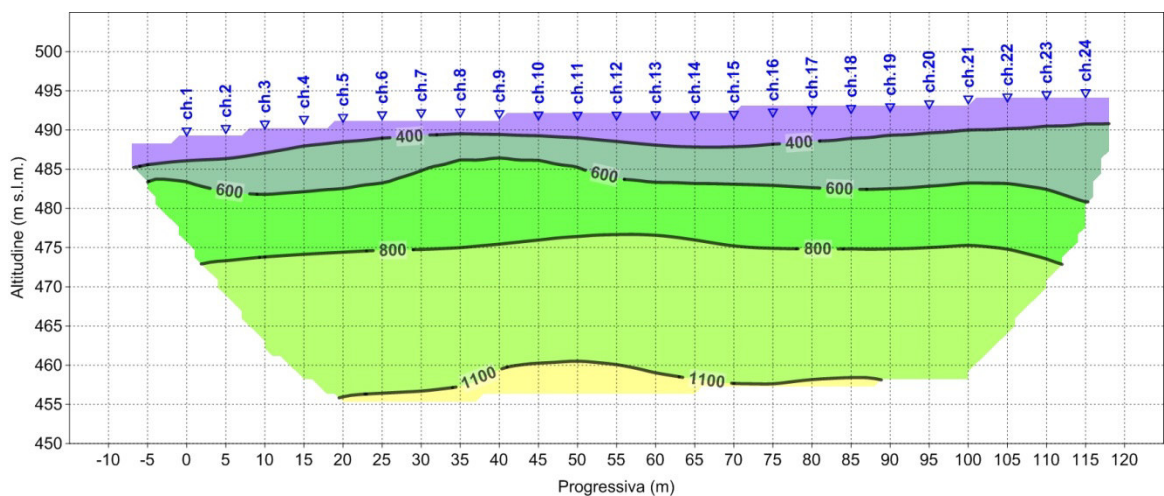


Fig. 2.5.18 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS03.

2.5.4 BS04

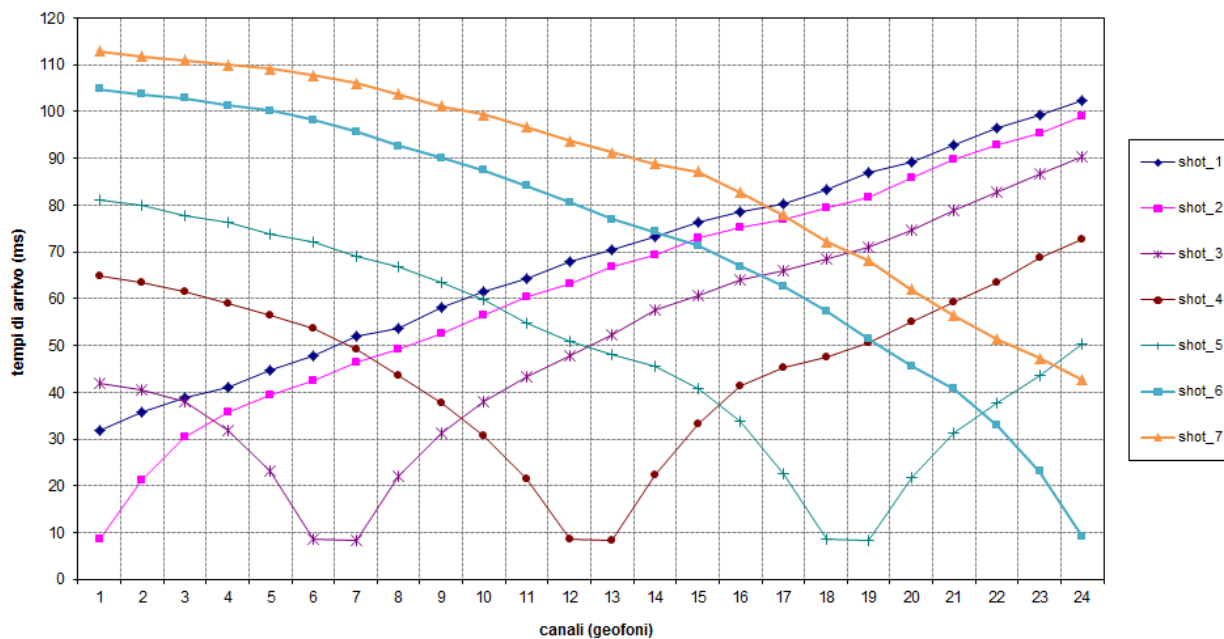


Fig. 2.5.19 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS04. Dromocrone.

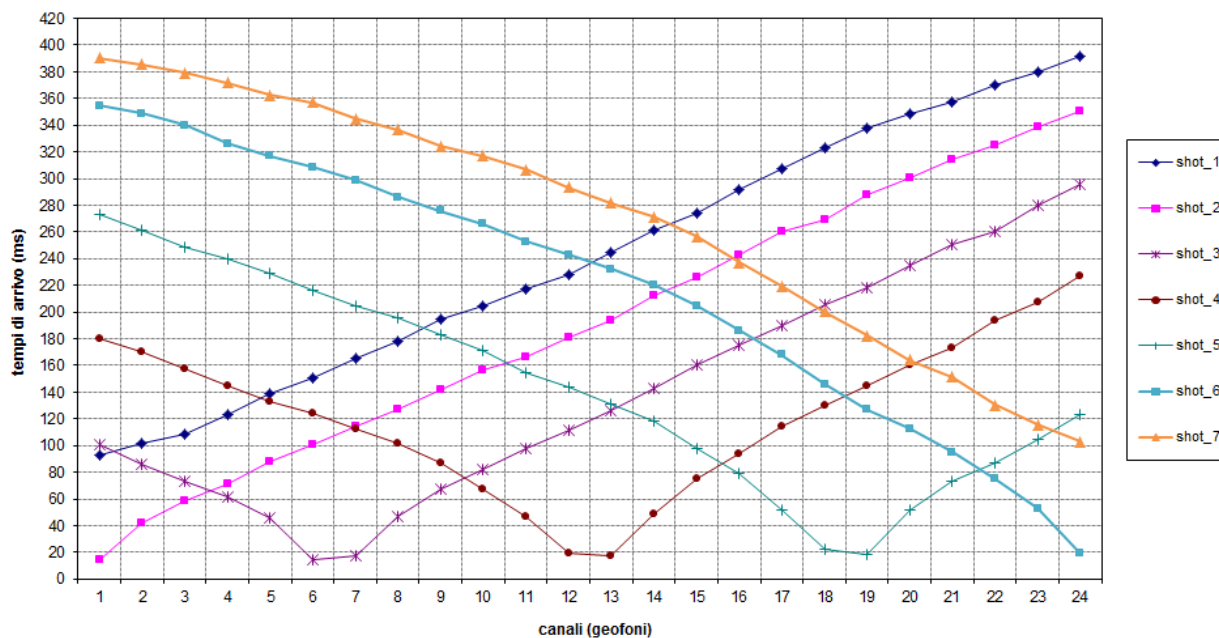


Fig. 2.5.20 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs04. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo simico **Bs04** hanno 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 e 9 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 100 e 300 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 e un massimo di 35 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.000 e 2.000 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 300 e 600 m/s. Il terzo sismostrato è caratterizzato da una velocità delle onde di compressione tra 2.000 e 2.200 m/s e velocità delle onde di taglio che oltrepassano i 650 m/s.

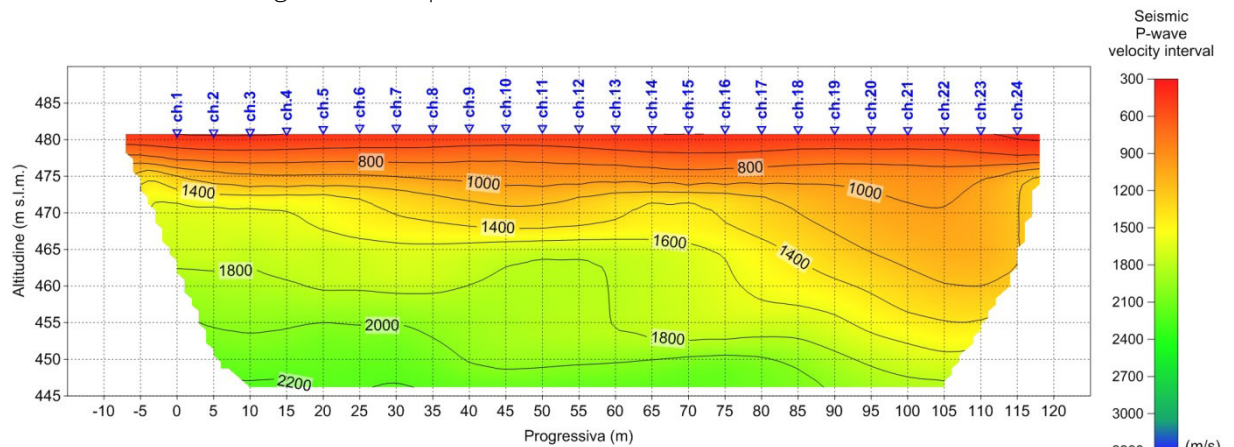


Fig. 2.5.21 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS04.

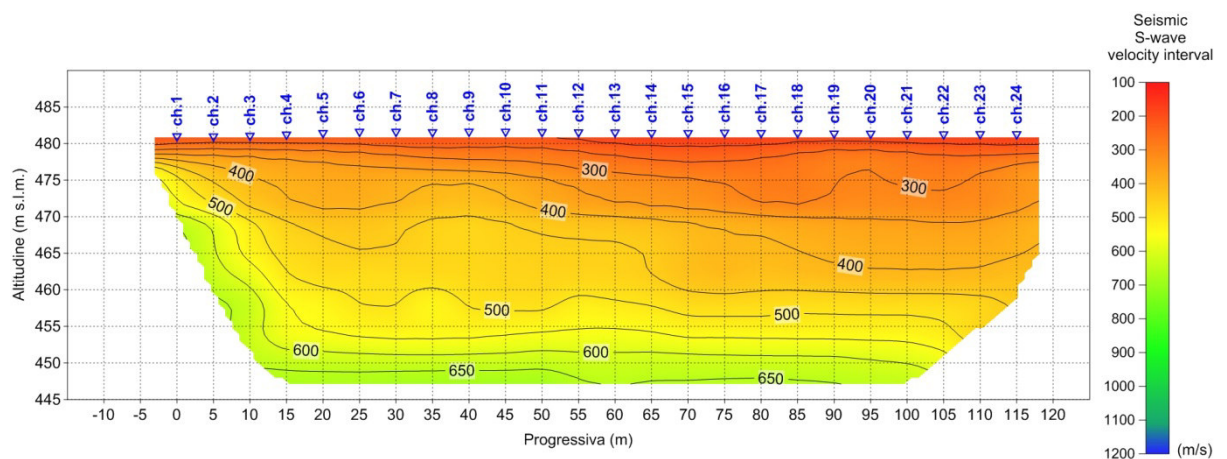


Fig. 2.5.22 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS04.

Le litologie che costituiscono i sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiale clastico grossolano, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa.

Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Nel caso specifico, il campo di velocità delle onde elastiche è ascrivibile ad un "suolo moderatamente rigido" ovvero con $V_s < 800$ m/s. Il rapporto V_p/V_s ricade nel range usualmente considerato per tali terreni.

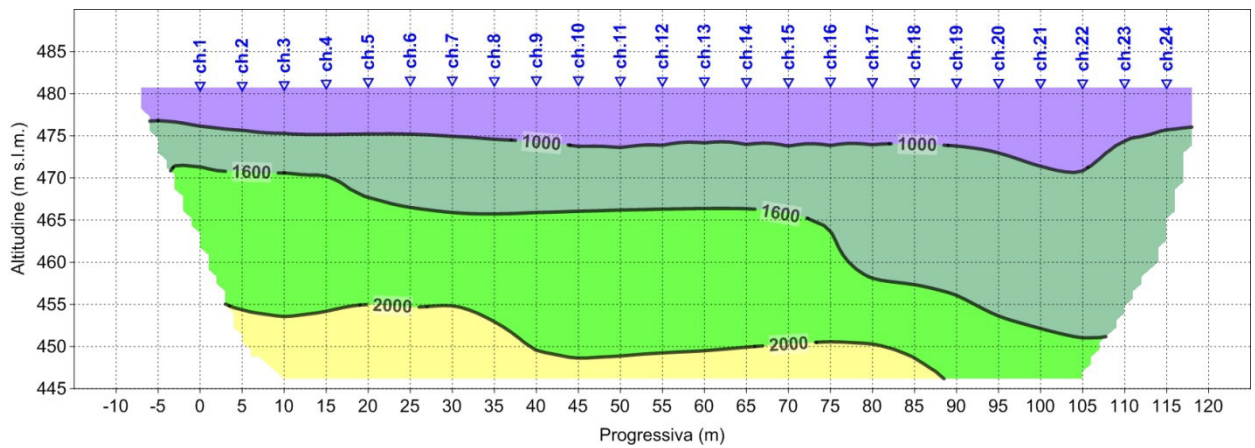


Fig. 2.5.23 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS04.

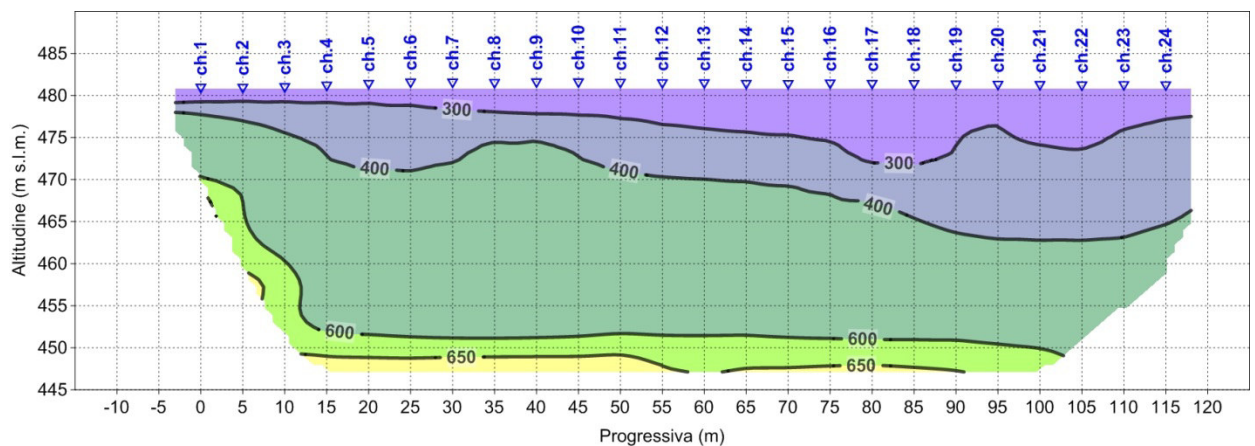


Fig. 2.5.24 - Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS04.

2.5.5 BS05

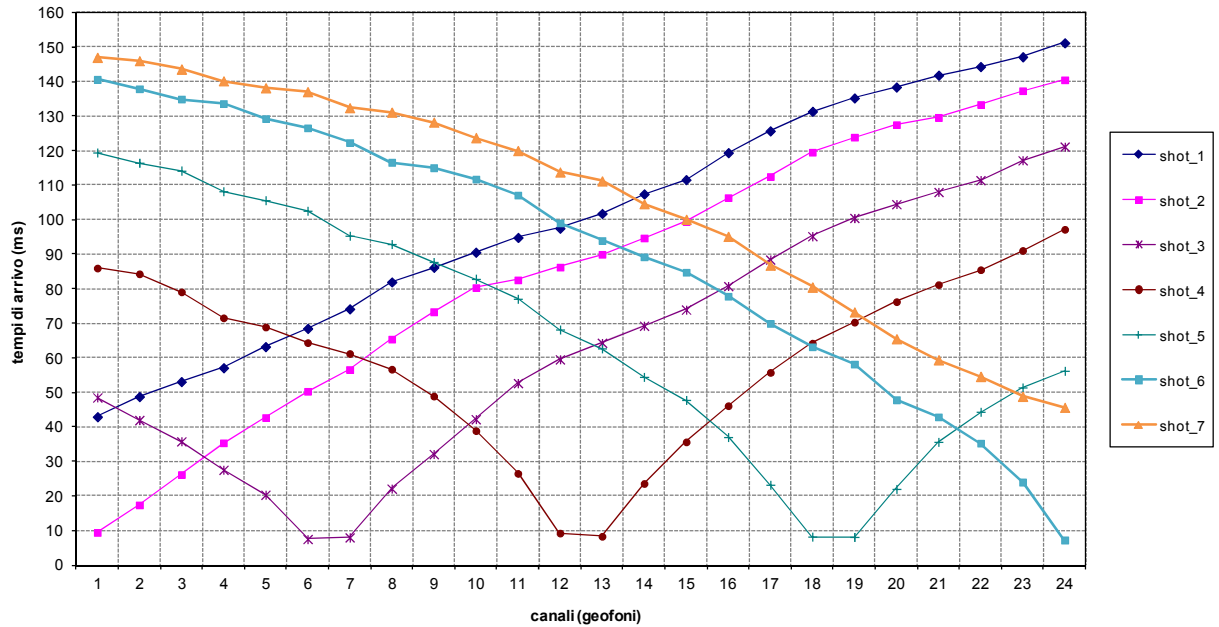


Fig. 2.5.25 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS05. Dromocrone.

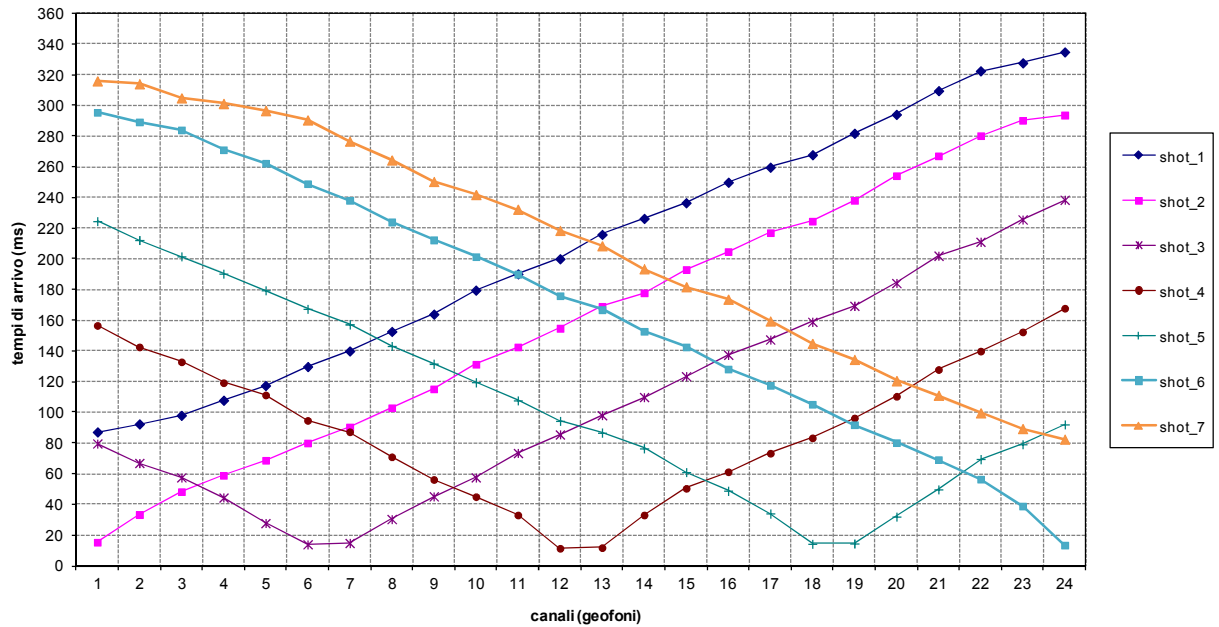


Fig. 2.5.26 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs05. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **Bs05** hanno permesso di evidenziare tre sismostrati. Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità variabile e mediamente pari a circa 15 dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 150 e 400 m/s. Il secondo sismostrato è compreso tra la citata prima interfaccia e la seconda interfaccia, posta ad una profondità media superiore ai 40 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.000 e 1.600 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 400 e 700 m/s. Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la massima profondità raggiunta dalle prospezioni in oggetto. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P superiori a 1.600 m/s e velocità delle onde di taglio superiori a 700 m/s.

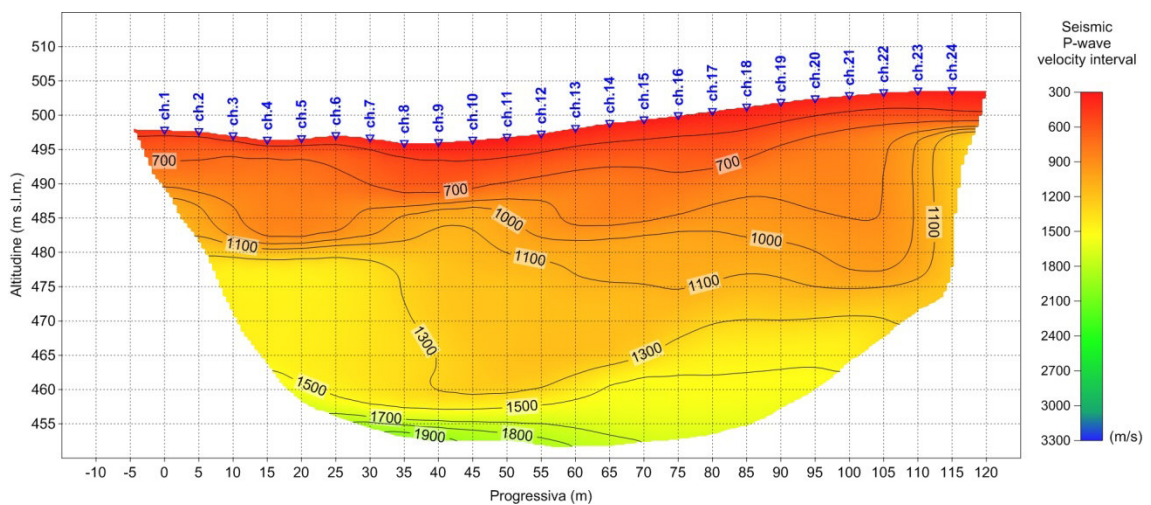


Fig. 2.5.27 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS05.

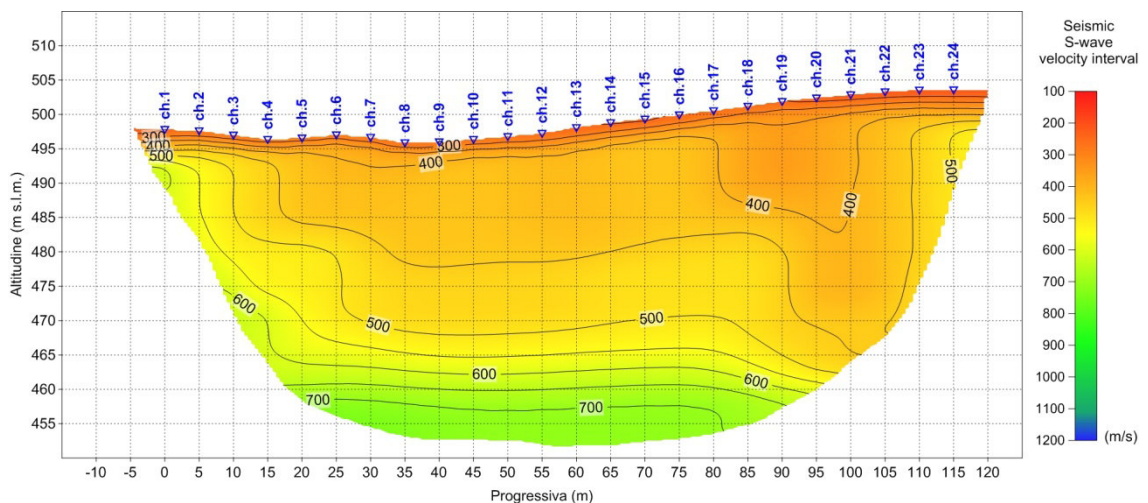


Fig. 2.5.28 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS05.

Le litologie che costituiscono i 3 sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiali clastici grossolani, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa.

Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Nel caso specifico, il campo di velocità delle onde elastiche è ascrivibile ad un "suolo moderatamente rigido" ovvero con $V_s < 800$ m/s. Il rapporto V_p/V_s ricade nel range usualmente considerato per tali terreni.

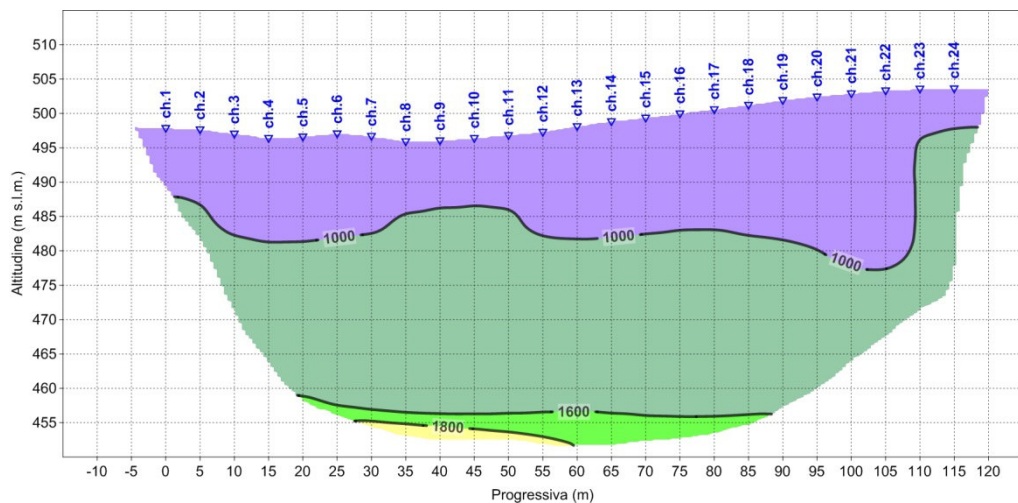


Fig. 2.5.29 – Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS05.

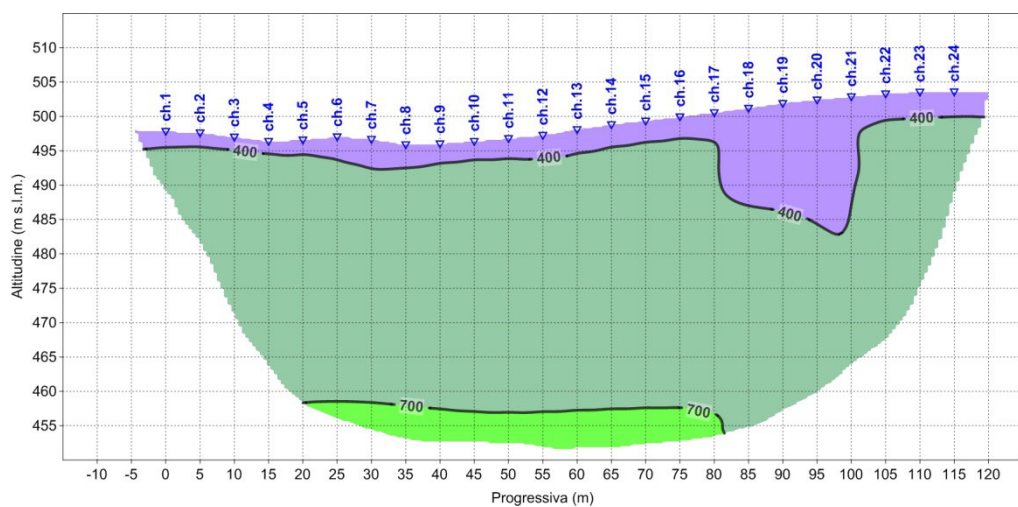


Fig. 2.5.30 – Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS05.

2.5.6 BS06

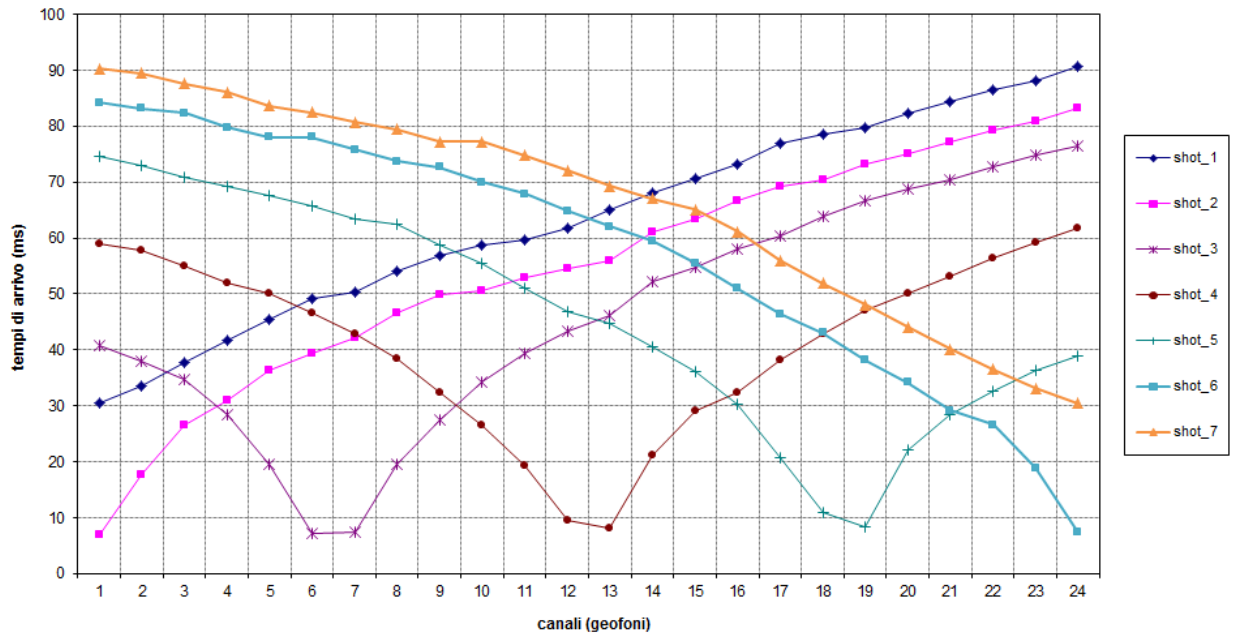


Fig. 2.5.31 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde P. Profilo BS06. Dromocrone.

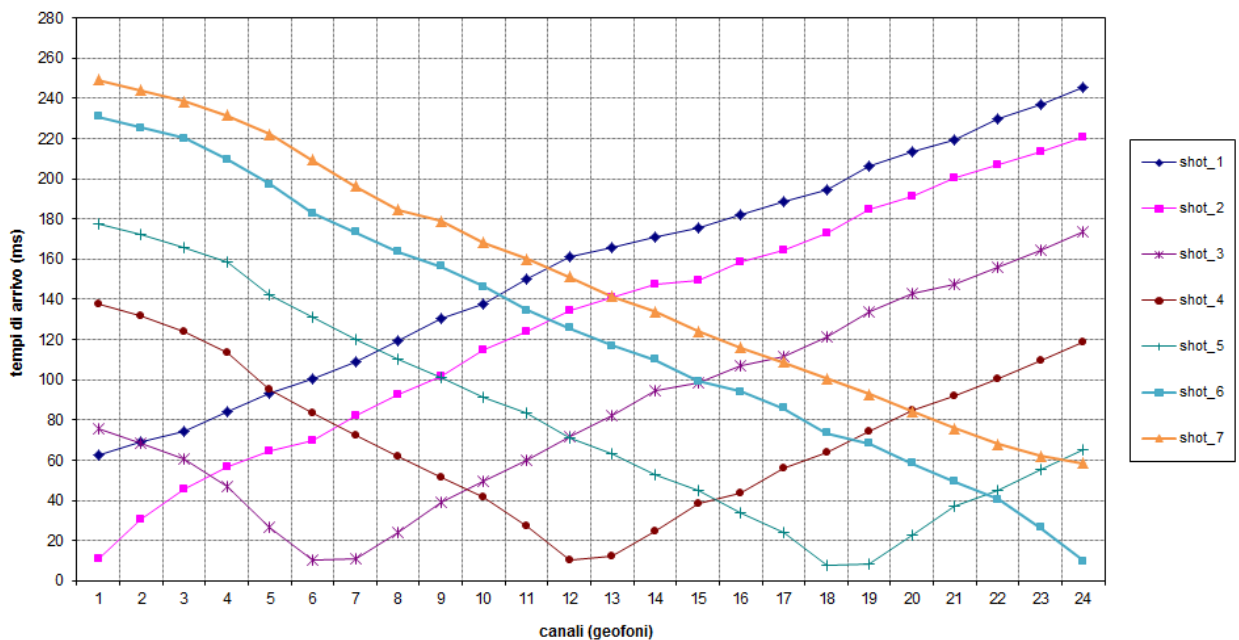


Fig. 2.5.32 – Tirano (SO). Tomografia sismica in onde S. Profilo Bs06. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **Bs06** hanno permesso di evidenziare tre sismostrati. Il primo sismostrato è posto dal piano campagna sino alla prima interfaccia che si colloca ad una profondità media di circa 5 m dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P compresa tra 300 e 1.000 m/s e valori di velocità delle onde S compresi tra 200 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 14 e un massimo di 23 m circa dal p.c. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P tra 1.000 e 2.000 m/s e velocità delle onde di taglio comprese tra 400 e 700 m/s. Il terzo sismostrato è compreso tra la seconda interfaccia e la massima profondità raggiunta dalle prospezioni in oggetto. Esso è caratterizzato da una velocità delle onde P superiori a 2.000 m/s e velocità delle onde di taglio superiori ai 700 m/s.

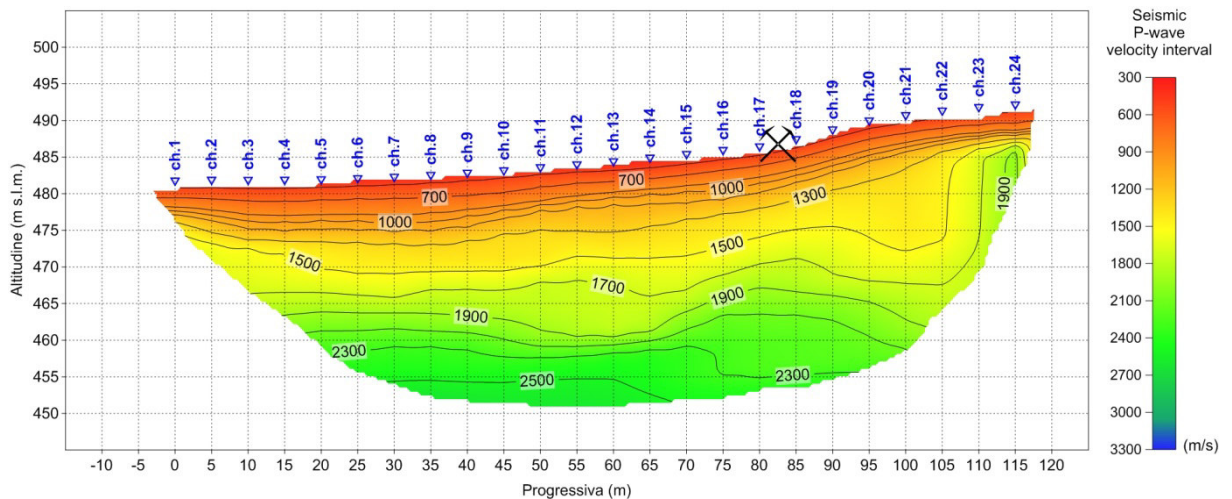


Fig. 2.5.33 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo BS06.

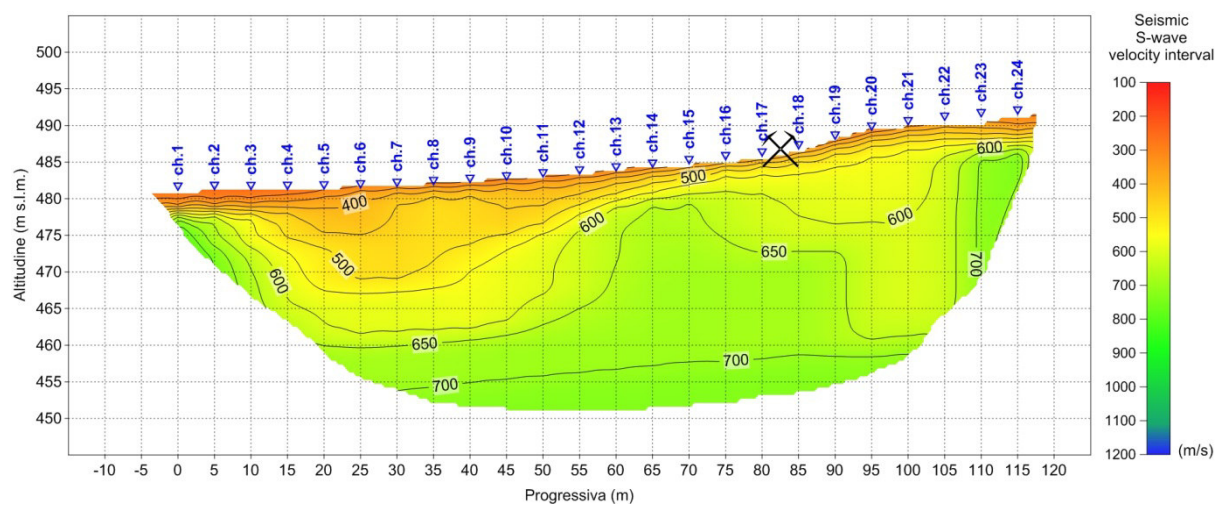


Fig. 2.5.34 – Tirano (SO). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo BS06.

Le litologie che costituiscono i sismostrati, descritti in precedenza, sono da attribuire a depositi detritici di versante, costituiti prevalentemente da materiali clastici grossolani, come sabbie medio - grossolane e ghiaia da spigolosa a sub angolare, di origine morenica o di conoide, in abbondante matrice sabbioso - limosa. Le differenze nel campo di velocità, registrate all'interno delle litologie detritiche, potrebbero essere ascrivibili a variazioni nel grado di addensamento dei materiali, o a forti eterometrie ed eteropie laterali, laddove tali depositi possono dar luogo a lenti limo-sabbiose o alla presenza di trovanti litoidi di dimensioni metriche.

Nel caso specifico, il campo di velocità delle onde elastiche è ascrivibile ad un "suolo moderatamente rigido" ovvero con $V_s < 800$ m/s, con valori delle velocità delle onde di taglio che, nella parte basale della pseudosezione raggiungono i 730 m/s. In tale frangente, il rapporto V_p/V_s ricade nel range usualmente considerato per tali terreni. Lungo le sezioni sismo stratigrafiche, in onde P e in onde S, è stata riportata la traccia di intersezione con il profilo BS02, che intercetta ortogonalmente il profilo BS06, attorno alla progressiva dei 82,5 m.

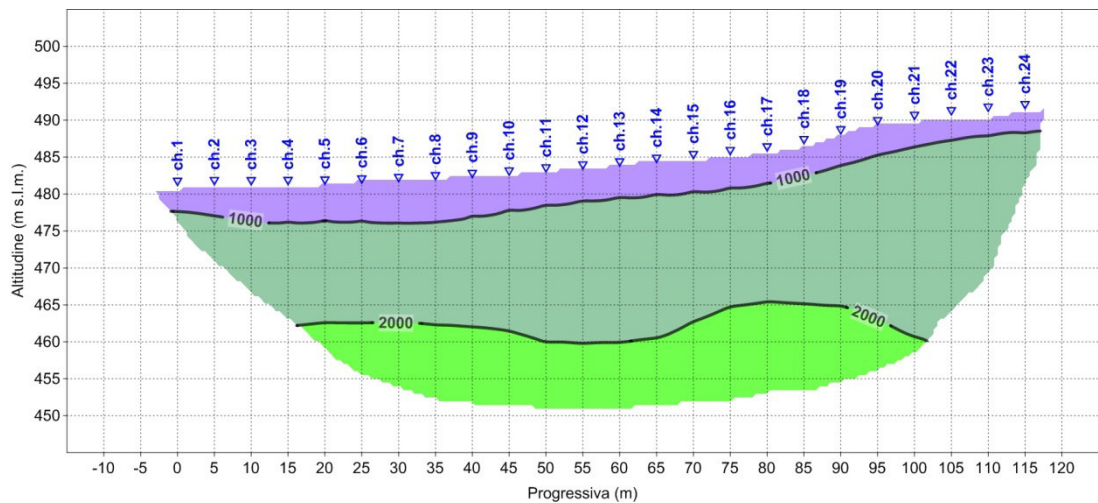


Fig. 2.5.35 – Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde P. Profilo BS06.

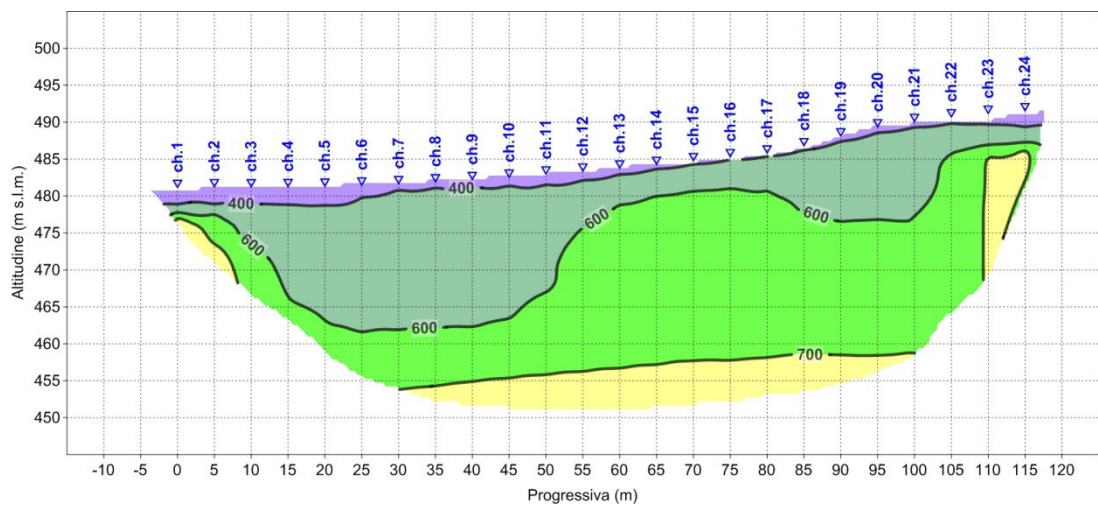


Fig. 2.5.36 – Tirano (SO). Interpretazione in sismostrati della pseudosezione sismica in onde S. Profilo BS06.

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).

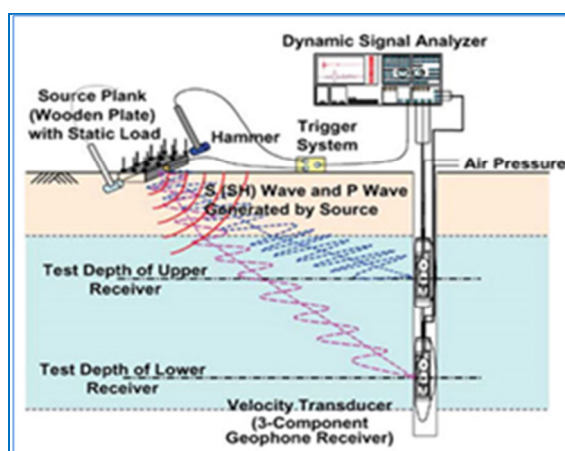


Fig. 3.1.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

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	$G = \nu \cdot V_s^2$	(2)
Modulo di Elasticità	$E = V_s^2 \cdot \nu \frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)}$	(3)
Modulo di Compressibilità	$K = \nu \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$	(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.

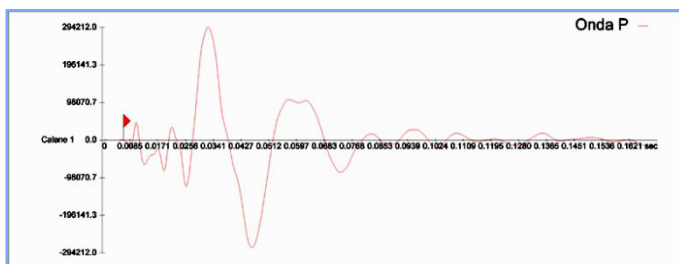


Fig. 3.1.2 - Esempio di onda P e di lettura del primo tempo di arrivo.

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).

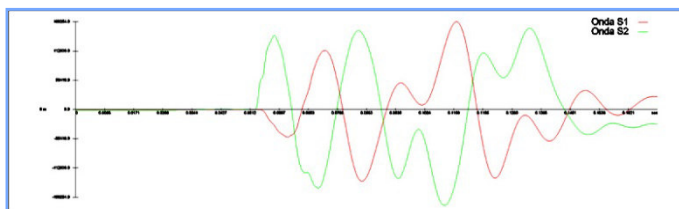


Fig. 3.1.3 - Esempio di onda S e dell'inversione di fase necessaria per l'individuazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio (onda S).

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 "S5" della **MAE**, costituito da un sensore a 5 componenti di cui un trasduttore di velocità (geofono) verticale da 4,5 Hz per la rilevazione delle onde P, e quattro trasduttori orizzontali per la rilevazione delle onde SH, da 4,5 Hz, orientati secondo una disposizione a raggiera, ovvero ad angoli di 45° 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 per le prove down-hole, sono stati acquisiti mediante un sismografo **MAE X610S** a 24 bits, le cui caratteristiche sono state descritte in precedenza.

3.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito delle indagini in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.3** prospezioni sismiche in foro "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		
		Coordinata EST	Coordinata NORD	Quota ortometrica del p.c. (m s.l.m.)
S02_DH	35,0	1587019,432	5115460,641	395,04
S06_DH	35,0	1588846,979	5117245,716	410,24
S11_DH	32,0	1591433,067	5118611,583	508,50

Tab. 3.3.1 – Tirano (SO). Indagini sismiche in foro "down-hole". Elenco delle coordinate.

Le indagini sono state eseguite sino alle profondità riportate in tabella, acquisendo i segnali relativi ad onde elastiche, mediante il dispositivo di rilevamento descritto nelle pagine precedenti. I 4 geofoni a componente orizzontale (per la rilevazione delle onde *SH*), risultano disposti, all'interno del dispositivo, in maniera da formare un'array a raggiera, con un angolo di sfasamento tra le componenti di 45°. 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.

In corso d'opera, è stato modificato il piano delle indagini, sostituendo l'indagine down-hole denominata S09_DH, con il profilo di sismica a rifrazione BS06.

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

Di seguito, si riporta la stratigrafia dei perfori investigati.

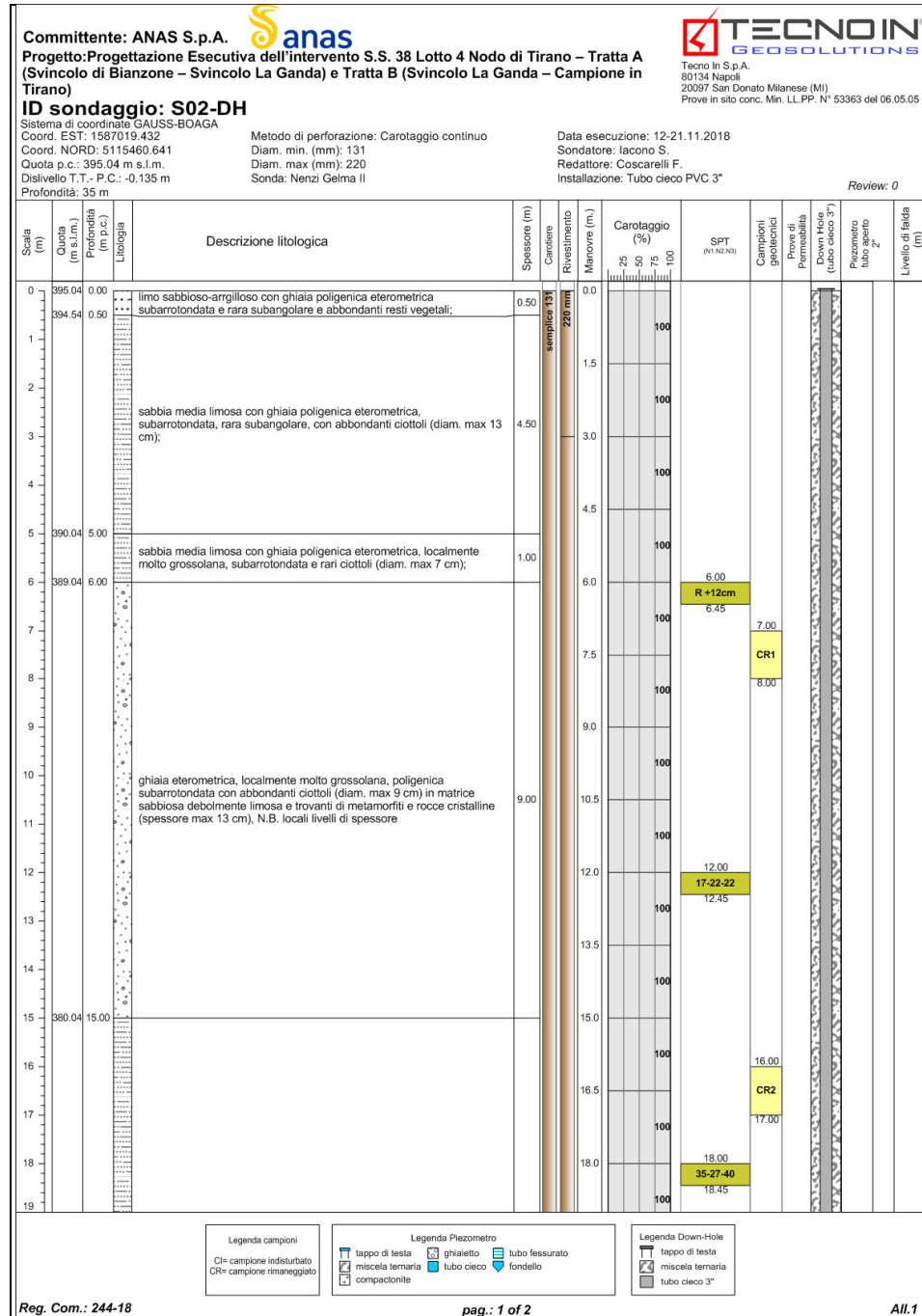


Fig. 3.3.1 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S02_DH. Pag. 1 di 2.

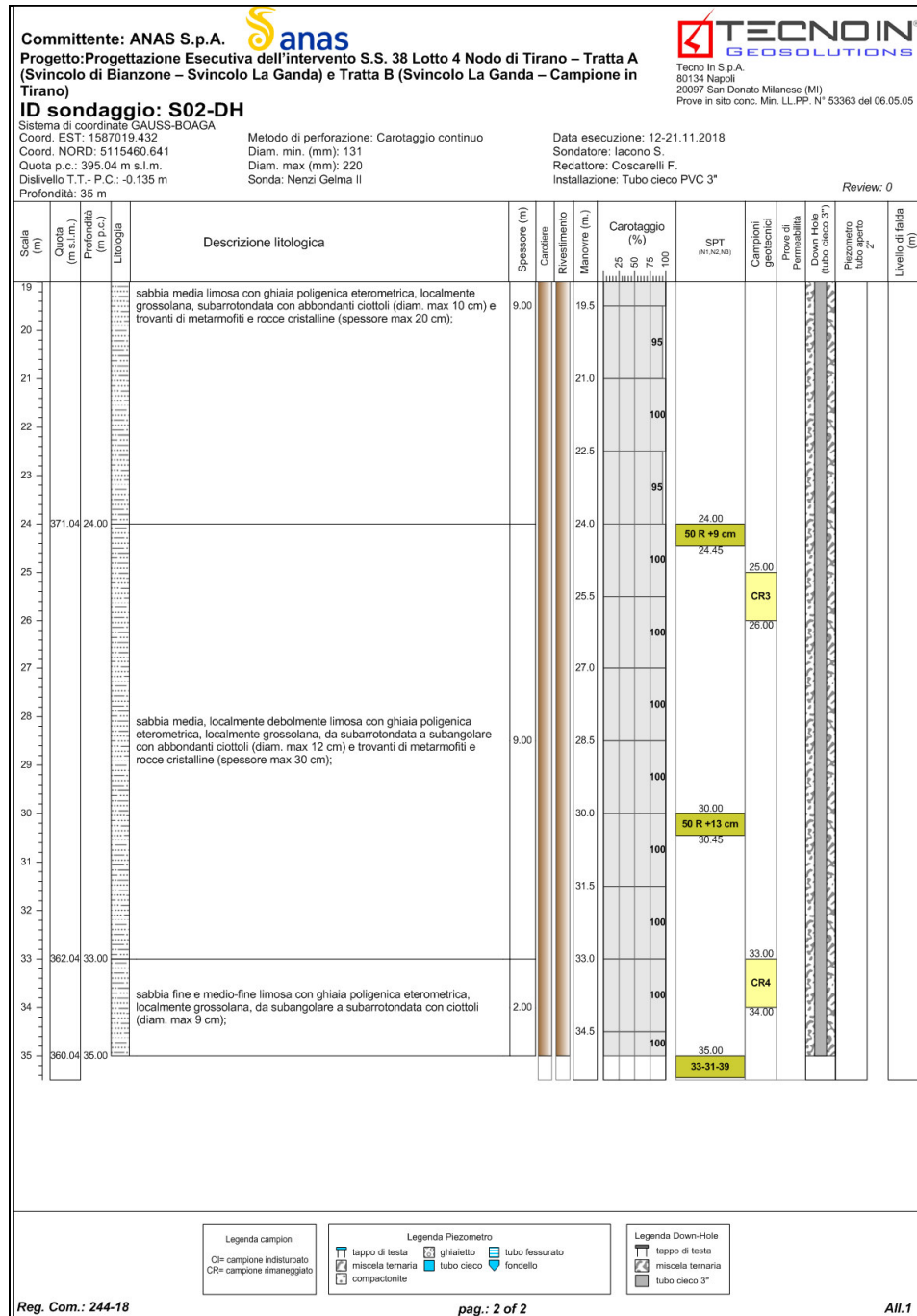


Fig. 3.3.2 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S02_DH. Pag. 2 di 2.

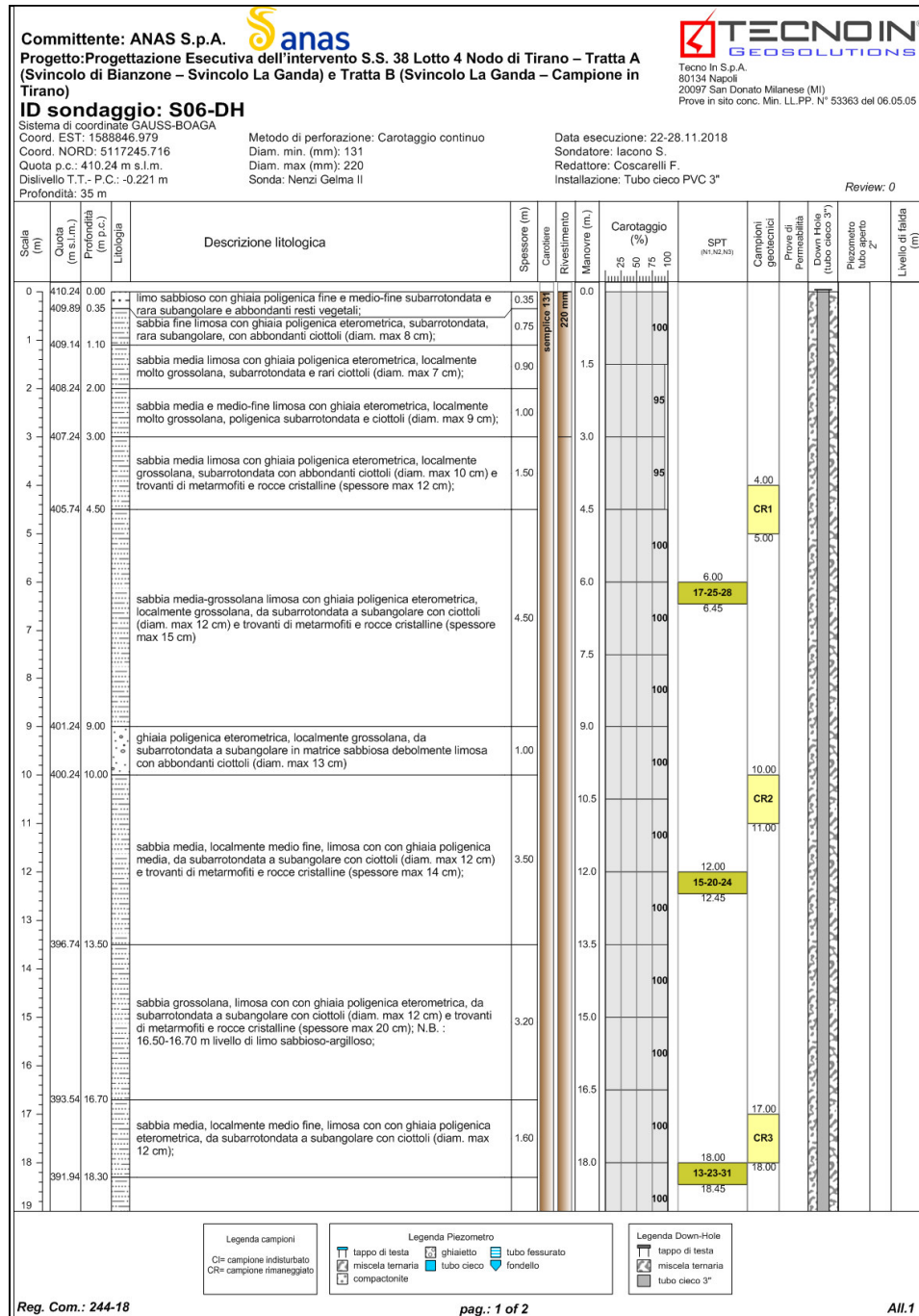


Fig. 3.3.3 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S06_DH. Pag. 1 di 2.

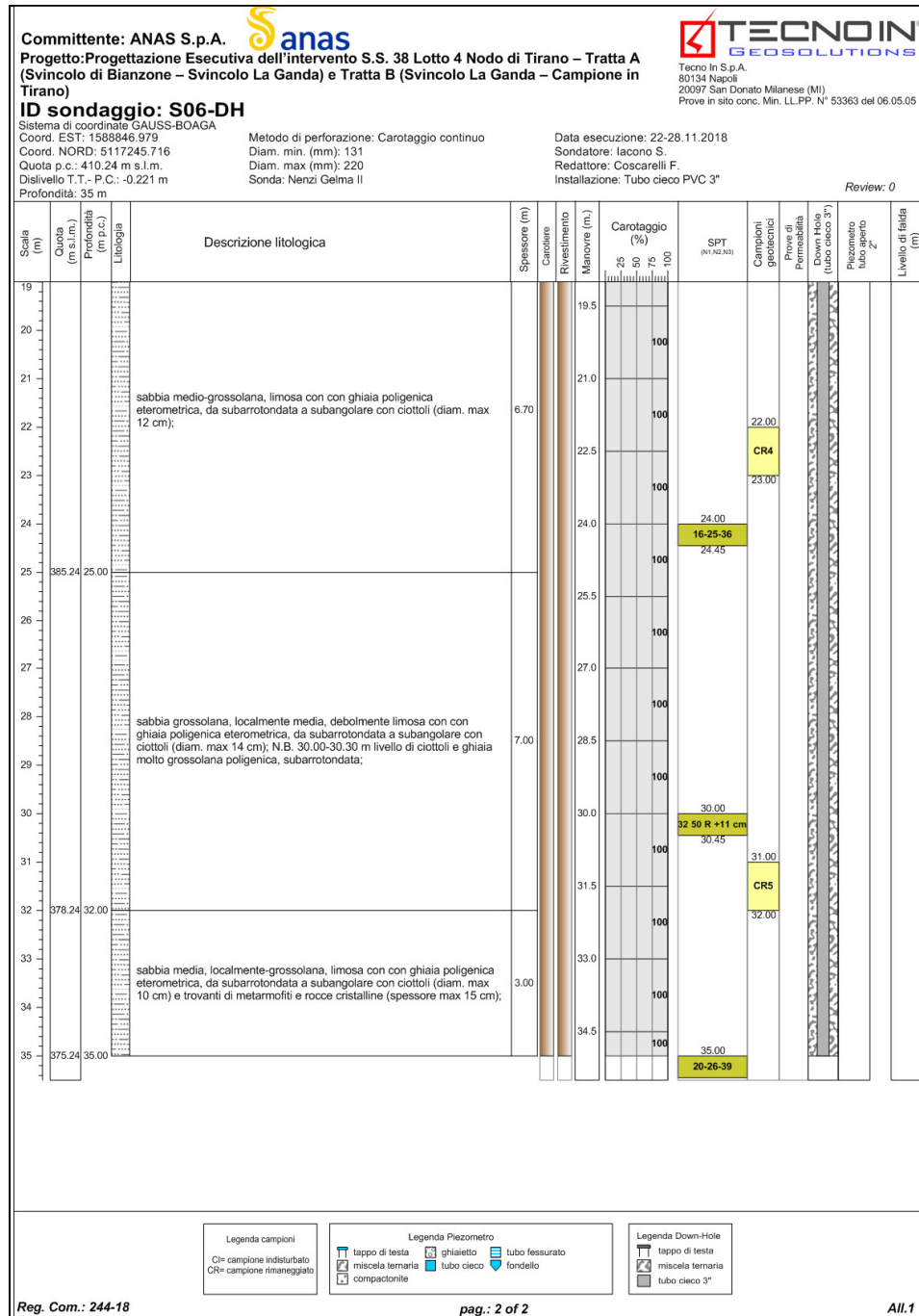


Fig. 3.3.4 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S06_DH. Pag. 2 di 2.

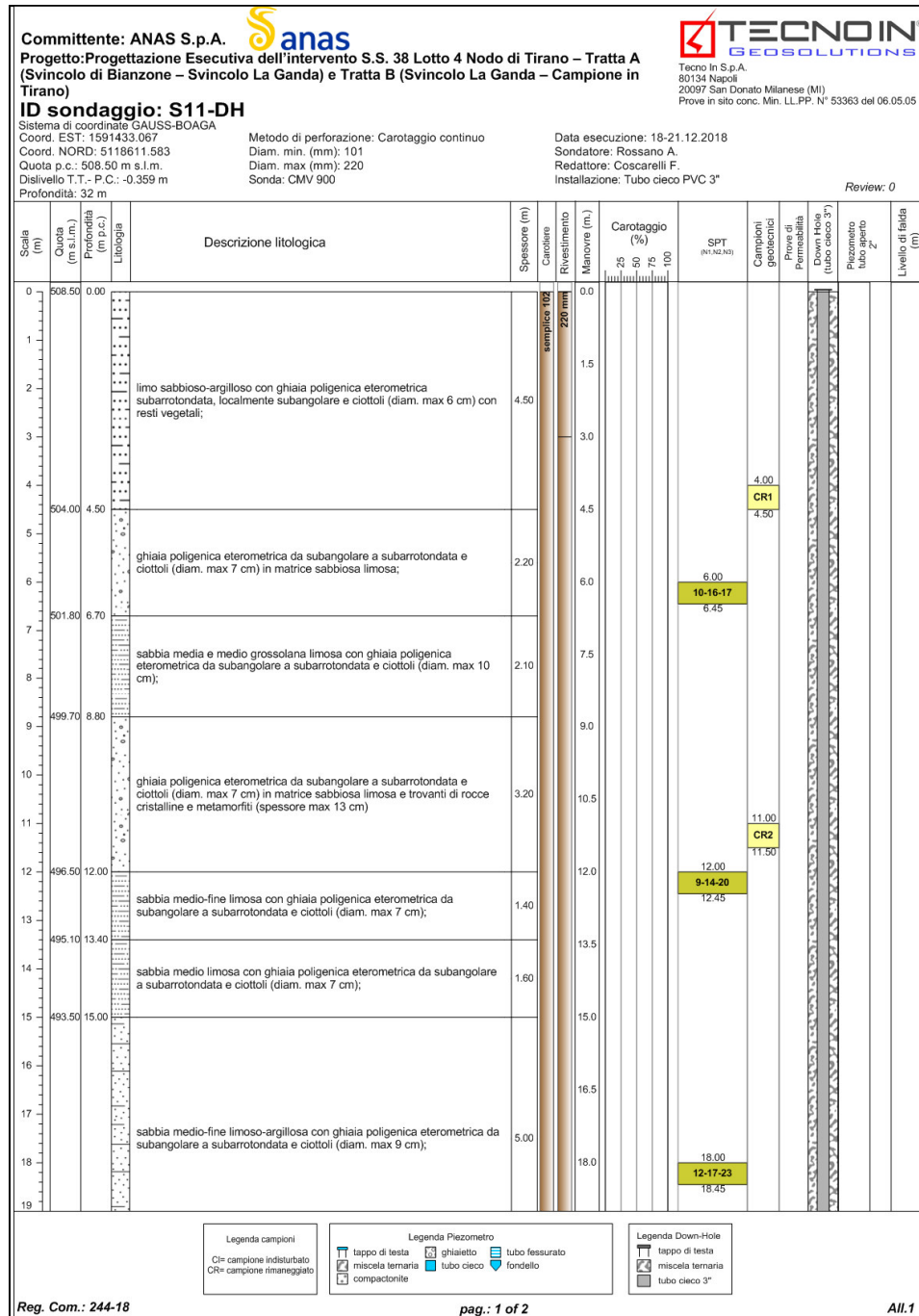


Fig. 3.3.5 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S11_DH. Pag. 1 di 2.

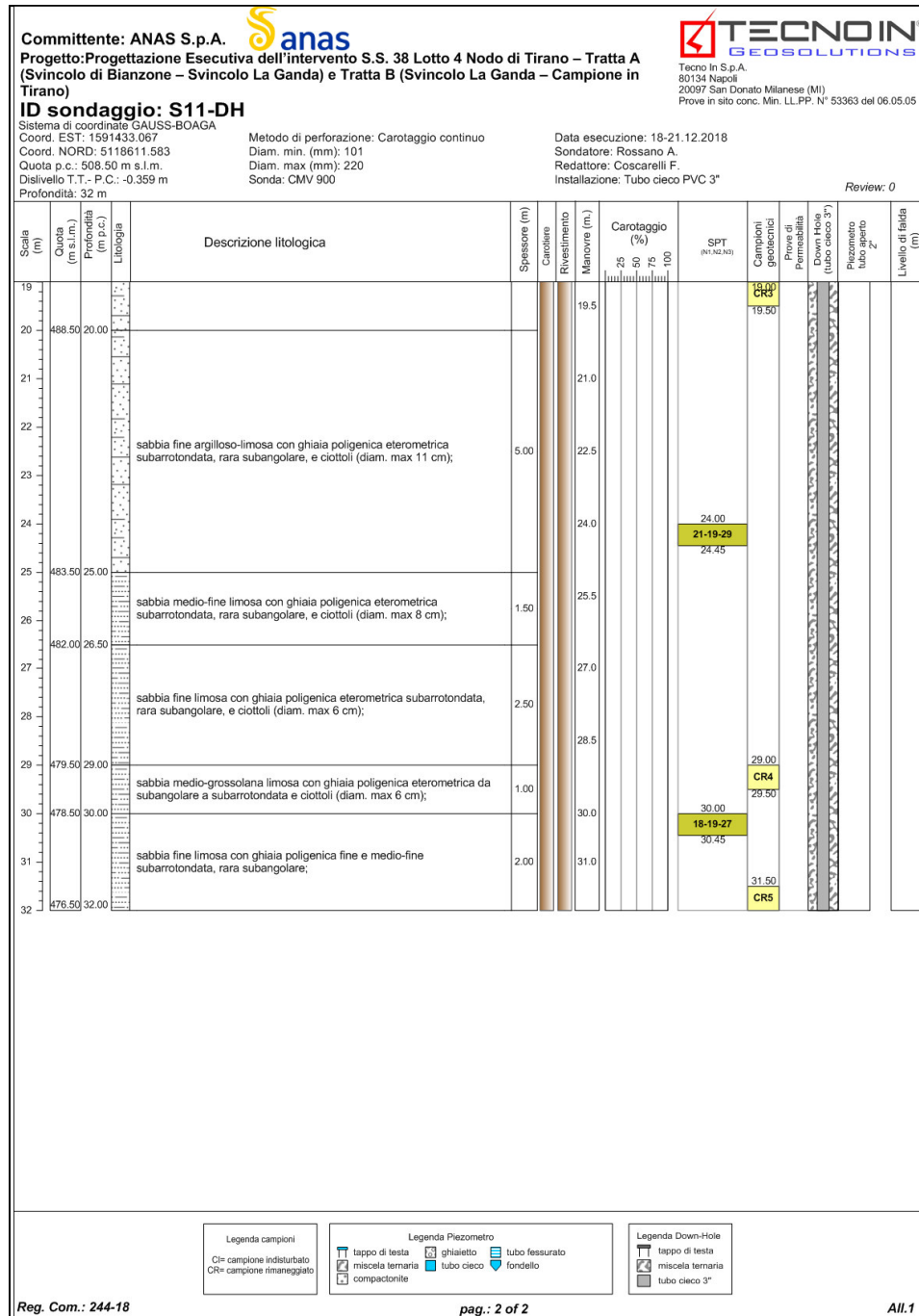


Fig. 3.3.6 – Tirano (SO). Stratigrafia del sondaggio S11_DH. Pag. 2 di 2.

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:

- 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 ai dati bibliografici.

3.4.1 S02_DH

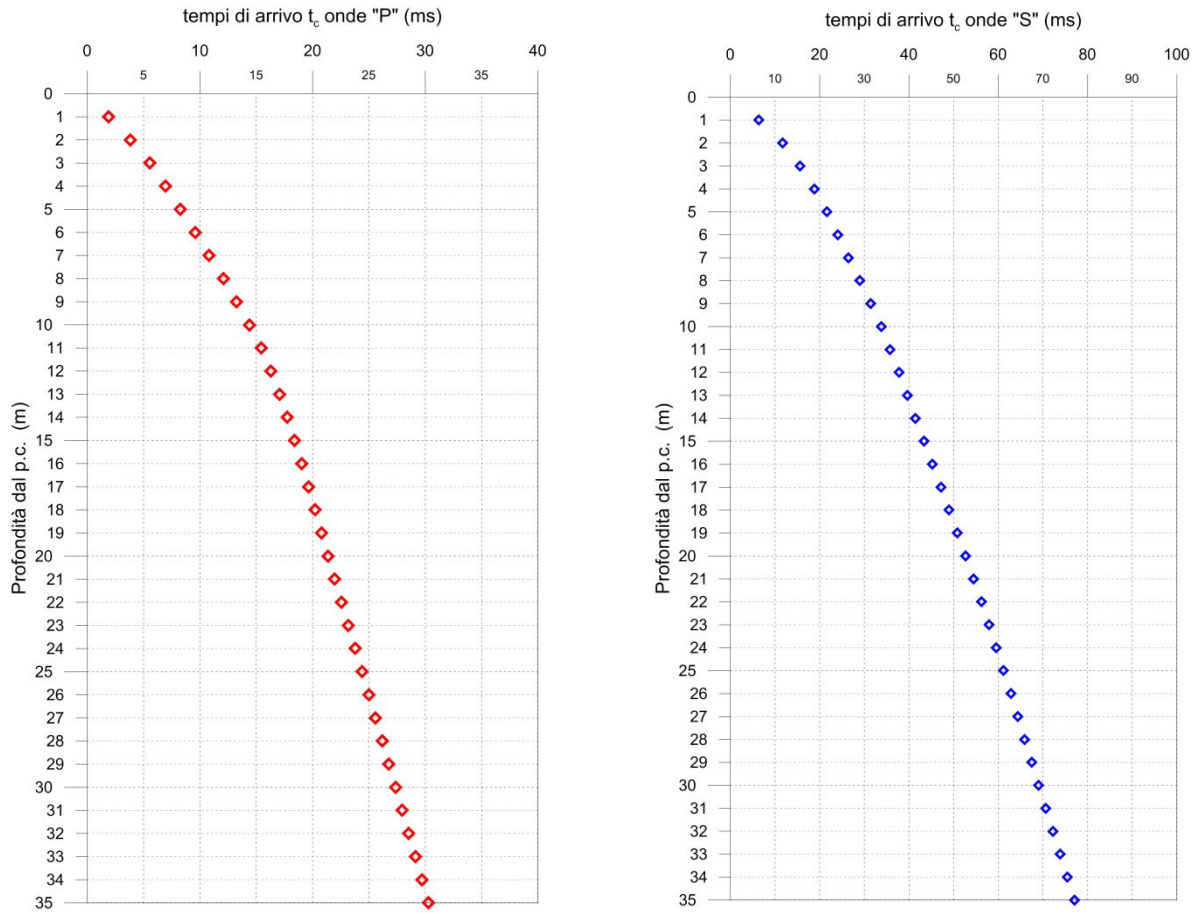


Fig. 3.4.1 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c.

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

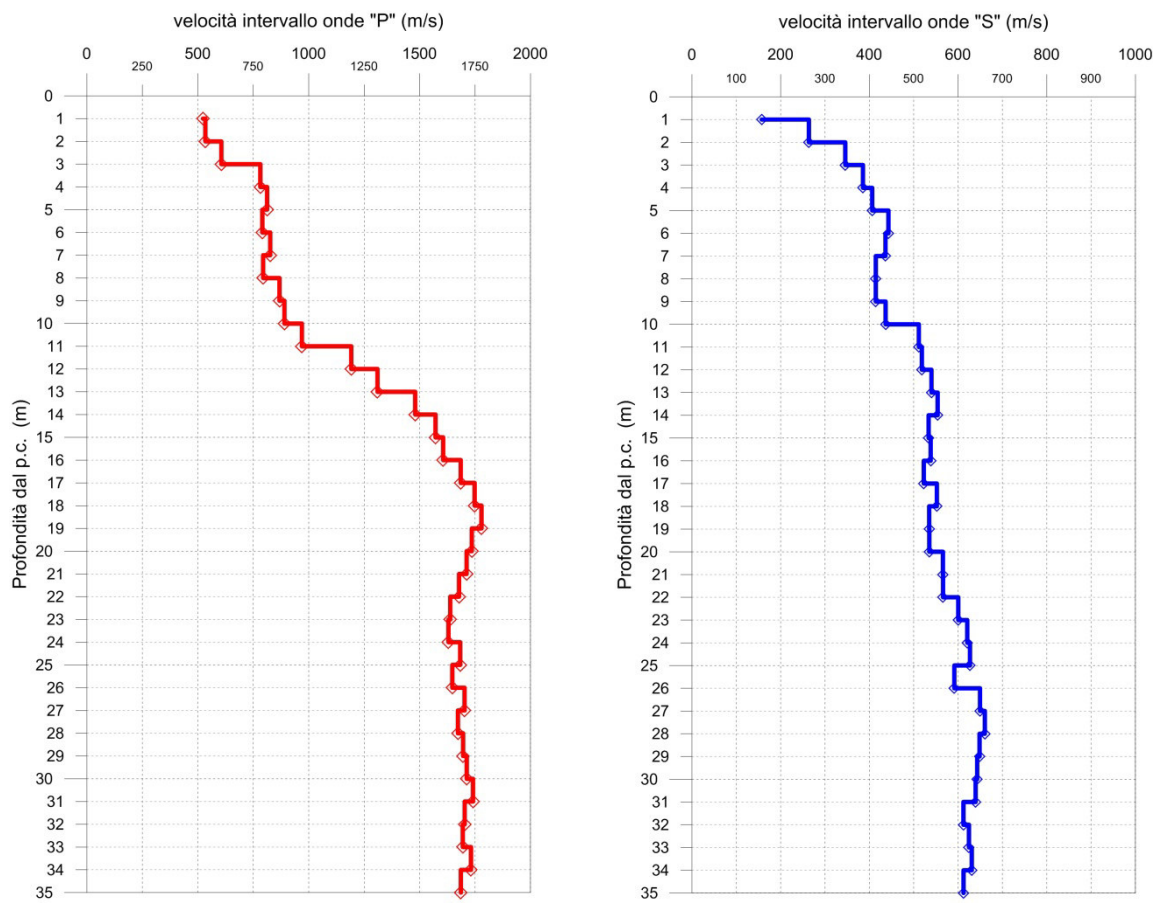


Fig. 3.4.2 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità.

A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t _o "P" (ms)	tempi osservati t _o "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	4,27	14,23	1,91	6,36	523	157	3,3	0,45	1,8	44	129	434
2	5,38	16,48	3,81	11,65	534	264	2,0	0,34	1,8	125	335	346
3	6,67	18,73	5,55	15,58	606	346	1,8	0,26	1,8	215	542	374
4	7,77	20,97	6,95	18,76	782	386	2,0	0,34	1,8	268	717	744
5	8,90	23,22	8,26	21,56	812	406	2,0	0,33	1,8	297	792	791
6	10,09	25,34	9,57	24,04	791	443	1,8	0,27	1,8	353	898	655
7	11,24	27,53	10,81	26,47	827	436	1,9	0,31	1,8	343	896	773
8	12,46	29,86	12,09	28,97	794	415	1,9	0,31	1,8	309	813	724
9	13,58	32,21	13,26	31,44	868	414	2,1	0,35	1,8	309	836	945
10	14,68	34,45	14,39	33,78	890	437	2,0	0,34	1,8	343	921	970
11	15,69	36,37	15,44	35,78	969	512	1,9	0,31	1,8	471	1232	1063
12	16,52	38,27	16,29	37,75	1192	519	2,3	0,38	1,8	484	1339	1912
13	17,27	40,10	17,07	39,63	1310	540	2,4	0,40	1,8	525	1467	2390
14	17,94	41,88	17,76	41,46	1480	554	2,7	0,42	1,8	552	1567	3209
15	18,57	43,74	18,41	43,36	1572	534	2,9	0,43	1,9	541	1553	3973
16	19,19	45,58	19,04	45,23	1606	538	3,0	0,44	1,9	551	1582	4167
17	19,78	47,48	19,64	47,16	1685	523	3,2	0,45	1,9	519	1503	4705
18	20,34	49,28	20,22	48,98	1748	552	3,2	0,44	1,9	580	1675	5032
19	20,90	51,14	20,79	50,86	1779	535	3,3	0,45	1,9	544	1577	5287
20	21,48	53,00	21,37	52,74	1736	535	3,2	0,45	1,9	544	1575	4998
21	22,06	54,76	21,96	54,51	1712	566	3,0	0,44	1,9	608	1751	4757
22	22,65	56,52	22,56	56,28	1678	566	3,0	0,44	1,9	609	1749	4537
23	23,26	58,17	23,17	57,96	1638	600	2,7	0,42	1,9	685	1949	4186
24	23,87	59,78	23,79	59,57	1630	621	2,6	0,42	1,9	732	2072	4074
25	24,46	61,37	24,38	61,17	1683	627	2,7	0,42	1,9	747	2120	4387
26	25,07	63,05	24,99	62,87	1647	592	2,8	0,43	1,9	665	1897	4270
27	25,65	64,59	25,58	64,41	1703	650	2,6	0,41	1,9	802	2269	4442
28	26,25	66,10	26,18	65,93	1673	661	2,5	0,41	1,9	829	2334	4210
29	26,84	67,64	26,77	67,48	1696	649	2,6	0,41	1,9	799	2261	4402
30	27,42	69,19	27,36	69,04	1712	643	2,7	0,42	1,9	786	2228	4523
31	27,99	70,75	27,94	70,60	1741	640	2,7	0,42	2,0	818	2326	4971
32	28,58	72,38	28,52	72,24	1704	612	2,8	0,43	2,0	750	2138	4804
33	29,17	73,98	29,11	73,84	1695	625	2,7	0,42	2,0	780	2218	4703
34	29,74	75,56	29,69	75,43	1732	631	2,7	0,42	2,0	796	2267	4938
35	30,34	77,19	30,29	77,06	1686	612	2,8	0,42	2,0	750	2137	4684

Tab. 3.4.1 – Tirano (SO). Indagine down-hole S02_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.

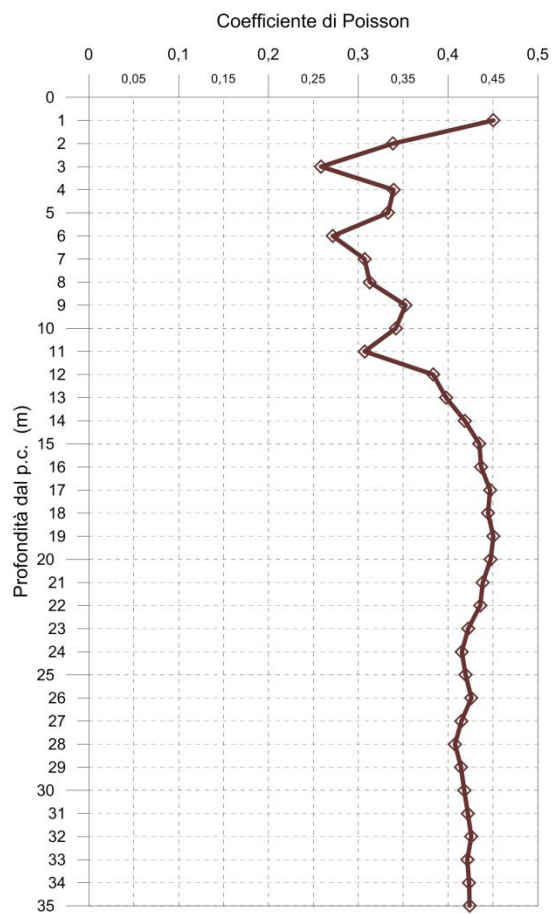


Fig. 3.4.3 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

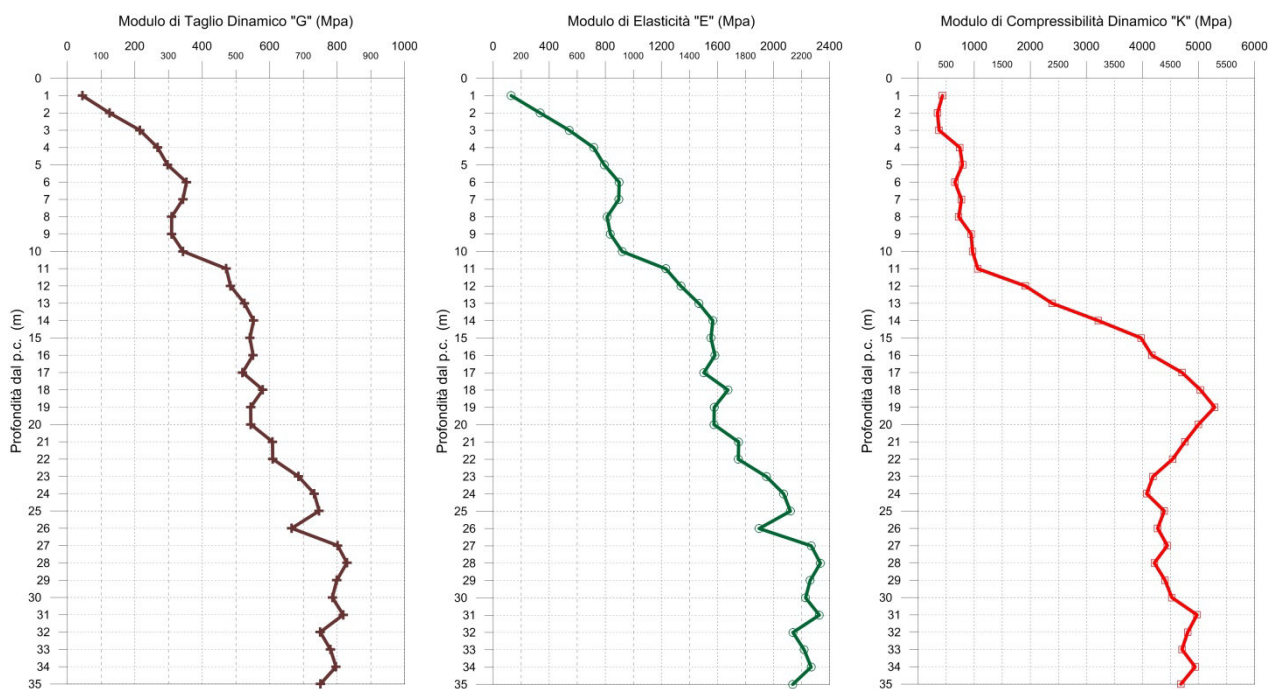


Fig. 3.4.4 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c.
 Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c.
 A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione 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)		$(V_P)_{\text{medio}}$ m/s	$(V_S)_{\text{medio}}$ m/s
	da	a		
1°	1,0	3,0	535	184
2°	3,0	5,0	703	320
3°	5,0	11,0	851	422
4°	11,0	35,0	1.623	580

Tab. 3.4.2 - Tirano (SO). Indagine down-hole S02_DH. Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

3.4.2 S06_DH

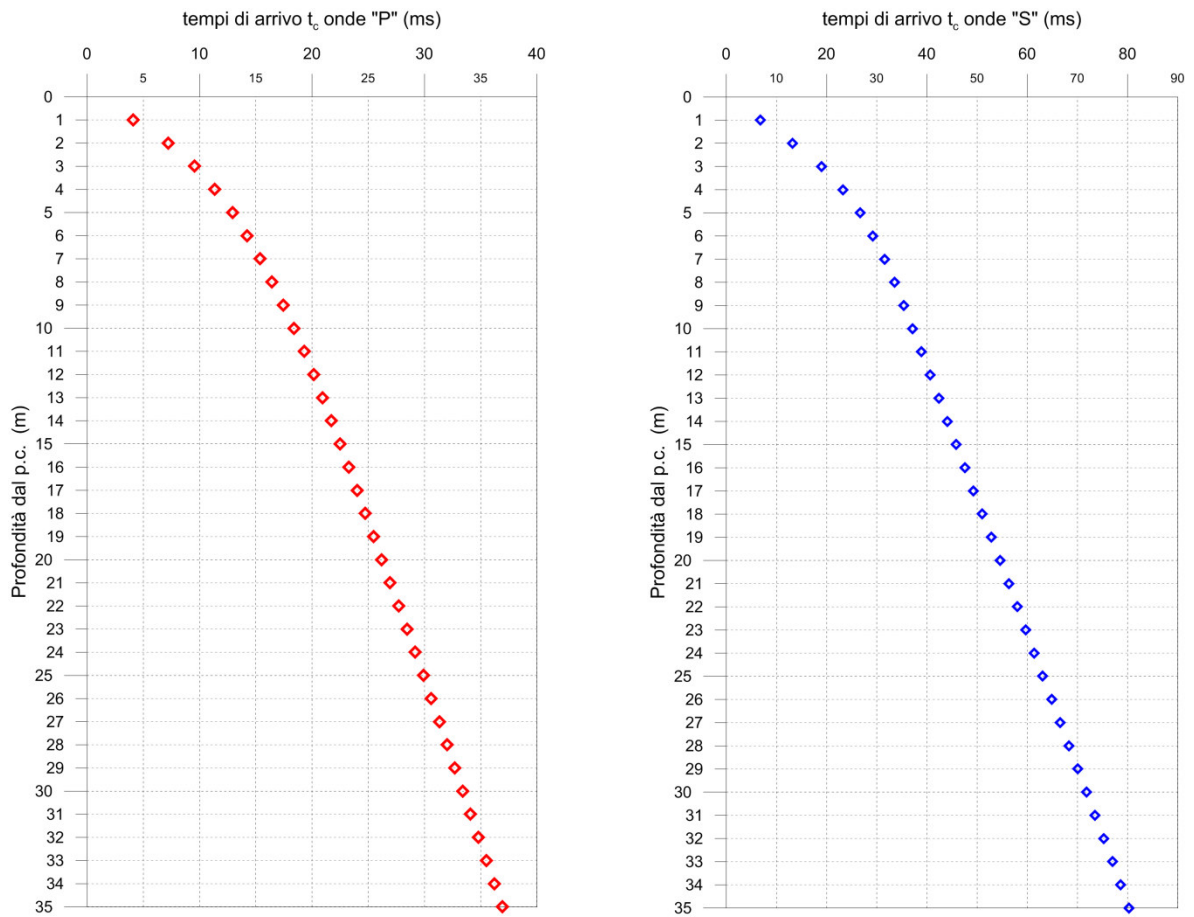


Fig. 3.4.5 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c.

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

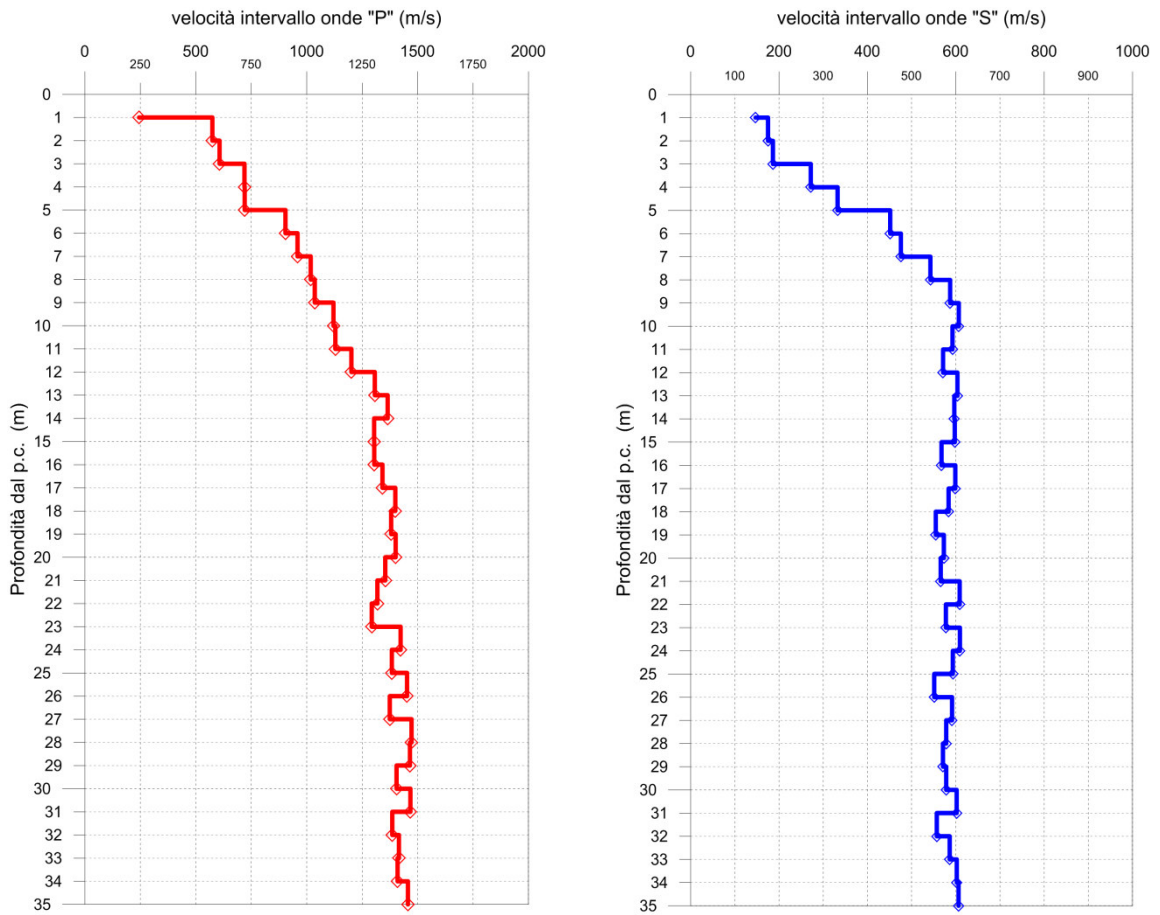


Fig. 3.4.6 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità.

A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t_0 "P" (ms)	tempi osservati t_0 "S" (ms)	tempi corretti t_c "P" (ms)	tempi corretti t_c "S" (ms)	velocità intervallo V_p (m/s)	velocità intervallo V_s (m/s)	Vp/Vs	Poisson (n)	γ_n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	9.17	15.22	4.10	6.81	244	147	1.7	0.22	1.8	39	94	55
2	10.20	18.61	7.21	13.16	574	175	3.3	0.45	1.8	55	160	521
3	11.48	22.78	9.55	18.95	607	186	3.3	0.45	1.8	62	181	580
4	12.69	25.97	11.35	23.23	719	272	2.6	0.42	1.8	133	376	754
5	13.95	28.72	12.95	26.66	720	332	2.2	0.36	1.8	199	543	668
6	14.99	30.80	14.22	29.22	904	452	2.0	0.33	1.8	367	979	982
7	15.99	32.80	15.37	31.54	958	476	2.0	0.34	1.8	408	1089	1110
8	16.94	34.59	16.43	33.55	1018	543	1.9	0.30	1.8	530	1379	1159
9	17.88	36.24	17.45	35.38	1037	587	1.8	0.26	1.8	603	1525	1076
10	18.75	37.86	18.39	37.12	1121	607	1.8	0.29	1.7	626	1618	1301
11	19.62	39.51	19.30	38.88	1129	593	1.9	0.31	1.8	632	1656	1452
12	20.44	41.24	20.16	40.68	1201	571	2.1	0.35	1.9	613	1661	1896
13	21.20	42.87	20.95	42.38	1307	604	2.2	0.36	1.8	638	1741	2138
14	21.92	44.53	21.70	44.08	1365	597	2.3	0.38	1.8	641	1772	2499
15	22.68	46.19	22.48	45.78	1304	598	2.2	0.37	1.9	679	1855	2327
16	23.44	47.94	23.26	47.57	1305	568	2.3	0.38	2.0	638	1765	2519
17	24.18	49.59	24.01	49.25	1342	599	2.2	0.38	1.9	681	1875	2511
18	24.89	51.30	24.74	50.98	1399	584	2.4	0.39	1.9	647	1805	2858
19	25.61	53.09	25.47	52.80	1381	555	2.5	0.40	2.0	609	1711	2963
20	26.32	54.82	26.19	54.55	1401	573	2.4	0.40	1.9	624	1746	2898
21	27.06	56.58	26.93	56.33	1354	566	2.4	0.39	1.9	609	1697	2672
22	27.81	58.22	27.70	57.98	1319	609	2.2	0.36	1.8	660	1801	2216
23	28.58	59.94	28.47	59.72	1294	577	2.2	0.38	2.0	650	1789	2396
24	29.28	61.58	29.18	61.36	1423	609	2.3	0.39	1.8	676	1876	2787
25	30.00	63.26	29.90	63.06	1384	593	2.3	0.39	1.9	669	1856	2746
26	30.70	65.07	30.61	64.87	1432	551	2.6	0.41	2.0	611	1726	3306
27	31.38	66.75	31.30	66.57	1455	592	2.5	0.40	1.8	630	1765	2969
28	32.09	68.48	32.01	68.30	1410	578	2.4	0.40	1.9	635	1778	2931
29	32.77	70.22	32.69	70.06	1466	571	2.6	0.41	1.9	619	1747	3256
30	33.48	71.95	33.41	71.79	1405	578	2.4	0.40	1.9	636	1778	2904
31	34.16	73.61	34.09	73.45	1467	602	2.4	0.40	1.8	660	1845	3040
32	34.88	75.40	34.81	75.25	1386	557	2.5	0.40	2.0	623	1750	3030
33	35.59	77.10	35.52	76.96	1416	586	2.4	0.40	1.9	653	1824	2938
34	36.29	78.76	36.23	78.62	1410	602	2.3	0.39	1.9	685	1903	2843
35	36.99	80.40	36.93	80.27	1436	606	2.4	0.39	1.9	699	1944	2984

Tab. 3.4.3 - Tirano (SO). Indagine down-hole S06_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.

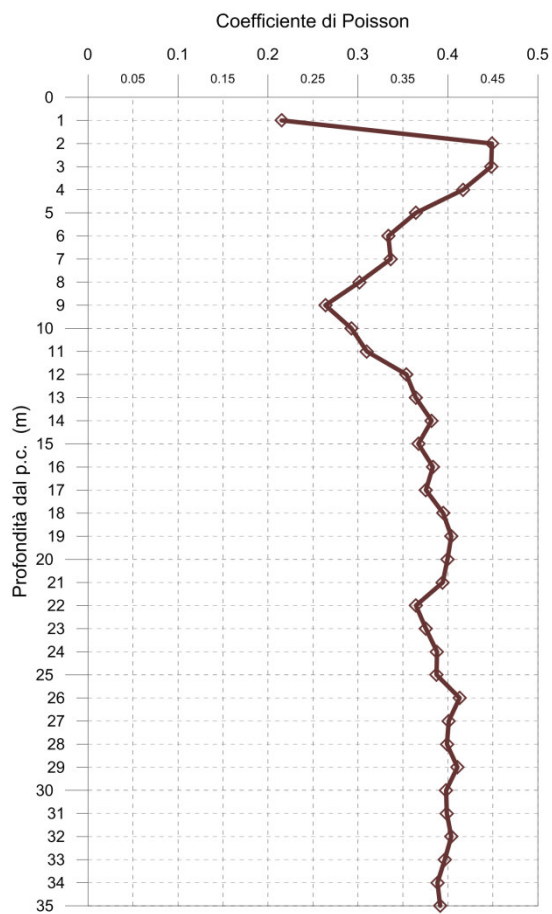


Fig. 3.4.7 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

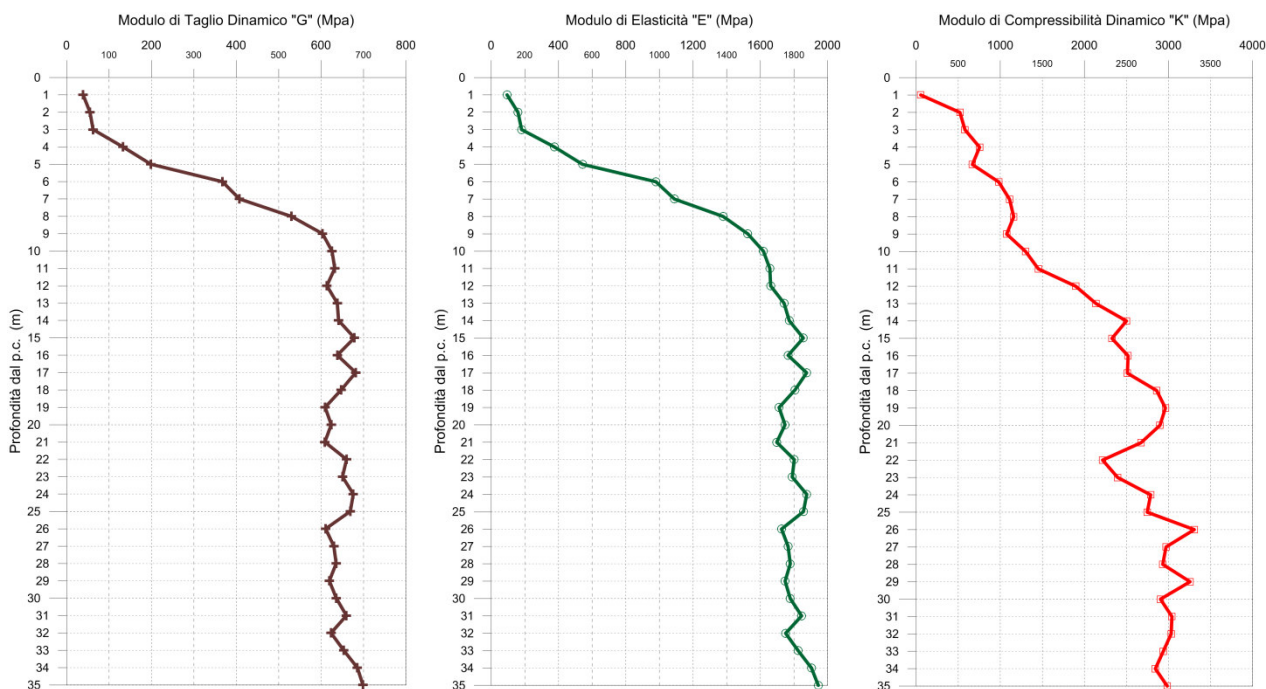


Fig. 3.4.8 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c.
 Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c.
 A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione 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)		$(V_P)_{medio}$ m/s	$(V_S)_{medio}$ m/s
	da	a		
1°	1,0	3,0	309	158
2°	3,0	5,0	581	255
3°	5,0	9,0	881	452
4°	9,0	16,0	1.183	574
5°	16,0	35,0	1.393	783

Tab. 3.4.4 - Tirano (SO). Indagine down-hole S06_DH. Suddivisione del sottosuolo in sismostrati.

3.4.3 S11_DH

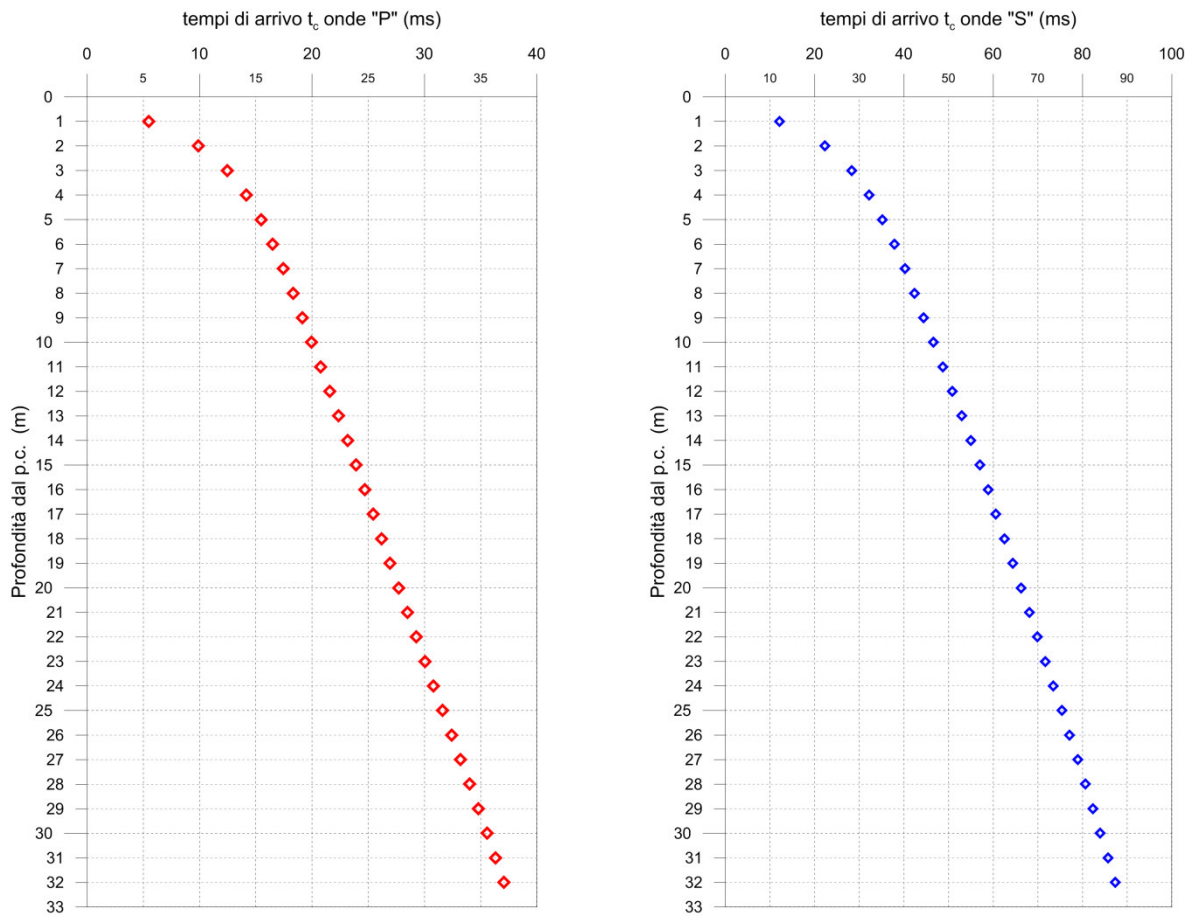


Fig. 3.4.9 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c.

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

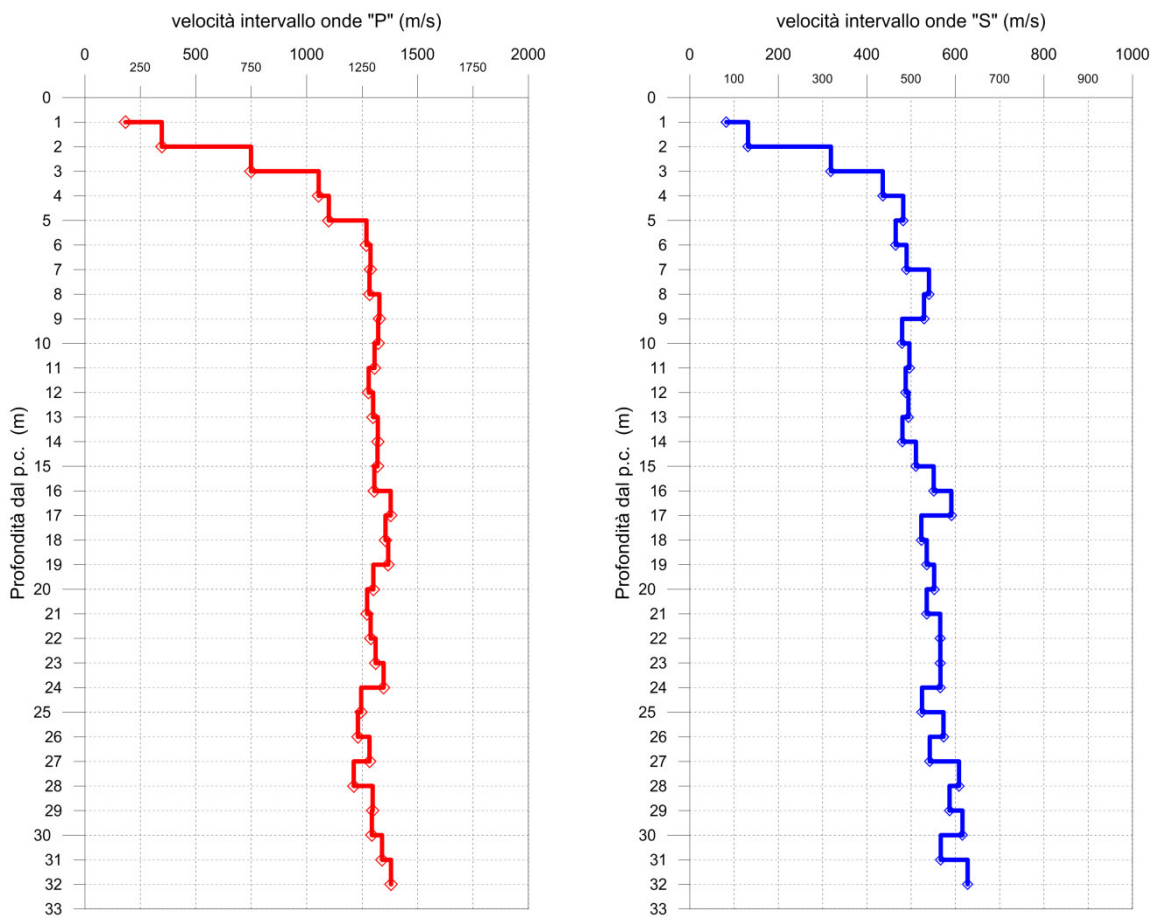


Fig. 3.4.10 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità.

A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t_p "P" (ms)	tempi osservati t_s "S" (ms)	tempi corretti t_p "P" (ms)	tempi corretti t_s "S" (ms)	velocità intervallo V_p (m/s)	velocità intervallo V_s (m/s)	V_p/V_s	Poisson (n)	γ_n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	12.25	27.06	5.48	12.10	183	83	2.2	0.37	1.8	12	34	44
2	13.96	31.56	9.87	22.32	346	132	2.6	0.42	1.8	31	88	174
3	15.00	34.00	12.48	28.29	749	319	2.3	0.39	1.8	183	508	765
4	15.82	35.99	14.15	32.19	1054	436	2.4	0.40	1.8	342	955	1545
5	16.65	37.88	15.46	35.17	1100	482	2.3	0.38	1.7	395	1091	1530
6	17.39	39.90	16.50	37.85	1269	465	2.7	0.42	1.8	389	1107	2382
7	18.13	41.85	17.43	40.24	1288	490	2.6	0.42	1.8	432	1222	2410
8	18.89	43.64	18.32	42.34	1283	540	2.4	0.39	1.8	525	1463	2263
9	19.62	45.48	19.15	44.40	1328	529	2.5	0.41	1.8	504	1416	2502
10	20.36	47.52	19.96	46.60	1322	480	2.8	0.42	1.8	414	1180	2595
11	21.11	49.50	20.77	48.70	1306	496	2.6	0.42	1.8	443	1254	2481
12	21.88	51.52	21.58	50.82	1279	488	2.6	0.41	1.8	428	1212	2376
13	22.64	53.52	22.38	52.90	1299	494	2.6	0.42	1.8	439	1242	2453
14	23.39	55.58	23.15	55.02	1321	480	2.8	0.42	1.8	415	1182	2586
15	24.14	57.52	23.93	57.01	1319	511	2.6	0.41	1.9	496	1400	2645
16	24.90	59.32	24.71	58.86	1305	551	2.4	0.39	1.9	576	1604	2467
17	25.62	61.00	25.44	60.58	1379	591	2.3	0.39	1.7	601	1667	2469
18	26.35	62.90	26.19	62.52	1355	523	2.6	0.41	2.0	533	1506	2872
19	27.08	64.76	26.93	64.40	1368	535	2.6	0.41	2.0	559	1575	2902
20	27.85	66.56	27.71	66.23	1300	552	2.4	0.39	1.9	570	1584	2403
21	28.63	68.42	28.50	68.11	1273	535	2.4	0.39	2.0	575	1603	2489
22	29.40	70.18	29.28	69.89	1288	566	2.3	0.38	1.8	589	1626	2268
23	30.16	71.94	30.05	71.67	1311	566	2.3	0.39	1.9	609	1686	2452
24	30.90	73.70	30.79	73.45	1346	566	2.4	0.39	1.9	609	1696	2633
25	31.70	75.60	31.60	75.36	1246	525	2.4	0.39	2.1	578	1609	2489
26	32.51	77.34	32.41	77.11	1231	573	2.1	0.36	1.9	614	1672	2014
27	33.29	79.18	33.20	78.96	1283	542	2.4	0.39	2.0	579	1610	2473
28	34.11	80.82	34.02	80.61	1212	608	2.0	0.33	1.8	669	1783	1766
29	34.88	82.52	34.80	82.32	1297	587	2.2	0.37	1.9	661	1813	2349
30	35.65	84.14	35.57	83.95	1294	616	2.1	0.35	1.8	664	1797	2045
31	36.40	85.90	36.32	85.72	1339	567	2.4	0.39	2.0	636	1770	2703
32	37.12	87.49	37.05	87.32	1380	628	2.2	0.37	1.7	670	1835	2346

Tab. 3.4.5 - Tirano (SO). Indagine down-hole S11_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.

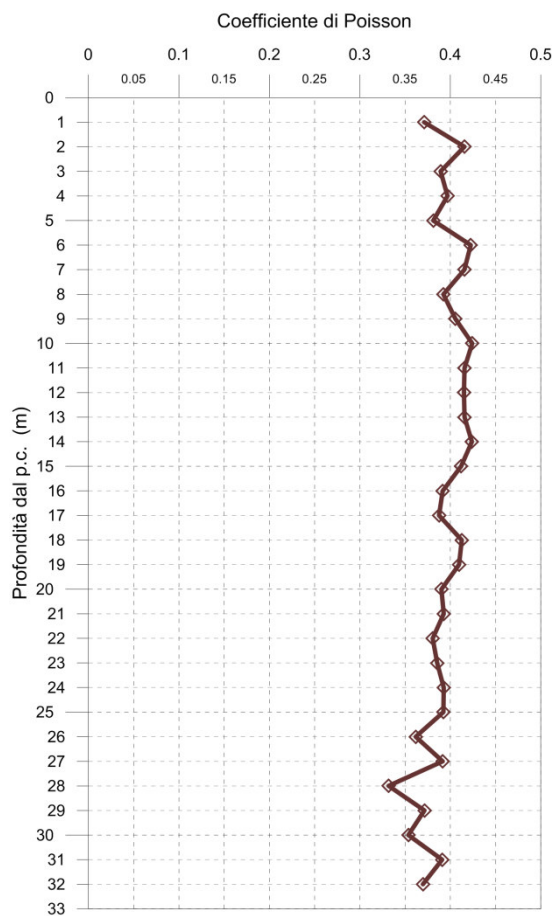


Fig. 3.4.11 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

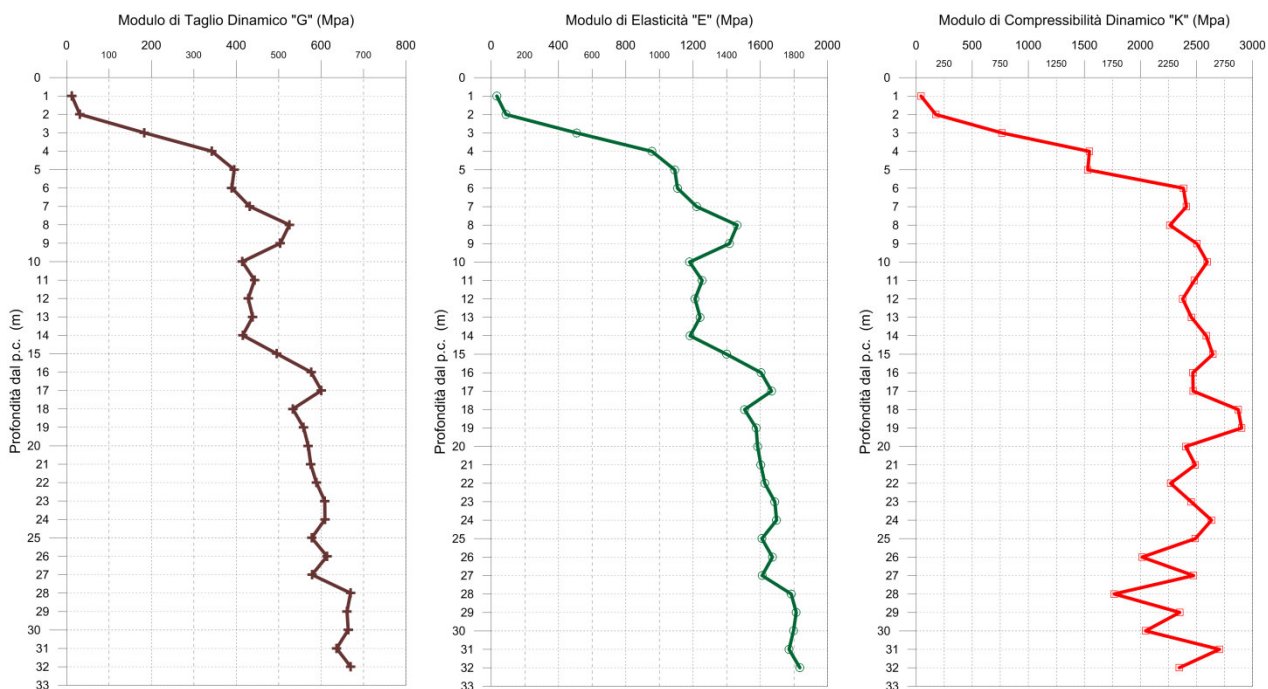


Fig. 3.4.12 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c.
 Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c.
 A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione 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	3,0	244	108
2°	3,0	6,0	738	312
3°	6,0	14,0	1.196	464
4°	14,0	32,0	1.295	558

Tab. 3.4.6 – Tirano (SO). Indagine down-hole S11_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 $V_{S,eq}$
S02_DH	463
S06_DH	439
S11_DH	405

Tab. 3.5.1 – Tirano (SO). Tabella riepilogativa del valore $V_{S,eq}$.

4 INDAGINE M.A.S.W.

4.1 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI

La tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), rappresenta una tipologia d'indagine sismica non invasiva che consente di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_S , basandosi sulla misura delle onde superficiali, fatta in corrispondenza di uno stendimento di sensori multipli (geofoni), disposti sulla superficie libera del terreno. Quando si energizza in un punto della sua superficie libera del terreno, si generano diversi tipi di onde. Se la sorgente è perpendicolare alla superficie, hanno origine onde appartenenti al piano verticale: onde P, onde SV, onde Rayleigh, onde rifratte. Se la sorgente è parallela alla superficie libera, si generano onde appartenenti al piano orizzontale: onde SH, onde di Love.

Nel metodo MASW di seguito descritto, si usano le onde di superficiali di Rayleigh e si trascurano gli effetti dovuti alle onde di volume, alle riflesse o alle rifratte. Sebbene una sorgente puntiforme verticale generi anche onde P ed S, oltre alle onde superficiali, intervengono due aspetti che rendono il contributo di dette onde prevalente sul contributo delle onde di volume. Il primo aspetto è che le onde Rayleigh trasportano circa i due terzi dell'energia generata dalla sorgente. Il secondo aspetto è che, allontanandosi dalla sorgente, le onde di Rayleigh subiscono un'attenuazione geometrica inferiore rispetto alle onde P e SV, perché esse si propagano secondo fronti d'onda cilindrici, mentre le onde P e SV si propagano secondo fronti d'onda sferici.

In sintesi, il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato, le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo ovvero la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza, con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, mentre onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo. Il metodo d'indagine MASW, descritto nella presente nota, è del tipo attivo ovvero le onde superficiali sono indotte o generate artificialmente mediante l'impatto di un grave sulla superficie del suolo e misurate ad uno stendimento lineare di sensori.

Un tipico schema di acquisizione di indagine MASW è mostrato di seguito.

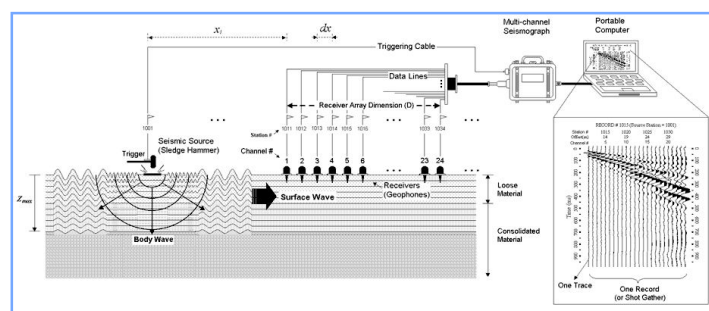


Fig. 4.1.1 – Esempio configurazione sorgente-ricevitori per l'esecuzione di un rilievo MASW.

Questo consente di ottenere uno spettro delle velocità di fase (ovvero una curva di dispersione) sperimentale apparente, generalmente nel range di frequenze compreso tra 4.5÷100 Hz; il metodo, pertanto, permette di ottenere informazioni indirette sulla parte del sottosuolo compresa (di norma) entro i primi 30÷50 metri circa dal piano campagna, in funzione della rigidità o rigidezza sismica dei litotipi costituenti il sottosuolo e della lunghezza dell'allineamento di sensori.

Il processo che viene usato per produrre profili di velocità delle onde S a partire dalle onde di Rayleigh, con la tecnica MASW, richiede tre passi descritti di seguito:

1. Dopo aver visionato i files d'interesse ed impostate le caratteristiche geometriche del profilo, in primo luogo viene calcolata la velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, mediante un processo di elaborazione che consente di estrarre la suddetta curva dallo spettro nel dominio frequenza-numero d'onda applicando una doppia trasformata di Fourier al campo di moto misurato originariamente nel dominio spazio-tempo.
2. Successivamente, viene calcolata la velocità di fase (o curva di dispersione) apparente numerica mediante modellazione del sottosuolo in termini di velocità delle onde P ed S, intervallo dei valori del coefficiente di Poisson e densità dei terreni.
3. La terza fase consiste, infine, nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore degli orizzonti litologici e la densità fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase sperimentale e quella numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

L'analisi multicanale delle onde di superficie può essere applicata in due differenti modi: attiva o passiva. La differenza tra le due tecniche, oltre al fatto che nella passiva non si prevedono energizzazioni artificiali, è essenzialmente legata alla possibilità di avere sorgenti naturali che possono fornire l'energia sufficiente per ottenere curve di dispersioni di buona qualità. Il sistema di indagine attiva consiste nell'usare una sorgente sismica ed una serie di ricevitori posti su una linea retta.

Dopo aver determinato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , si procede al calcolo della velocità equivalente nei primi 30 metri di profondità ($V_{s,30}$).

L'algoritmo di inversione della curva di dispersione del modo fondamentale delle onde di Rayleigh, utilizzato per i dati acquisiti, è quello proposto da Xia et al., 1999, caratterizzato da un metodo iterativo basato sul gradiente. Tale metodo utilizza un modello di sottosuolo iniziale stratificato, caratterizzato dai seguenti parametri: velocità delle onde S (V_s), velocità delle onde P (V_p), densità (ρ), spessore (h) e coefficiente di Poisson (Fig. 4.1.2).

Con questa serie di parametri, l'algoritmo di inversione cerca una soluzione in modo iterativo. Il modello iniziale di velocità delle onde S (V_s) è approssimato dalla misura della curva di dispersione, mentre il modello iniziale di velocità delle onde P (V_p) è individuato utilizzando V_s e il coefficiente di Poisson.

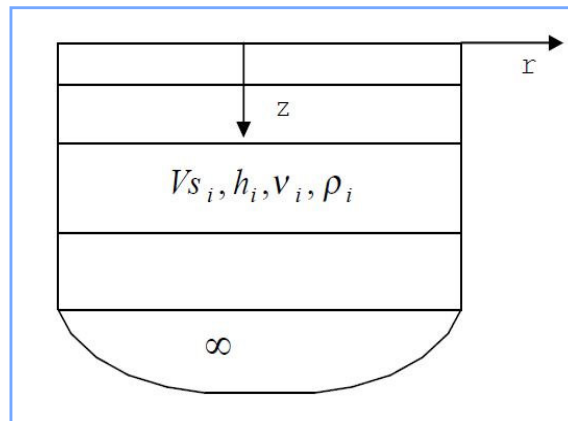


Fig. 4.1.2 – Modello di semispazio semplificato.

Viene poi definita una funzione obiettivo ed una matrice di pesi e, successivamente, minimizzata la funzione obiettivo con il metodo di Levenberg – Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

Si individua così il nuovo valore di V_s (Xia et al., 1999).

L'inversione della curva di dispersione permette di ricavare un profilo di velocità delle onde S, che è posizionato in corrispondenza della metà della stesa dei geofoni.

L'elaborazione dei dati è avvenuta avvalendosi dei seguenti software specialistici:

- IXSeg2Segy software per la visualizzazione dei segnali acquisiti;
- SURFSEIS 3.0 sviluppato dal Kansas Geological Survey – University of Kansas.

Mediante i programmi descritti, è stato possibile ottenere il profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo e, di conseguenza, calcolare la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,30}$.

4.2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Di seguito sono riportate le specifiche della strumentazione utilizzata per la prova MASW:

- Geofoni, 24 velocimetri a componente verticale, con frequenza pari a 4,5 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 "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.

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

4.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.2** indagini sismiche di superficie M.A.S.W., la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegata. Di seguito, si riportano le specifiche delle prospezioni, in cui sono riportate le coordinate di inizio e fine di ogni stendimento.

Codice indagine	Lunghezza (m)	Sistema di riferimento GAUSS - BOAGA			
		Coordinata iniziale EST	Coordinata iniziale NORD	Coordinata finale EST	Coordinata finale NORD
MASW-1	46,0	1588439,917	5116860,958	1588479,566	5116884,085
MASW-2	46,0	1589552,154	5117527,640	1589591,576	5117550,966

Tab. 4.3.1 - Tirano (SO). Indagine MASW. Elenco coordinate.

Il profilo altimetrico della prova MASW-1, varia da 405,91 m s.l.m., nel punto iniziale, a 406,50 m s.l.m., nel punto finale, mentre la quota altimetrica della prova MASW-2, varia da 420,51 m s.l.m., nel punto iniziale del profilo, a 419,72 m s.l.m., nel punto finale.

Per l'esecuzione del profilo MASW sono 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 è proceduto all'acquisizione dei segnali su ciascun punto prestabilito, esternamente al profilo stesso, ed alla memorizzazione dei dati sia sulla memoria di massa del sismografo sia sul *pen-drive*. Per quanto concerne la documentazione fotografica inerente le attività di campo, si rimanda alle schede allegate.

4.4 RISULTANZE DELL'INDAGINE MASW

Di seguito, sono riportate le risultanze delle prospezioni sismiche MASW, riepilogate tramite i seguenti elaborati prodotti per ciascuno dei due profili:

- sismogramma originale, in cui sono riportate le tracce registrate sull'intero array di geofoni costituenti lo stendimento;
- diagramma della trasformata bidimensionale del campo d'onda (nel sistema velocità di fase - frequenza f-k) con i massimi spettrali evidenziati;
- diagramma di confronto tra la curva di dispersione stimata e quella sintetica generata a partire dal modello finale di V_S ;
- profilo verticale dell'andamento della velocità delle onde S, in funzione della profondità, e confronto tra il profilo V_S di primo tentativo con quello finale, risultante del processo di inversione dei dati;
- tabella con i parametri calcolati (V_S , V_P , profondità e spessore dei sismostrati, modulo di Poisson e densità).

Infine, a seguito del processo di elaborazione esposto nei paragrafi precedenti, è stato ricavato il valore di velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,30}$.

4.4.1 MASW-1

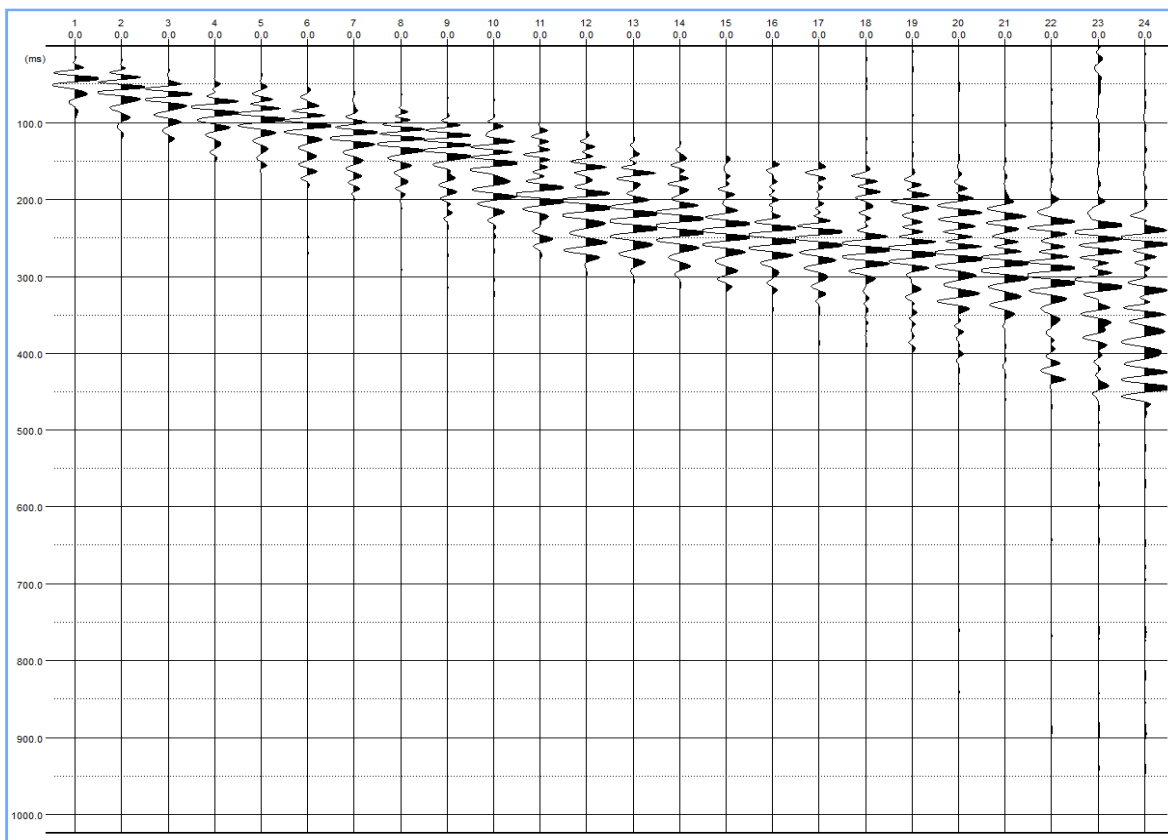


Fig. 4.4.1 – Tracce sismiche del segnale acquisito.

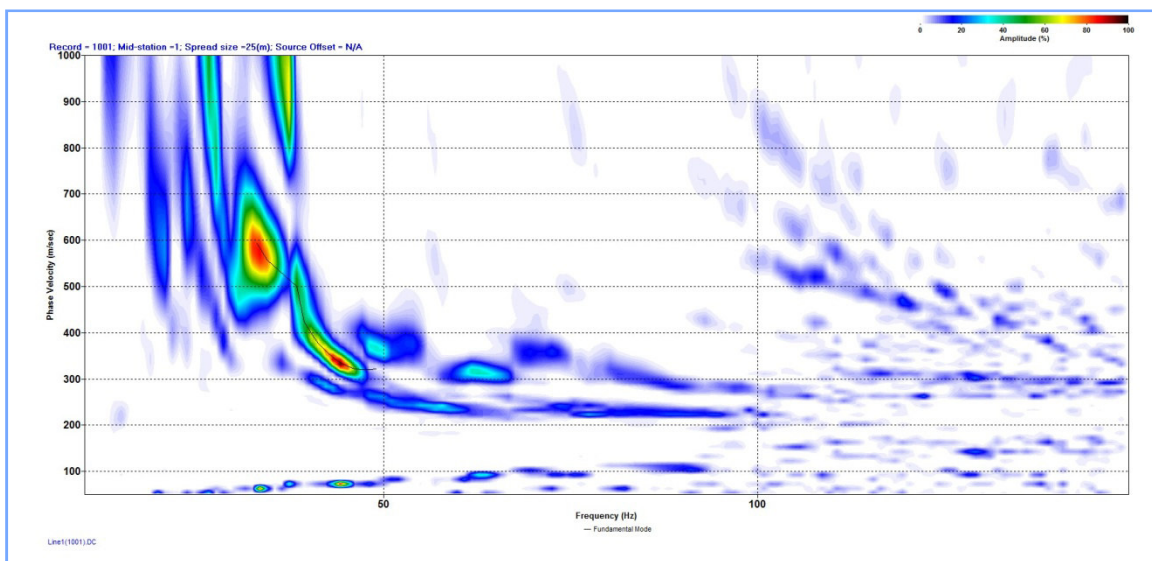


Fig. 4.4.2 – Curva F-V con evidenza del picking dei massimi spettrali.

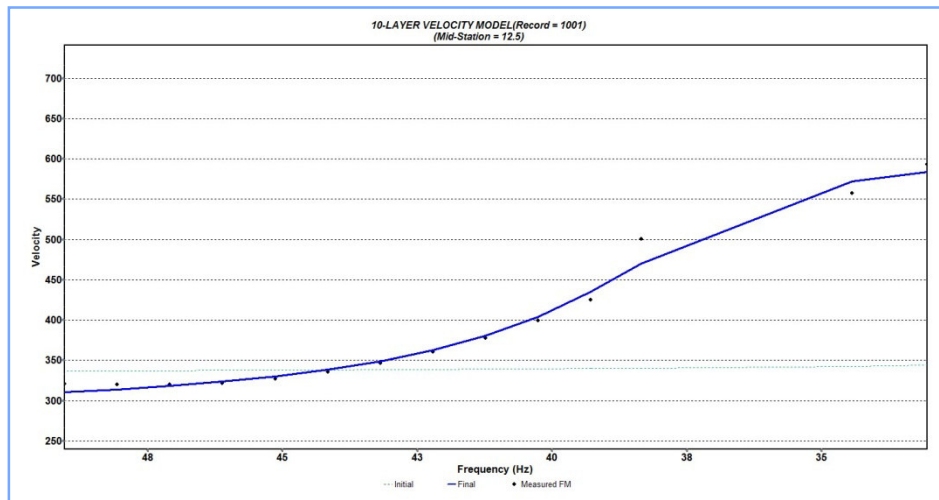


Fig. 4.4.3 - Confronto tra la curva di dispersione stimata e quella sintetica generata dal modello finale di V_s .

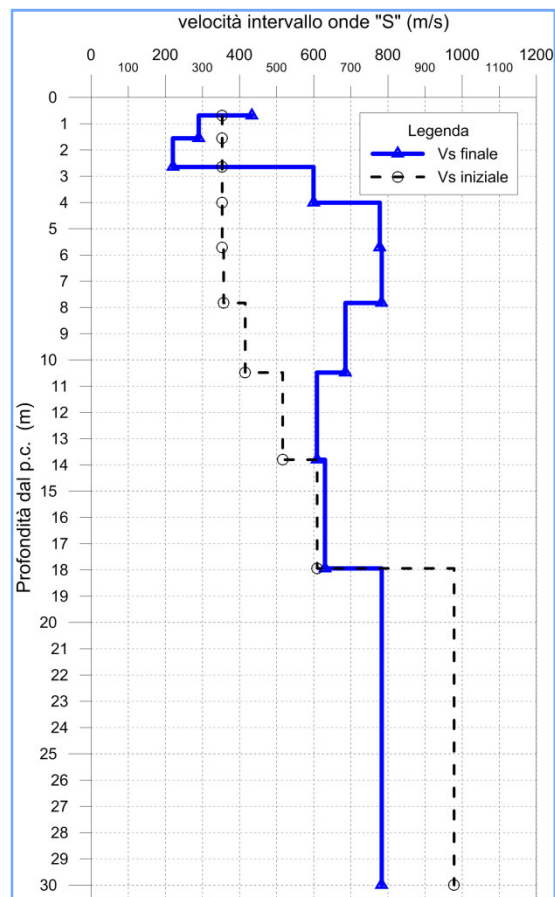


Fig. 4.4.4 - Profilo verticale della velocità delle onde S, in funzione della profondità, e confronto tra il profilo V_s iniziale con quello finale.

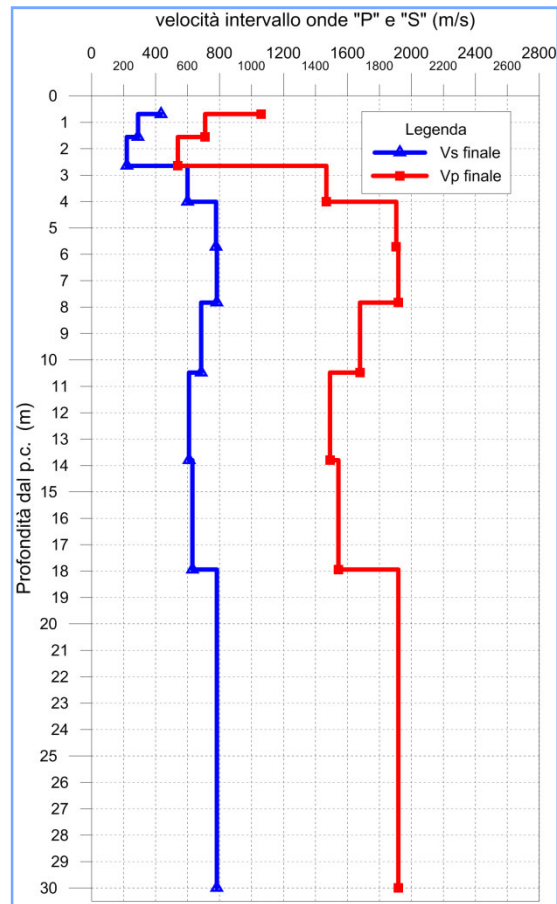


Fig. 4.4.5 – Profilo verticale della velocità delle onde S finale e profilo delle onde P finale, in funzione della profondità.

Numero di Strati	Profondità iniziale (m dal p.c)	Spessore (m)	Vs iniziale (m/s)	Vp iniziale (m/s)	Poisson (-)	Densità (gr/cm ³)
1	0.7	0.7	353	1061	0.4	1.6
2	1.6	0.9	353	710	0.4	1.6
3	2.7	1.1	353	539	0.4	1.7
4	4.0	1.4	353	1468	0.4	1.7
5	5.7	1.7	353	1905	0.4	1.8
6	7.8	2.1	357	1918	0.4	1.8
7	10.5	2.7	415	1678	0.4	1.9
8	13.8	3.3	516	1491	0.4	1.9
9	17.9	4.1	609	1543	0.4	2.0
10	HalfSpace	N/A	978	1918	0.4	2.0

Tab. 4.4.1 – Tirano (SO). Indagine MASW-1. Riepilogo dei parametri assunti a priori.

Numero di Strati	Profondità (m dal p.c)	Vs finale (m/s)	Vp finale (m/s)	Spessore (m)	h/Vs
1	0.7	433	1061	0.7	0.0016
2	1.6	290	710	0.9	0.0030
3	2.7	220	539	1.1	0.0050
4	4.0	599	1468	1.4	0.0023
5	5.7	778	1905	1.7	0.0022
6	7.8	783	1918	2.1	0.0027
7	10.5	685	1678	2.7	0.0039
8	13.8	609	1491	3.3	0.0055
9	17.9	630	1543	4.1	0.0066
10	30.0	783	1918	12.1	0.0154

Tab. 4.4.2 – Tirano (SO). Indagine MASW-1. Riepilogo dei parametri calcolati.

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, $V_{s,30}$:

Codice indagine	Valore $V_{s,30}$
MASW-1	625 m/s

Tab. 4.4.3 – Tirano (SO). Indagine MASW-1. Tabella riepilogativa del valore $V_{s,30}$.

4.4.2 MASW-2

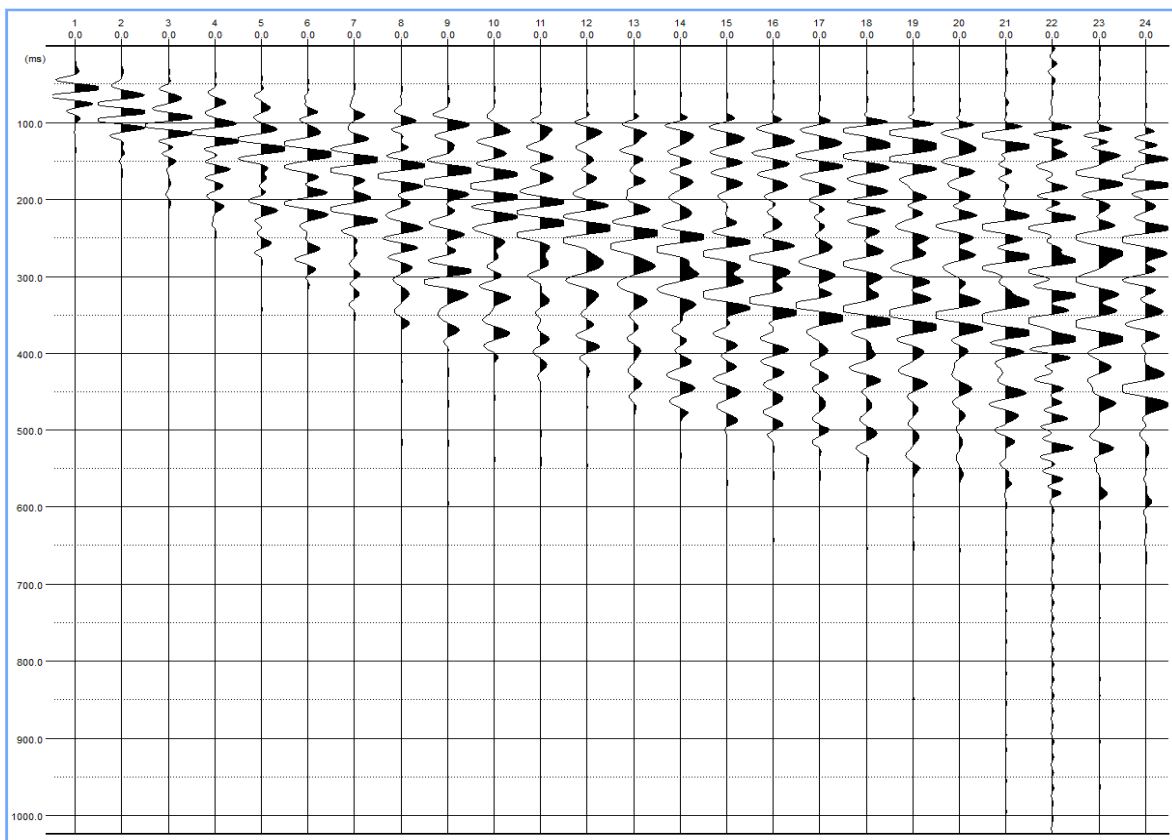


Fig. 4.4.6 - Tracce sismiche del segnale acquisito.

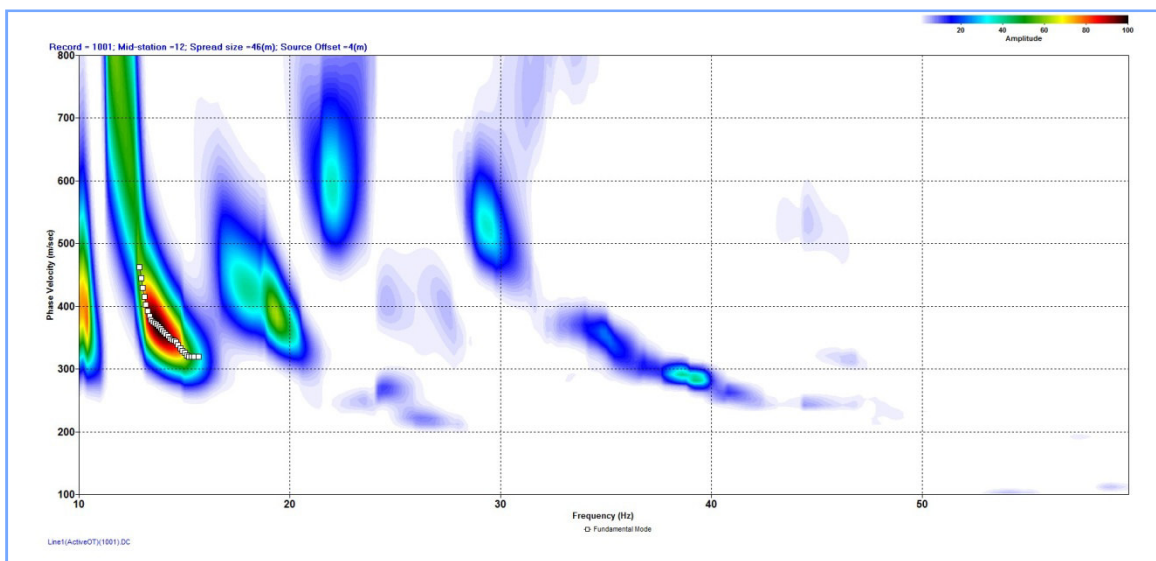


Fig. 4.4.7 - Curva F-V con evidenza del picking dei massimi spettrali.

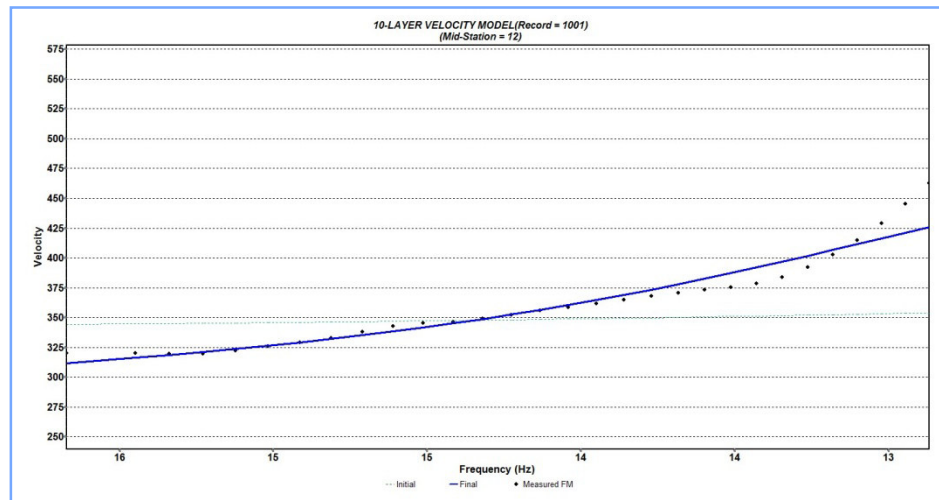


Fig. 4.4.8 - Confronto tra la curva di dispersione stimata e quella sintetica generata dal modello finale di V_s .

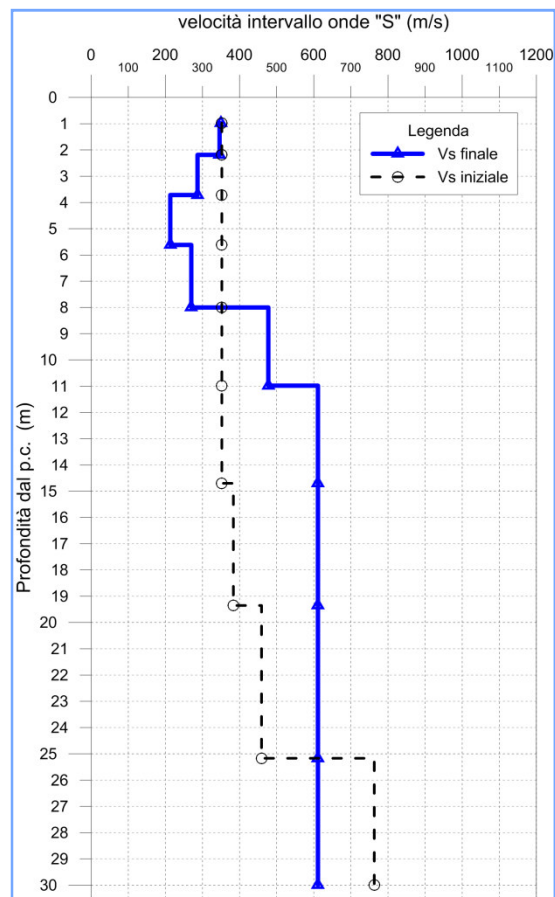


Fig. 4.4.9 - Profilo verticale della velocità delle onde S, in funzione della profondità, e confronto tra il profilo V_s iniziale con quello finale.

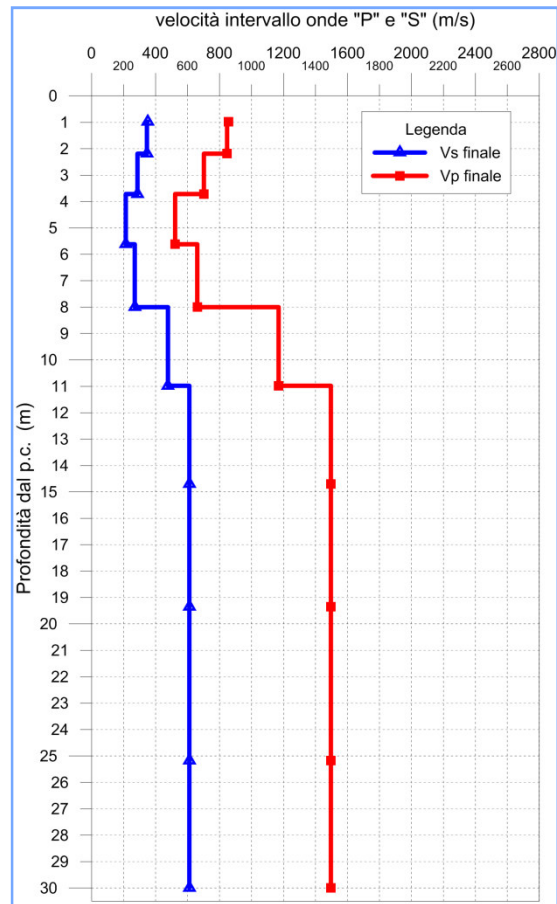


Fig. 4.4.10 – Profilo verticale della velocità delle onde S finale e profilo delle onde P finale, in funzione della profondità.

Numero di Strati	Profondità iniziale (m dal p.c)	Spessore (m)	Vs iniziale (m/s)	Vp iniziale (m/s)	Poisson (-)	Densità (gr/cm ³)
1	1.0	1.0	352	857	0.4	1.6
2	2.2	1.2	352	847	0.4	1.6
3	3.7	1.5	352	702	0.4	1.7
4	5.6	1.9	352	522	0.4	1.7
5	8.0	2.4	352	661	0.4	1.8
6	11.0	3.0	352	1169	0.4	1.8
7	14.7	3.7	352	1497	0.4	1.9
8	19.4	4.7	383	1497	0.4	1.9
9	25.2	5.8	459	1497	0.4	2.0
10	HalfSpace	N/A	763	1497	0.4	2.0

Tab. 4.4.4 – Tirano (SO). Indagine MASW-2. Riepilogo dei parametri assunti a priori.

Numero di Strati	Profondità (m dal p.c)	Vs finale (m/s)	Vp finale (m/s)	Spessore (m)	h/Vs
1	1.0	350	857	1.0	0.0028
2	2.2	346	847	1.2	0.0035
3	3.7	287	702	1.5	0.0053
4	5.6	213	522	1.9	0.0089
5	8.0	270	661	2.4	0.0088
6	11.0	477	1169	3.0	0.0062
7	14.7	611	1497	3.7	0.0061
8	19.4	611	1497	4.7	0.0076
9	25.2	611	1497	5.8	0.0095
10	30.0	611	1497	4.8	0.0079

Tab. 4.4.5 – Tirano (SO). Indagine MASW-2. Riepilogo dei parametri calcolati.

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, $V_{s,30}$:

Codice indagine	Valore $V_{s,30}$
MASW-2	449 m/s

Tab. 4.4.6 – Tirano (SO). Indagine MASW-2. Tabella riepilogativa del valore $V_{s,30}$.



ANAS S.p.A. - Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori
Progettazione Esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano - Tratta "A"
(Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e Tratta "B"
(Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"

Documentazione indagini geofisiche

ALLEGATO FOTOGRAFICO

ALLEGATO

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS01 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS02 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS03 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS04 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS05 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*



TECNO IN S.p.A.

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: BS06 (sismica a rifrazione)



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*



TECNO IN S.p.A.

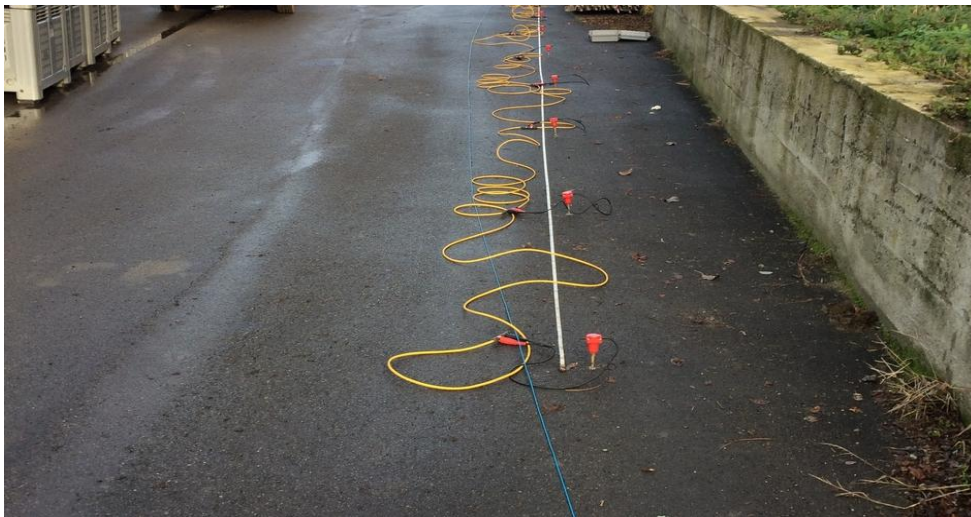
Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: MASW-1



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: MASW-2



Canale_1



Canale_24

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: S02_DH



Fase di acquisizione - postazione di misurazione



Fase di acquisizione onde "S"

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: S06_DH



Fase di acquisizione onde "P"



Fase di acquisizione onde "S"

Committente: **ANAS SPA**

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

Oggetto: *Progettazione esecutiva dell'intervento "S.S. 38 - Lotto 4: Nodo di Tirano -
Tratta "A" (Svincolo di Bianzone - Svincolo La Ganda) e
Tratta "B" (Svincolo La Ganda - Campione in Tirano)"*

Reg.comm.: 244/18

Località: *Tirano e Bianzone (SO)*



TECNO IN S.p.A.

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

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Profilo: S11_DH



Fase di acquisizione onde "P"



Fase di acquisizione onde "S"