

**ASSE VIARIO MARCHE - UMBRIA E QUADRILATERO DI
PENETRAZIONE INTERNA**

**Sublotto 2.2: Intervalliva Macerata - allaccio funzionale della SS77
alla città di Macerata alle località "La Pieve" e "Mattei"**

PROGETTO DEFINITIVO

<p>IL GEOLOGO</p> <p>Dott. Geol. Salvatore Marino Ordine dei geologi della Regione Lazio n. 1069</p> 	<p>I PROGETTISTI SPECIALISTICI</p> <p><i>Ing. Ambrogio Signorelli</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p> <p><i>Ing. Moreno Panfili</i> Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A2657</p> <p><i>Ing. Claudio Muller</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 15754</p> <p><i>Ing. Giuseppe Resta</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p>	<p>PROGETTAZIONE ATI: (Mandataria)</p> <p>GPI INGEGNERIA GESTIONE PROGETTI INGEGNERIA srl</p> <p>(Mandante)</p> <p>cooprogetti cocoprogetti</p> <p>(Mandante)</p> <p>engeko</p> <p>(Mandante)</p> <p>AIM Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</p>
<p>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</p> <p><i>Ing. Valerio Guidobaldi</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A30025</p>		<p>IL PROGETTISTA E RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12):</p> <p>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI ORDINE INGEGNERI ROMA Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 140354035</p> 
<p>VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO</p> <p><i>Ing. Iginio Farotti</i></p>		

DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOTECNICHE

Documentazione indagini geognostiche – Documentazione indagini geofisiche

CODICE PROGETTO				NOME FILE				REVISIONE	SCALA
OPERA	LOTTO	STATO	SETTORE	WBS					
				CODICE ELAB.	DISCIPLINA	TIPO DOC.	N° PROGRESS.		
LO703	MC	D	P	GENER00	GEO	RLG	007	A	-
A	Emissione				Marzo 2020			Marino	Guiducci
REV.	DESCRIZIONE				DATA		REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
INTERVALLIVA DI MACERATA, TRATTO SFORZACOSTA
(SVINCOLO SS77) - LA PIEVE (EX SUBLOTTO 2.2 DEL
MAXI LOTTO 1)

LOCATION:
COMUNI DI MACERATA E CORRIDONIA (MC)

CLIENT:
QUADRILATERO S.p.A.

OBJECT:
DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 140/19
Revision n.: 00
Date: agosto 2019
Description: emissione

Redacted by: Dr. Geol. Giovanni Antonucci
Reviewed by: Dr.ssa Geol. Maria Gabriella Vadala'
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 140-19_geofisica.pdf

INDICE

1	PREMESSA	2
2	INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	3
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA	3
2.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	4
2.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	6
2.4	DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI	7
2.5	RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	8
2.5.1	TS01	9
2.5.2	TS02	11
3	INDAGINI DOWN-HOLE	13
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	13
3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	16
3.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	18
3.4	RISULTANZE DELL'INDAGINE DOWN-HOLE	18
3.4.1	BH02-DH	19

1 **PREMESSA**

Il presente elaborato “documentazione indagini geofisiche” viene redatto per la realizzazione dell’intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxi Lotto 1). Le indagini ricadono nei comuni di Macerata e Corridonia nella provincia di Macerata.

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

- n.2 prospezioni sismiche a rifrazione tomografica;
- n.1 indagine sismica down-hole.

Le indagini in oggetto sono state effettuate nel mese di Luglio ed Agosto 2019.

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.

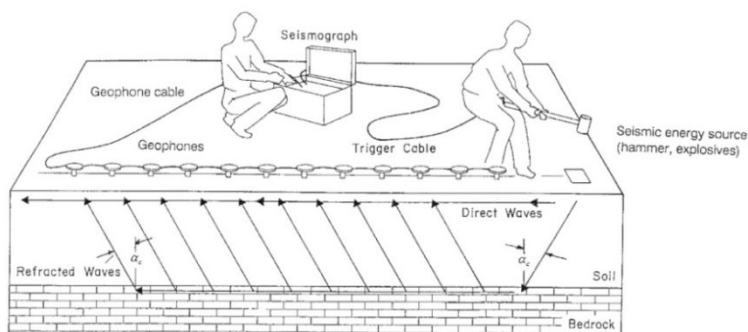


Fig. 2.1 – Schema esecutivo della sismica a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 – 00).

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).

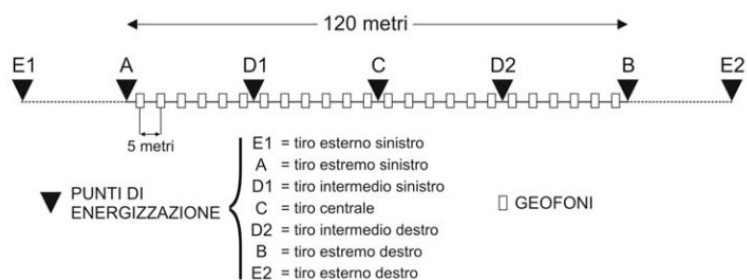


Fig. 2.2 – Tomografia sismica. Disposizione siti di energizzazione.

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 "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, 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.2** prospezioni sismiche a rifrazione, con elaborazione tomografica, la cui ubicazione è riportata nelle tavole allegate. Le sismiche in oggetto sono entrambe lunghe **115 m**.

Per i dettagli di ciascuna prospezione si rimanda alle schede monografiche ed alle tavole allegate.

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.

2.4 DESCRIZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI

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

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

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

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

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

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

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

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

2.5 RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

Le prospezioni sismiche in oggetto sono state compiute posizionando al suolo **n.2** basi sismiche aventi ognuna un numero di canali pari a 24 ed aventi lunghezza pari a **115** metri cadauna.

I dati sono stati acquisiti energizzando in corrispondenza dei siti esterni, in prossimità degli estremi, ed un 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 TS01

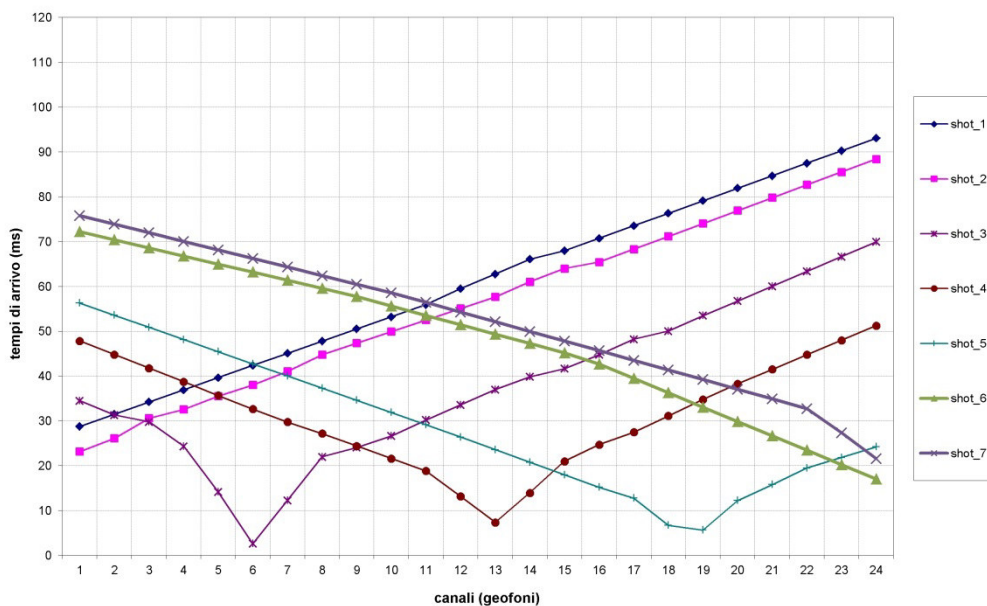


Fig. 2.3 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Tomografia sismica in onde P. Profilo TS01. Dromocrone.

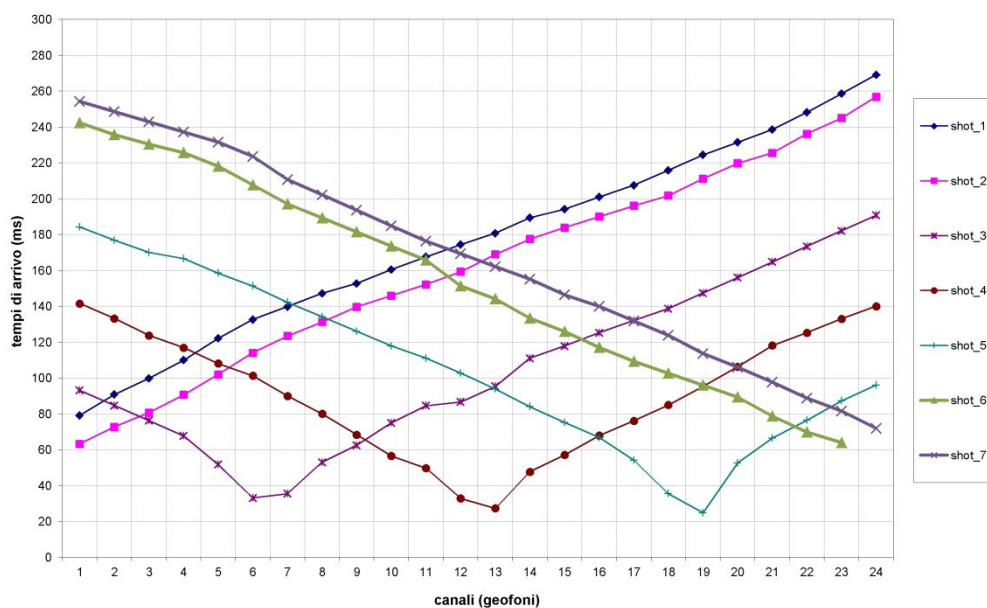


Fig. 2.4 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Tomografia sismica in onde S. Profilo TS01. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **TS01** hanno permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna ed una profondità media di circa 3 m, ed è costituito da ghiaia con sabbia limosa. La velocità delle onde di taglio è compresa tra 180 e 360 m/s, mentre la velocità delle onde P è compresa tra 600 e 1.000 m/s.

Il secondo sismostrato si attesta ad una profondità compresa tra 7 e 12 m circa dal piano campagna, ed è costituito dalle medesime litologie sovrastanti caratterizzate, però, da una velocità delle onde di taglio compresa tra 360 e 500 m/s, mentre la velocità delle onde P è compresa tra 1.000 e 1.500 m/s.

In profondità, la velocità delle onde sismiche aumenta sino a raggiungere valori pari a circa 620 m/s, per quanto riguarda le onde S, mentre per quel che concerne le velocità delle onde P, risultano pari a circa 1.800 m/s. Tali velocità sono proprie di argille sabbiose che passano, successivamente, ad argille marnose.

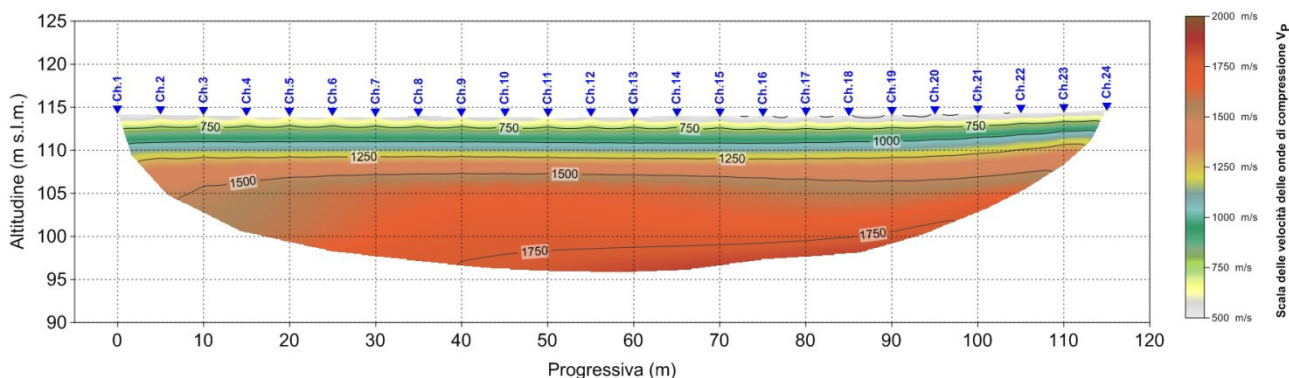


Fig. 2.5 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo TS01.

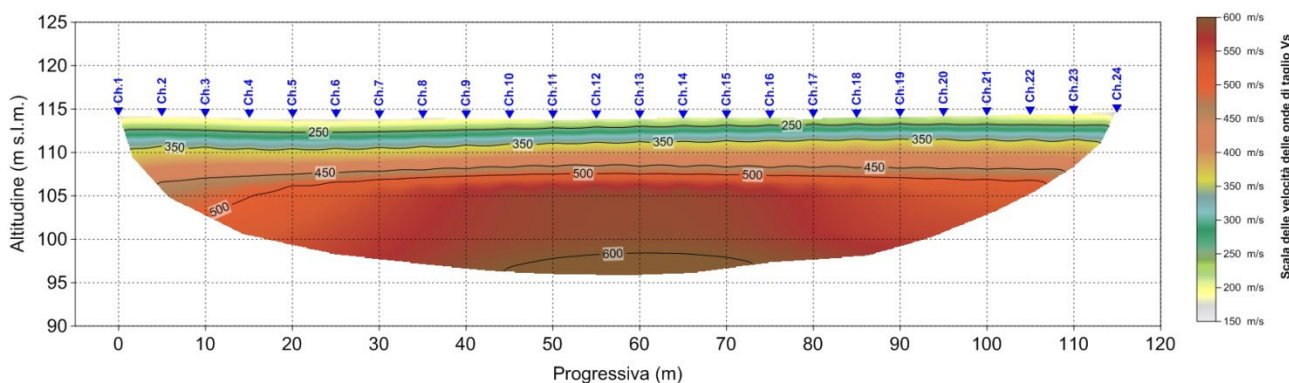


Fig. 2.6 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo TS01.

2.5.2 TS02

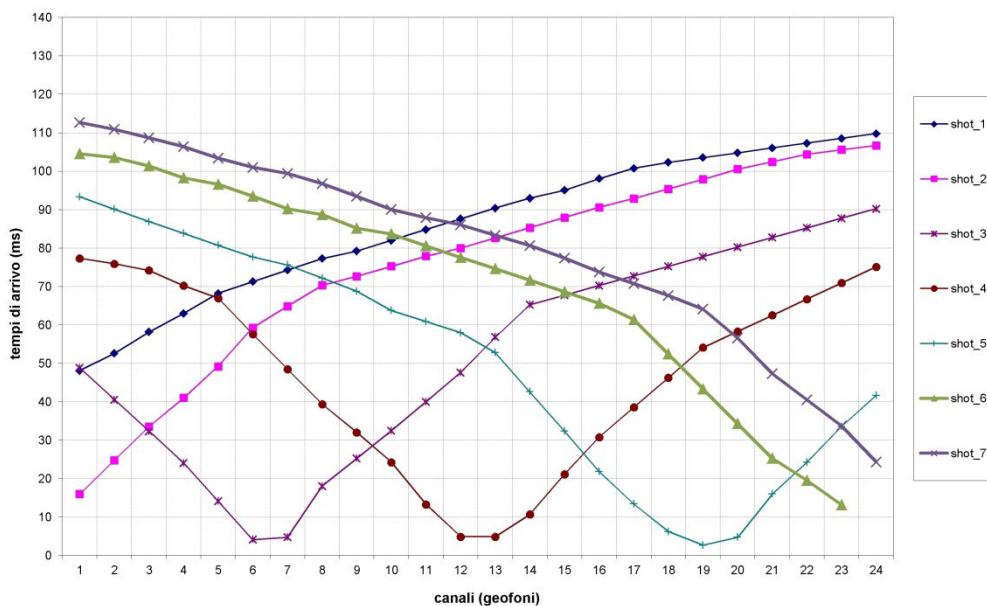


Fig. 2.7 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Tomografia sismica in onde P. Profilo TS02. Dromocrone.

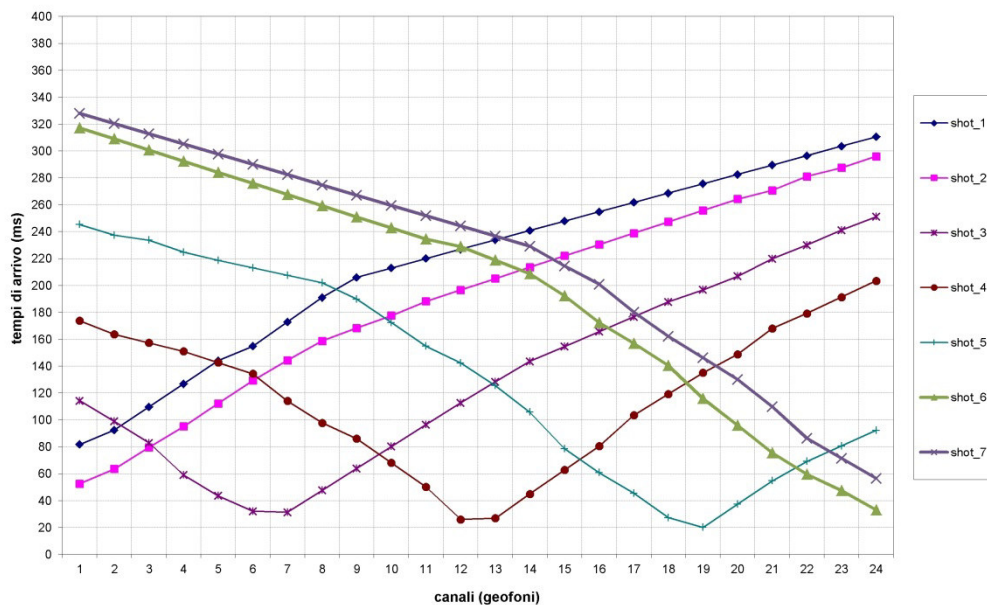


Fig. 2.8 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Tomografia sismica in onde S. Profilo TS02. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico **TS02** hanno permesso di evidenziare tre sismostrati.

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna ed una profondità media di circa 7 m, ed è costituito da ghiaia con sabbia limosa. La velocità delle onde di taglio è compresa tra 180 e 360 m/s, mentre la velocità delle onde P è compresa tra 550 e 900 m/s.

Il secondo sismostrato si attesta ad una profondità compresa tra 12 e 20 m circa dal piano campagna, ed è costituito dalle medesime litologie sovrastanti caratterizzate, però, da una velocità delle onde di taglio compresa tra 360 e 500 m/s, mentre la velocità delle onde P è compresa tra 900 e 1.500 m/s.

In profondità, la velocità delle onde sismiche aumenta sino a raggiungere valori pari a circa 580 m/s, per quanto riguarda le onde S, mentre per quel che concerne le velocità delle onde P, risultano pari a circa 1.720 m/s. Tali velocità sono proprie di argille sabbiose che passano, successivamente, ad argille marnose.

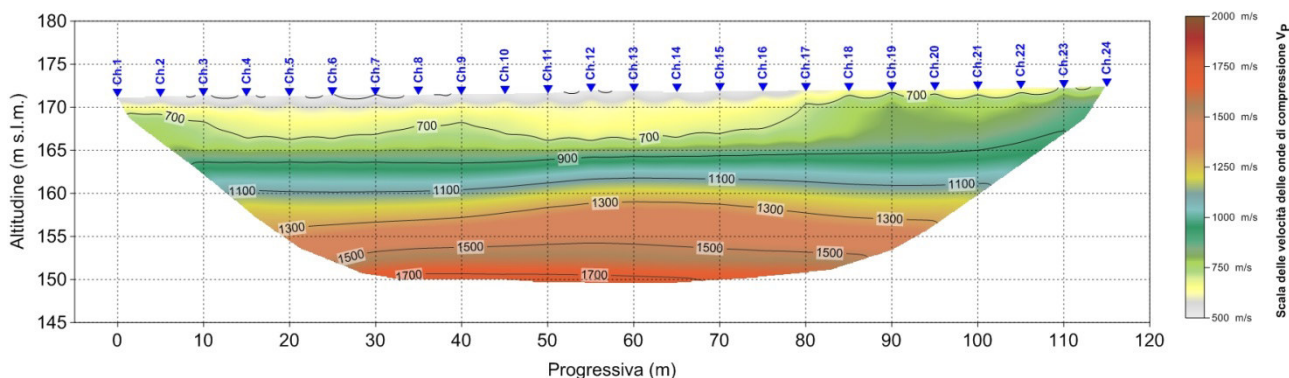


Fig. 2.9 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo TS02.

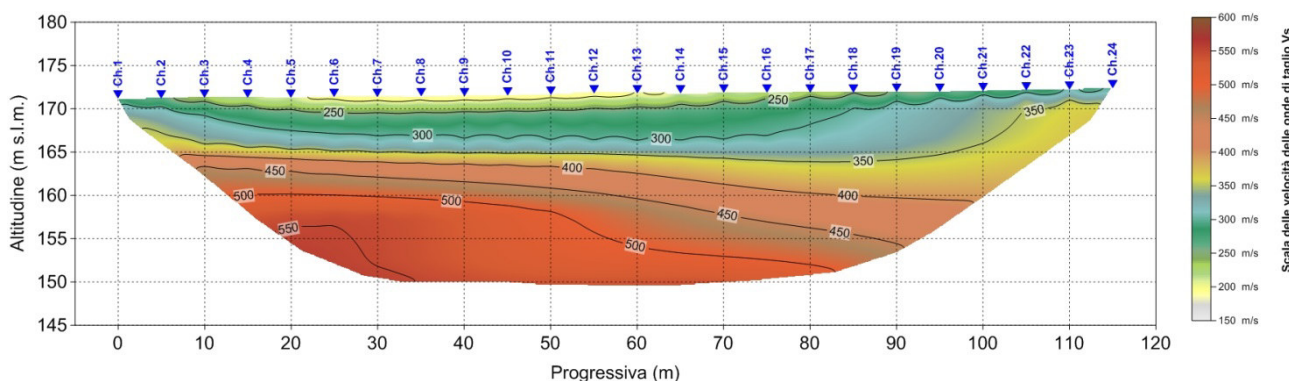


Fig. 2.10 – Intervalliva di Macerata, tratto Sforzacosta (svincolo S.S. 77) – la pieve (ex Sublotto 2.2. del Maxilotto 1). Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo TS02.

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).

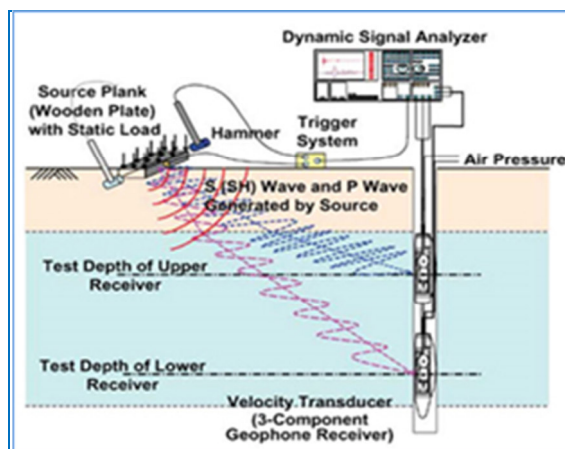


Fig. 3.1 – Schema di sistema di acquisizione per prove sismiche in foro tipo down-hole.

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, in cui, si osserva distintamente il primo arrivo dell'onda di compressione.

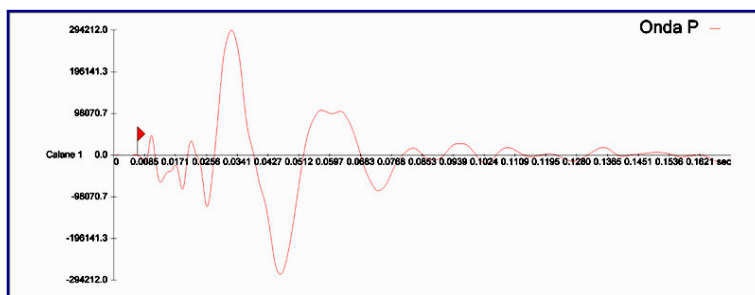


Fig. 3.2 - Esempio di arrivo dell'onda "P"

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 (vedi figura seguente).

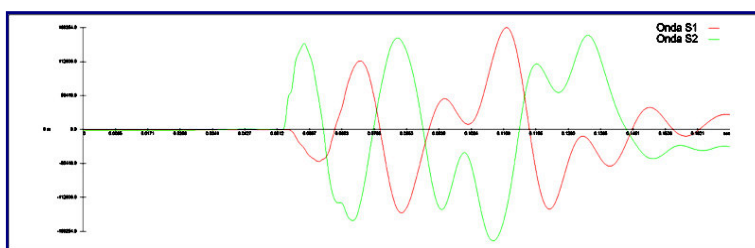


Fig. 3.3 - Esempio di arrivo dell'onda "S"

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.
- 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 bit, 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.

3.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, è stata eseguita **n.1** prova down-hole. Per i dettagli della prospezione si rimanda alla scheda monografica ed alle tavole allegate.

Le indagini sono state eseguite sino a **30 m** di profondità, 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.

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:

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

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

3.4.1 BH02-DH

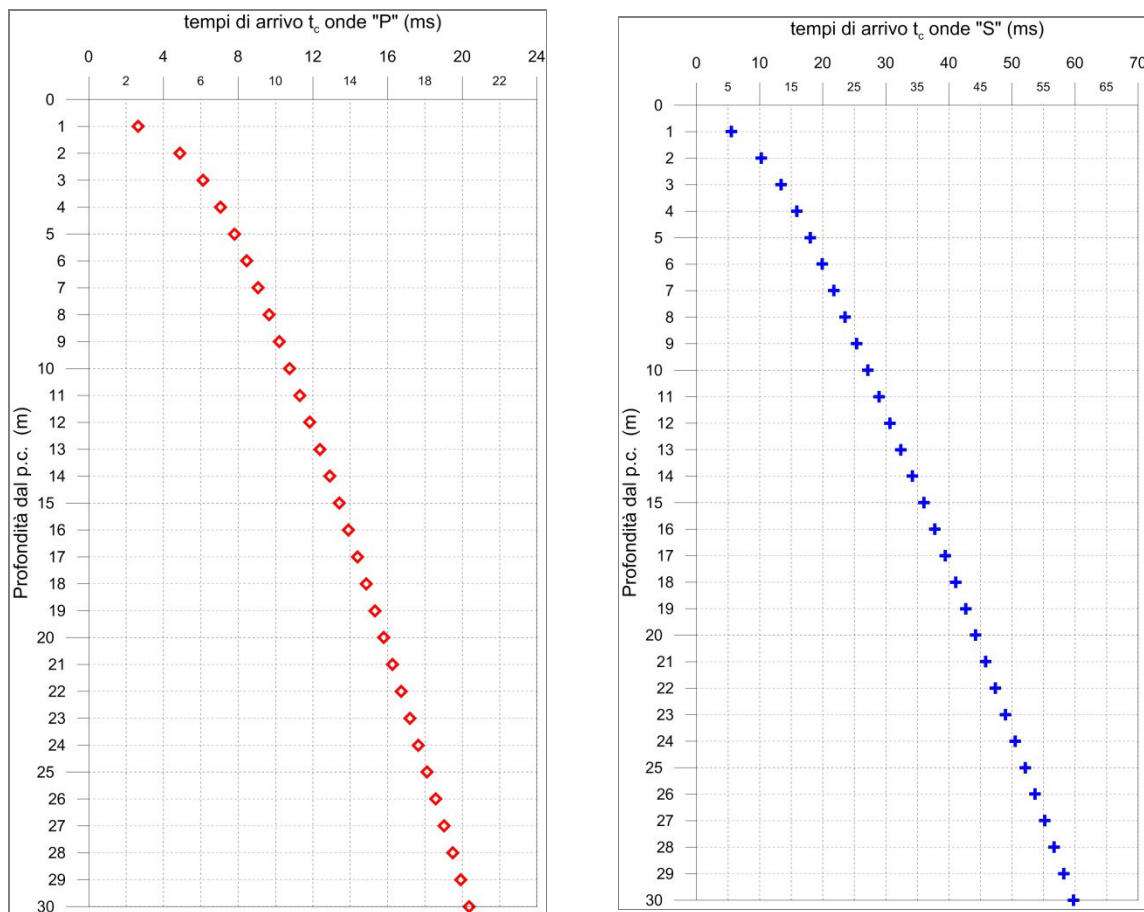


Fig. 3.4 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento dei tempi di arrivo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

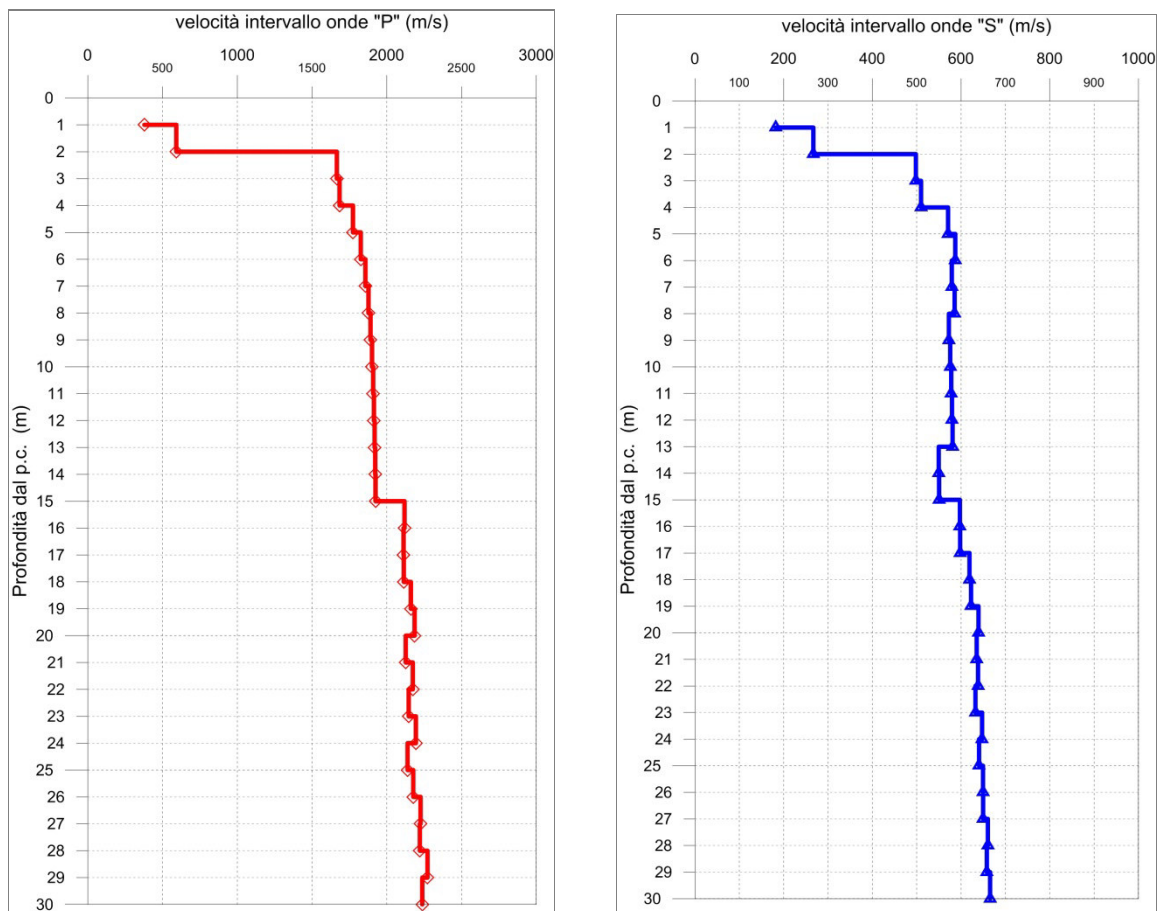


Fig. 3.5 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "P", in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento delle velocità intervallo delle onde "S", in funzione della profondità dal p.c.

Inserendo i valori di velocità di propagazione delle onde elastiche nelle formule (1) (2), (3) e (4), sono stati determinati i valori dei moduli elastici ovvero del coefficiente di Poisson (ν) e dei parametri elastici G, E, K.

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)	V_p/V_s	Poisson (ν)	γ^n gamma NATURALE	G Mpa	E Mpa	K Mpa
1	5,90	12,30	2,64	5,50	379	182	2,1	0,35	2,20	73	196	219
2	6,90	14,52	4,88	10,27	592	267	2,2	0,37	2,20	157	430	563
3	7,37	16,08	6,13	13,38	1666	498	3,3	0,45	2,20	546	1584	5377
4	7,88	17,78	7,05	15,90	1684	510	3,3	0,45	2,20	572	1657	5476
5	8,40	19,38	7,80	17,99	1774	571	3,1	0,44	2,20	716	2067	5970
6	8,91	20,98	8,45	19,90	1825	587	3,1	0,44	2,20	758	2188	6320
7	9,42	22,63	9,06	21,76	1857	579	3,2	0,45	2,20	738	2134	6602
8	9,94	24,28	9,64	23,56	1877	586	3,2	0,45	2,20	754	2181	6748
9	10,45	25,98	10,21	25,36	1891	573	3,3	0,45	2,20	721	2091	6909
10	10,97	27,68	10,76	27,14	1901	576	3,3	0,45	2,20	729	2113	6982
11	11,48	29,38	11,30	28,91	1909	578	3,3	0,45	2,20	735	2130	7037
12	12,00	31,08	11,83	30,66	1914	580	3,3	0,45	2,20	739	2142	7078
13	12,51	32,78	12,37	32,40	1919	581	3,3	0,45	2,20	742	2152	7110
14	13,03	34,58	12,90	34,23	1922	550	3,5	0,46	2,20	664	1934	7243
15	13,54	36,38	13,42	36,06	1925	550	3,5	0,46	2,20	666	1940	7264
16	14,01	38,04	13,90	37,75	2118	597	3,5	0,46	1,95	696	2028	7823
17	14,48	39,70	14,38	39,43	2112	598	3,5	0,46	1,95	697	2031	7770
18	14,95	41,31	14,86	41,05	2114	619	3,4	0,45	1,95	747	2172	7717
19	15,41	42,90	15,33	42,67	2161	623	3,5	0,45	1,95	756	2199	8101
20	15,87	44,46	15,79	44,24	2186	639	3,4	0,45	1,95	797	2317	8258
21	16,33	46,03	16,26	45,82	2127	635	3,3	0,45	1,95	787	2283	7770
22	16,79	47,59	16,72	47,39	2174	638	3,4	0,45	1,95	794	2308	8157
23	17,26	49,16	17,19	48,98	2147	632	3,4	0,45	1,95	780	2266	7946
24	17,71	50,70	17,65	50,52	2195	647	3,4	0,45	1,95	817	2374	8303
25	18,18	52,26	18,12	52,09	2139	641	3,3	0,45	1,95	800	2321	7853
26	18,63	53,79	18,58	53,63	2177	649	3,4	0,45	1,95	823	2387	8143
27	19,08	55,33	19,03	55,17	2226	650	3,4	0,45	1,95	823	2392	8564
28	19,53	56,84	19,48	56,69	2221	661	3,4	0,45	1,95	851	2470	8487
29	19,97	58,35	19,92	58,21	2272	658	3,5	0,45	1,95	844	2456	8943
30	20,42	59,85	20,37	59,72	2237	666	3,4	0,45	1,95	864	2508	8606

Tab. 3.1 – Indagine down-hole BH02-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.

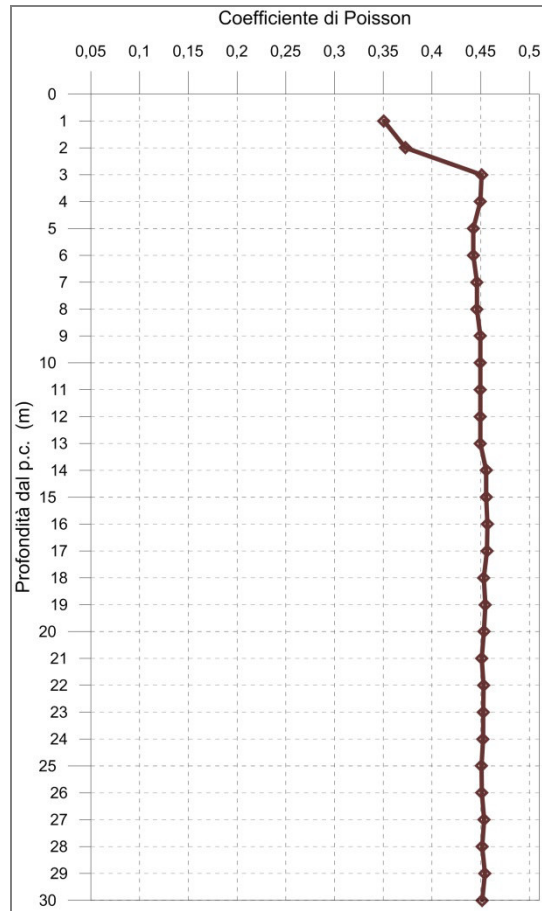


Fig. 3.6 - Diagramma relativo all'andamento del coefficiente di Poisson in funzione della profondità dal p.c.

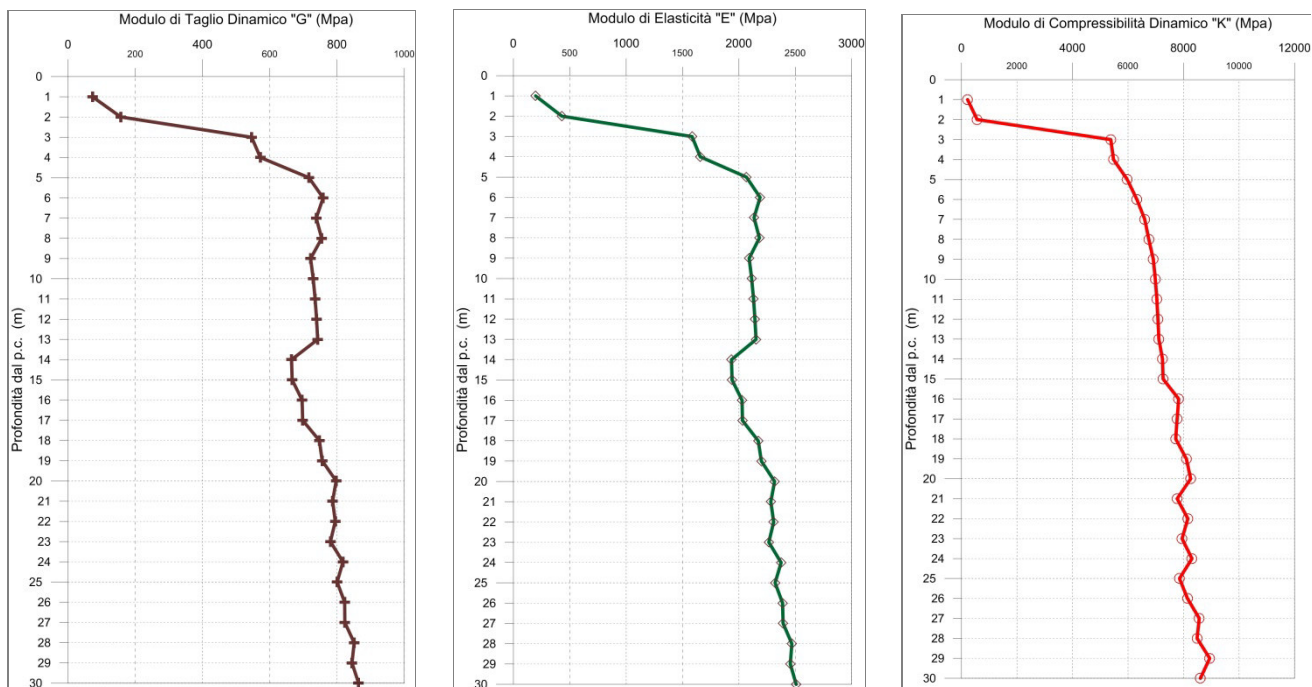


Fig. 3.7 - A sinistra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "G" in funzione della profondità dal p.c. Al centro, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "E" in funzione della profondità dal p.c. A destra, diagramma relativo all'andamento del modulo elastico "K" in funzione della profondità dal p.c.

DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



PROJECT:
"INTERVALLIVA DI MACERATA,
TRATTO LA PIEVE - VIA MATTEI"

LOCATION:
COMUNE DI MACERATA

CLIENT:
QUADRILATERO S.p.A.

OBJECT:
DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE



Tecno In Ref.: R.C. 185/19
Revision n.: 00
Date: ottobre 2019
Description: emissione

Redacted by: Dott. Geol. Giovanni Antonucci
Reviewed by: Dr.ssa Geol. Maria Gabriella Vadala'
Approved by: Dr. Geol. Lucio Amato
Document code: 185-19_geofisica.pdf

INDICE

1	PREMESSA	2
2	INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	3
2.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA	3
2.2	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	5
2.3	RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA	6
2.3.1	T3	7
2.3.2	T4	9
2.3.3	T5	11
2.3.4	T6	13
3	INDAGINI M.A.S.W.	15
3.1	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA ED ELABORAZIONE DATI	15
3.2	DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	18
3.3	DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE	18
3.4	RISULTANZE DELLE INDAGINI MASW	19
3.4.1	MASW M1	20

1 PREMESSA

Il presente elaborato viene redatto per il Progetto "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Le indagini ricadono nel comune di Macerata.

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

- n.4 prospezioni sismiche a rifrazione tomografica;
- n.1 MASW.

Si precisa che, in accordo con la Committenza, il numero e la tipologia di prospezioni sismiche a rifrazione è variato, rispetto a quanto previsto nella scheda sintetica, con l'integrazione di una prospezione sismica a rifrazione.

Le indagini in oggetto sono state effettuate nei mesi di settembre ed ottobre 2019.

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.

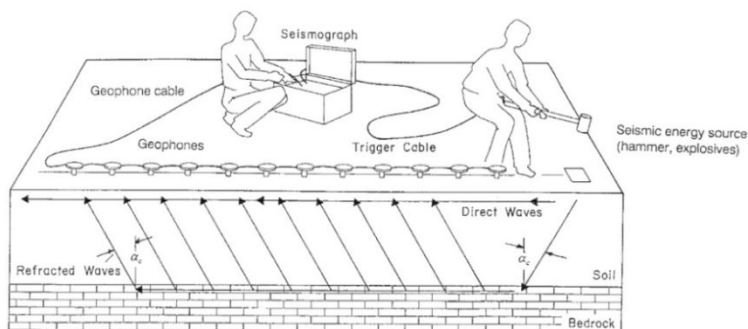


Fig. 2.1 - Schema esecutivo della sismica a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 - 00).

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).

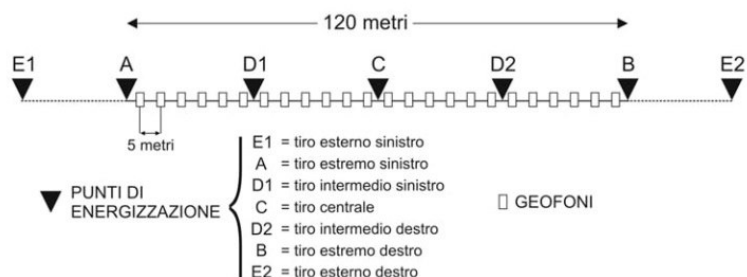


Fig. 2.2 - Tomografia sismica. Disposizione siti di energizzazione.

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 cannone 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 DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, sono state eseguite **n.4** prospezioni sismiche a rifrazione, con elaborazione tomografica. Nella tabella, si riportano le specifiche di ciascuna prospezione:

Codice indagine	Lunghezza base sismica (m)	UTM WGS84 Fuso 32			
		Coordinata inizio profilo - EST	Coordinata inizio profilo - NORD	Coordinata fine profilo - EST	Coordinata fine profilo - NORD
T3	115	372805,521	4792750,857	372851,128	4792856,368
T4	115	372963,451	4793053,025	373049,263	4793129,410
T5	115	373457,443	4794007,609	373538,251	4794089,337
T6	46	372861,494	4792918,737	372885,575	4792958,009

*Tab. 2.1 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
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.

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

2.3 RISULTANZE DELL'INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

Le prospezioni sismiche in oggetto sono state compiute posizionando al suolo **n.4** basi sismiche aventi un numero di canali pari a 24 ed aventi lunghezza variabile tra 46 (T6) e 115 metri (T3, T4 e T5).

I dati sono stati acquisiti energizzando in corrispondenza dei siti esterni, in prossimità degli estremi, in funzione della logistica, ed in un certo numero di tiri interni.

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 campiture a falsi colori.

Di seguito, per ognuno dei profili eseguiti, si riportano le informazioni / elaborazioni elencate:

- dromocrone ottenute dalla lettura dei tempi di primo arrivo delle onde P ed SH;
- pseudosezioni sismiche in onde P e in onde S.

2.3.1 T3

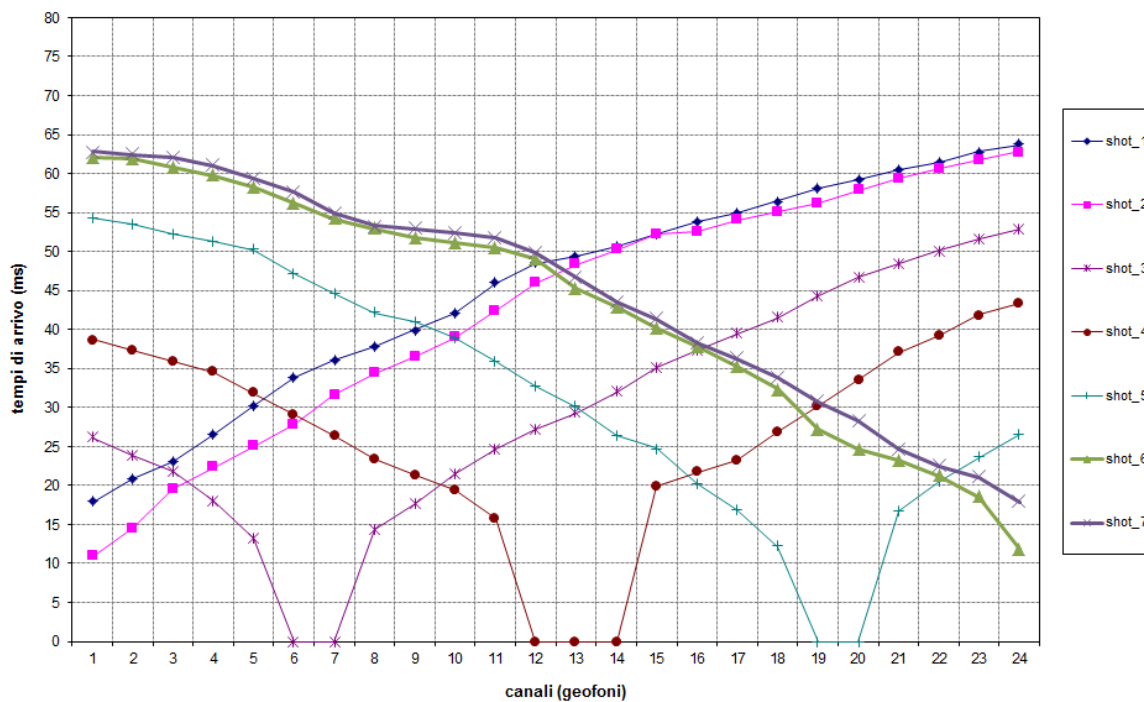


Fig. 2.3 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde P. Profilo T3. Dromocrone.

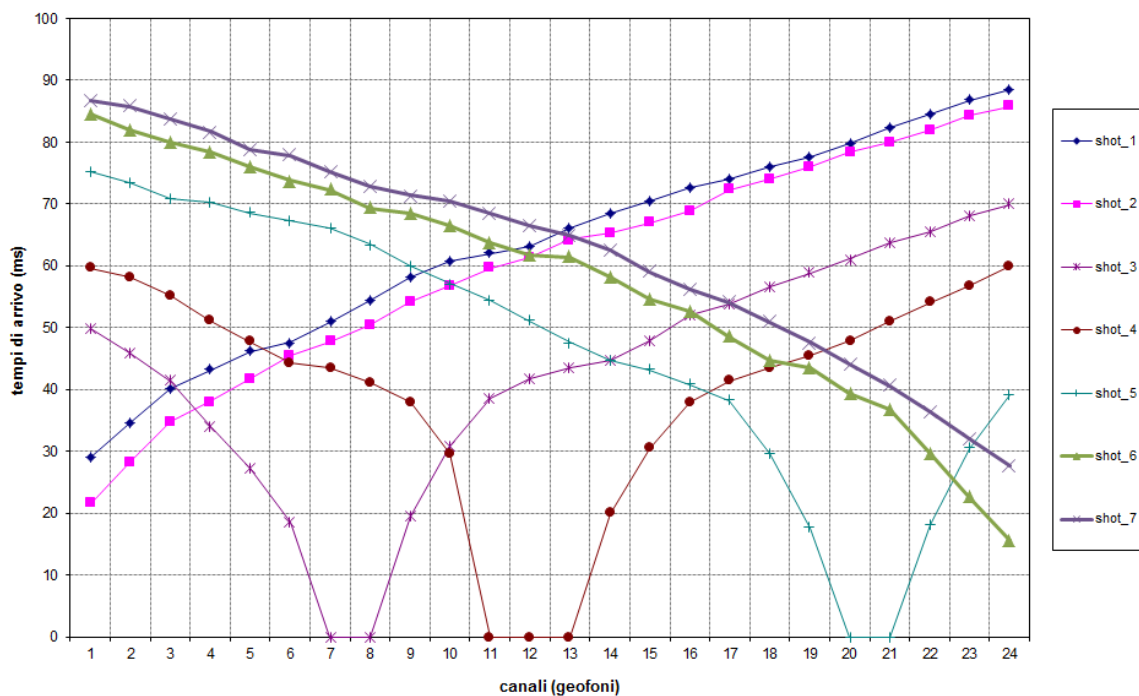


Fig. 2.4 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde S. Profilo T3. Dromocrone.

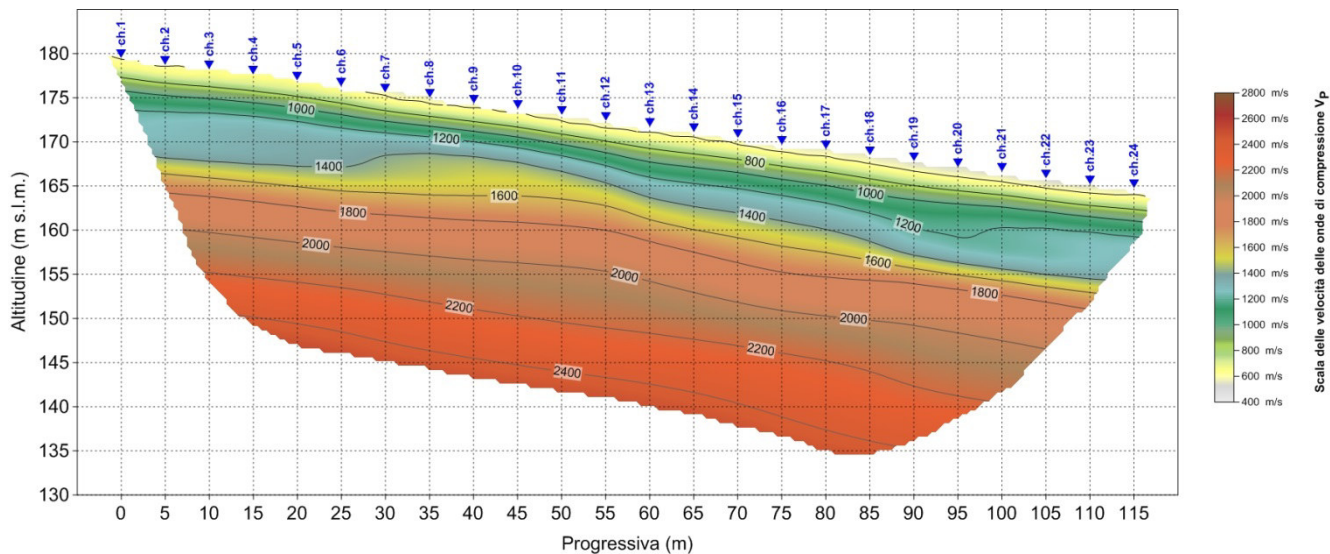


Fig. 2.5 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo T3.

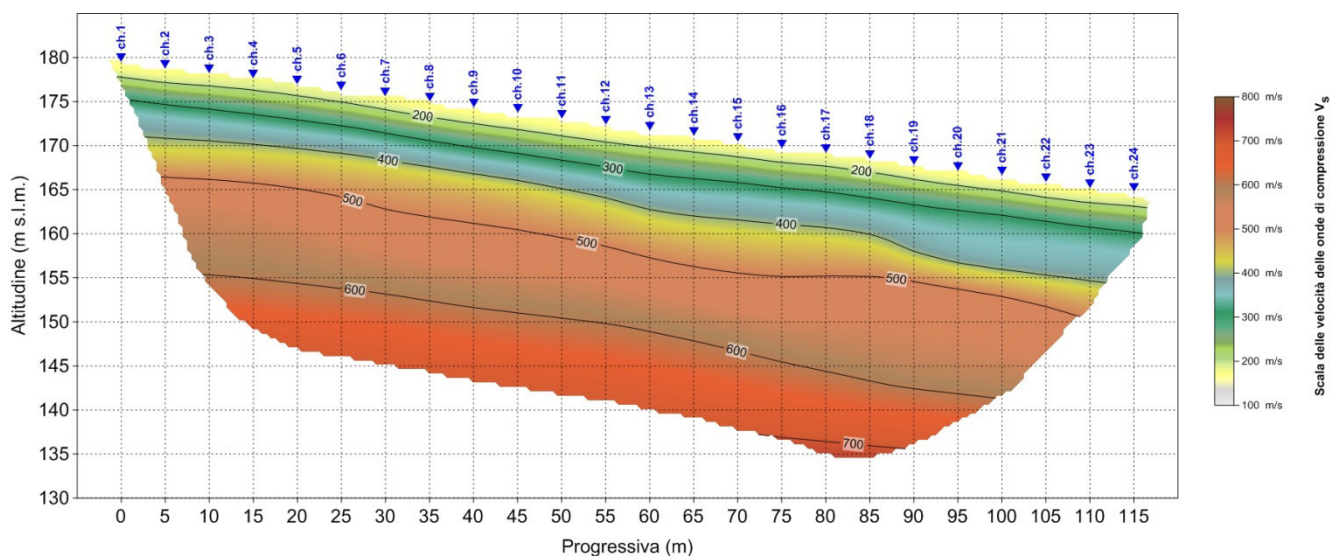


Fig. 2.6 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo T3.

2.3.2 T4

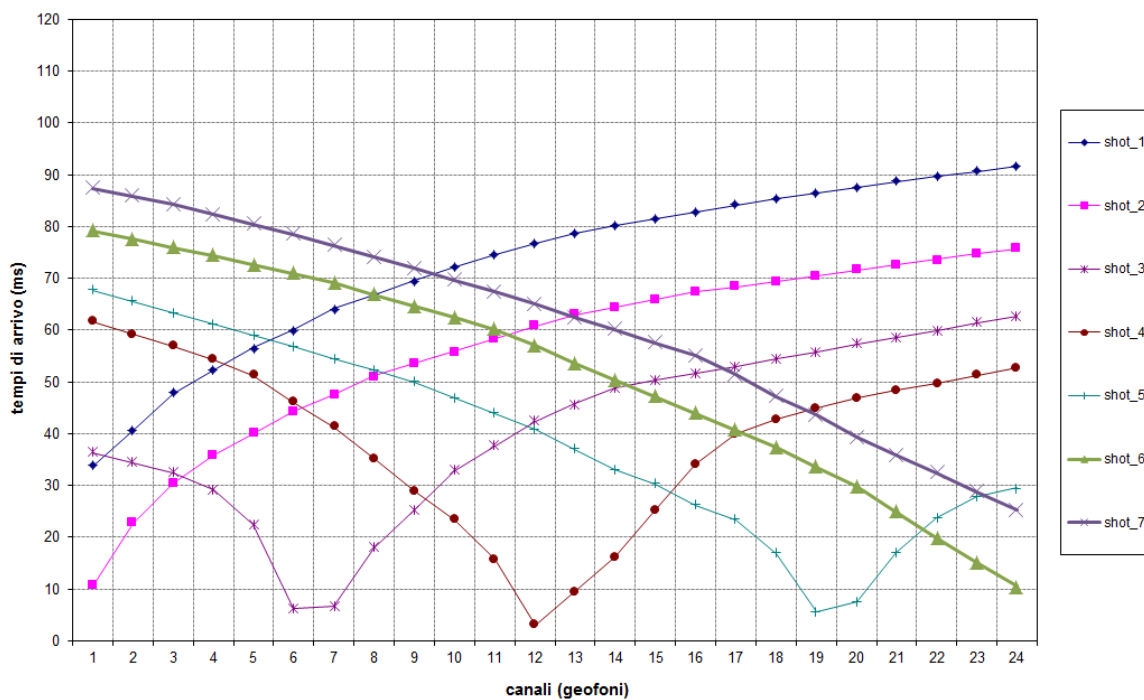


Fig. 2.7 – “Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei”.
Tomografia sismica in onde P. Profilo T4. Dromocrone.

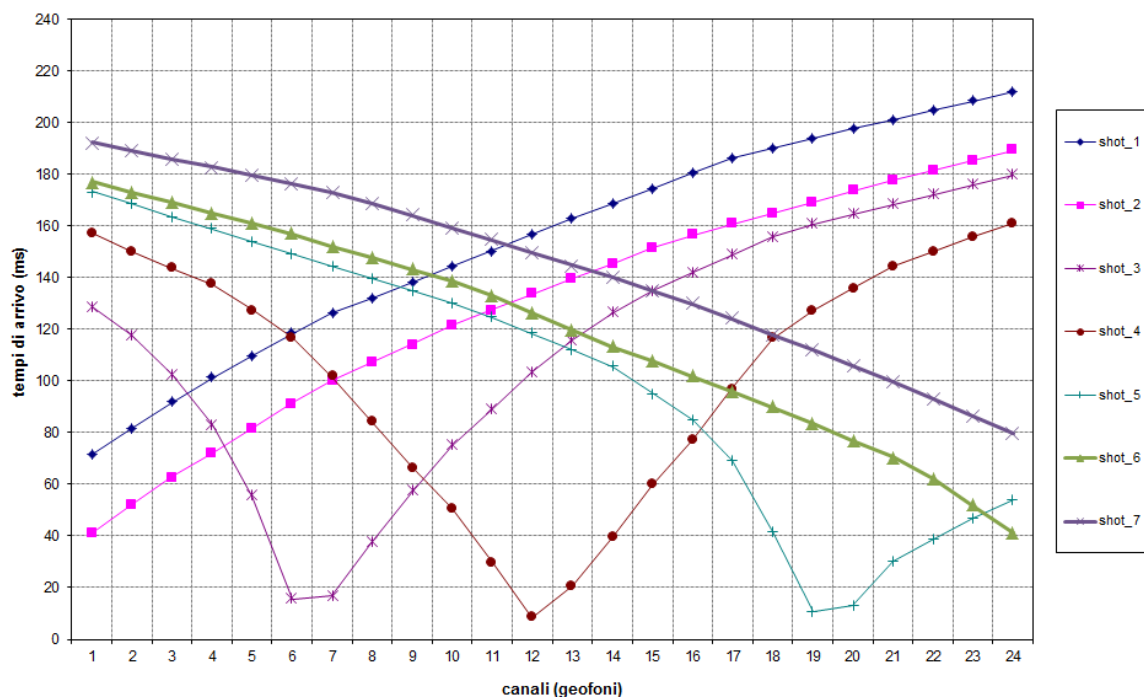


Fig. 2.8 – “Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei”.
Tomografia sismica in onde S. Profilo T4. Dromocrone.

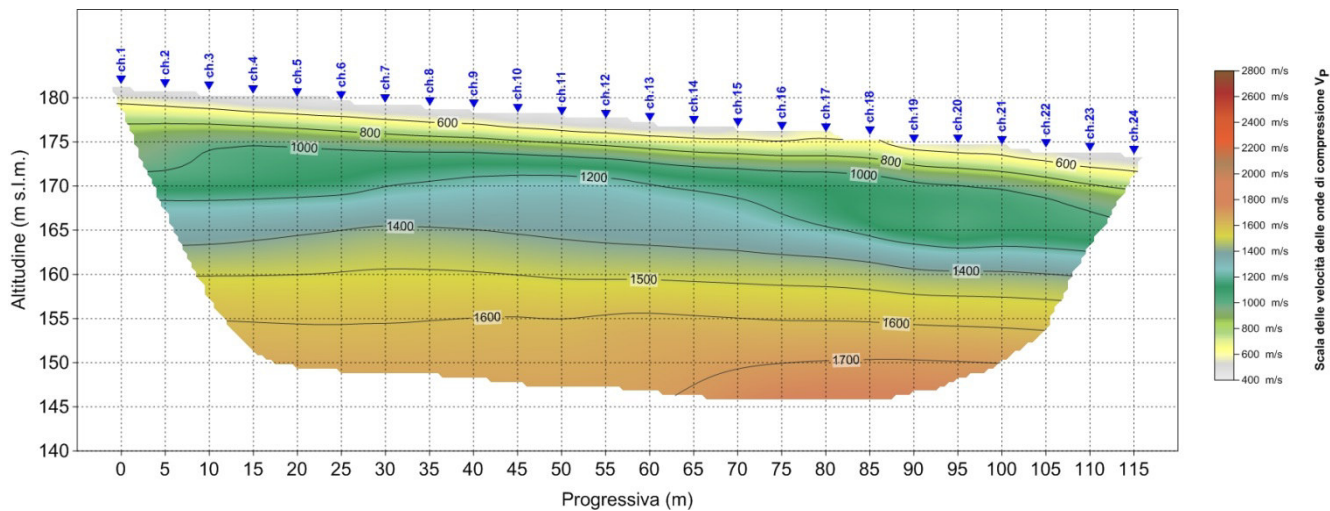


Fig. 2.9 – “Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei”.
Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo T4.

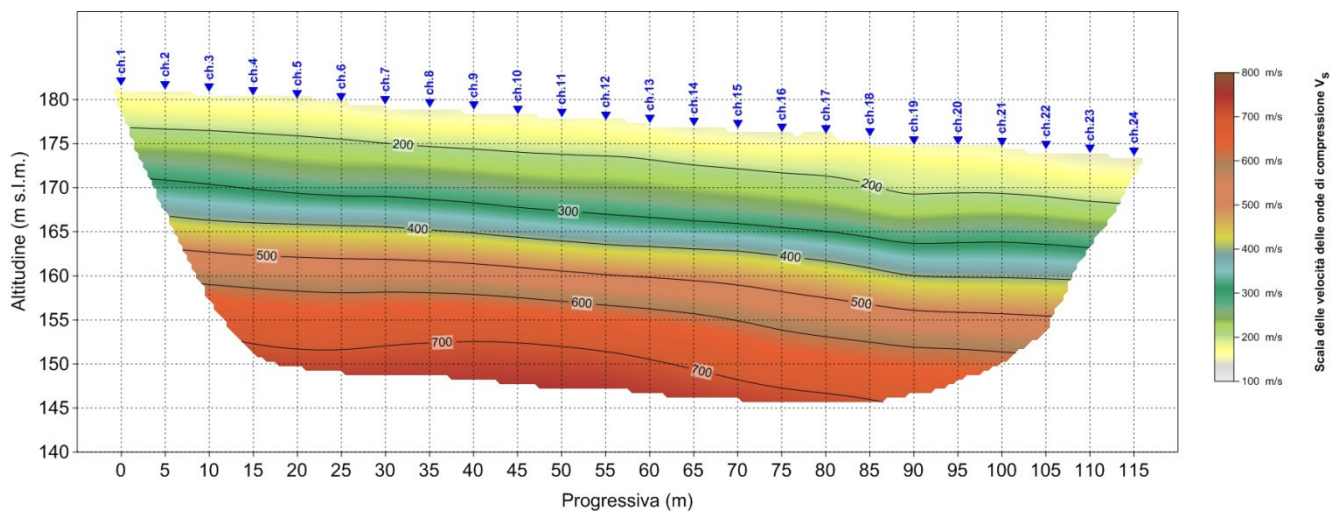


Fig. 2.10 – “Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei”.
Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo T4.

2.3.3 T5

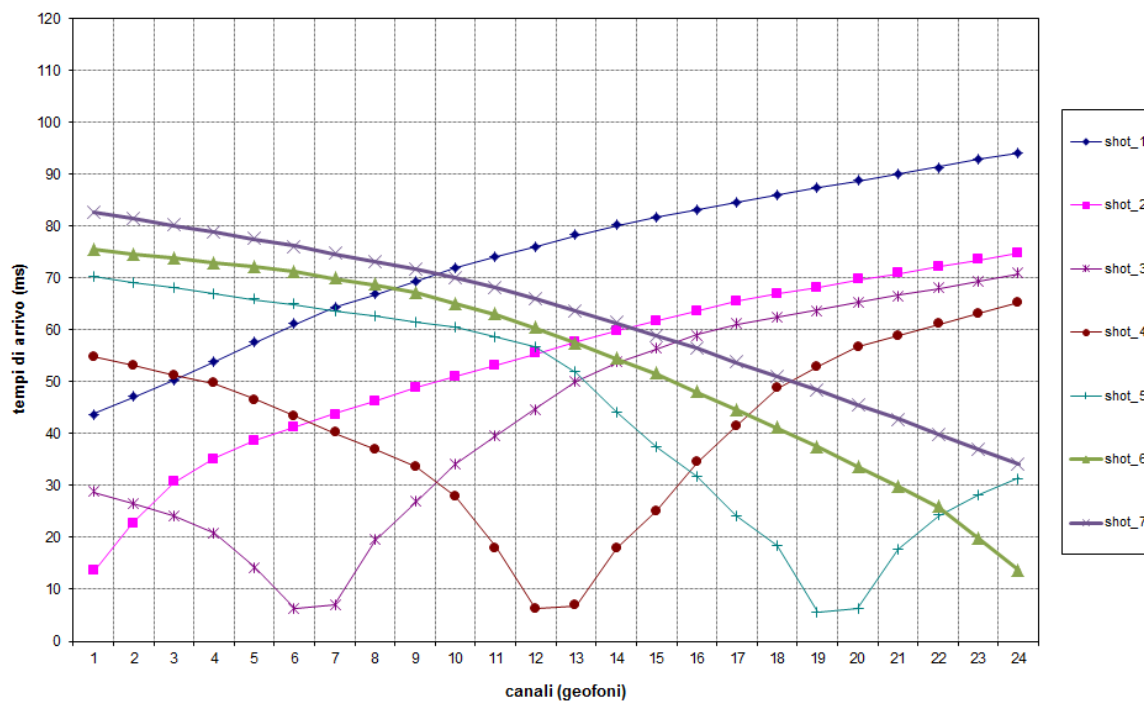


Fig. 2.11 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde P. Profilo T5. Dromocrone.

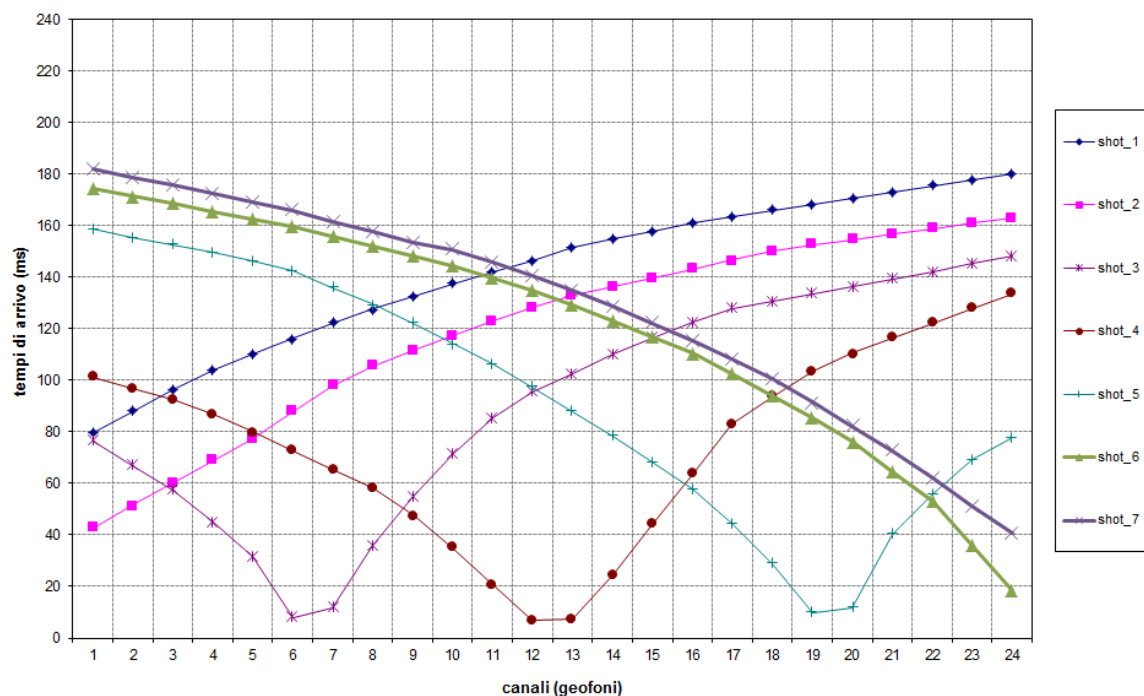


Fig. 2.12 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde S. Profilo T5. Dromocrone.

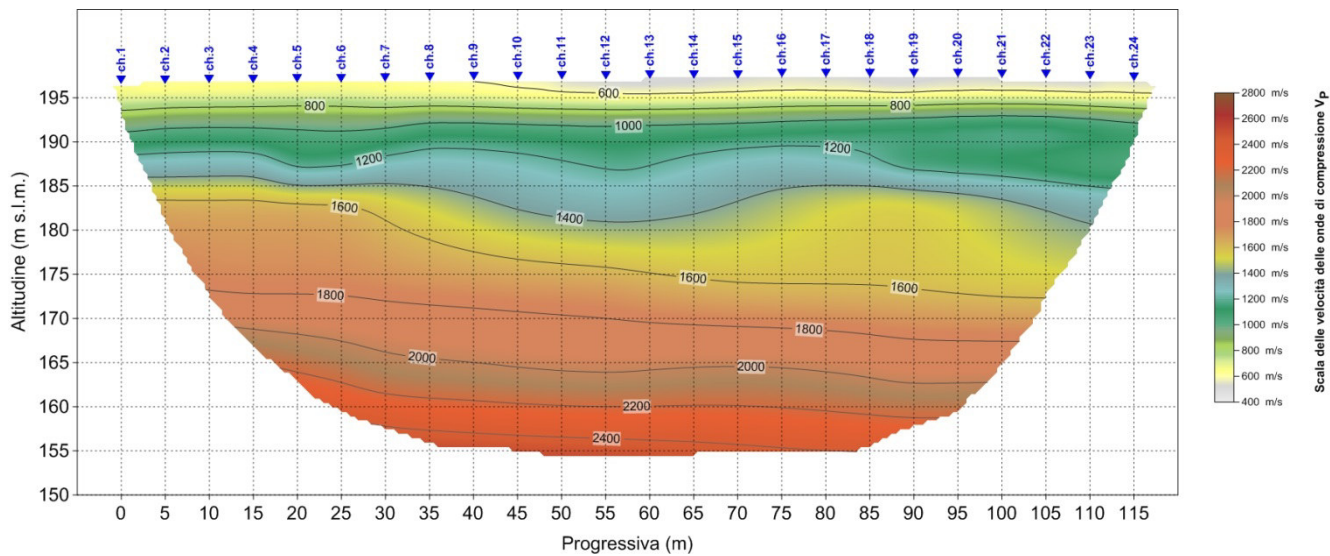


Fig. 2.13 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo T5.

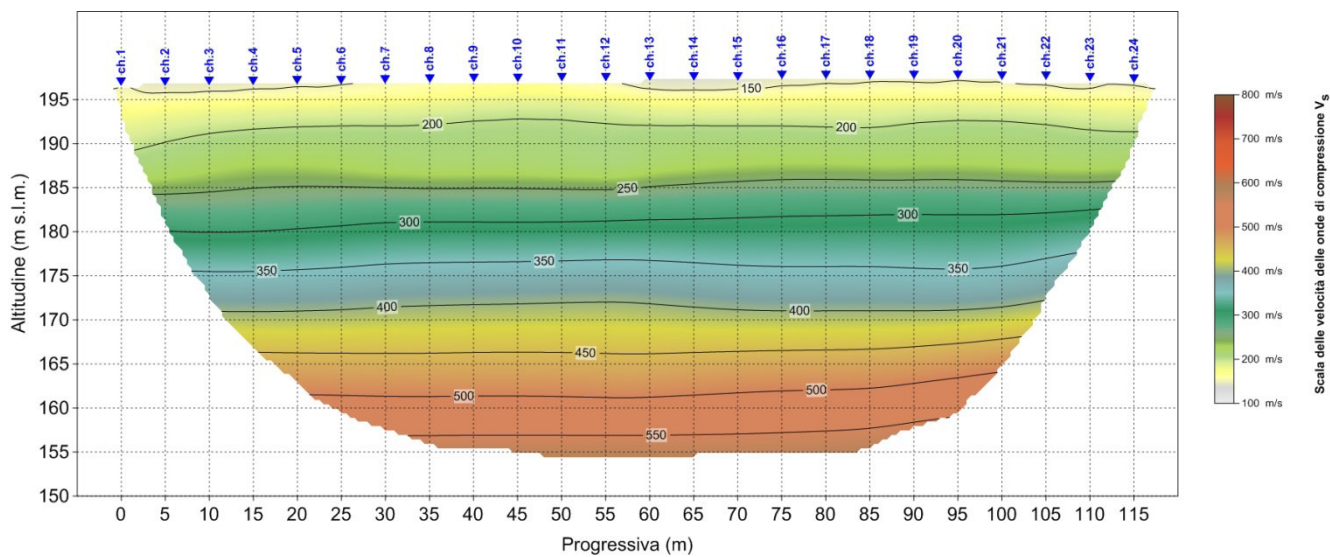


Fig. 2.14 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo T5.

2.3.4 T6

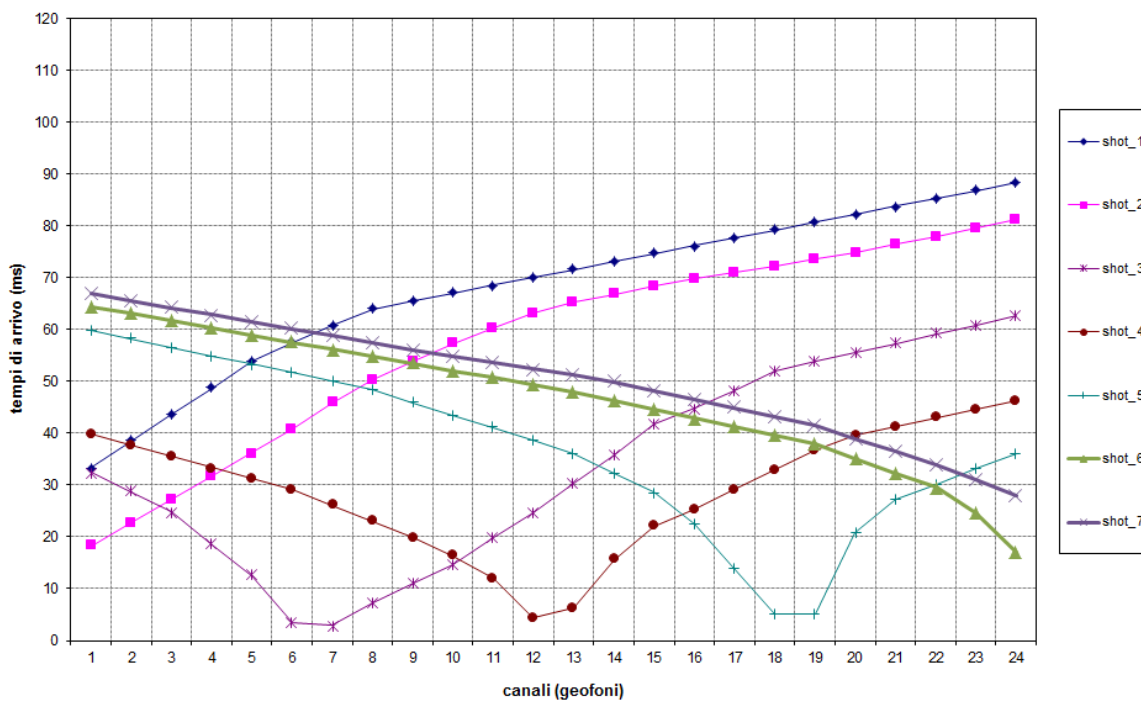


Fig. 2.15 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde P. Profilo T6. Dromocrone.

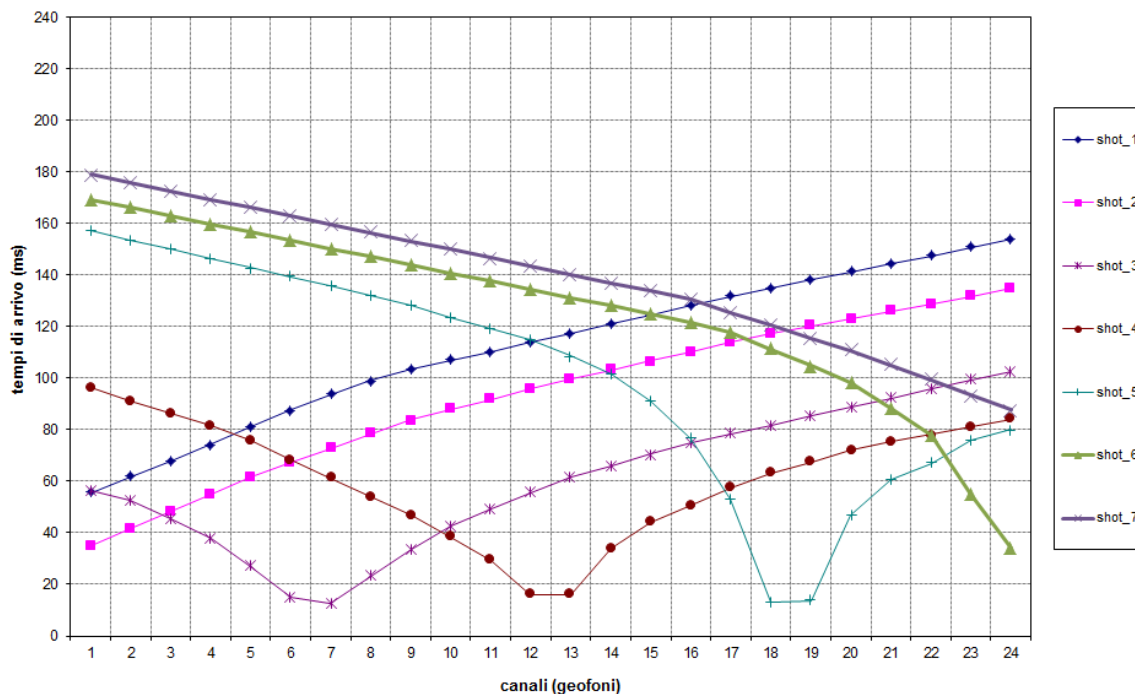


Fig. 2.16 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Tomografia sismica in onde S. Profilo T6. Dromocrone.

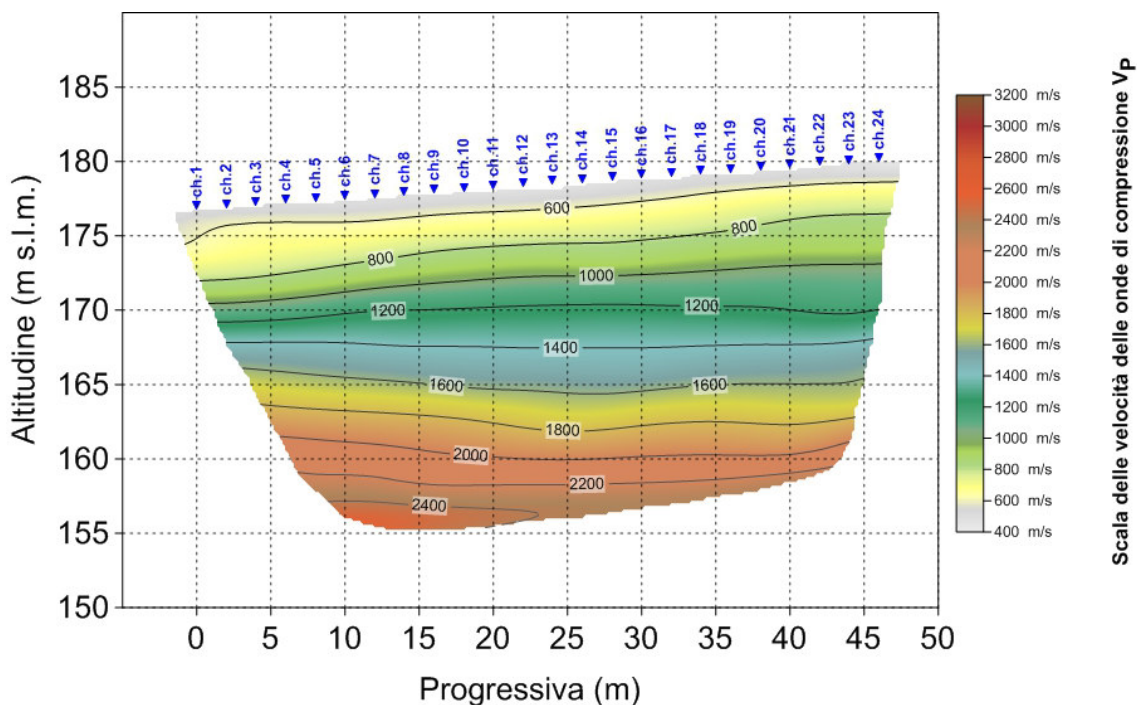


Fig. 2.17 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde P. Profilo T6.

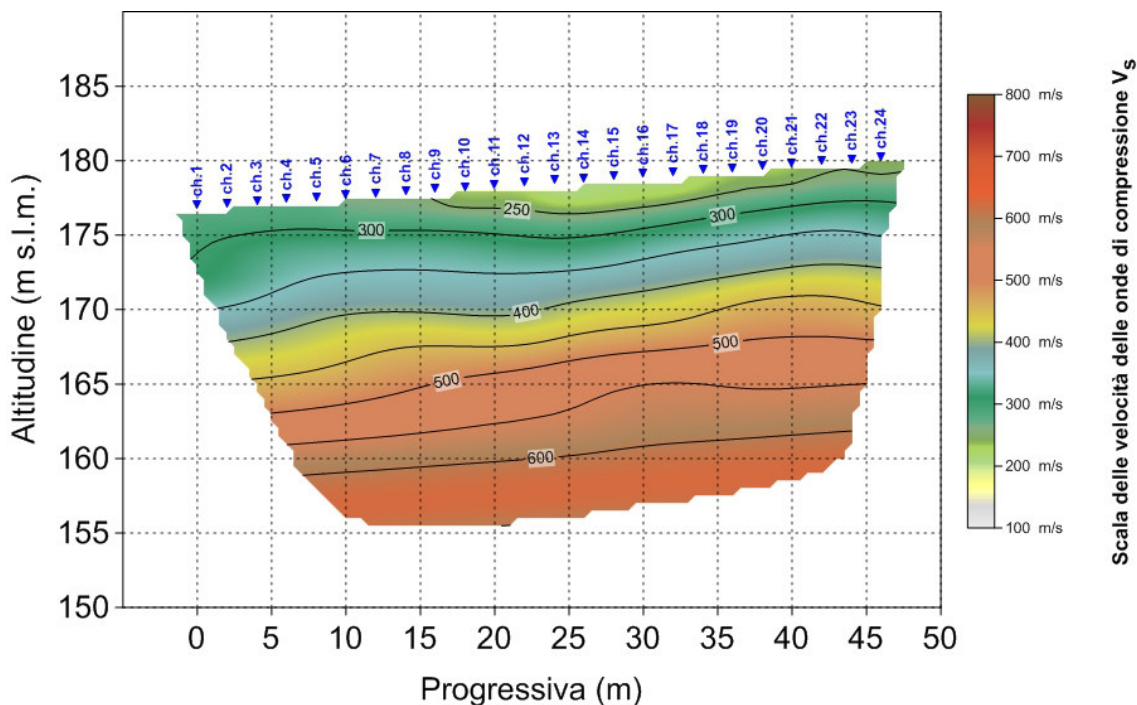


Fig. 2.18 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Pseudosezione sismica tomografica in onde S. Profilo T6.

3 INDAGINI M.A.S.W.

3.1 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. 3.1.

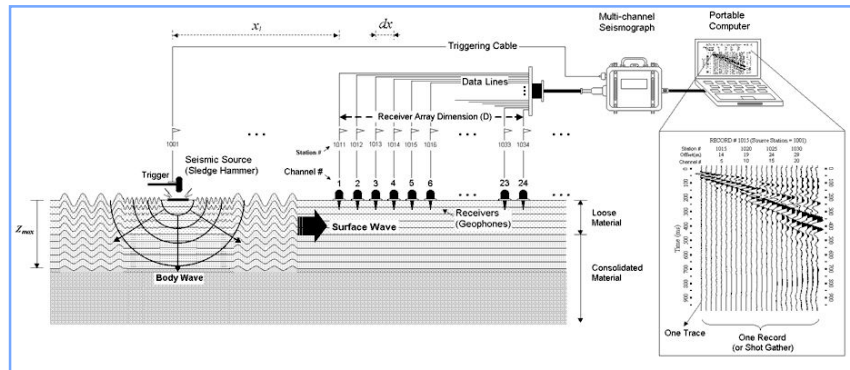


Fig. 3.1 - Esempio configurazione sorgente-ricevitori per l'esecuzione di un rilievo MASW.

Questo consente di ottenere uno spettro delle velocità di fase (ovvero una curva di dispersione) sperimentale apparente, generalmente nel range di frequenze compreso tra $4.5 \div 100$ Hz; il metodo, pertanto, permette di ottenere informazioni indirette sulla parte del sottosuolo compresa (di norma) entro i primi $30 \div 50$ 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. 3.2). 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.

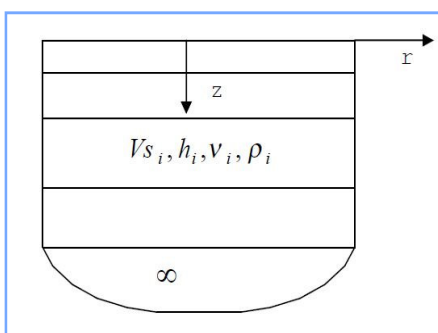


Fig. 3.2 - Modello di semispazio semplificato.

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;
- SURFSEIS 3.0 sviluppato dal Kansas Geological Survey – University of Kansas.

3.2 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.

3.3 DESCRIZIONE DELLE MODALITA' ESECUTIVE

Nell'ambito della commessa in oggetto, come accennato in premessa, è stata eseguita n.1 indagine MASW la cui ubicazione è di seguito riportata.

Codice indagine	Lunghezza (m)	UTM WGS84			
		Coordinata EST inizio	Coordinata NORD inizio	Coordinata EST fine	Coordinata NORD fine
M1	46	373610,299	4794234,436	373636,100	4794270,128

*Tab. 3.1 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei".
Coordinate indagine MASW.*

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.

3.4 RISULTANZE DELLE INDAGINI MASW

Di seguito, sono riportate le risultanze della prospezione sismica MASW, riepilogate tramite i seguenti elaborati:

- 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.
- 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).

3.4.1 MASW M1

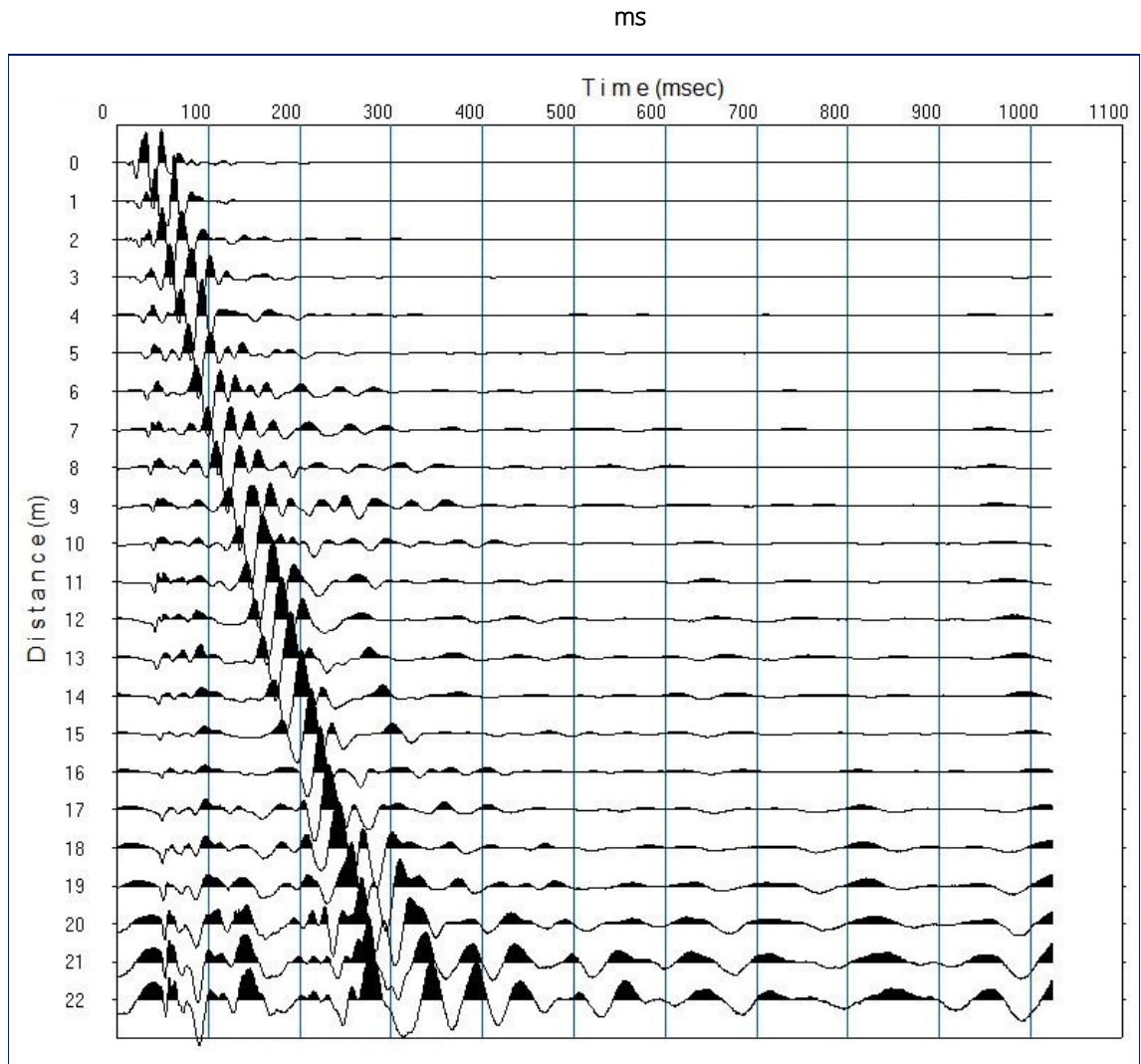


Fig. 3.3 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei". MASW M1. Sismogramma

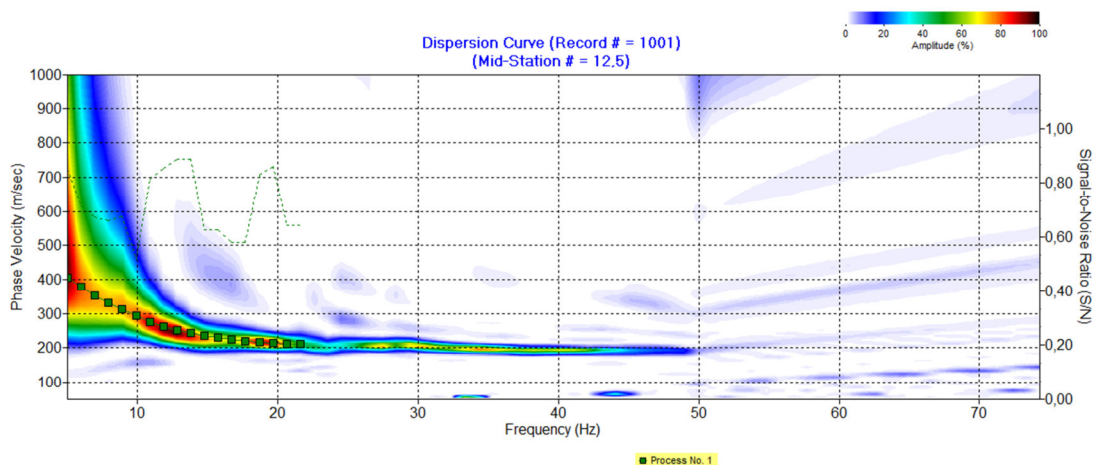


Fig. 3.4 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei". MASW M1. Curva di Dispersione

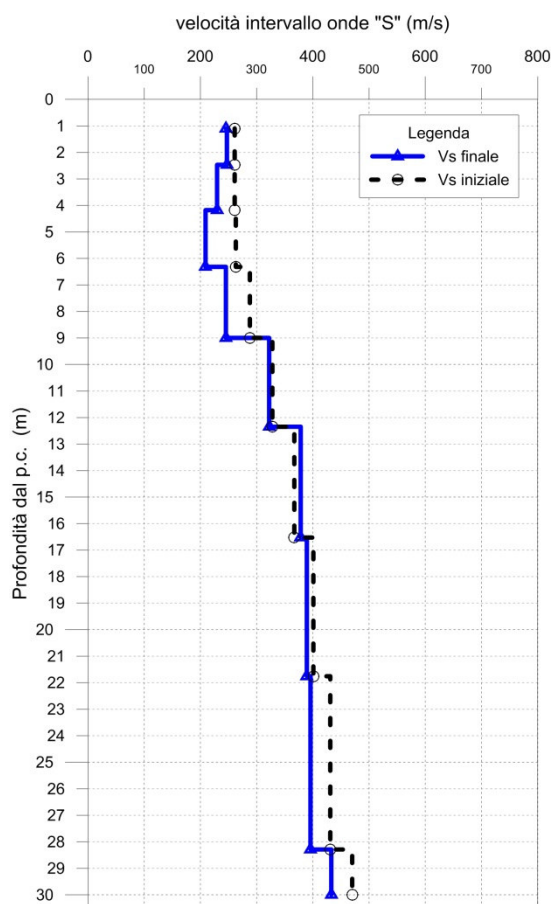


Fig. 3.5 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei". MASW M1. Profilo verticale delle onde di taglio (V_s)

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	1,1	1,1	261	914	0,4	1,6
2	2,5	1,4	261	914	0,4	1,6
3	4,2	1,7	261	914	0,4	1,7
4	6,3	2,1	263	921	0,4	1,7
5	9,0	2,7	288	1008	0,4	1,8
6	12,4	3,3	328	1148	0,4	1,8
7	16,5	4,2	367	1285	0,4	1,9
8	21,8	5,2	401	1404	0,4	1,9
9	28,3	6,5	431	1509	0,4	2,0
10	HalfSpace	N/A	470	1645	0,4	2,0

Fig. 3.6 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei". MASW M1. 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	1,1	245	858	1,1	0,0045
2	2,5	247	865	1,4	0,0055
3	4,2	230	804	1,7	0,0074
4	6,3	209	732	2,1	0,0102
5	9,0	245	858	2,7	0,0109
6	12,4	322	1128	3,4	0,0104
7	16,5	378	1324	4,2	0,0110
8	21,8	389	1363	5,2	0,0134
9	28,3	396	1385	6,5	0,0165
10	30,0	433	1515	1,7	0,0040

Fig. 3.7 - "Intervalliva di Macerata, tratto La Pieve - Via Mattei". MASW M1. Riepilogo dei parametri calcolati