

STRADA STATALE 4 "VIA SALARIA"
**Adeguamento della piattaforma stradale e messa in
sicurezza dal km 56+000 al km 64+000**
Stralcio 1 (pk 0+000 – 1+900)

PROGETTO ESECUTIVO
COD. RM368

PROGETTAZIONE: R.T.I.: PROGER S.p.A. (capogruppo mandataria)
PROGIN S.p.A.
S.I.N.A. S.p.A. – BRENG S.r.l.

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Antonio GRIMALDI (Progin S.p.A.)
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli n. 23799

CAPOGRUPPO MANDATARIA:


IL GEOLOGO:
Dott. Geol. Gianluca PANDOLFI ELMI (Progin S.p.A.)
Ordine dei Geologi Regione Umbria n. 467



Direttore Tecnico:
Dott. Ing. Lorenzo INFANTE

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:
Dott. Ing. Michele CURIALE (Progin S.p.A.)



VISTO: IL RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO
Dott. Ing. Paolo NARDOCCI


PROTOCOLLO
DATA

Gennaio 2024

STUDI, RILIEVI ED INDAGINI – INDAGINI PREESISTENTI
Report dei risultati delle indagini geofisiche preesistenti

CODICE PROGETTO

D	P	R	M	3	6	8	E	2	3
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

NOME FILE
 T01GE00GEORE02C

CODICE ELAB.

T	0	1	G	E	0	0	G	E	0	R	E	0	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

REVISIONE
SCALA:

C

-

C	Emissione a seguito istruttoria ANAS e Validazione	01 - 2024	F. Pontoni	G. Pandolfi	L. Infante
B	Emissione a seguito istruttoria ANAS	05 - 2023	F. Pontoni	G. Pandolfi	L. Infante
A	Prima emissione	11-2022	F. Pontoni	G. Pandolfi	L. Infante
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

Sommario

1	PREMESSA	1
----------	-----------------------	----------

Allegati: Rapporto Tecno In Spa Indagini Geofisiche - Maggio 2021

1 PREMESSA

In allegato vengono riportati i risultati della campagna di indagine geofisica eseguita per la progettazione definitiva dalla Società Tecno In S.p.A. nel maggio 2021, per quanto riguarda le indagini ricadenti nello stralcio 1 dalla pk 1+000 alla pk 1+900.

INDAGINI GEOFISICHE

Tipo Indagine	Denominazione	Campagna Anno
MASW	MASW01	2021
Sismica rifrazione	R01	2021
Down-Hole	S02-DH	2021
	S03-DH	2021

DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

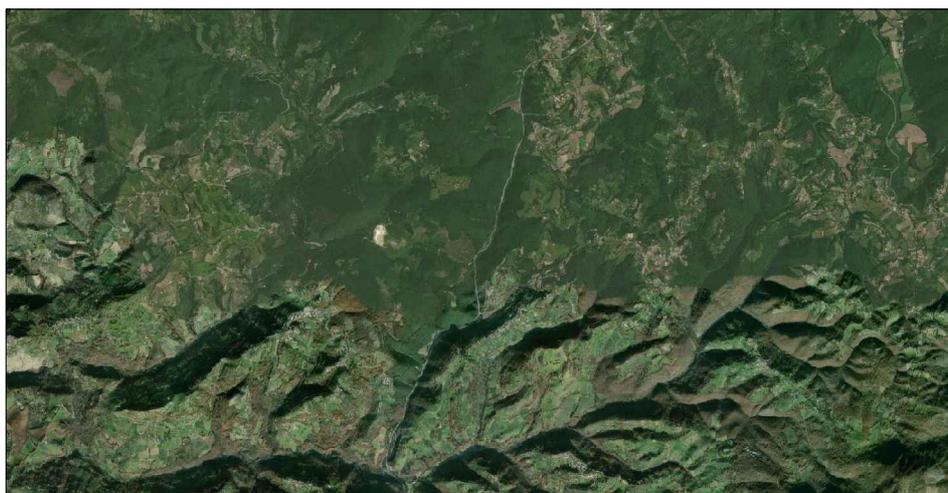


PROJECT:
INTERVENTO "S.S. 4 VIA SALARIA" - ADEGUAMENTO
DELLA PIATTAFORMA STRADALE E MESSA IN SICUREZZA
DAL KM 56+000 AL KM 64+000

LOCATION:
COMUNI DI CASAPROTA, POGGIO SAN
LORENZO E TORRICELLA IN SABINA (RI)

CLIENT:
ANAS S.p.A.

OBJECT:
DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 042/21
Revision n.: 00
Date: maggio 2021
Description: emissione

Redacted by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Reviewed by: Dr.ssa Geol. Maria Gabriella Vadalà
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 042-21_geofisica.pdf

INDICE

1	PREMESSA	3
2	INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	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	10
2.5	RISULTANZE DELLE INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	11
2.5.1	RIFRA1	12
2.5.2	RIFRA2	14
2.5.3	RIFRA3	16
3	INDAGINE DOWN-HOLE	18
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	18
3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	21
3.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	22
3.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE	28
3.4.1	S02-DH	29
3.4.2	S03-DH	34
3.4.3	S04-DH	39
3.4.4	S05-DH	44
3.4.5	S06-DH	49
3.4.6	S07-DH	54
3.4.7	S08-DH	59
3.4.8	S09-DH	64
3.4.9	S11-DH	69
4	INDAGINI HVSR	74
4.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	74
4.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	75
4.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	76
4.4	RISULTANZE DELLE INDAGINI HVSR	77
4.4.1	HVSR01	78
5	INDAGINI M.A.S.W.	83
5.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	83
5.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	86

5.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	87
5.4	DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI	89
5.4.1	Prospezione sismica - MASW01	90
5.4.2	Prospezione sismica - MASW02	92

1 PREMESSA

Il presente elaborato "Documentazione indagine geognostica" viene redatto per il Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000".

Le indagini ricadono nei comuni di Casaprota, Poggio San Lorenzo e Torricella in Sabina, in provincia di Rieti.

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

- n.3 prospezioni sismiche a rifrazione tomografica;
- n.9 indagine sismica down-hole;
- n. 1 indagine di rumore sismico ambientale a stazione singola, HVSR;
- n.2 prospezioni sismiche MASW.

Le indagini in oggetto sono state effettuate nel mese di Maggio 2021.

2 INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

2.1 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA

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

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

La generazione delle onde elastiche avviene presso una base sismica (Fig. 2.1), 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.

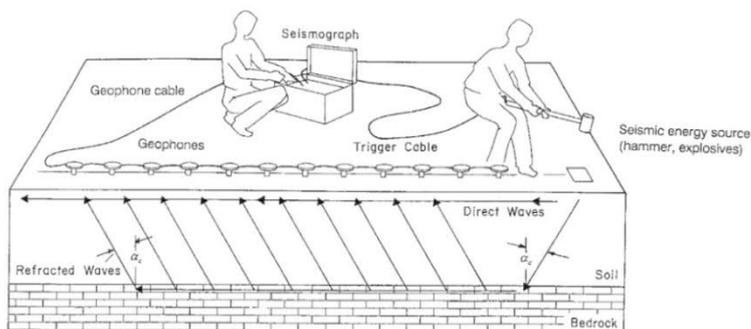


Fig. 2.1 – Schema esecutivo della sismica a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 – 00).

L'indagine eseguita con la metodologia della tomografia sismica a rifrazione necessita di un numero di tiri eseguiti sia internamente sia esternamente a ciascun stendimento. Nel caso in oggetto, sono stati eseguiti un numero di tiri compresi tra cinque e nove a seconda della lunghezza dello stesso stendimento. Di seguito, si riporta lo schema adottato per una base sismica lunga 120 metri (Fig. 2.2).

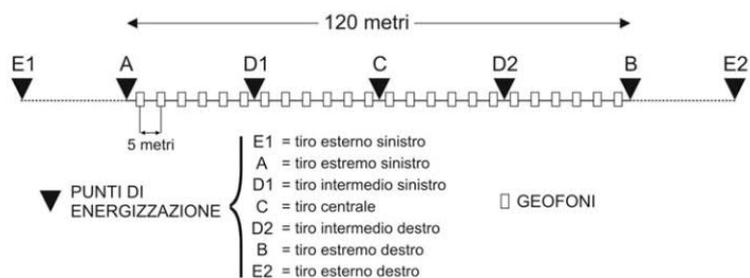


Fig. 2.2 – Tomografia sismica. Disposizione siti di energizzazione.

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 nonché da un energizzatore *minibang* equipaggiato con cartucce industriali calibro 8.

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

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

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

2.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.3** prospezioni sismiche a rifrazione, con elaborazione tomografica, la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riportano le specifiche di ciascuna prospezione:

Codice Indagine	Lunghezza base sismica (m)	COORDINATE UTM WGS84 - FUSO 33			
		Coordinata inizio profilo - EST	Coordinata iniziale NORD	Coordinata finale EST	Coordinata inizio profilo - EST
RIFRA1	69	320441,583	4678360,408	320412,124	4678297,820
RIFRA2	69	321363,516	4679936,358	321298,730	4679913,277
RIFRA3	69	321680,965	4680947,782	321689,313	4680879,621

Tab. 2.1 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagini sismiche a rifrazione.

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 sul pen drive.



Fig. 2.3 - S Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Tomografia sismica. Profilo sismico RIFRA1.



Fig. 2.4 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Tomografia sismica. Profilo sismico RIFRA2.



Fig. 2.5 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Tomografia sismica. Profilo sismico RIFRA3.

2.4 DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI

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

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

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

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

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

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

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

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

2.5 RISULTANZE DELLE INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

Le prospezioni sismiche in oggetto sono state compiute posizionando al suolo **n.3** basi sismiche, aventi ognuna un numero di canali pari a 24, per una lunghezza pari a 69 metri.

I dati sono stati acquistati energizzando in corrispondenza sia dei siti esterni sia all'interno (numero di tiri interni pari 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 mediante isolinee e campitura a falsi colori.

Di seguito, per i profili eseguiti, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

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

2.5.1 RIFRA1

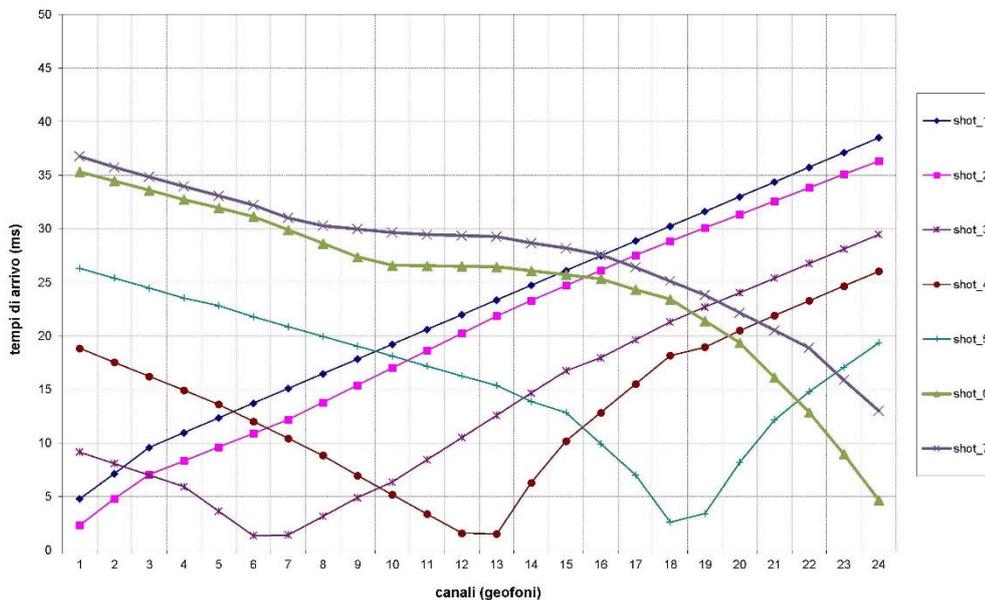


Fig. 2.6 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Tomografia sismica in onde P. Profilo RIFRA1. Dromocrone.

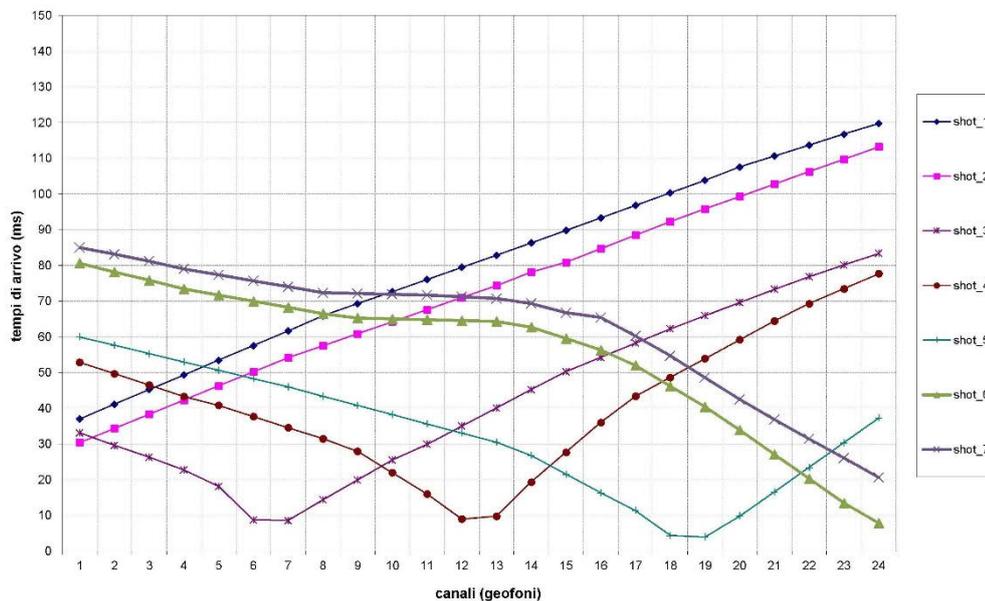


Fig. 2.7 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Tomografia sismica in onde S. Profilo RIFRA1. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **RIFRA1** hanno permesso di evidenziare **due** sismostrati.

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna ed una profondità variabile compresa tra 3 m e 10 m circa, ed è costituito da depositi ghiaiosi e detrito calcareo. La velocità delle onde di taglio è compresa tra 360 e 800 m/s, mentre la velocità delle onde P è compresa tra 700 e 2.200 m/s.

In profondità, la velocità delle onde sismiche aumenta sino a raggiungere valori superiori a 1.400 m/s, per quanto riguarda le onde S, mentre per quel che concerne le velocità delle onde P, risultano superiori a 3.400 m/s. Tali velocità sono proprie di un bedrock sismico costituito da calcare marnoso.

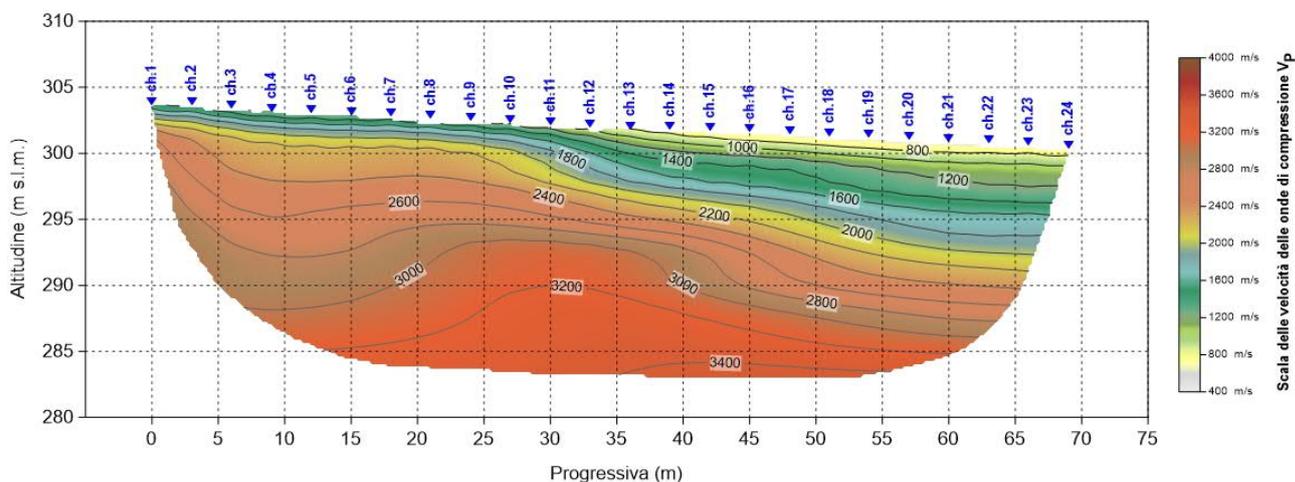


Fig. 2.8 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo RIFRA1

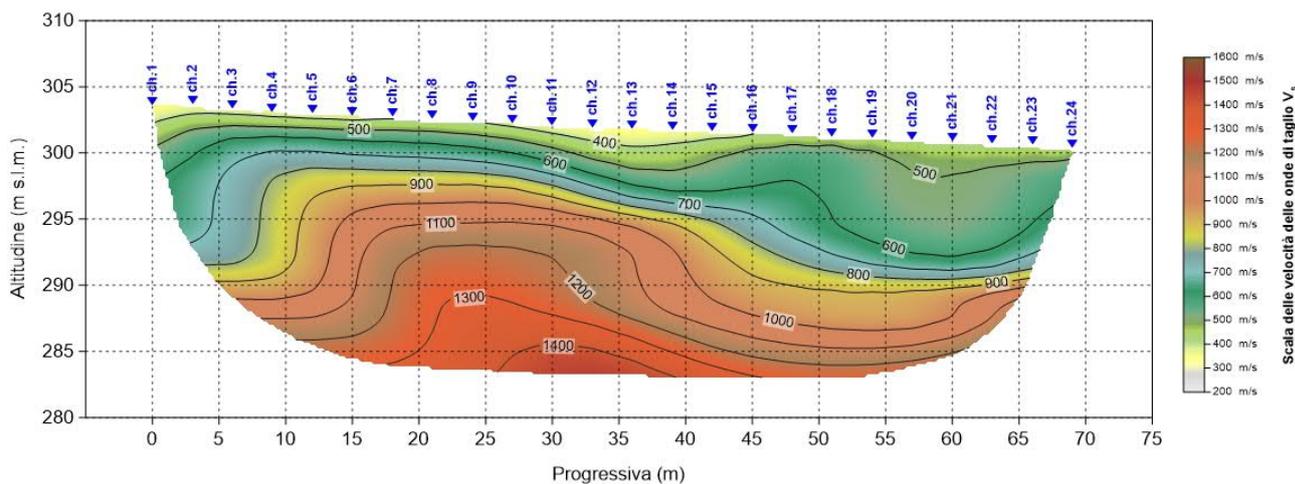


Fig. 2.9 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo RIFRA1.

3 INDAGINE 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).

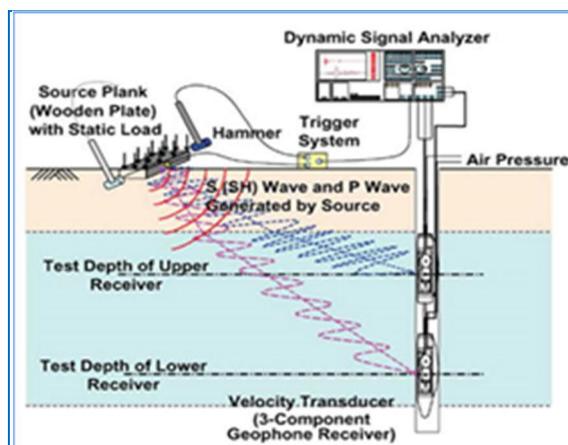


Fig. 3.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

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

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

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

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

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

Per quanto concerne le registrazioni ottenute da energizzazione applicata in verticale, è stato determinato il primo arrivo in onde P come mostrato nella figura seguente (Fig. 3.2), in cui, si osserva distintamente il primo arrivo dell'onda di compressione.



Fig. 3.2 - 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. 3.3).

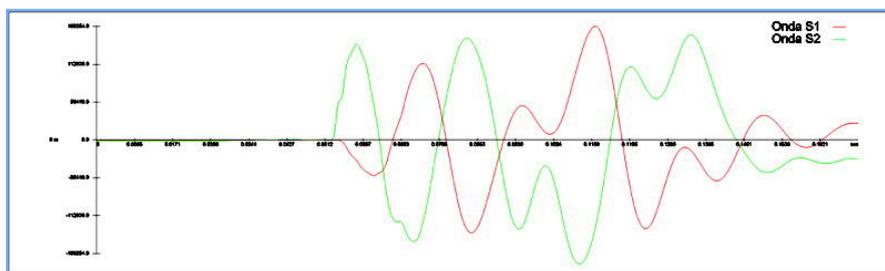


Fig. 3.3 - Esempio di onda S e dell'inversione di fase necessaria per l'individuazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio (onda S).

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

3.2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

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

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

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

3.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.9** prove down-hole la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate.

Di seguito, si riporta la specifica della prospezione:

Codice Indagine	Profondità dal p.c. (m)	COORDINATE UTM WGS84 - FUSO 33		
		Coordinata EST	Coordinata NORD	Quota (m s.l.m.)
S02-DH	35,00	320809,322	4679181,018	338,910
S03-DH	35,00	320955,757	4679463,653	351,351
S04-DH	35,00	321323,822	4679918,284	379,709
S05-DH	50,00	321814,862	4680114,527	403,513
S06-DH	35,00	321677,304	4681083,355	442,661
S07-DH	35,00	322396,137	4682848,402	530,526
S08-DH	35,00	322418,586	4683521,315	557,215
S09-DH	35,00	322861,008	4684169,051	599,078
S11-DH	45,00	323127,694	4684216,639	585,845

Tab. 3.1 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagini sismiche in foro down-hole.

Le indagini sono state eseguite sino alla profondità riportata 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.



Fig. 3.4 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S02-DH.



Fig. 3.5 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S03-DH.



Fig. 3.6 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S04-DH.



Fig. 3.7 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S05-DH.



Fig. 3.8 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro SO6-DH.



Fig. 3.9 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro SO7-DH.



Fig. 3.10 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S08-DH.



Fig. 3.11 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S09-DH.



Fig. 3.12 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine sismica in foro S11-DH.

3.4 RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE

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

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

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

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

I siti di energizzazione sono stati posizionati nei pressi di ciascun 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, per ciascuna indagine, 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 in forma tabellare e grafica.

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

3.4.1 S02-DH

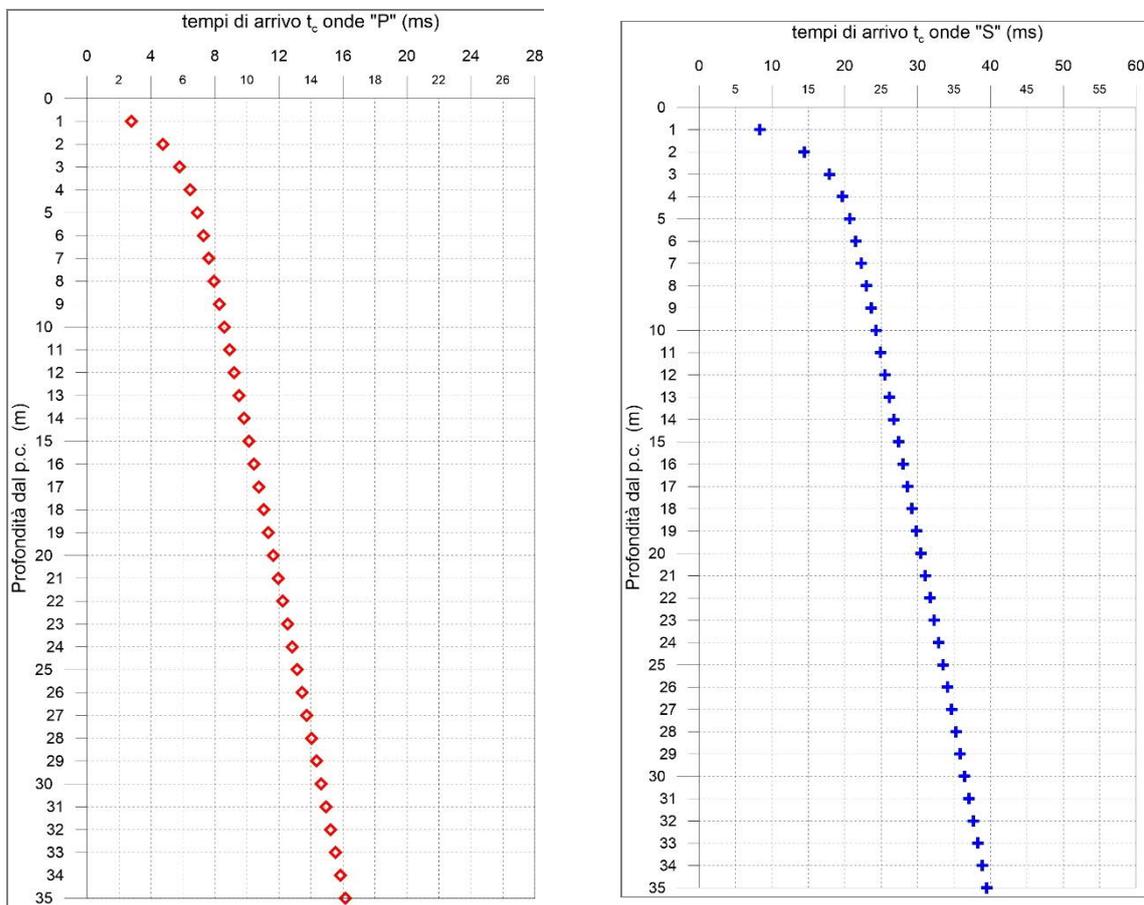


Fig. 3.13 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

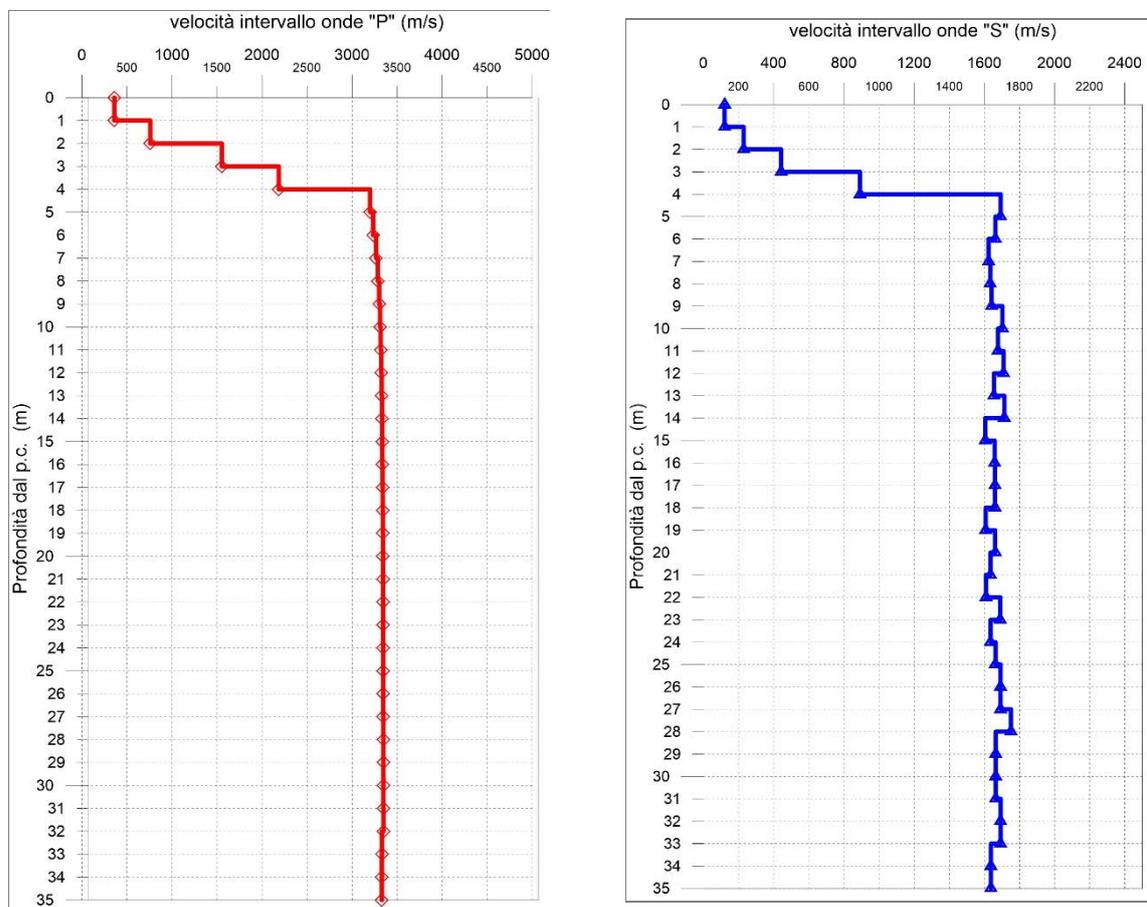


Fig. 3.14 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", In funzione della profondità dal p.c.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t _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	Polsson (n)	γ_n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	5,01	15,01	2,78	8,33	360	120	3,0	0,44	2,00	29	83	220
2	5,93	18,05	4,74	14,44	758	229	3,3	0,45	2,00	105	305	1008
3	6,48	19,98	5,80	17,87	1553	443	3,5	0,46	2,00	392	1140	4301
4	6,90	21,01	6,46	19,67	2185	891	2,5	0,40	2,00	1588	4448	7435
5	7,20	21,57	6,89	20,66	3201	1693	1,9	0,31	2,50	7167	18716	16061
6	7,49	22,15	7,27	21,49	3233	1663	1,9	0,32	2,50	6913	18254	16920
7	7,79	22,75	7,62	22,25	3266	1624	2,0	0,34	2,50	6591	17610	17880
8	8,09	23,35	7,95	22,95	3287	1634	2,0	0,34	2,50	6676	17837	18110
9	8,39	23,95	8,28	23,62	3301	1641	2,0	0,34	2,50	6734	17991	18266
10	8,69	24,53	8,59	24,26	3311	1703	1,9	0,32	2,50	7250	19144	17744
11	8,99	25,12	8,90	24,89	3319	1678	2,0	0,33	2,50	7038	18697	18149
12	9,28	25,70	9,21	25,50	3324	1710	1,9	0,32	2,50	7307	19293	17883
13	9,58	26,30	9,52	26,13	3328	1655	2,0	0,34	2,50	6846	18290	18570
14	9,88	26,88	9,82	26,73	3332	1714	1,9	0,32	2,50	7341	19383	17966
15	10,18	27,50	10,13	27,36	3335	1604	2,1	0,35	2,50	6435	17366	19219
16	10,48	28,10	10,43	27,98	3337	1659	2,0	0,34	2,50	6880	18381	18662
17	10,78	28,70	10,73	28,59	3339	1660	2,0	0,34	2,50	6887	18401	18683
18	11,07	29,30	11,04	29,20	3340	1661	2,0	0,34	2,50	6894	18418	18700
19	11,37	29,92	11,34	29,83	3341	1608	2,1	0,35	2,50	6461	17437	19298
20	11,67	30,52	11,64	30,43	3343	1662	2,0	0,34	2,50	6904	18444	18726
21	11,97	31,13	11,94	31,05	3343	1635	2,0	0,34	2,50	6683	17948	19036
22	12,27	31,75	12,24	31,68	3344	1609	2,1	0,35	2,50	6472	17467	19331
23	12,57	32,34	12,54	32,27	3345	1691	2,0	0,33	2,50	7150	18995	18439
24	12,86	32,95	12,84	32,89	3346	1636	2,0	0,34	2,50	6691	17971	19061
25	13,16	33,55	13,14	33,49	3346	1664	2,0	0,34	2,50	6919	18484	18767
26	13,46	34,14	13,44	34,08	3347	1692	2,0	0,33	2,50	7157	19014	18457
27	13,76	34,73	13,74	34,68	3347	1692	2,0	0,33	2,50	7159	19018	18462
28	14,06	35,30	14,04	35,25	3347	1752	1,9	0,31	2,50	7672	20122	17784
29	14,36	35,90	14,34	35,85	3348	1664	2,0	0,34	2,50	6925	18502	18785
30	14,65	36,50	14,64	36,45	3348	1665	2,0	0,34	2,50	6927	18506	18789
31	14,95	37,10	14,93	37,06	3348	1665	2,0	0,34	2,50	6928	18509	18792
32	15,25	37,69	15,23	37,65	3349	1693	2,0	0,33	2,50	7166	19036	18479
33	15,55	38,28	15,53	38,24	3331	1693	2,0	0,33	2,50	7167	19004	18186
34	15,85	38,89	15,83	38,85	3330	1638	2,0	0,34	2,50	6705	17976	18782
35	16,15	39,50	16,14	39,46	3330	1638	2,0	0,34	2,50	6706	17978	18784

Tab. 3.2 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". 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.

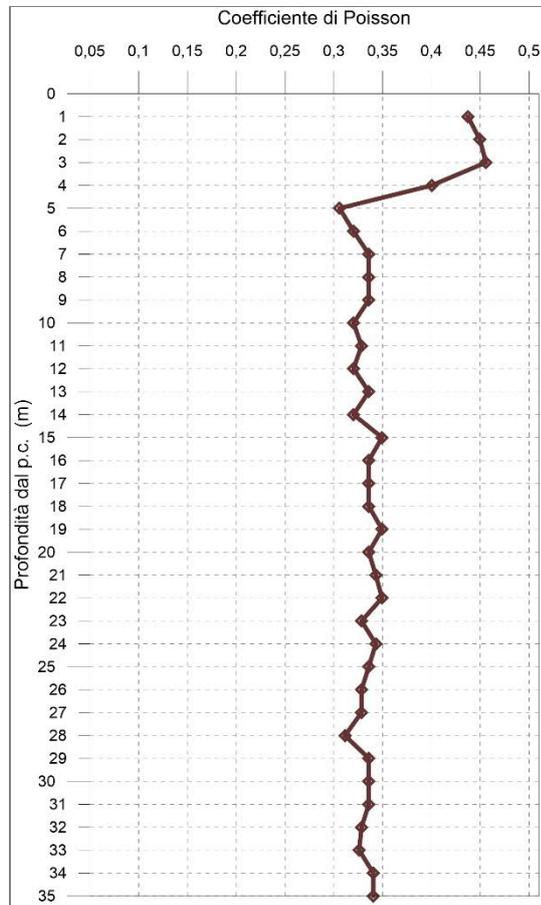


Fig. 3.15 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c..

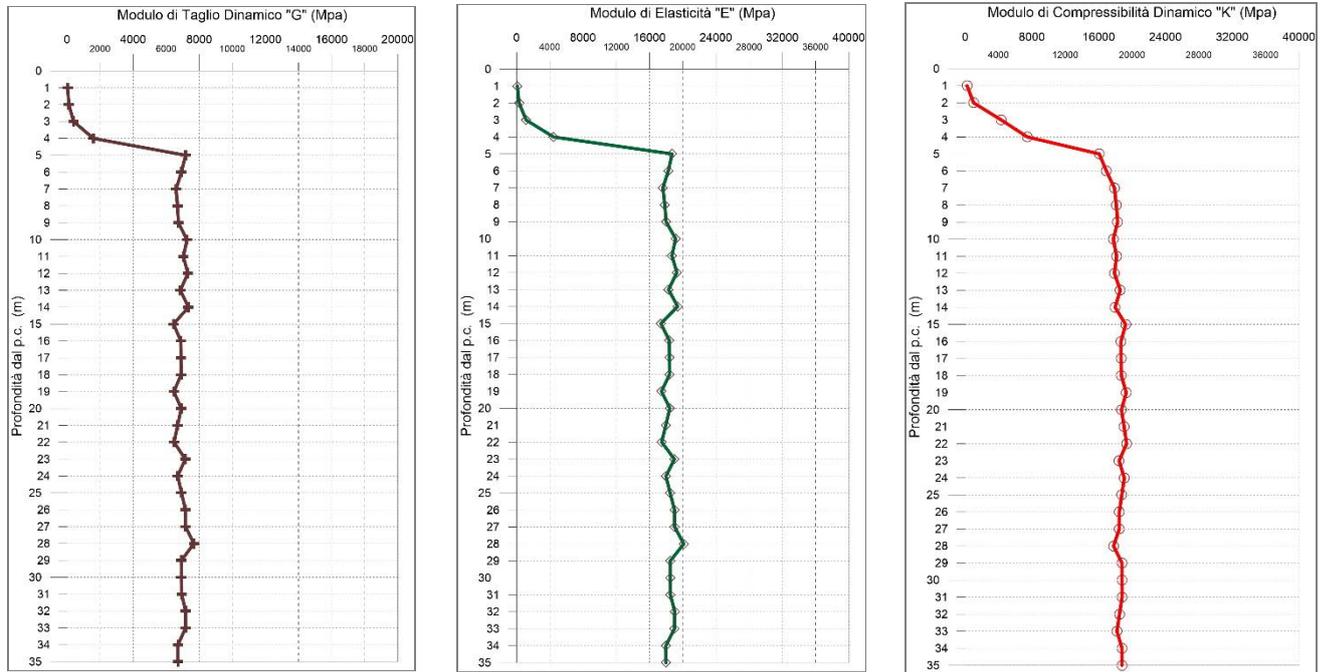


Fig. 3.16 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

3.4.2 S03-DH

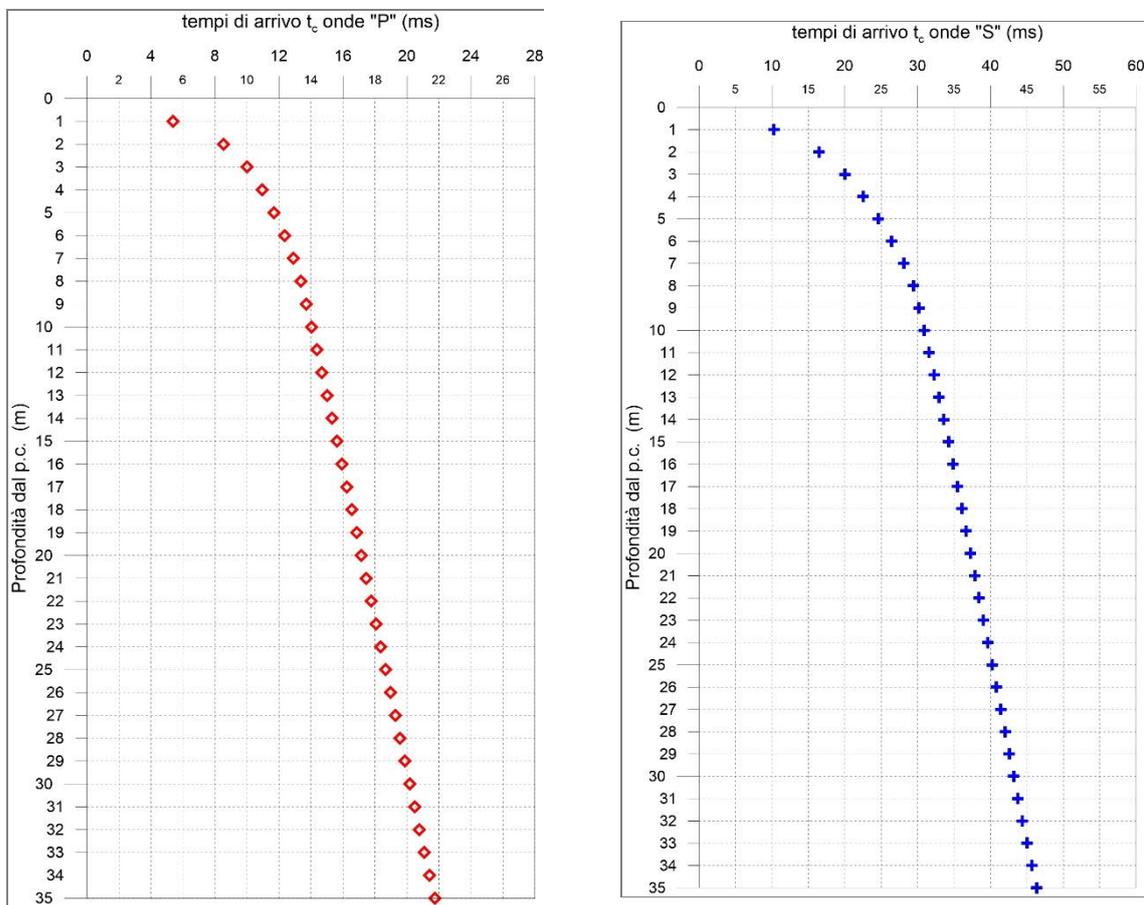


Fig. 3.17 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

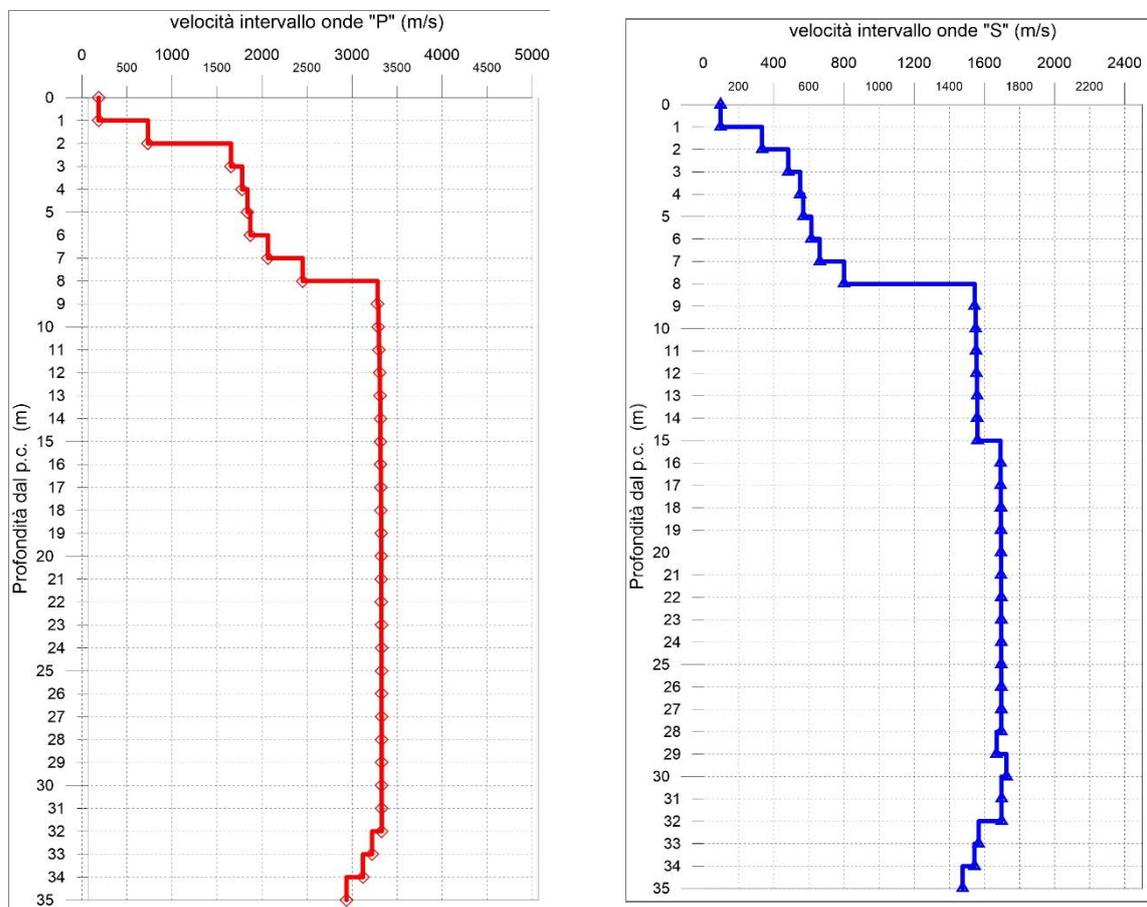


Fig. 3.18 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", In funzione della profondità dal p.c.

Profondità (m dal p.c.)	tempi osservati t _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	Polsson (n)	γ_n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	9,72	18,50	5,39	10,26	186	97	1,9	0,31	2,00	19	50	44
2	10,67	20,59	8,53	16,47	734	334	2,2	0,37	2,00	223	611	780
3	11,18	22,35	10,00	19,99	1656	484	3,4	0,45	2,00	468	1362	4861
4	11,70	24,02	10,95	22,49	1780	551	3,2	0,45	2,00	607	1756	5526
5	12,21	25,69	11,70	24,60	1838	569	3,2	0,45	2,00	647	1873	5897
6	12,73	27,25	12,35	26,44	1870	615	3,0	0,44	2,00	756	2177	5987
7	13,20	28,73	12,91	28,09	2067	662	3,1	0,44	2,00	878	2533	7371
8	13,60	29,95	13,37	29,44	2451	800	3,1	0,44	2,00	1280	3688	10310
9	13,90	30,59	13,71	30,17	3282	1545	2,1	0,36	2,40	5731	15561	18217
10	14,20	31,23	14,04	30,88	3292	1550	2,1	0,36	2,40	5766	15656	18329
11	14,50	31,86	14,37	31,57	3300	1553	2,1	0,36	2,40	5792	15726	18410
12	14,80	32,50	14,69	32,25	3305	1556	2,1	0,36	2,40	5811	15778	18472
13	15,10	33,14	15,00	32,92	3310	1558	2,1	0,36	2,40	5826	15819	18520
14	15,40	33,77	15,31	33,58	3313	1560	2,1	0,36	2,40	5838	15851	18557
15	15,70	34,41	15,62	34,24	3316	1561	2,1	0,36	2,40	5847	15877	18588
16	16,00	35,00	15,93	34,85	3318	1692	2,0	0,32	2,40	6872	18199	17257
17	16,30	35,59	16,24	35,45	3320	1693	2,0	0,32	2,40	6879	18219	17276
18	16,60	36,18	16,54	36,05	3321	1694	2,0	0,32	2,40	6885	18236	17292
19	16,90	36,76	16,85	36,65	3322	1694	2,0	0,32	2,40	6891	18250	17305
20	17,20	37,35	17,15	37,25	3324	1695	2,0	0,32	2,40	6895	18262	17316
21	17,50	37,94	17,46	37,84	3324	1695	2,0	0,32	2,40	6899	18272	17326
22	17,80	38,53	17,76	38,44	3325	1696	2,0	0,32	2,40	6902	18281	17334
23	18,10	39,12	18,06	39,03	3326	1696	2,0	0,32	2,40	6905	18288	17342
24	18,40	39,71	18,36	39,63	3327	1697	2,0	0,32	2,40	6908	18295	17348
25	18,70	40,29	18,67	40,22	3327	1697	2,0	0,32	2,40	6910	18301	17354
26	19,00	40,88	18,97	40,81	3328	1697	2,0	0,32	2,40	6912	18306	17359
27	19,30	41,47	19,27	41,41	3328	1697	2,0	0,32	2,40	6914	18311	17363
28	19,60	42,06	19,57	42,00	3328	1697	2,0	0,32	2,40	6915	18315	17367
29	19,90	42,66	19,87	42,60	3329	1670	2,0	0,33	2,40	6692	17826	17670
30	20,20	43,24	20,17	43,18	3329	1727	1,9	0,32	2,40	7155	18831	17058
31	20,50	43,82	20,48	43,77	3329	1698	2,0	0,32	2,40	6919	18325	17377
32	20,80	44,41	20,78	44,36	3330	1698	2,0	0,32	2,40	6920	18328	17379
33	21,11	45,05	21,09	45,00	3222	1568	2,1	0,34	2,40	5897	15864	17058
34	21,43	45,70	21,41	45,65	3122	1544	2,0	0,34	2,40	5721	15310	15763
35	21,77	46,37	21,75	46,33	2938	1477	2,0	0,33	2,40	5235	13935	13742

Tab. 3.3 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine down-hole S03-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.

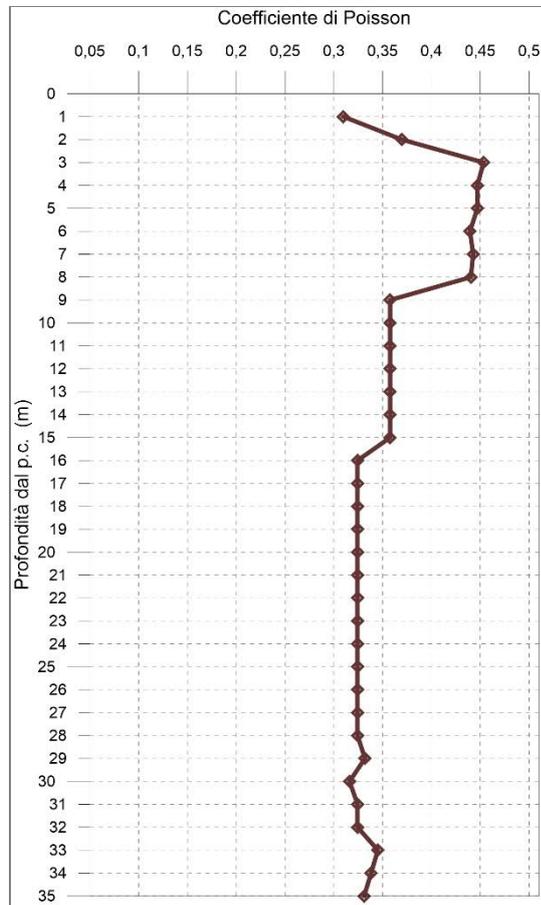


Fig. 3.19 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c..

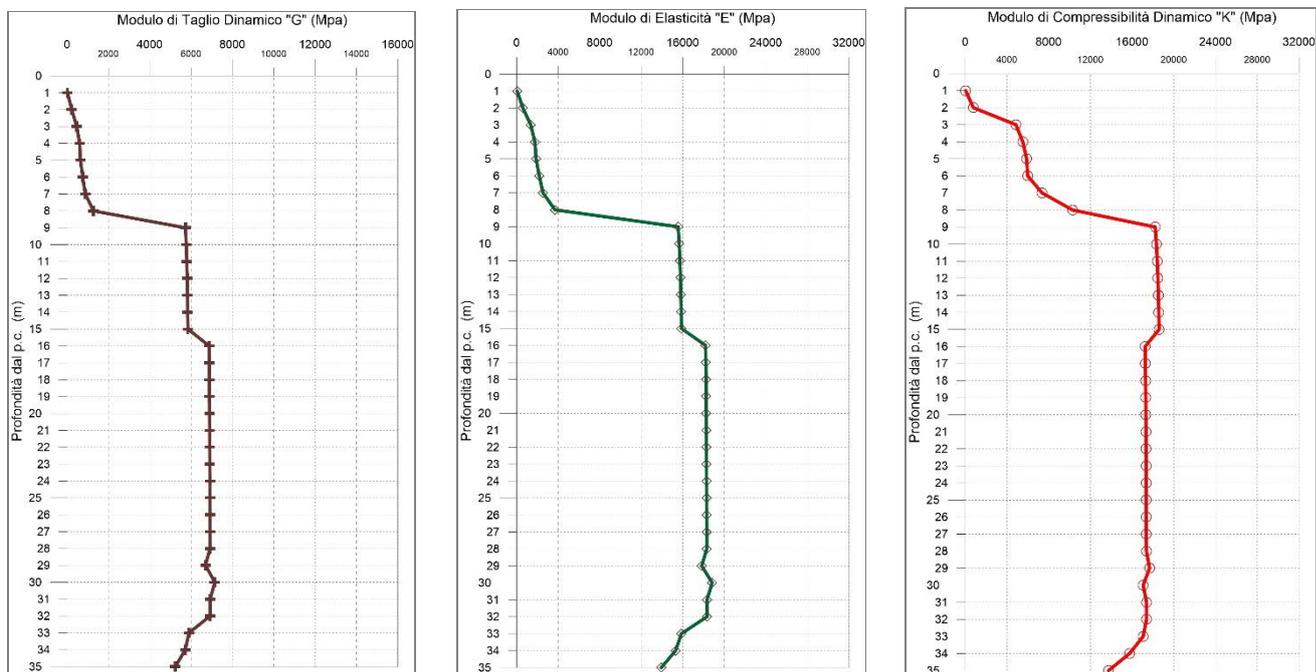


Fig. 3.20 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

4 INDAGINI HVSR

4.1 DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI

Le analisi sul rumore ambientale rappresentano una soluzione versatile ed economica per ottenere sia stime dirette della risposta di sito. La metodologia con cui viene analizzato il rumore ambientale studia il rapporto spettrale della componente orizzontale sulla componente verticale (H/V) di ogni singola stazione (HVSR o Tecnica di Nakamura).

La tecnica di Nakamura permette di conoscere la frequenza di risonanza di un bacino o di un pacco sedimentario, a partire dall'analisi dei rapporti spettrali H/V (componente/i orizzontale/i su verticale) effettuati su registrazioni di rumore ambientale, quindi di definire in termini di frequenza di risonanza, la risposta sismica in caso di terremoto.

I risultati dei rapporti spettrali H/V, sono una conseguenza diretta sia della composizione del campo d'onda del noise, che è funzione della sorgente di vibrazione e della struttura del sottosuolo, che degli effetti dei differenti tipi di onde sismiche sui rapporti H/V.

La stabilità è molto buona nel tempo, ma dipende dalle caratteristiche specifiche del sito. I rapporti spettrali H/V non sono sempre consistenti con le registrazioni di un singolo evento sismico, viceversa corrispondono bene ad un set di registrazioni di un certo numero di eventi, se pur rappresentandoli in piccola percentuale.

Le acquisizioni e le successive elaborazioni sono state effettuate tenendo conto di quanto riportato nell'ambito del progetto SESAME² (Site EffectS assessments using AMBient Excitation), che ha stabilito delle direttive per garantire la riproducibilità delle misure H/V, indispensabile per ottenere dei dati rappresentativi e poco influenzati dal contesto di misura ed ambientale.

Al termine di ciascuna prova si è proceduto all'elaborazione dei dati avvalendosi del software **Geopsy** (Geophysical Signal Database For Noise Array Processing) per il processing dei dati.

L'interpretazione dei dati è stata eseguita al fine di ottenere una curva, detta di ellitticità, che rappresenta appunto il rapporto spettrale tra il segnale delle componenti orizzontali e quello della componente verticale. Questa curva permette di valutare in modo diretto le frequenze di risonanza del sito indagato.

Come accennato in precedenza, la tecnica, in origine proposta da Nogoshi e Igarashi, in seguito diffusa da Nakamura, consiste nella stima del rapporto fra lo spettro di ampiezza delle componenti orizzontali e quello della componente verticale dei microtremori sismici ambientali registrati da una singola stazione.

² Progetto triennale di ricerca europeo, terminato nel 2005, con lo scopo di fornire delucidazioni sull'affidabilità e sulle procedure di acquisizione ed analisi del noise ambientale (<ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf>).

Il calcolo del rapporto H/V segue queste fasi:

- Registrazione del segnale ambientale nelle 3 componenti.
- Scomposizione del segnale in finestre temporali, con l'obiettivo di isolare le parti della registrazione in cui il segnale risulta maggiormente stazionario ed eliminare i rumori transitori, o transienti.
- Calcolo e smussamento dello spettro di ampiezza ricavato tramite la trasformata di Fourier per ognuna delle finestre selezionate su tutte e tre le componenti.
- Combinazione, con un'operazione di media, delle due componenti orizzontali per ognuna delle finestre selezionate.
- Calcolo del rapporto H/V per ogni finestra.
- Calcolo della media dei rapporti H/V delle singole finestre, che rappresenterà la curva H/V definitiva.

4.2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per l'esecuzione delle misurazioni HVSR è stato adoperato un tromografo Tromino[®] avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- 3 canali velocimetrici per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ± 1.5 mm/s);
- acquisizione alla frequenza di 172 Hz;
- conversione A/D a 24 bit.

4.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, è stata eseguita **n. 1** indagine HVSR la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate. Di seguito, si riportano le coordinate dell'Indagine.

Codice indagine	COORDINATE UTM WGS84 - FUSO 33	
	Coordinata EST	Coordinata NORD
HVSR01	323063,182	4684158,820

Tab. 4.1 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine HVSR

si è proceduto con il posizionamento della strumentazione al suolo e con acquisizioni della durata di **20** minuti. Tale durata risulta appropriata per determinare l'eventuale contributo delle basse frequenze.

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

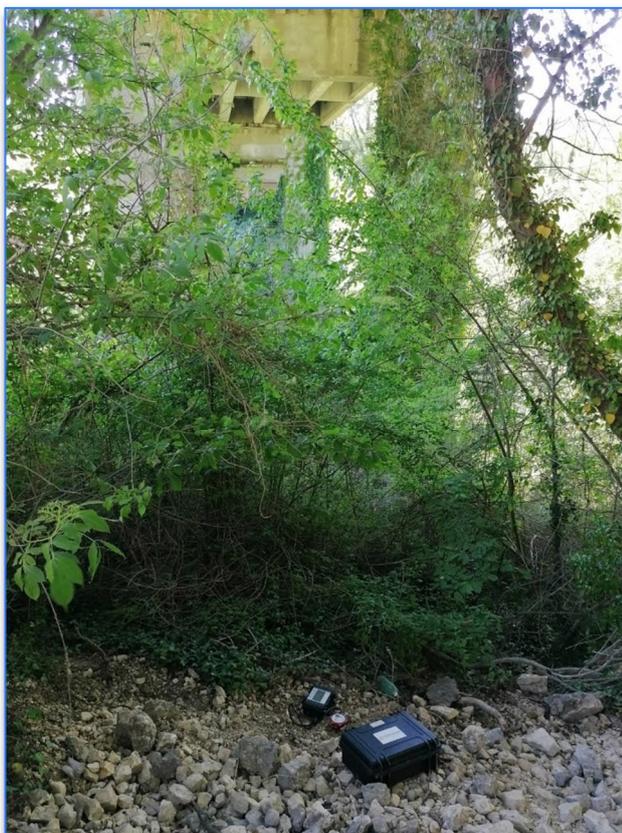


Fig. 4.1 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine HVSR01

4.4 RISULTANZE DELLE INDAGINI HVSR

Di seguito, sono riportate le risultanze dell'indagine HVSR tramite i seguenti elaborati:

- scheda di cantiere;
- segnale acquisito;
- continuità del segnale HVSR durante l'acquisizione (diagramma frequenza vs tempo);
- diagramma in cui sono raggruppati gli spettri medi di tutte e tre le componenti V, N, E;
- diagramma del segnale HVSR nel dominio delle frequenze con indicazione dell'intervallo di frequenza in cui sono stati verificati i criteri del progetto SESAME;
- diagramma della direzionalità del rapporto H/V inerente la direzione di provenienza del segnale sul semipiano orizzontale.
- tabella riepilogativa delle grandezze d'interesse.

4.4.1 HVSRO1

DATE	26/05/2021	HOUR	18:00	PLACE	Anas SS4 Salaria		
OPERATOR	Calvanese		GPS TYPE and #				
LATITUDE	42.17224780°	LONGITUDE	12.51137764°	ALTITUDE			
STATION TYPE	SENSOR TYPE		Tromino				
STATION #	HVSR01	SENSOR #	DISK #				
FILE NAME	H/V_1		POINT #				
GAIN	High	SAMPL. FREQ.	172 Hz	REC. DURATION	20 minutes seconds		
WEATHER CONDITIONS	WIND	<input type="checkbox"/> none	<input checked="" type="checkbox"/> weak (5m/s)	<input type="checkbox"/> medium	<input type="checkbox"/> strong Measurement (if any): _____		
	RAIN	<input checked="" type="checkbox"/> none	<input type="checkbox"/> weak	<input type="checkbox"/> medium	<input type="checkbox"/> strong Measurement (if any): _____		
	Temperature (approx):	25 Remarks _____					
GROUND TYPE	<input checked="" type="checkbox"/> earth (<input type="checkbox"/> hard <input type="checkbox"/> soft)	<input type="checkbox"/> gravel	<input checked="" type="checkbox"/> sand	<input type="checkbox"/> rock	<input type="checkbox"/> grass = (<input type="checkbox"/> short <input type="checkbox"/> tall)		
	<input type="checkbox"/> asphalt	<input checked="" type="checkbox"/> cement	<input type="checkbox"/> concrete	<input type="checkbox"/> paved	<input type="checkbox"/> other _____		
	<input type="checkbox"/> dry soil	<input type="checkbox"/> wet soil	Remarks _____				
ARTIFICIAL GROUND-SENSOR COUPLING	<input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type _____						
BUILDING DENSITY	<input checked="" type="checkbox"/> none <input type="checkbox"/> scattered <input type="checkbox"/> dense <input type="checkbox"/> other, type _____						
TRANSIENTS	zone	few	moderate	many	very dense	distance	MONOCHROMATIC NOISE SOURCES (factories, works, pumps, rivers...)
							<input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> yes, type _____
cars							NEARBY STRUCTURES (trees, polls, buildings, bridges, underground structures,...) (description, height, distance)
trucks							
pedestrians	<input checked="" type="checkbox"/>						
other							
OBSERVATIONS						FREQUENCY: _____ Hz (if computed in the field)	

Fig. 4.2 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Misure HVSR. Brogliaccio di cantiere HVSR01

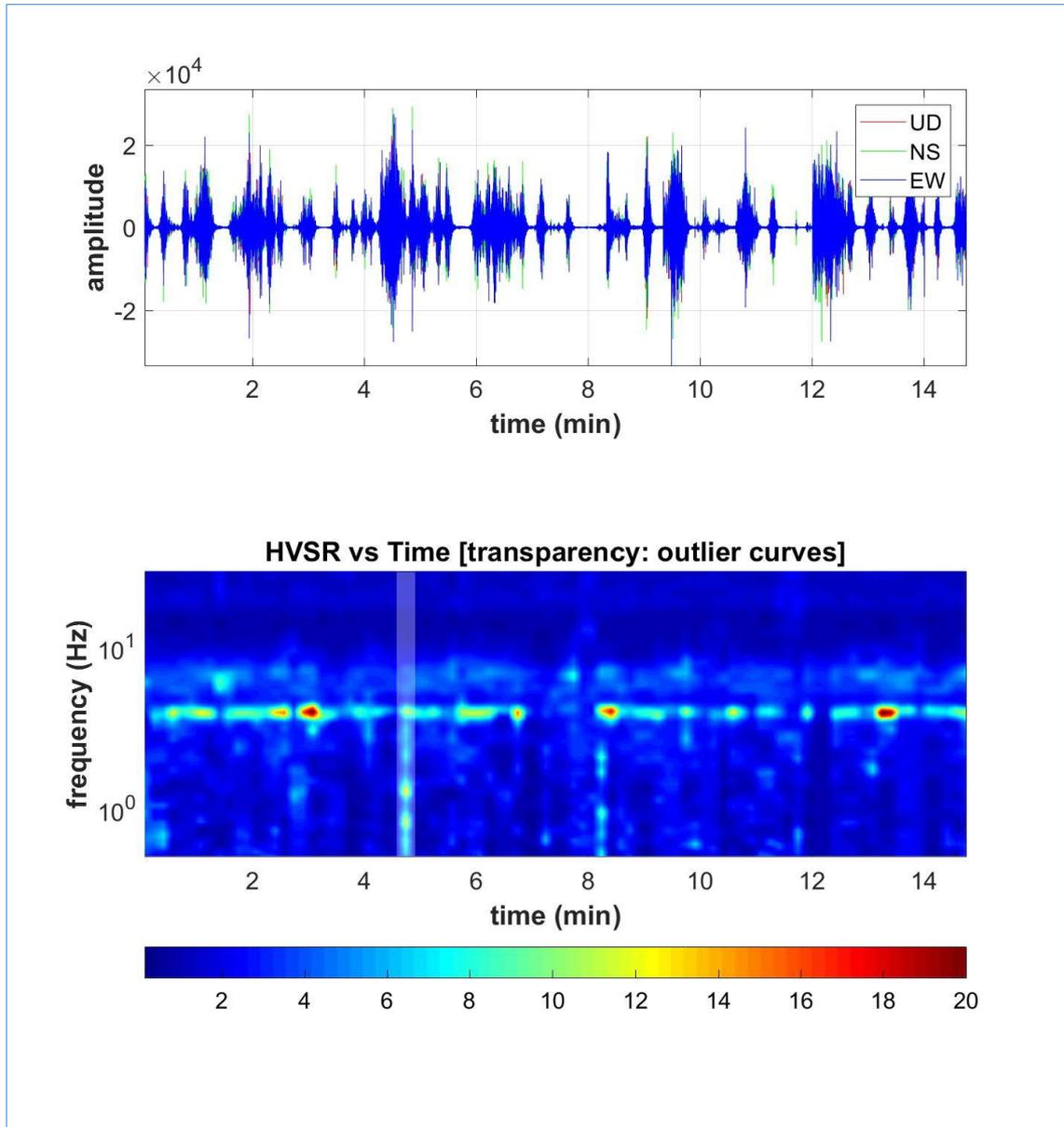


Fig. 4.3 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". HVSR01.

In alto è riportato il segnale acquisito.

In basso è riportato il diagramma frequenza vs tempo della continuità del segnale HVSR durante l'acquisizione.

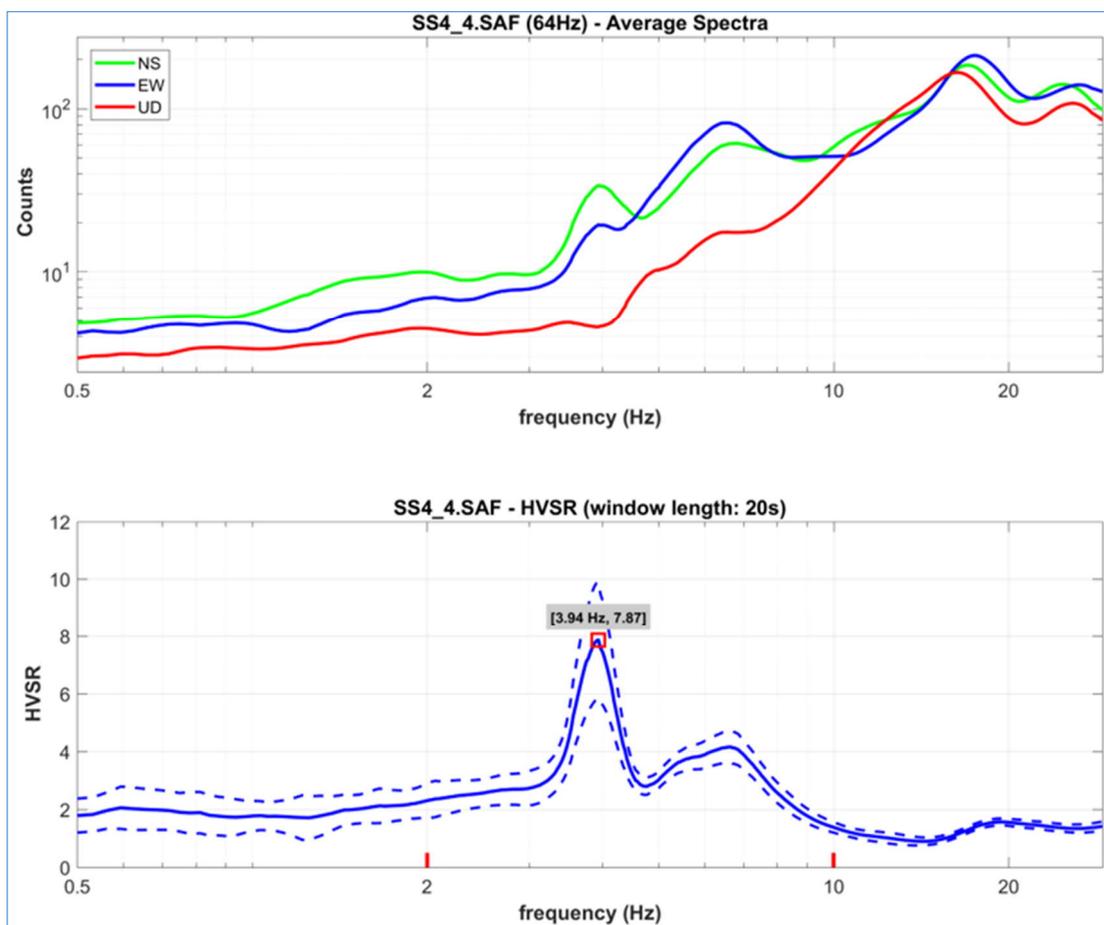


Fig. 4.4 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". HVSR01.

In alto è riportato il diagramma in cui sono raggruppati gli spettri medi di tutte e tre le componenti V, N, E.

In basso è riportato il diagramma del segnale HVSR nel dominio delle frequenze con indicazione dell'intervallo di frequenza in cui sono stati verificati i criteri del progetto SESAME.

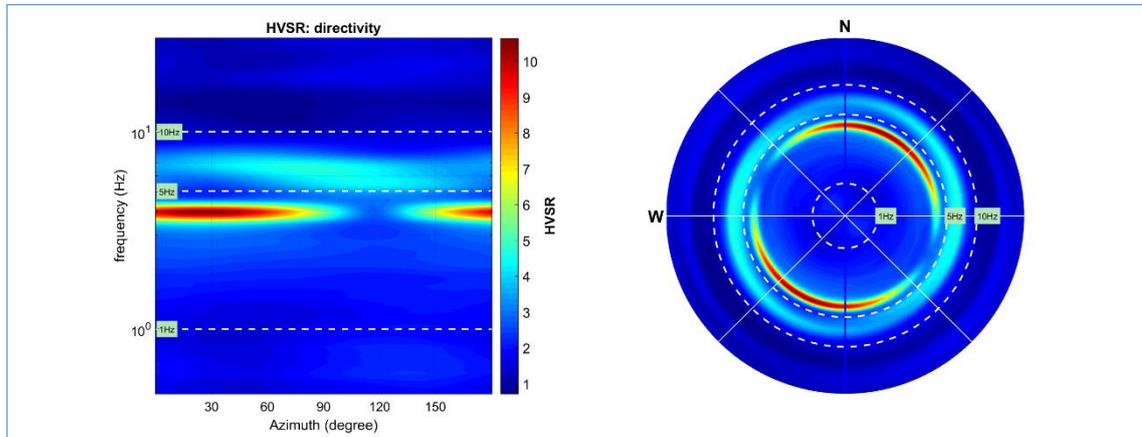


Fig. 4.5 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". HVSr01.

Nella figura è riportato il diagramma della direzionalità del rapporto H/V inerente la direzione di provenienza del segnale sul semipiano orizzontale.

Verifica criteri SESAME

Di seguito, è riportato il riepilogo delle grandezze d'interesse per l'indagine in oggetto tenendo in considerazione i criteri riportati nel progetto SESAME cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 2.0-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 3.9

Peak HVSr value: 7.9

=== Criteria for a reliable H/V curve =====

#1. $[f_0 > 10/Lw]$: $3.941 > 0.5$ (OK)

#2. $[nc > 200]$: $7016 > 200$ (OK)

#3. $[f_0 > 0.5\text{Hz}; \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0]$ (OK)

=== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

#1. $[\text{exists } f_- \text{ in the range } [f_0/4, f_0] \mid AH/V(f_-) < A_0/2]$: yes, at frequency 1.0 Hz (OK)

#2. $[\text{exists } f_+ \text{ in the range } [f_0, 4f_0] \mid AH/V(f_+) < A_0/2]$: yes, at frequency 2.0 Hz (OK)

#3. $[A_0 > 2]$: $7.9 > 2$ (OK)

#4. $[f_{\text{peak}}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%]$: (OK)

#5. $[\sigma_{\text{maf}} < \epsilon(f_0)]$: $0.983 > 0.197$ (NO)

#6. $[\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)]$: $0.982 < 1.58$ (OK)

5 INDAGINI M.A.S.W.

5.1 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 in Fig. 5.1.

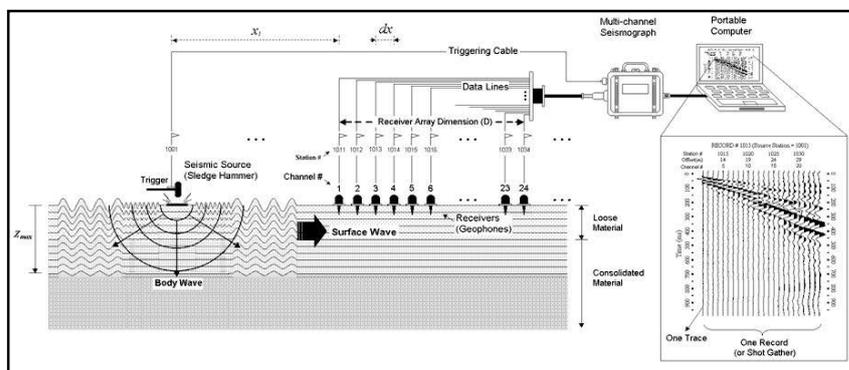


Fig. 5.1 - Esempio configurazione sorgente-ricevitori per l'esecuzione di un rilievo MASW.

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 rigidità 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 file 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, 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 d'indagine attiva consiste nell'usare una sorgente sismica ed una serie di ricevitori posti su una linea retta.

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. 5.2). 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.

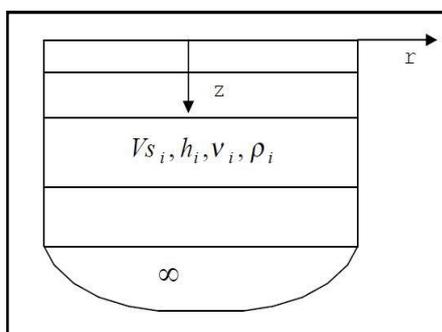


Fig. 5.2 - Modello di semispazio semplificato.

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 posto 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;
- winMASW: sviluppato dalla Eliosoft geophysical software and service.

5.2 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 bit, le cui caratteristiche sono state riportate in precedenza.

5.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, sono state eseguite **n.2** prospezioni sismiche MASW.

Di seguito, si riportano le specifiche delle prospezioni:

Codice Indagine	Lunghezza base sismica (m)	COORDINATE UTM WGS84 - FUSO 33			
		Coordinata inizio profilo - EST	Coordinata inizio profilo - NORD	Coordinata fine profilo - EST	Coordinata fine profilo - NORD
MASW01	46	320386.300	4678252.648	320375.378	4678208.583
MASW02	46	323351,261	4684377,814	323315,472	4684349,162

Tab. 5.1 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagini sismiche MASW.

Per l'esecuzione dei profili 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.



Fig. 5.3 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine MASW01



Fig. 5.4 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". Indagine MASW02

5.4 DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI

Successivamente all'elaborazione di dati, per ciascuna indagine MASW, sono state riportate le seguenti risultanze:

Finestra di Input

- Sismogramma originale, in cui sono riportate le tracce registrate sull'intero array di geofoni costituenti lo stendimento.
- Spettro originale - frequenza Vs velocità (in m/s).

Finestra di output

- Spettro elaborato - frequenza Vs velocità (in m/s).
 - Diagramma dell'evoluzione del modello "migliore", espresso in termini di minor *misfit* ovvero della minore discrepanza tra curva osservata e curva calcolata e diagramma del modello medio calcolato secondo l'operazione statistica nota come *Marginale Posterior Probability Density*.
 - Profilo verticale della velocità delle onde S (V_s) relativo al modello "migliore" ed al modello "medio"
 - Tabella di sintesi dove sono riportati gli spessori degli strati e la relativa velocità delle onde di taglio.

5.4.1 Prospezione sismica - MASW01

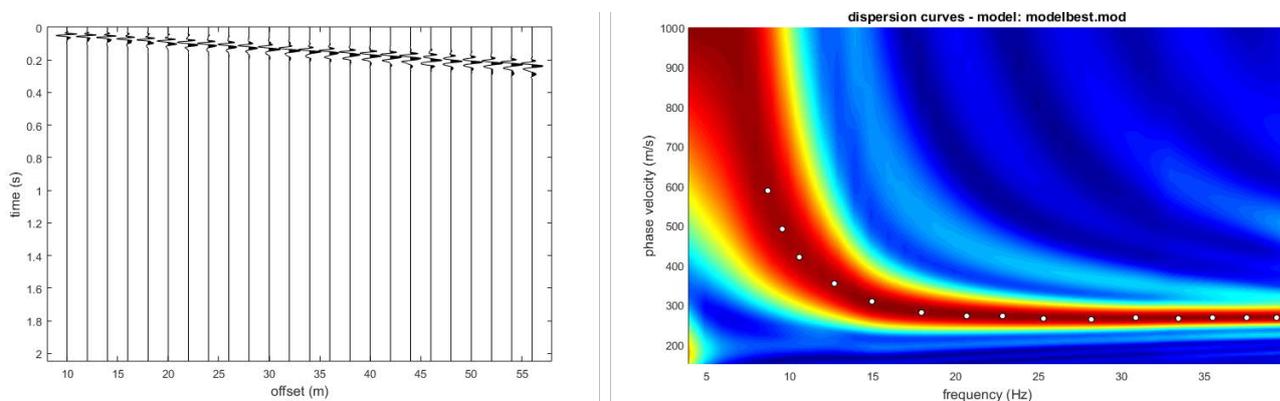


Fig. 5.5 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000".
 MASW01. Sismogramma e curva di dispersione originale.

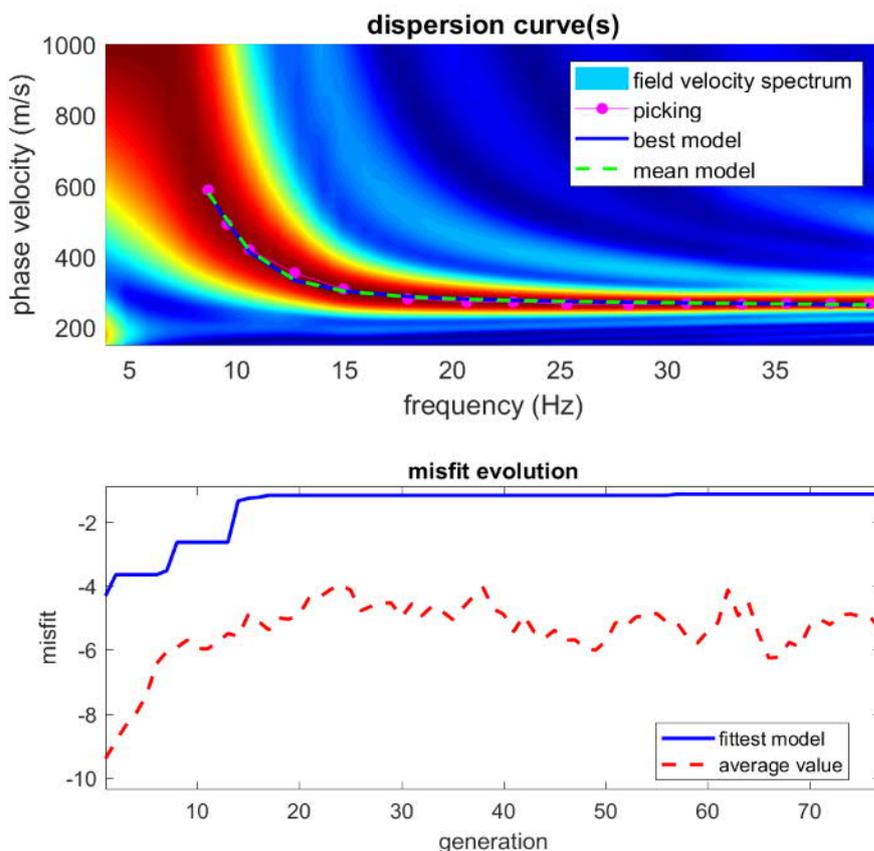


Fig. 5.6 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW01.
 Spettro di velocità ed andamento dei misfit.

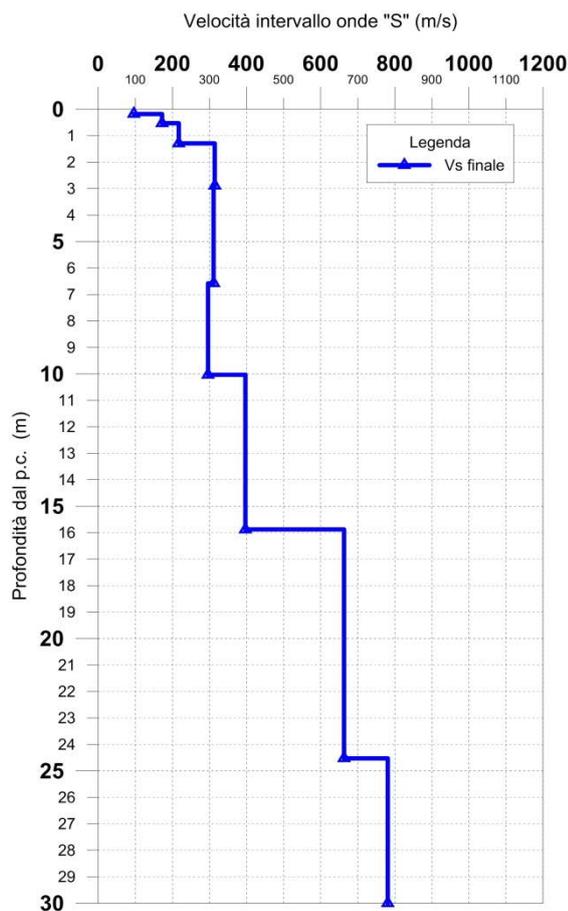


Fig. 5.7 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW01.
Profilo verticale delle onde di taglio (VS).

Numero di Strati	Vs finale (m/s)	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	h/Vs
1	96	0,18	0,18	0,00189
2	172	0,35	0,53	0,00202
3	217	0,76	1,29	0,00352
4	314	1,60	2,89	0,00509
5	311	3,69	6,58	0,01185
6	296	3,46	10,04	0,01167
7	397	5,84	15,88	0,01471
8	663	8,65	24,52	0,01305
9	781	42,91	67,43	0,05494

Fig. 5.8 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW01.
Tabella di sintesi dove sono riportati gli spessori degli strati e la relativa velocità delle onde di taglio.

5.4.2 Prospezione sismica - MASW02

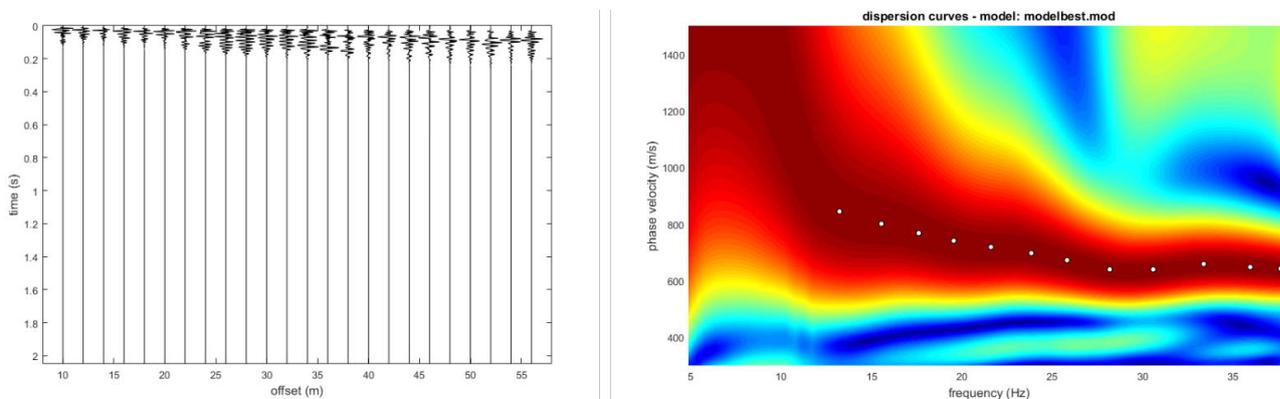


Fig. 5.9 – Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000".
MASW02. Sismogramma e curva di dispersione originale.

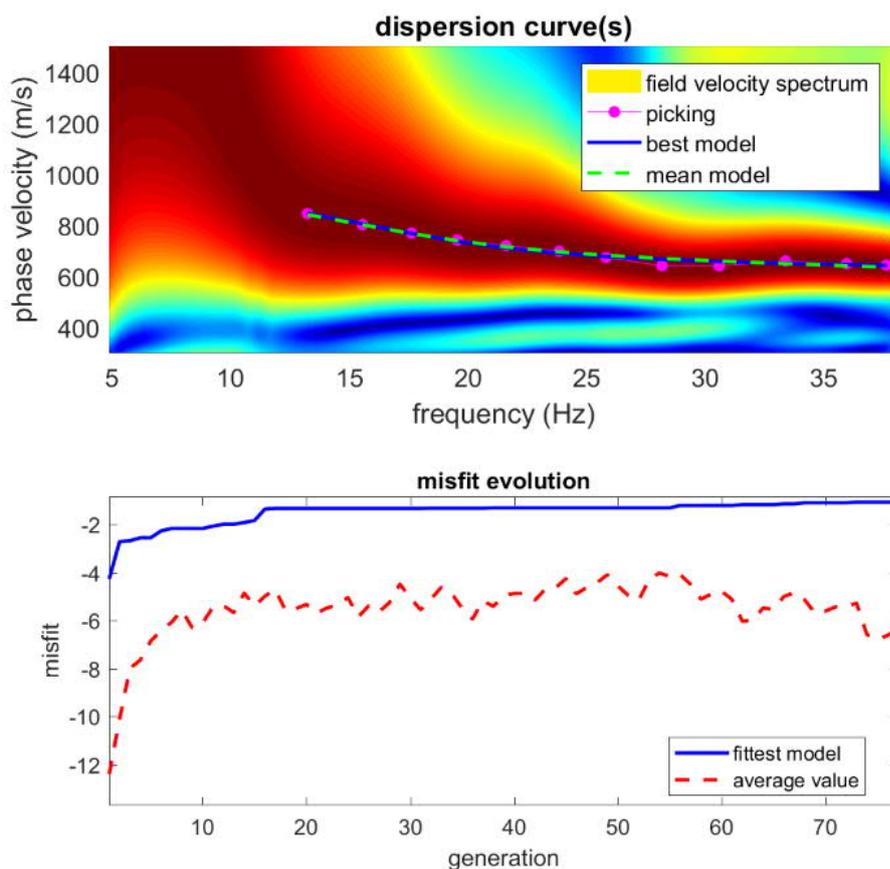


Fig. 5.10 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW02.
Spettro di velocità ed andamento dei misfit.

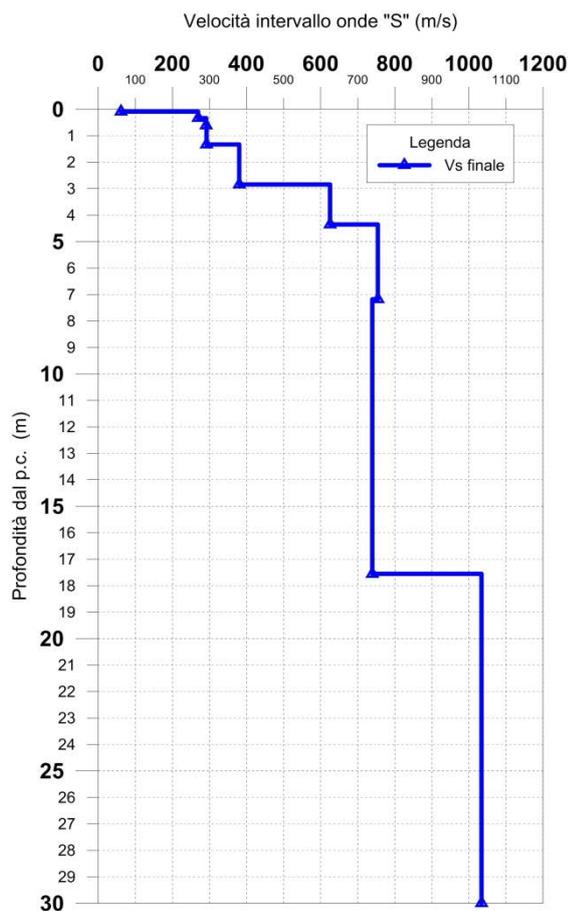


Fig. 5.11 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW02.
Profilo verticale delle onde di taglio (VS).

Numero di Strati	Vs finale (m/s)	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	h/Vs
1	61	0,09	0,09	0,00144
2	269	0,25	0,34	0,00092
3	291	0,28	0,62	0,00096
4	292	0,71	1,33	0,00244
5	380	1,51	2,84	0,00398
6	625	1,51	4,35	0,00242
7	754	2,82	7,17	0,00374
8	739	10,38	17,55	0,01404
9	1034	44,99	62,54	0,04351

Fig. 5.12 - Progetto Definitivo della "S.S. 4 Salaria — Adeguamento della piattaforma stradale e messa in sicurezza dal km 56+000 al km 64+000". MASW02.
Tabella di sintesi dove sono riportati gli spessori degli strati e la relativa velocità delle onde di taglio.