

**INDAGINE DI SISMICA SUPERFICIALE COMBINATA ATTIVA
PER L'INDIVIDUAZIONE DELLA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO
AI SENSI DEL DM 17-01-2018**

STABILIMENTO CAFFARO - COMUNE DI BRESCIA (BS)



COMMITTENTE:

AECOM URS Italia S.p.A.
Via Watt, 27 Milano



Il geologo incaricato

Dott. Geol. Massimo Compagnoni

DATA EMISSIONE:

22 Febbraio 2019

INDICE

1	PREMESSA	2
2	DATI PREGRESSI	2
3	TIPOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE ADOTTATA	4
4	CENNI TEORICI	6
5	METODO DI ACQUISIZIONE	8
6	METODO DI ELABORAZIONE	9
7	RISULTATI	11
7.1	RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE P	11
7.2	RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE ZVF	15
7.3	RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE RVF	18
8	INTERPRETAZIONE	21
9	CONSIDERAZIONI FINALI	24
	BIBLIOGRAFIA	25
	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA.....	26

1 PREMESSA

Su incarico della AECOM URS Italia S.p.A. è stata eseguita una campagna di indagine geofisica di sismica superficiale attiva, finalizzata alla caratterizzazione sismica del sottosuolo del sito di ubicazione dello stabilimento Caffaro di Brescia, nell'ambito del progetto di bonifica e messa in sicurezza permanente del sito.

2 DATI PREGRESSI

I dati desunti dagli studi pregressi e disponibili per l'area di studio mostrano in generale un assetto sismo-stratigrafico caratterizzato da buona omogeneità verticale e laterale ben approssimabile ad un modello piano-parallelo, condizione fondamentale, nell'ambito degli studi di valutazione degli effetti di amplificazione sismica di tipo stratigrafico, per l'applicabilità sia della procedura semplificata basata sulle categorie di sottosuolo proposta dalla normativa nazionale sia della procedura di analisi sismica di 2° livello proposta dai criteri regionali.

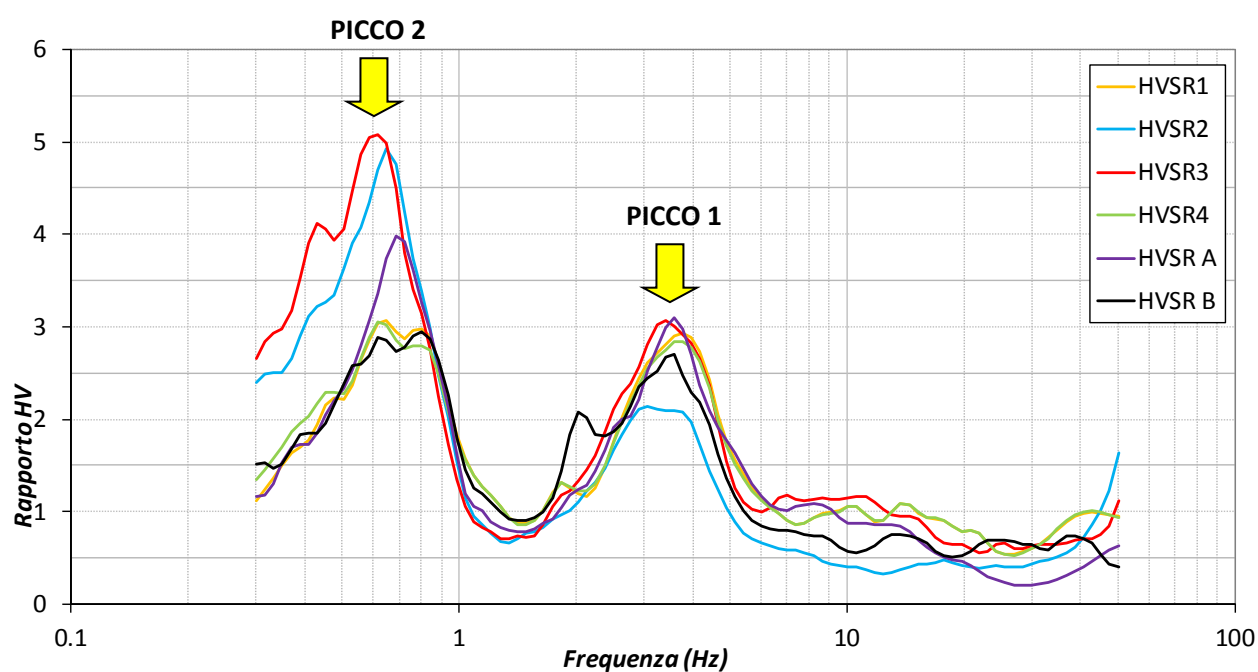
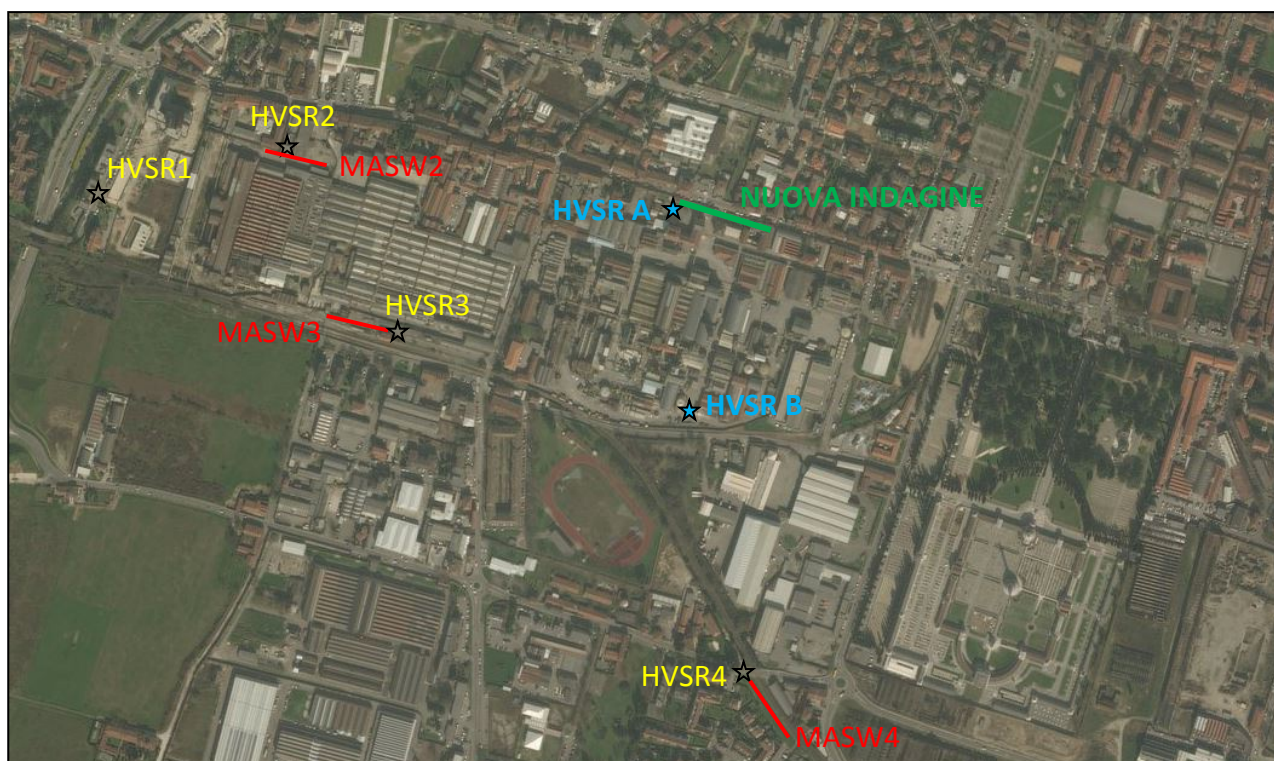
In particolare nell'ambito degli studi di pianificazione si evidenziano:

- lo studio di microzonazione sismica di livello 1, redatto ai sensi delle linee guida nazionali (I.C.M.S., 2008), che colloca l'area nell'ambito della microzona omogenea in prospettiva sismica n. 3, caratterizzata dalla presenza in superficie di depositi ghiaioso-sabbioso con matrice argilloso-limosa frequentemente abbondante; l'orizzonte conglomeratico GR assume spessori notevoli e poggia a sua volta sui depositi argillosi e argillo-ghiaiosi (Villafranchiano);
- l'analisi sismica di 1° e 2° livello della componente sismica dello studio geologico comunale, redatto ai sensi dei criteri regionali (DGR 2616/2011), che colloca l'area all'interno dello scenario di pericolosità sismica locale Z4a (zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi), per la quale sono previste in fase di progettazione urbanistica l'applicazione degli approfondimenti di 3° livello o in alternativa l'utilizzo dello spettro di norma caratteristico della categoria di sottosuolo superiore; infatti sulla base dei risultati delle indagini sismiche disponibili al momento della redazione dello studio geologico comunale il sito è identificabile come appartenente alla categoria di sottosuolo B, con il fattore di amplificazione calcolato FAC per periodi compresi tra 0.1-0.5 s superiore al valore di soglia comunale FAS.

Nella relazione geologica, sismica e geotecnica redatta dallo scrivente nel giugno 2018 a supporto del progetto di fattibilità tecnica ed economica per la bonifica e messa in sicurezza permanente dello stabilimento Caffaro di Brescia sono state eseguite due acquisizioni di sismica passiva a

stazione singola, a nord e a sud del comparto in oggetto (HVSr A e HVSr B), al fine di verificare l'estrapolabilità al sito dei dati geofisici disponibili nell'area di Via Milano reperiti tramite specifiche indagini eseguite dallo scrivente nel maggio 2017 a supporto del Progetto Oltre la Strada del Comune di Brescia. Per maggiori dettagli si rimanda agli studi sopra citati.

Di seguito si riporta l'ubicazione delle indagini sismiche pregresse rispetto alla nuova indagine eseguita (in verde) e i risultati dell'indagine di sismica passiva:



PICCHI DI RISONANZA EVIDENZIATI DALLE CURVE HV DISPONIBILI				
HVSr	PICCO 1		PICCO 2	
	f_0	A_0	f_0	A_0
1	3.65441 ± 0.432585	2.91978	0.69408 ± 0.108354	2.92208
2	3.26370 ± 0.451694	2.09911	0.63602 ± 0.081738	4.81415
3	3.53201 ± 0.396582	3.02856	0.59715 ± 0.077739	5.05283
4	3.63895 ± 0.412320	2.84632	0.66196 ± 0.115555	2.97372
PICCHI DI RISONANZA EVIDENZIATI DALLE CURVE HV ESEGUITE NELLO STABILIMENTO CAFFARO				
HVSr	PICCO 1		PICCO 2	
	f_0	A_0	f_0	A_0
A	3.54129 ± 0.193619	3.09308	0.70321 ± 0.077817	3.9563
B	3.40271 ± 0.328848	2.09911	0.72715 ± 0.098927	2.7927

L'interpretazione stratigrafica dei 2 picchi delle curve HV è coerente con il modello geologico dell'area, in quanto:

- il picco 1 a circa 3.3-3.6 Hz è generato dalla risonanza del tetto dell'unità conglomeratica, posta a profondità dell'ordine dei 30 m;
- il picco 2 a circa 0.6-0.7 Hz è generato dalla risonanza del tetto del substrato roccioso, posta a profondità superiori a 200 m.

Le condizioni sismo-stratigrafiche dei 6 siti di acquisizione passiva risultano pertanto tra loro omogenee per quanto riguarda le caratteristiche elastiche presenti oltre i 30-40 m di profondità; differenze in termini di rigidezza sono eventualmente presenti negli strati più superficiali, per le quali, in fase di studio di fattibilità tecnica ed economica, sono stati ritenuti preliminarmente estrapolabili all'interno dello Stabilimento Caffaro i risultati delle indagini pregresse disponibili.

3 TIPOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE ADOTTATA

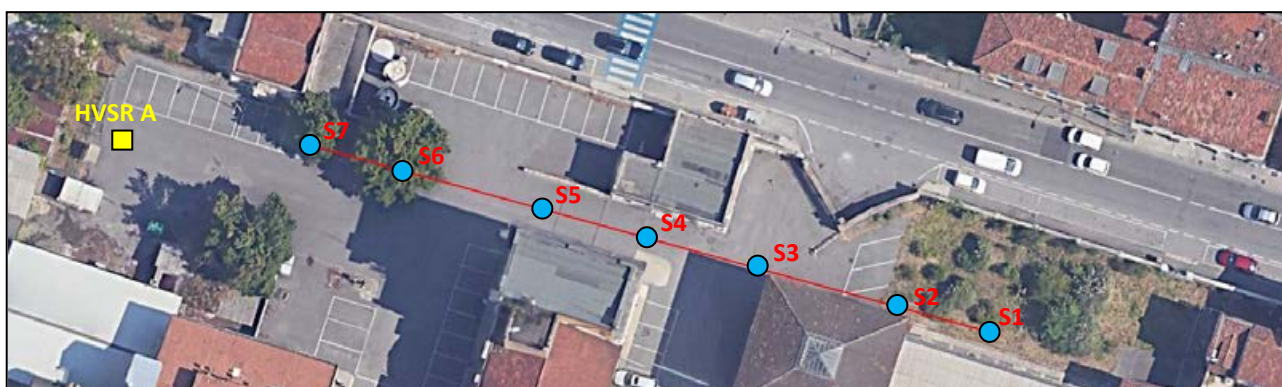
Al fine di identificare la sismo-stratigrafia dei primi 30 m di profondità all'interno dello Stabilimento Caffaro, a completamento delle conoscenze disponibili dagli studi pregressi, e di individuare il valore del parametro diagnostico (V_{s30}), utilizzato dalla normativa vigente per l'individuazione della categoria di sottosuolo, è stata eseguita una campagna di indagine sismica attraverso la combinazione di due tecniche superficiali attive: sismica a rifrazione in onde longitudinali P e indagine MASW in configurazione ZVP e RVP.

La campagna d'indagine è stata eseguita il giorno 18-02-2019 e ha permesso la ricostruzione della sezione 2D in termini di velocità delle onde longitudinali (V_p) nei primi 10-12 m di profondità e l'individuazione del profilo di rigidezza medio nei primi 30 m di profondità.

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su piastra posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e da un fucile sismico tipo ISOTTA;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria 4.5 Hz, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali prodotte da una specifica sorgente;
- un sistema di ricezione: costituito da 24 geofoni orizzontali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa con frequenza propria 8.0 Hz, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche trasversali prodotte da una specifica sorgente;
- un sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da sismografo a 24 canali della Geometrics, con range dinamico di sistema di 144 dB, intervallo di campionamento compreso tra 0.02 e 16 ms, fino a 16000 campioni per traccia; il sismografo è alimentato con batteria al Pb a 12 V ed è collegato al notebook PC per il salvataggio delle acquisizioni e la gestione dei parametri di configurazione spaziali e temporali; i geofoni sono collegati al sismografo tramite cavo sismico;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso (attraverso sensore di movimento applicato alla mazza) nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione;

Di seguito si riporta il sito in dettaglio e la configurazione dell'indagine:



4 CENNI TEORICI

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (*head wave*): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.

I contrasti di proprietà elastiche responsabili della generazione di onde birifratte possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali e/o idrogeologiche.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) (Park et al., 1999) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo medio di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo. 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 omogeneo ed isotropo la velocità di propagazione delle onde di *Rayleigh* è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda. In un mezzo verticalmente eterogeneo, ovvero stratificato, le onde di *Rayleigh* sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di *Rayleigh* dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde di *Rayleigh* 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, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

La propagazione delle onde di *Rayleigh* in un mezzo stratificato è un fenomeno multi-modale, ovvero in corrispondenza di una certa frequenza, per un determinato sito caratterizzato da una specifica stratigrafia, possono esistere diverse velocità di propagazione, a cui corrisponde un determinato modo di vibrazione del sito.

Il metodo di indagine MASW attivo consiste nella generazione artificiale di onde superficiali in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente parallelamente all'*array*) e nell'acquisizione della perturbazione generata lungo uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale apparente nel *range* di frequenze compreso tra 10-15Hz e 70-100Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30 m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente. Lungo lo stendimento di sensori così predisposto è possibile acquisire anche rumore ambientale.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

In analogia a quanto sopra citato relativo all'utilizzo di geofoni verticali e di sorgente verticale (configurazione ZVF) è possibile eseguire l'indagine MASW in configurazione RVF, ovvero utilizzando geofoni orizzontali orientati parallelamente allo stendimento e sorgente verticale: in quest'ultimo caso l'analisi è condotta in termini di componente radiale delle onde superficiali di Rayleigh, anziché della componente verticale con il vantaggio di disporre di due tipologie di curve di dispersione e vincolare in modo più robusto il successivo processo d'inversione.

Analogamente sarebbe possibile acquisire il campo d'onda attivo utilizzando una sorgente trasversale e i geofoni orizzontali orientati trasversalmente allo stendimento, conducendo le analisi in termini di onde di volume trasversali SH e onde superficiali di Love, ma la presenza della pavimentazione e dell'asfalto non garantisce buoni risultati, in particolare in termini di energizzazione, e pertanto non si è ritenuto necessario operare in tal senso.

I 24 sensori verticali e i 24 sensori orizzontali sono stati installati su apposite basette di metallo ed appoggiate alla pavimentazione rigide presente nel sito (vedi documentazione fotografica).

5 METODO DI ACQUISIZIONE

Nell'ambito dell'indagine lineare attiva è di fondamentale importanza eseguire più energizzazioni a distanze diverse dai sensori e in corrispondenza di ciascun estremità dell'array sismico, in modo da disporre di una sufficiente ridondanza di informazioni che ci permetta di gestire al meglio eventuali disomogeneità presenti nel sottosuolo.

La tipologia d'indagine necessita di una certa attenzione nella scelta dei parametri configurazionali di acquisizione, sia in termini temporali sia in termini spaziali: il campionamento temporale deve essere tale da permettere l'acquisizione completa della perturbazione in tutti i sensori disponibili, la frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio di quella massima che si intende registrare, la lunghezza dello stendimento non deve essere inferiore alla metà della massima lunghezza d'onda che si intende acquisire e la distanza intergeofonica deve essere la metà della minima lunghezza d'onda di interesse.

Sulla base di queste valutazioni e compatibilmente con la logistica del sito è stato allestito uno stendimento sismico lineare, lungo il quale sono stati disposti e collegati in serie i 24 geofoni verticali e orizzontali con distanza intergeofonica di 2.5 m; sono stati eseguiti n. 7 punti di energizzazione, organizzati simmetricamente con 3 shots interni ugualmente spazati e 2 shots esterni per ciascun estremo dello stendimento; è stato utilizzato un sistema di riferimento relativo, la cui origine è posta in corrispondenza dello shot S1 esterno al 1° geofono, come mostrato nella figura d'inquadramento del capitolo 3.

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) dell'acquisizione lineare:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA LINEARE	
Dislivello altimetrico tra gli <i>shots</i> esterni	0 m
Lunghezza stendimento compresi <i>shots</i> esterni	77.5 m
Lunghezza stendimento ricevitori	57.5 m
Numero Geofoni	24
Distanza intergeofonica	2.5 m
Numero punti di energizzazione (<i>shots</i>)	7
1° <i>Shot</i> esterno	2.5 m
2° <i>Shot</i> esterno	10 m
Durata acquisizione	1 s
Pre-triggering delay	0.05 ms
Intervallo di campionamento	0.25 ms
Numero di campioni per traccia	4000
Massima frequenza campionabile	2 kHz

6 METODO DI ELABORAZIONE

L'analisi dell'acquisizione lineare attiva ha permesso di individuare il tempo di primo arrivo in corrispondenza di ciascun ricevitore longitudinale per ciascun punto di energizzazione, attraverso la procedura di *picking* manuale; tali valori sono stati riportati in un grafico distanza-tempo, opportunamente corretti in funzione della topografia, per ottenere l'andamento delle dromocrone, dal quale è possibile ottenere l'andamento delle velocità delle onde analizzate con la profondità (longitudinali V_p); la profondità totale investigata è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

La ricostruzione del modello sismostratigrafico può avvenire attraverso l'utilizzo di molteplici metodi di interpretazione; tra i metodi disponibili in letteratura si è scelto di utilizzare:

- il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D, attraverso la combinazione dei tempi di percorso in direzione "avanti" (*forward shot*) e in direzione "indietro" (*reverse shot*); la ricostruzione dei rifrattori avviene nei punti in cui la somma dei tempi di percorso verso il basso è uguale ai tempi di percorso reciproco; la velocità del rifrattore è determinata dalla media delle pendenze dei fronti d'onda *forward* e *reverse*; la condizione preliminare per l'applicazione del metodo è l'esistenza di un completo *traveltime* nelle due direzioni dello stendimento; il metodo richiede la costruzione preliminare di una griglia di calcolo equispaziata, che per tutti gli stendimenti eseguiti è stata fissata a passo 1 m;
- il metodo di tomografia sismica, il quale, partendo dal modello iniziale 1D di velocità desunto con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D e dai dati di *traveltime* ottenuti dal *picking* manuale, modella il percorso bidimensionale di un fascio di raggi curvilinei per ogni arrivo (Hermann, 1980; Worthington, 1984; Nolet, 1987), mediante l'algoritmo tomografico basato sull'adattamento iterativo SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*).

L'interpretazione è stata eseguita mediante il *software Reflexw versione 7.5* della Sandmeier software (2014).

Dall'osservazione del modello interpretativo ottenuto in termini di onde di volume longitudinali è stato ricostruito il modello sismostratigrafico del sito fino alla massima profondità di indagine, variabile in funzione della lunghezza dello stendimento sismico e dell'ordine dei 10-12 m.

I dati acquisiti in configurazione MASW ZVF e RVF sono stati eseguiti con diversa distanza della sorgente dal geofono esterno ai due estremi dello stendimento sismico, al fine di verificare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) e di valutare la stabilità della

curva di dispersione sperimentale apparente delle Onde di Rayleigh, operazione fondamentale prima di elaborare un modello di rigidezza 1D rappresentativo della risposta del sito.

I dati di campagna acquisiti sono stati trasformati nel dominio f-k (frequenza – numero d'onda): i massimi di energia individuati sono associabili rispettivamente alle onde di Rayleigh; per ogni frequenza il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k, da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh.

Per ciascuna acquisizione in configurazione ZVF e RVF è stata determinata la curva di dispersione sperimentale e da queste sono stati riconosciuti gli eventi coerenti in ampi intervalli di frequenza, in modo da individuare gli eventi associabili ai diversi modi di propagazione. Dall'osservazione delle diverse curve di dispersione sperimentale è stata individuata l'acquisizione che fornisce una curva di dispersione sperimentale apparente meglio definita per quanto riguarda il modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e gli eventuali modi superiori; le acquisizioni così selezionate sono state sottoposte a filtraggio, tramite il quale si è cercato di rimuovere l'influenza delle onde di volume, al fine di individuare le curve di dispersione sperimentali rappresentative del sito.

Sulla base del modello geologico di riferimento è stato stimato un modello 1D preliminare in termini di V_p e V_s e, tramite procedura diretta, sono state calcolate le relative curve di dispersione numeriche dell'onda di Rayleigh, utilizzando il *software winMASW5.2* (2013) della EliaSoft; la procedura adottata prevede la modifica controllata, sulla base del modello geologico del sito, dei valori di densità di massa ρ , spessore h , velocità delle onde di taglio V_s e del coefficiente di Poisson ν di ciascun strato che costituisce il modello preliminare del sottosuolo, nel rispetto del modello 1D in onde P determinato dalla sismica a rifrazione.

L'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio rappresentativo del sito avviene pertanto integrando tra loro i risultati ottenuti dalla modellazione diretta e dall'inversione automatica.

7 RISULTATI

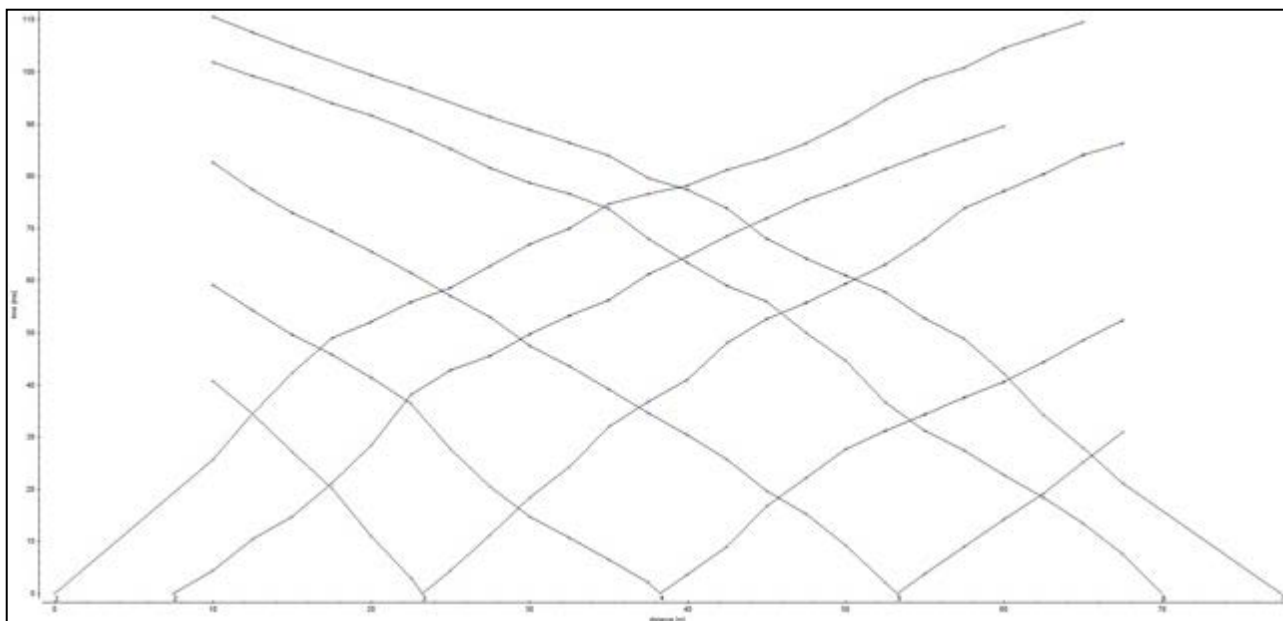
Di seguito vengono riportati le elaborazioni e i risultati ottenuti.

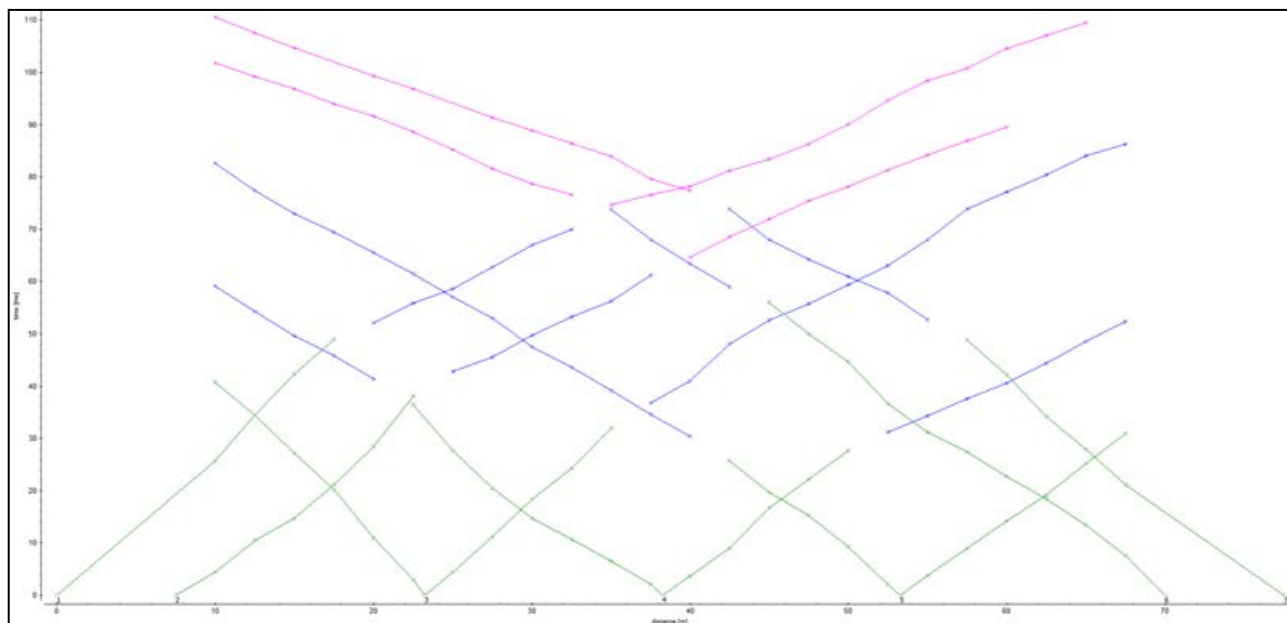
Per le elaborazioni in termini di indagine di sismica a rifrazione in fase P sono riportati i tempi di primo arrivo e le relative dromocrone, le assegnazioni dei tratti di dromocrona ai vari strati del modello interpretativo, i risultati delle interpretazioni condotte con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D, i risultati ottenuti dall'applicazione del metodo tomografico e il relativo confronto tra dromocrone sintetiche e dromocrone sperimentali.

Per le elaborazioni in termini di indagine MASW in configurazione ZVF e RVF sono riportati gli spettri $f-V_f$ (frequenza-velocità di fase) di ciascuna acquisizione coniugata, l'elaborazione tramite rimozione dal sismogramma delle onde di volume e dei disturbi per le acquisizioni selezionate, i relativi spettri $f-k$ (frequenza-numero d'onda) e gli spettri $f-V_f$ (frequenza-velocità di fase), le curve di dispersione apparente sperimentali scelte come caratteristiche del sito (picking) e le curve di dispersione numeriche che meglio approssimano quelle sperimentali con il relativo profilo 1D di rigidità con la profondità.

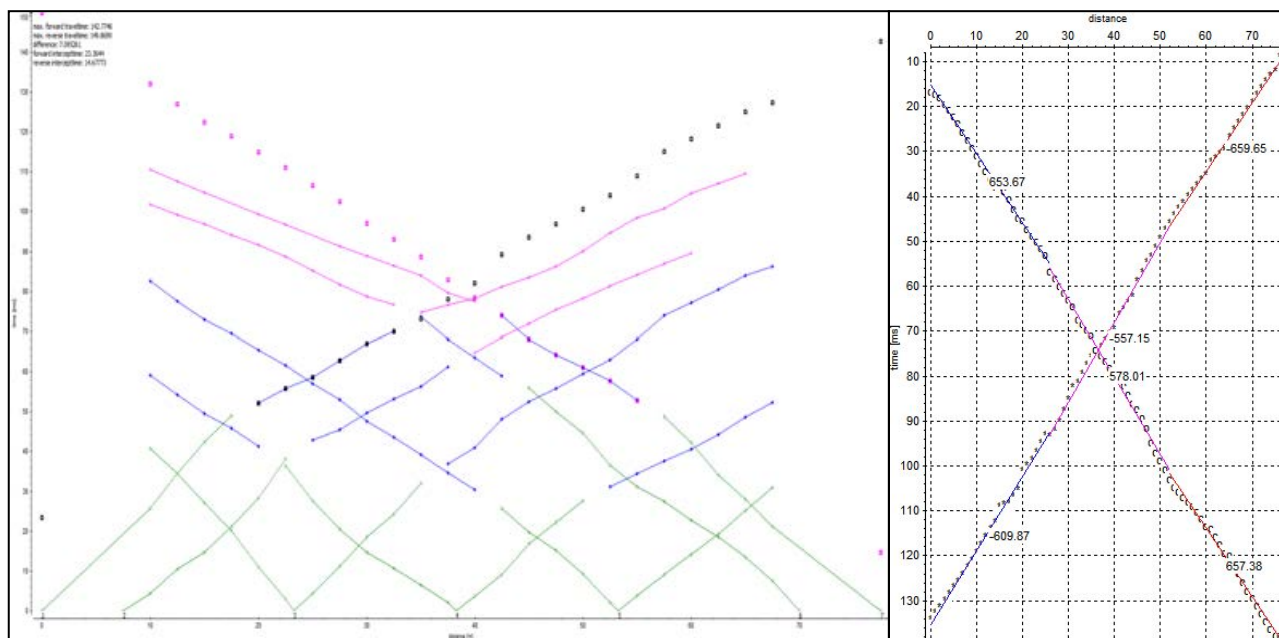
7.1 RISULTATI INDAGINE DI SISMICA A RIFRAZIONE IN FASE P

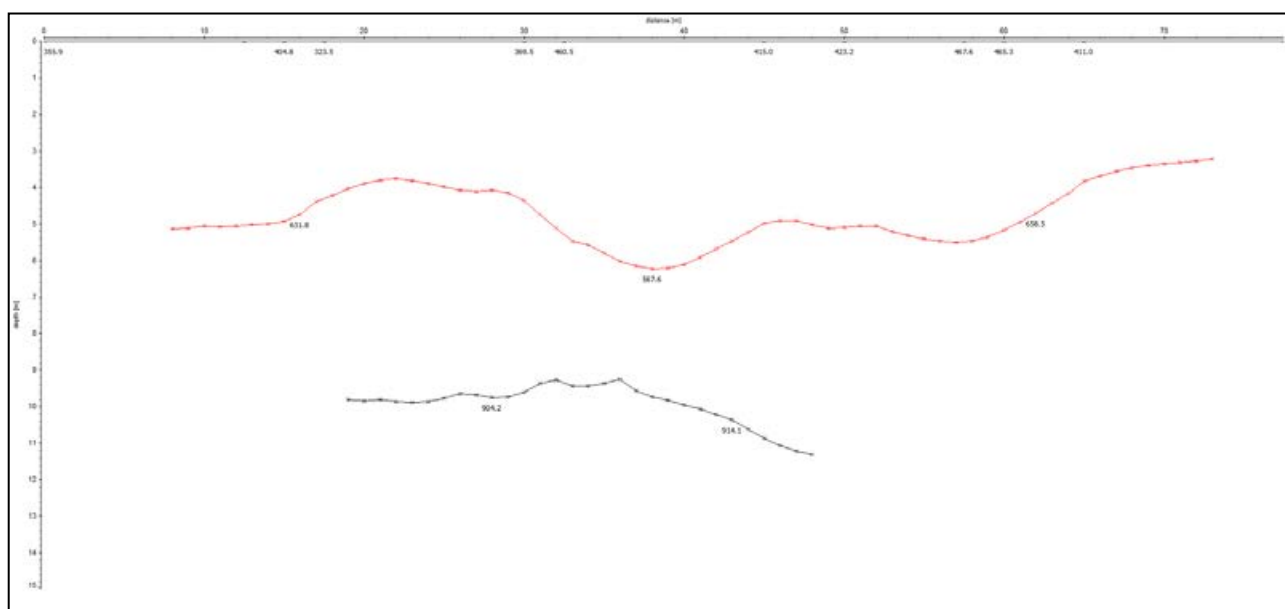
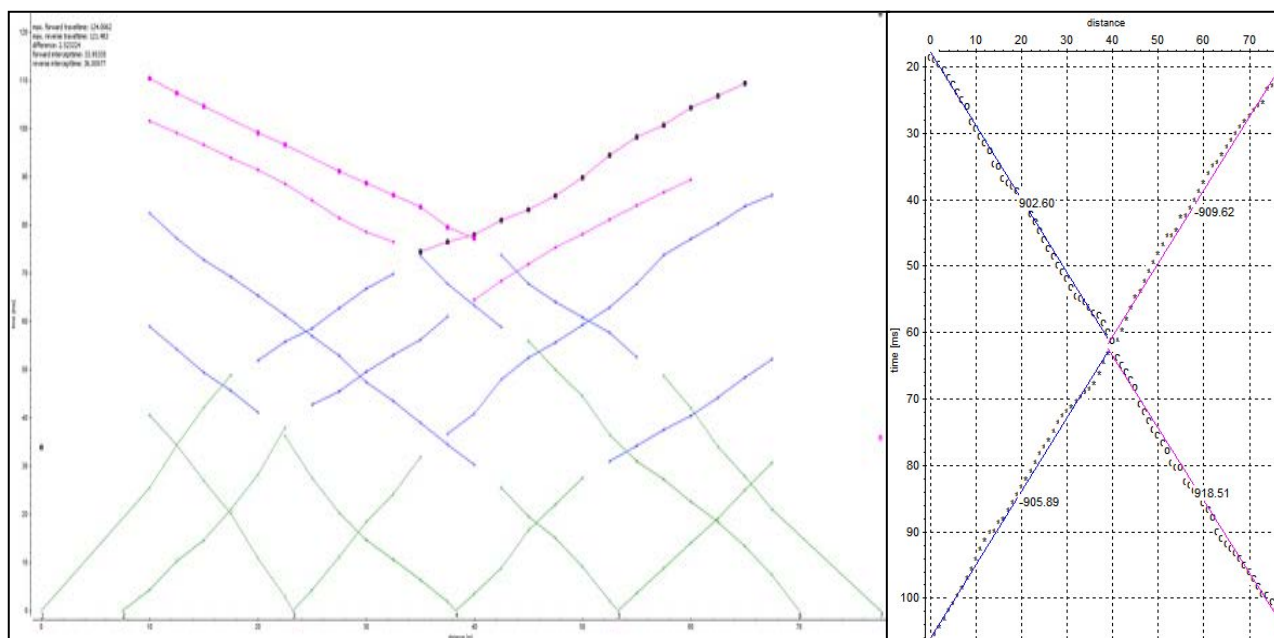
Di seguito sono riportate le dromocrone e le relative assegnazioni, in base ad un modello interpretativo a 3 strati:



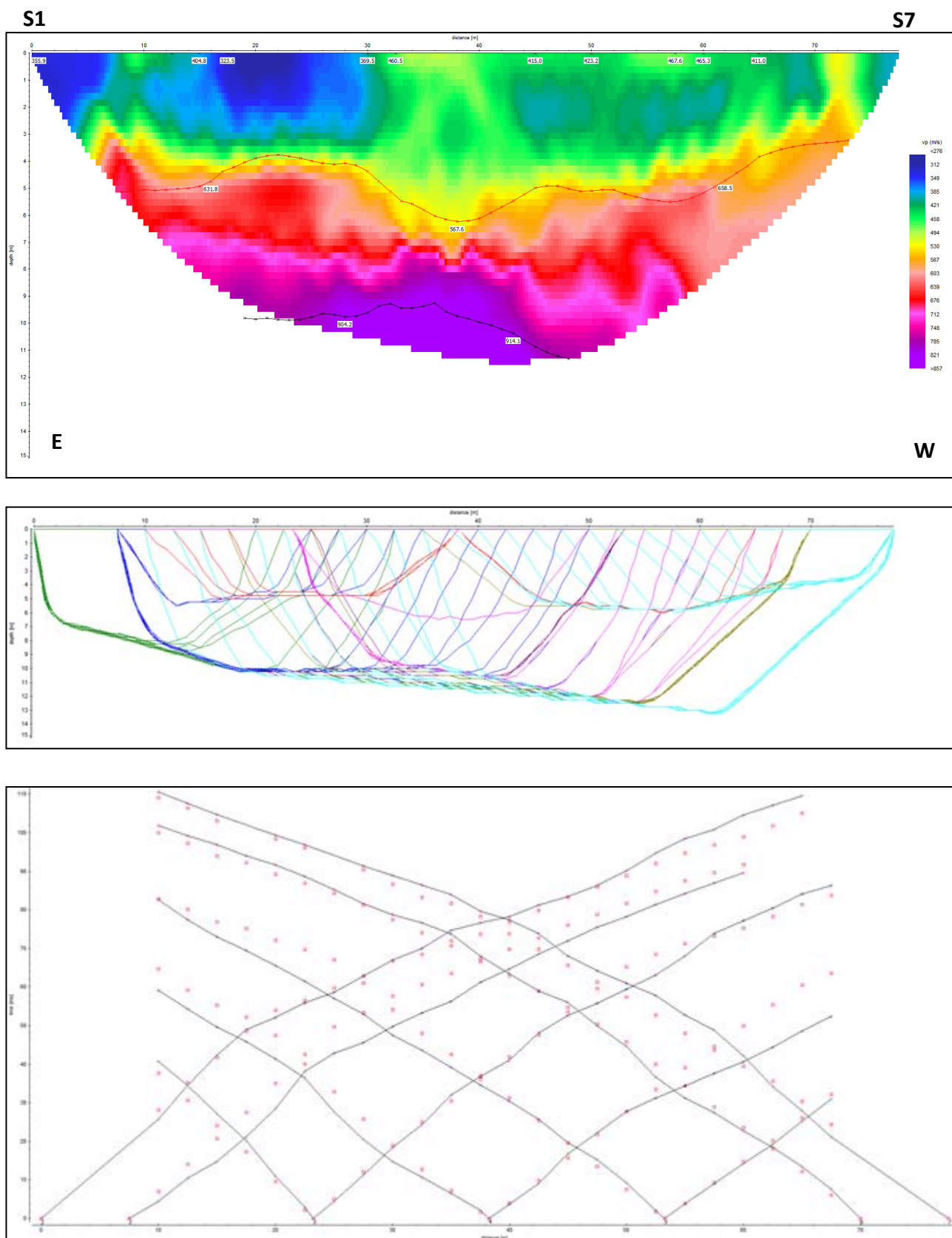


Di seguito si riportano le elaborazioni condotte con il metodo dell'inversione del fronte d'onda 2D:





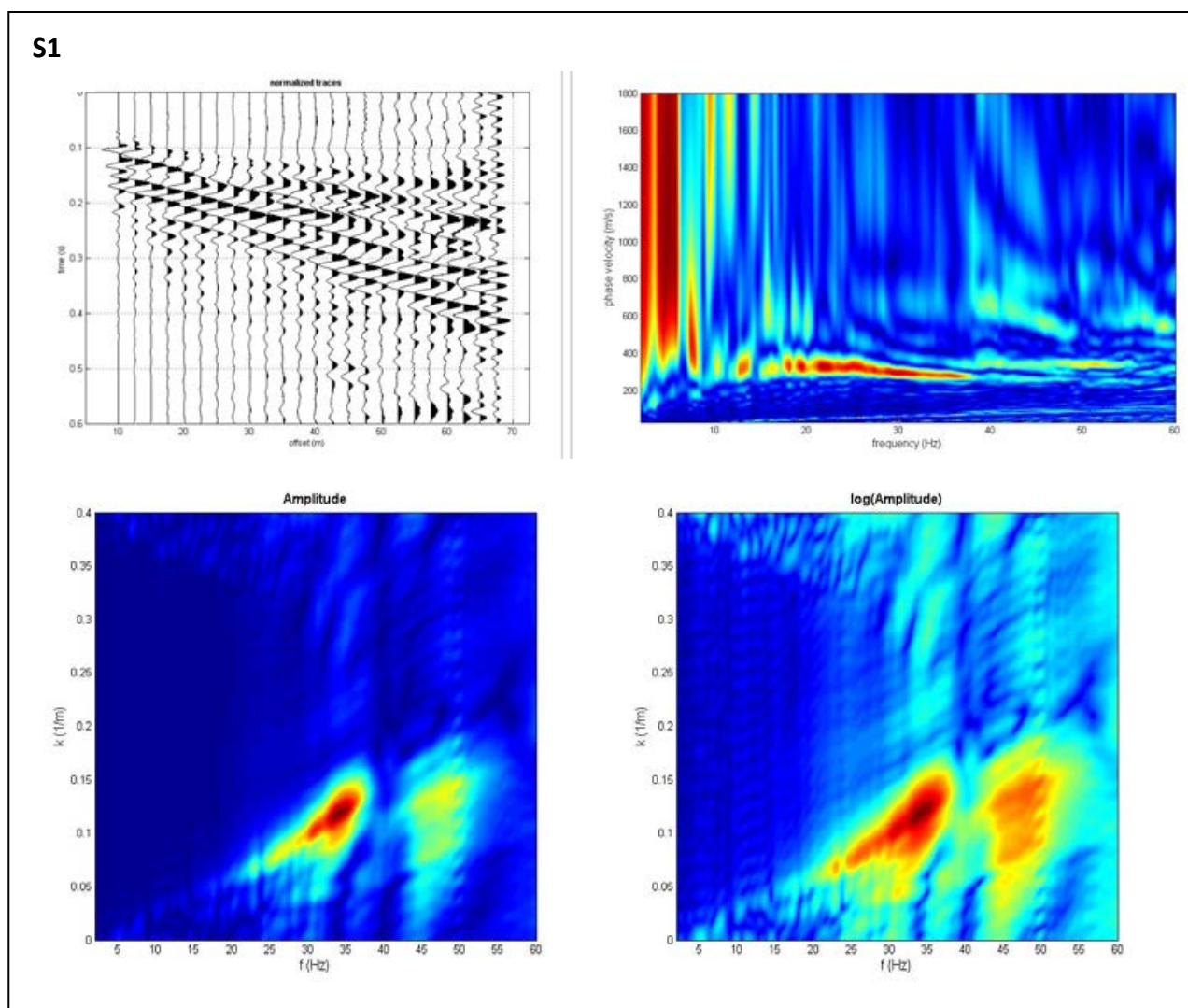
Di seguito si riportano le elaborazioni con il metodo tomografico, gli andamenti dei raggi e i punti delle dromocrone sintetiche confrontati con le dromocrone sperimentali:

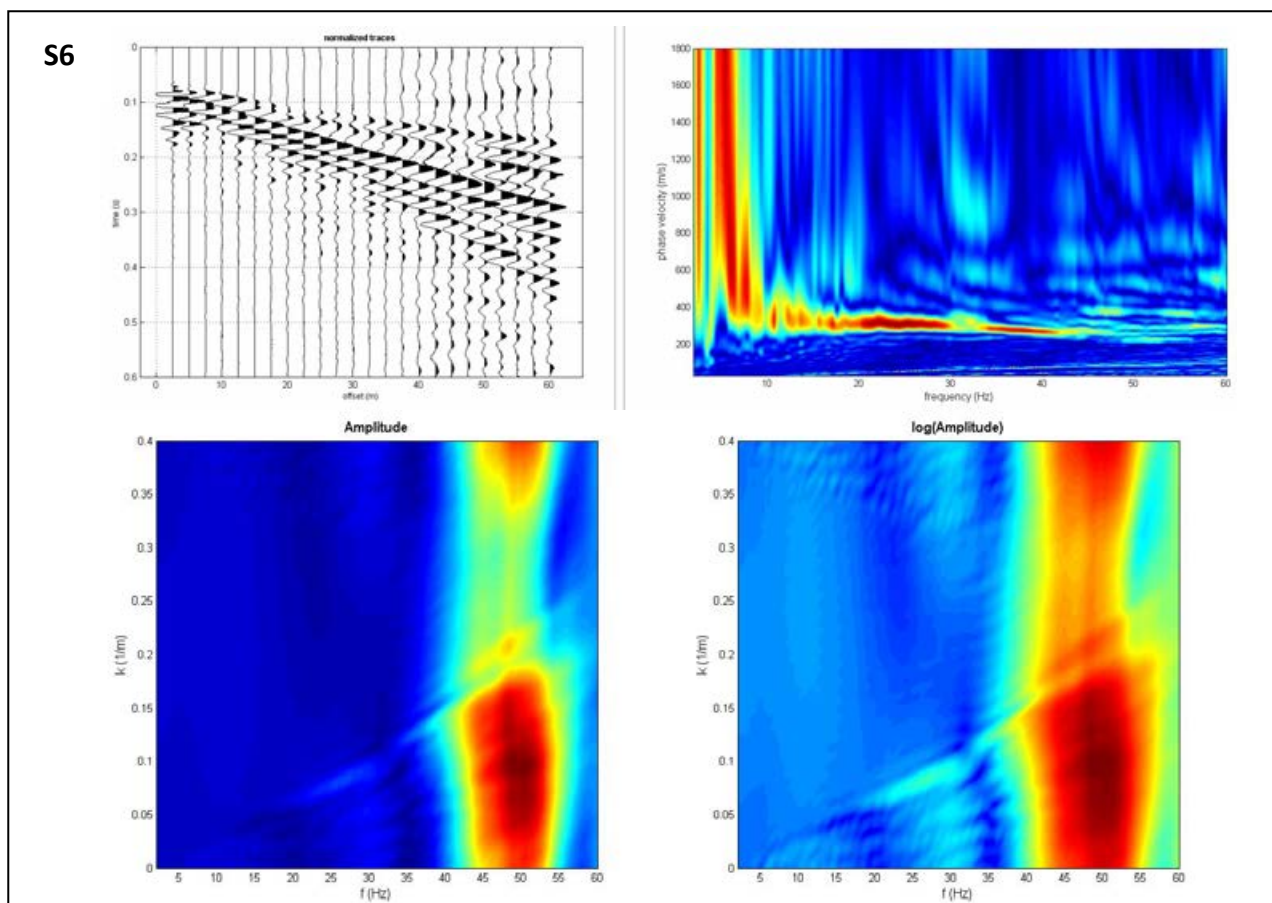
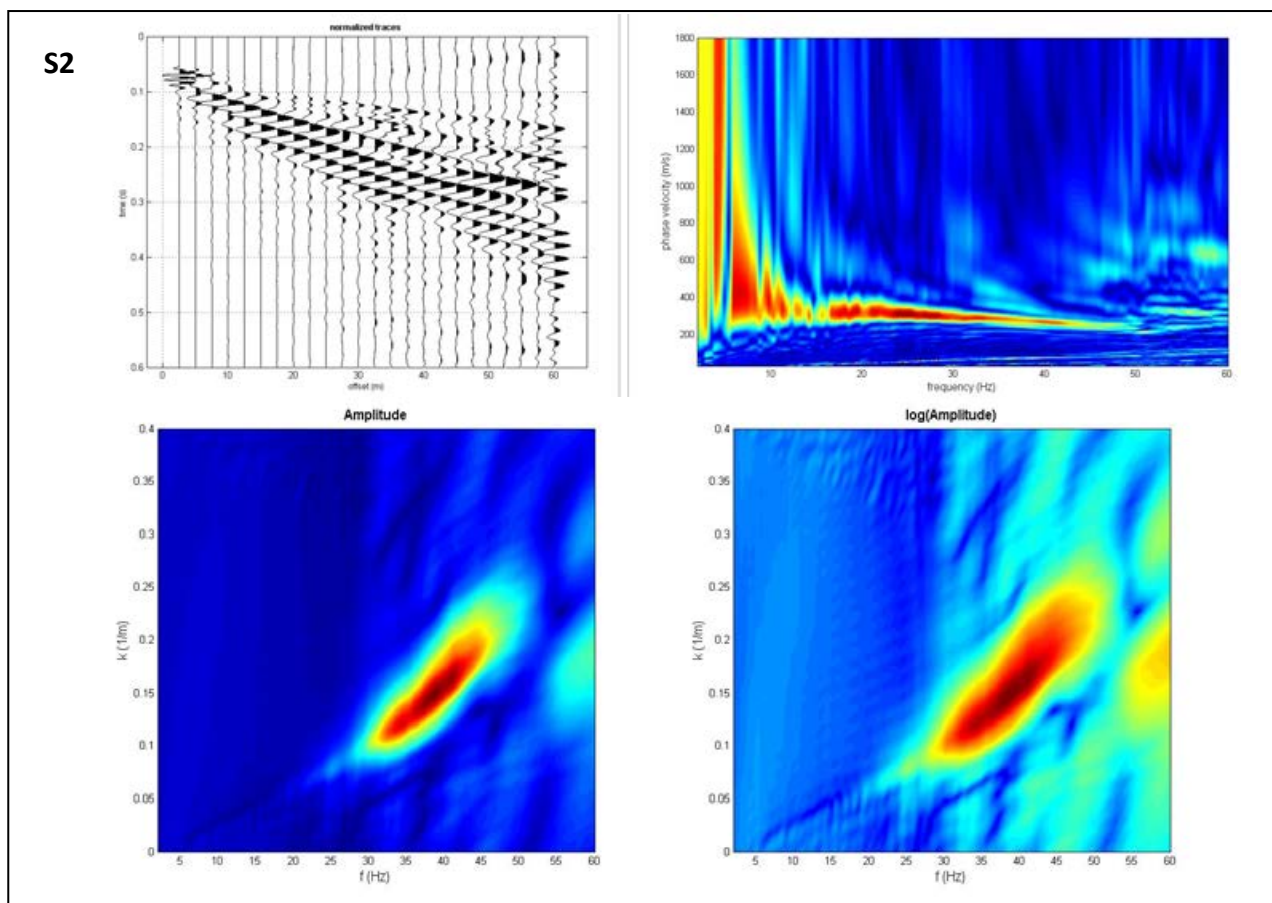


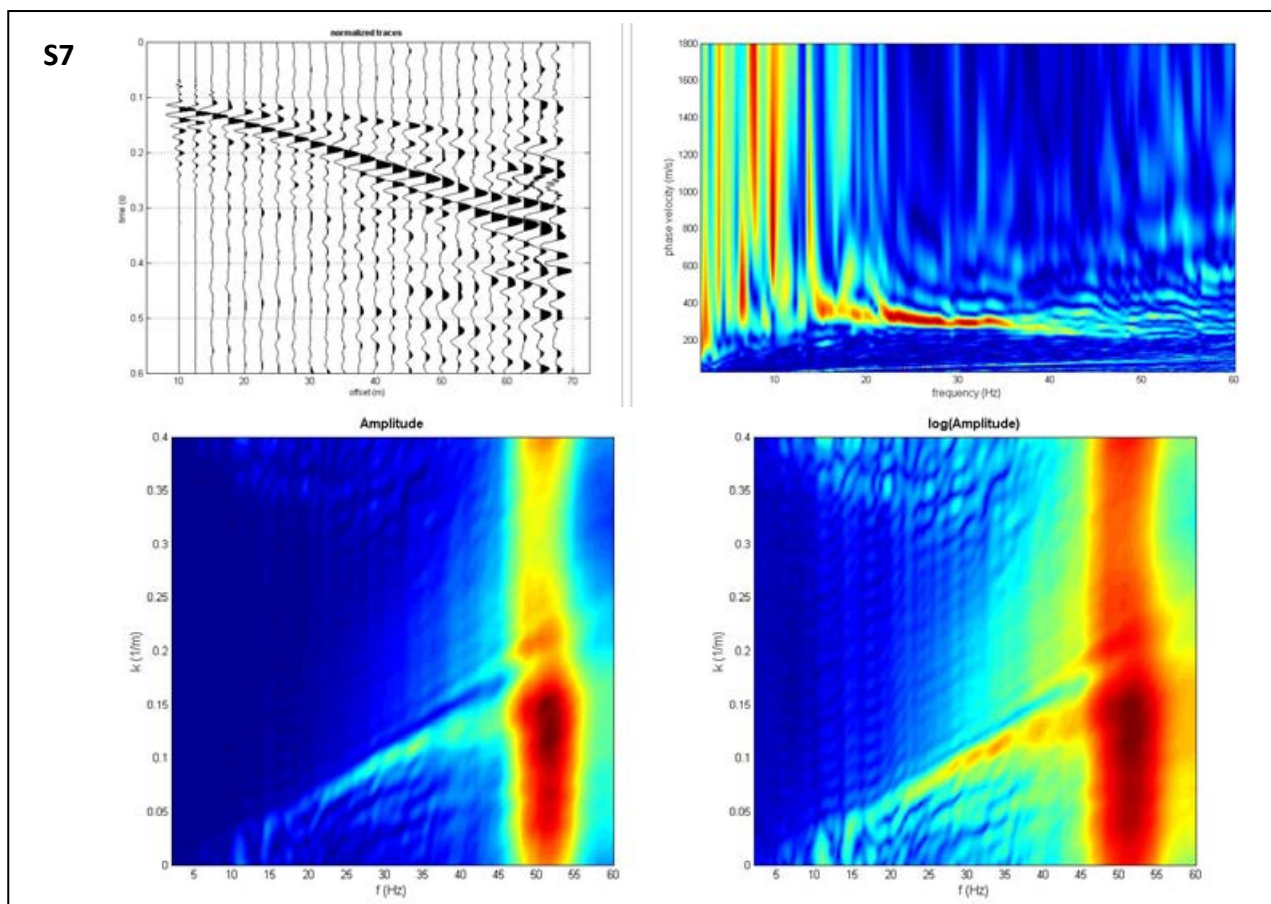
L'indagine di sismica a rifrazione in fase P ha permesso di investigare una profondità complessiva pari a 10-12 m e mostra un primo sismo-strato di spessore variabile da 2 a 4 m molto eterogeneo, con valori di V_p minimi dell'ordine dei 300-350 m/s in corrispondenza dell'estremo est, ove sono presenti un tombino per la raccolta delle acque pluviali ed evidenze di cedimenti della pavimentazione; valori maggiori dell'ordine dei 400-500 m/s si riscontrano in corrispondenza dell'estremo ovest; il secondo sismo-strato presenta una maggiore omogeneità con spessori dell'ordine dei 4-6 m e valori di V_p dell'ordine dei 600-800 m/s; il terzo sismo-strato si sviluppa a profondità superiori a 10 m e presenta valori di V_p dell'ordine dei 900-1000 m/s.

7.2 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE ZVF

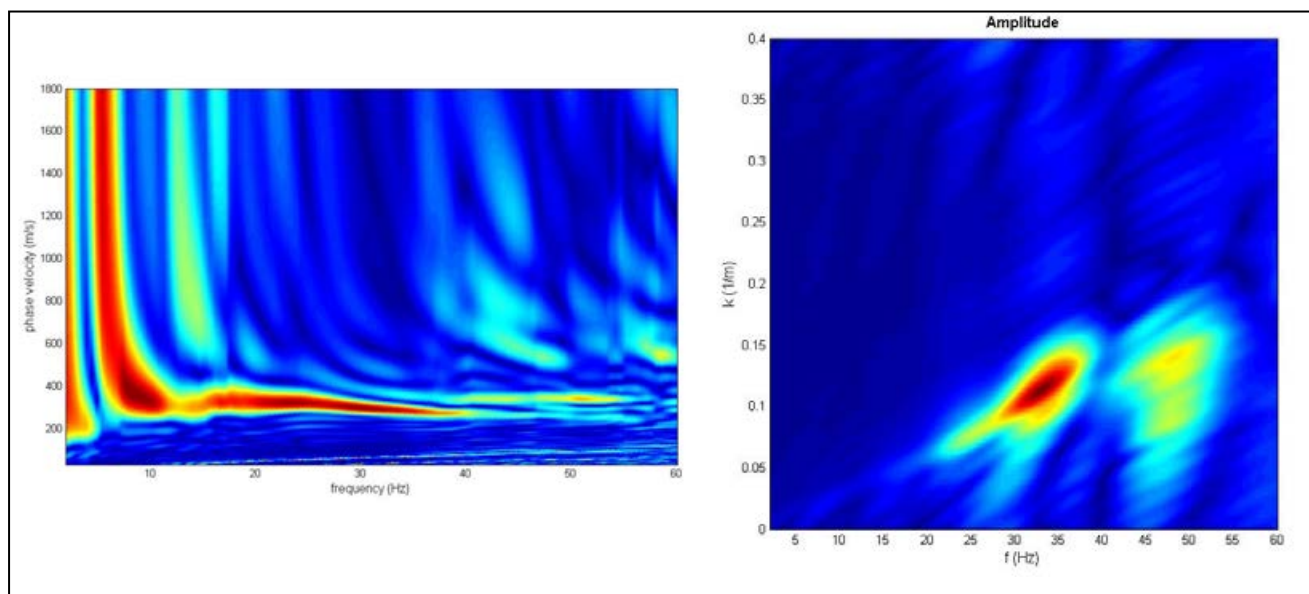
Di seguito sono riportati gli spettri f- V_f (frequenza-velocità di fase) e f_k di ciascuna acquisizione coniugata (sorgente ad impatto verticale e sensori verticali):



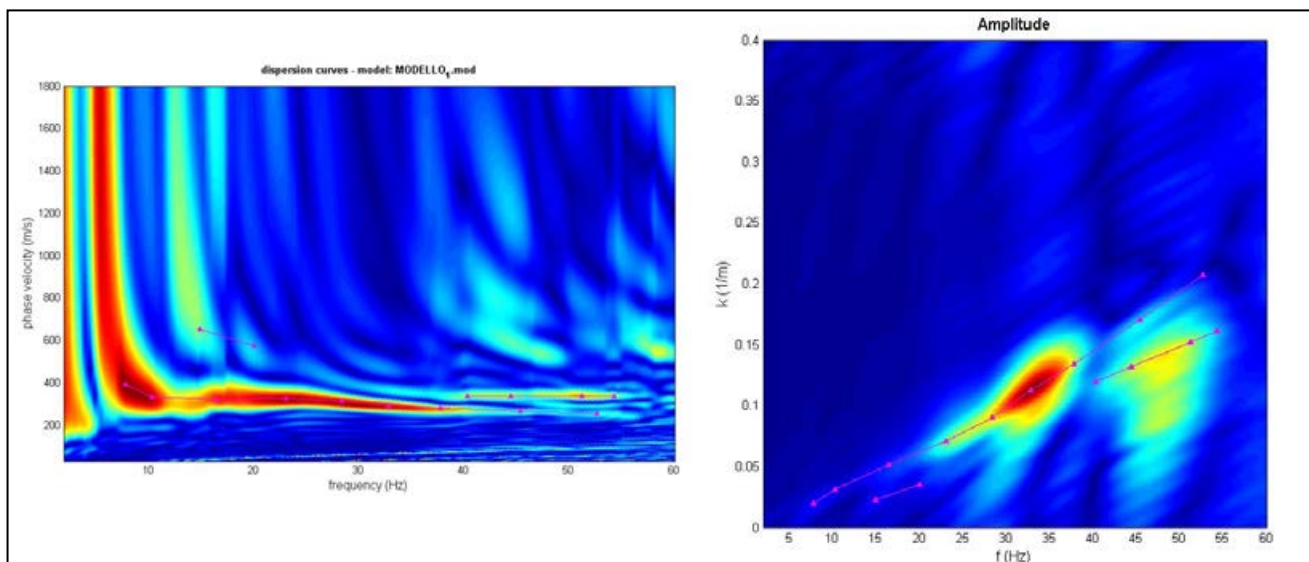




Considerando l'acquisizione S1 come migliore in termini di contributo energetico del modo fondamentale dell'Onda di Rayleigh e definizione degli eventuali modi superiori è stata eseguita un'operazione di filtraggio nel dominio del tempo, al fine di eliminare il contributo delle onde di volume e degli eventuali disturbi; di seguito si riportano gli spettri f - V_f e f - k dell'acquisizione S1 dopo il filtraggio:

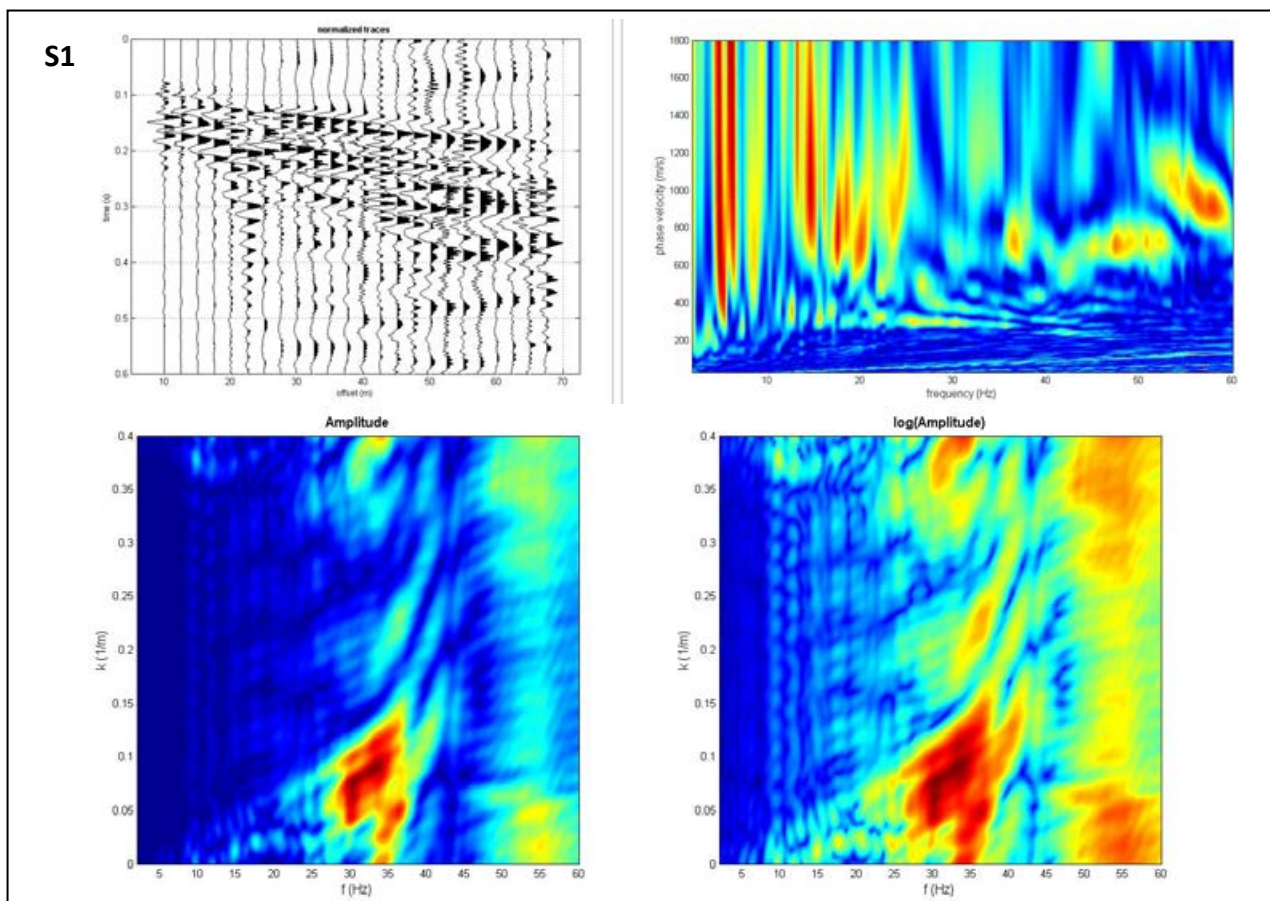


L'individuazione della curva di dispersione sperimentale ZVP rappresentativa del sito è avvenuta tramite picking manuale:

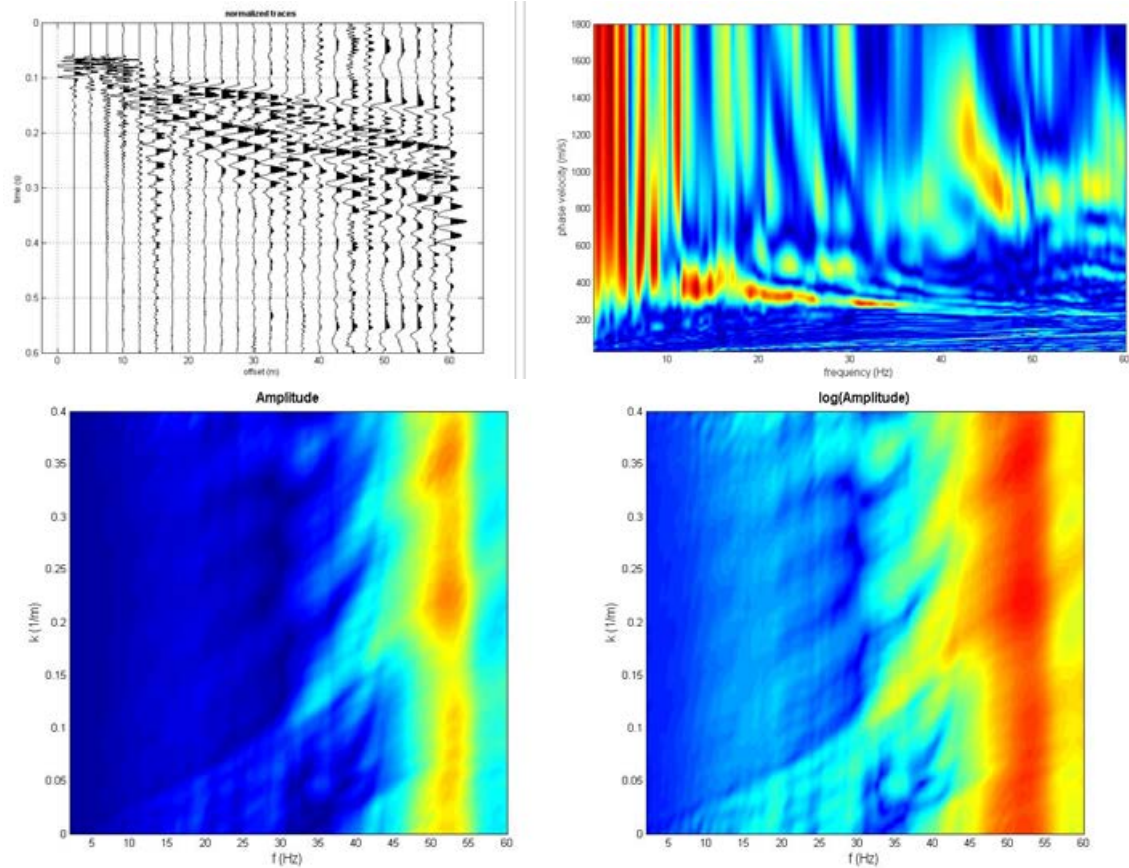


7.3 RISULTATI INDAGINE MASW IN CONFIGURAZIONE RVF

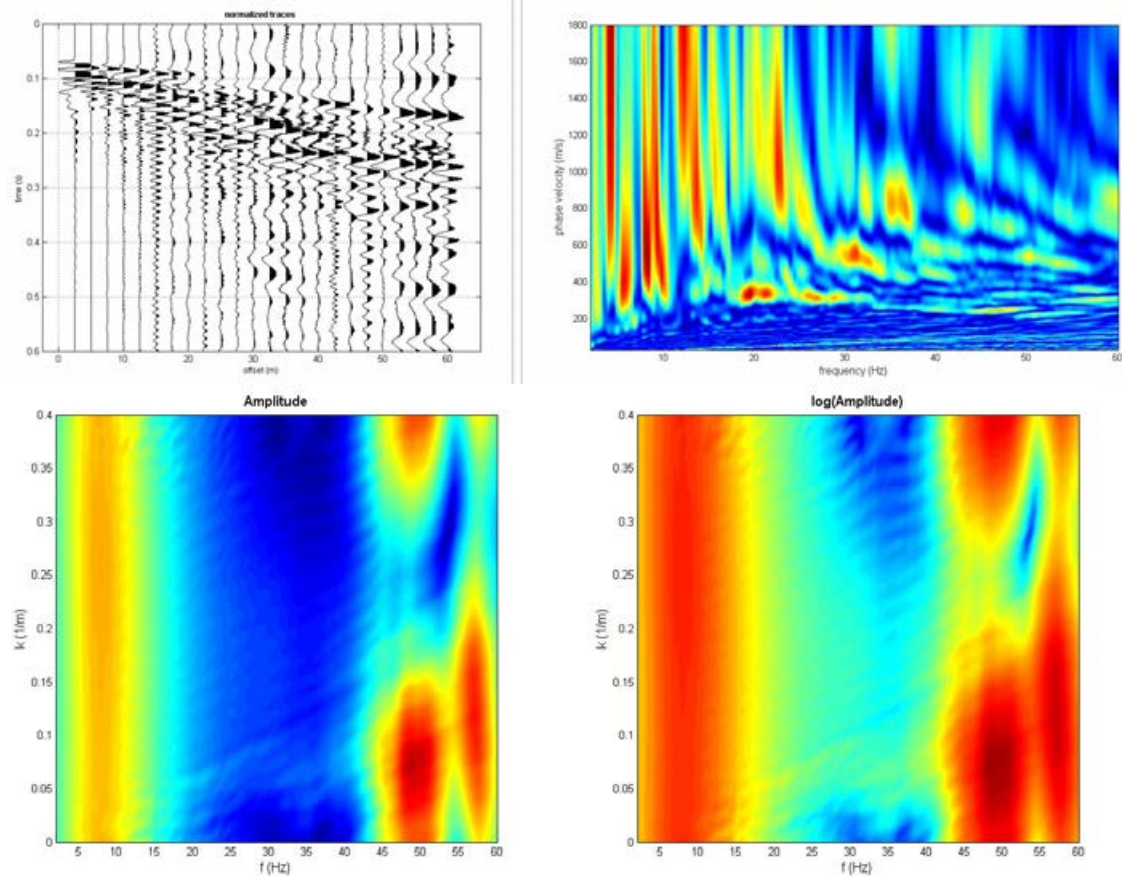
Di seguito sono riportati gli spettri f - V_f (frequenza-velocità di fase) e fk di ciascuna acquisizione coniugata (sorgente ad impatto verticale e sensori trasversali ad asse radiale allo stendimento), utili per la verifica della curva di dispersione individuata in precedenza:

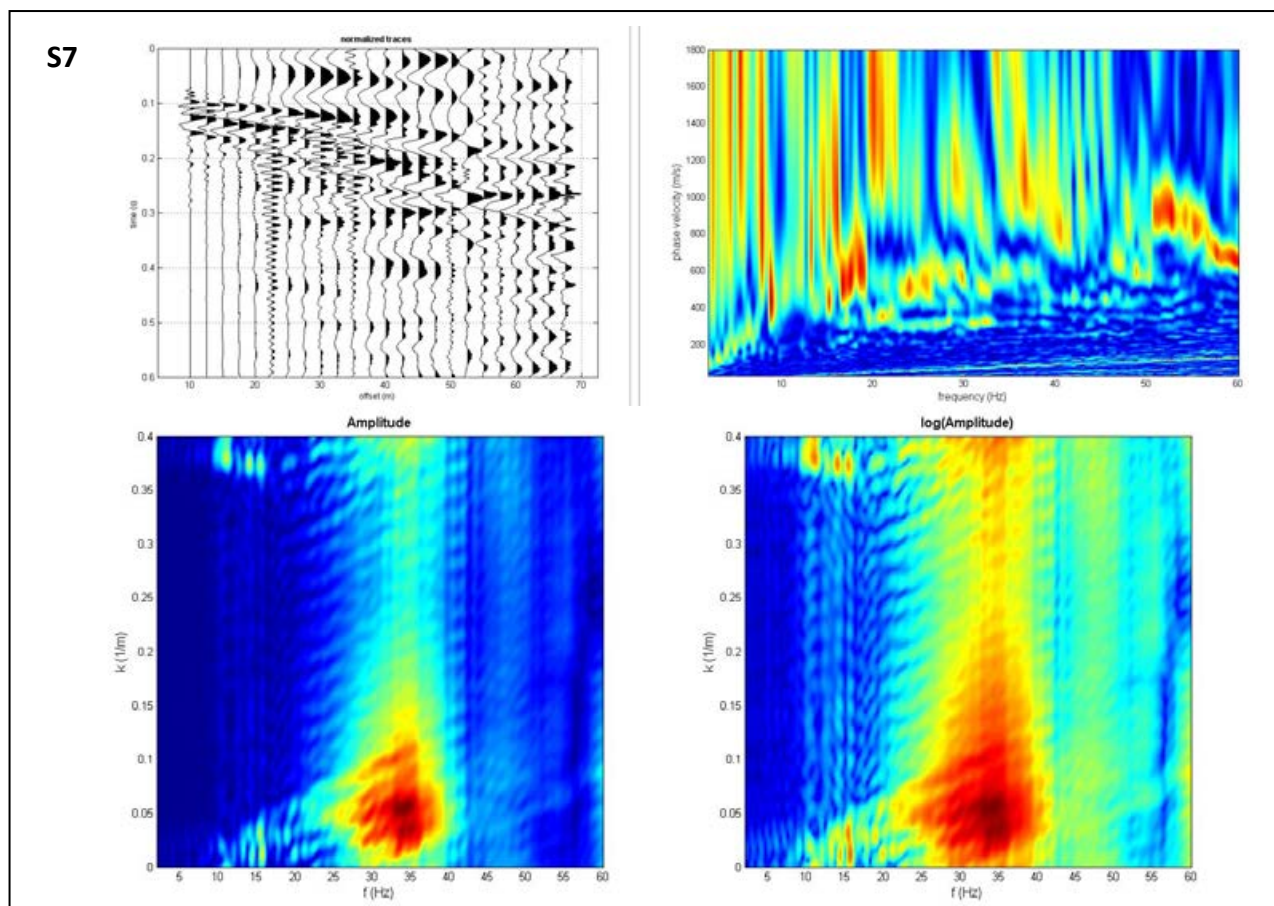


S2

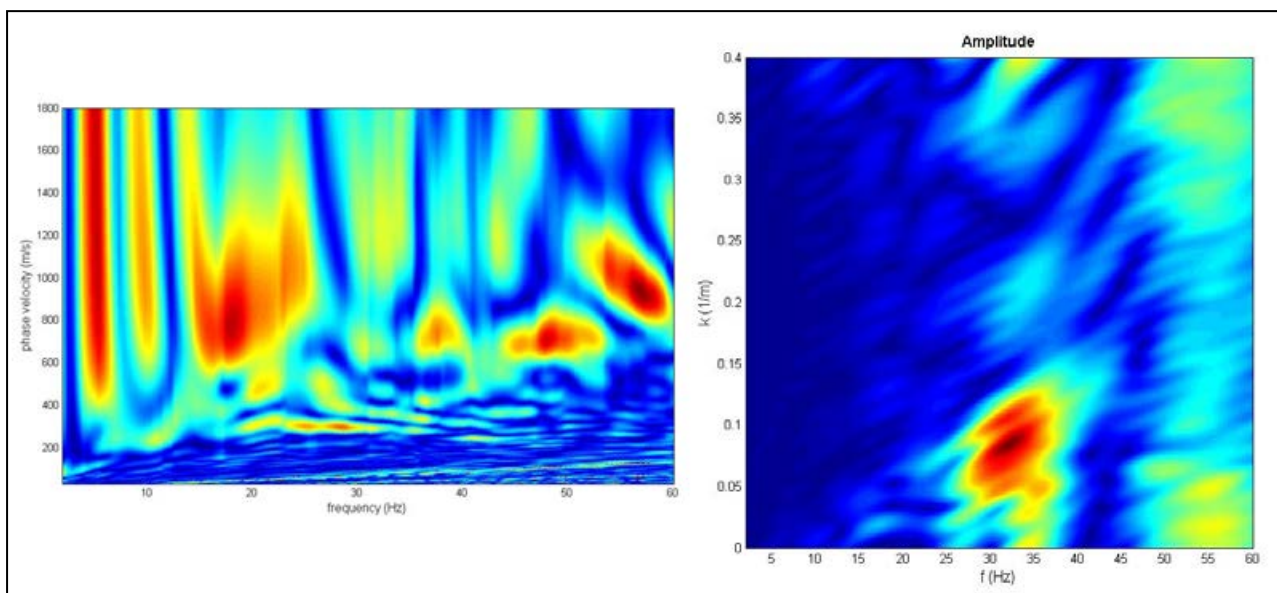


S6





Le acquisizioni con geofoni orizzontali mostrano un forte disturbo legato alla presenza della pavimentazione, in particolare all'estremo W molto evidente in termini di spettro fk ; l'acquisizione S1 si dimostra comunque l'acquisizione di miglior definizione, a conferma di quanto evidenziato in conformazione ZVF; di seguito si riportano gli spettri $f-V_f$ e fk dell'acquisizione S1 dopo le operazioni di filtraggio:

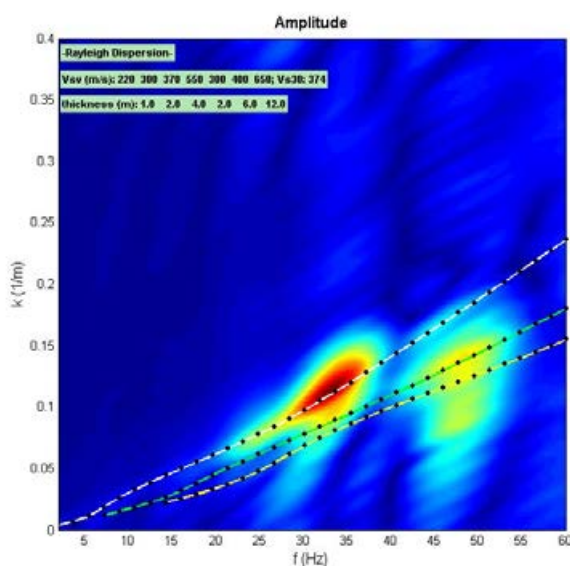
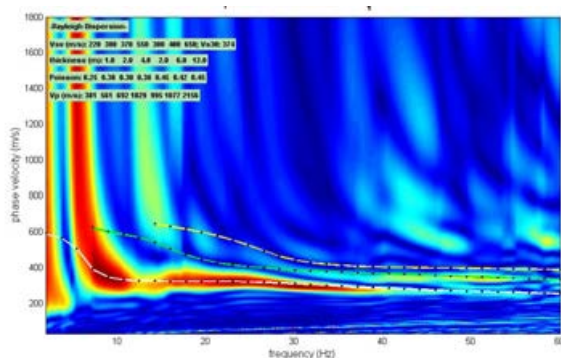


8 Interpretazione

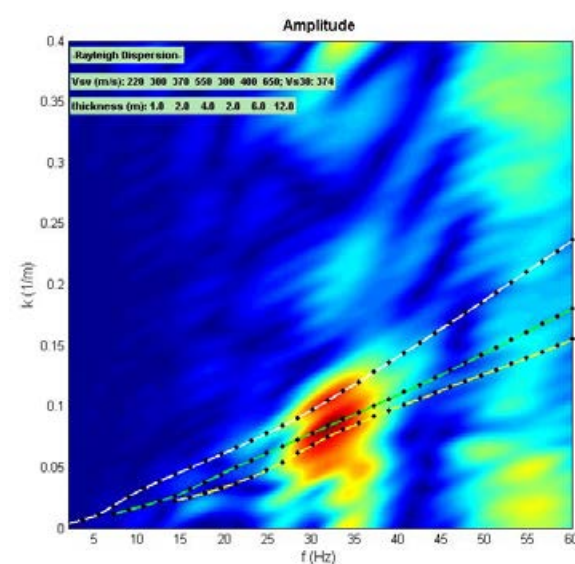
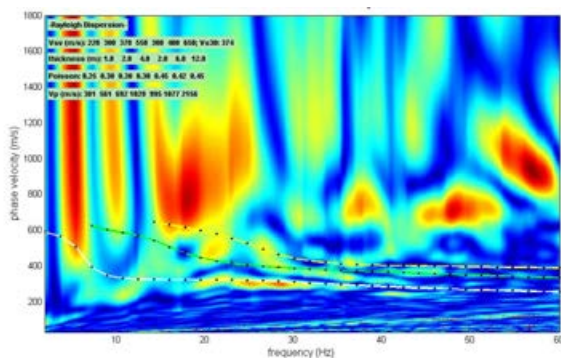
Sulla base dei risultati di sismica a rifrazione in onde P e del modello geologico dell'area è stato prefissato un modello preliminare di sottosuolo, verificandone la validità tramite procedura diretta, calcolando le curve di dispersione numeriche del modo fondamentale e dei primi due modi superiori dell'Onda di Rayleigh e confrontandole con gli spettri f_k in configurazione ZVF-RVF:

MODELLO PRELIMINARE				
Z (m)	S (m)	V_S (m/s)	V_P (m/s)	ν
1.0	1.0	220	381	0.25
3.0	2.0	300	561	0.30
7.0	4.0	370	692	0.30
9.0	2.0	550	1029	0.30
15.0	6.0	300	995	0.45
27.0	12.0	400	1077	0.42
-	-	650	2156	0.45

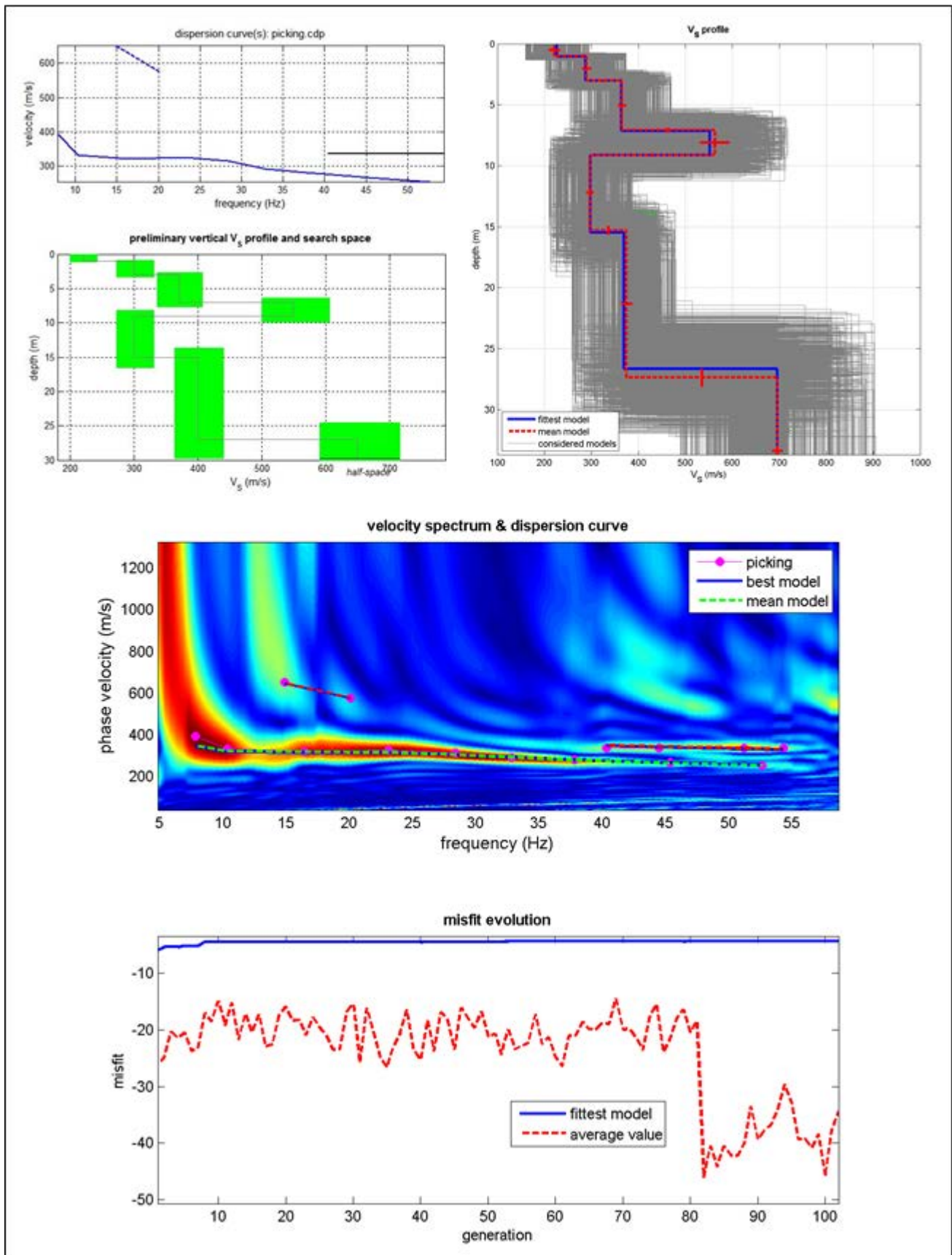
**SOLUZIONE TEORICA CALCOLATA IN PROCEDURA DIRETTA PER LA CONFIGURAZIONE ZVF:
MODO FONDAMENTALE E PRIMI DUE MODI SUPERIORI DELL'ONDA DI RAYLEIGH**



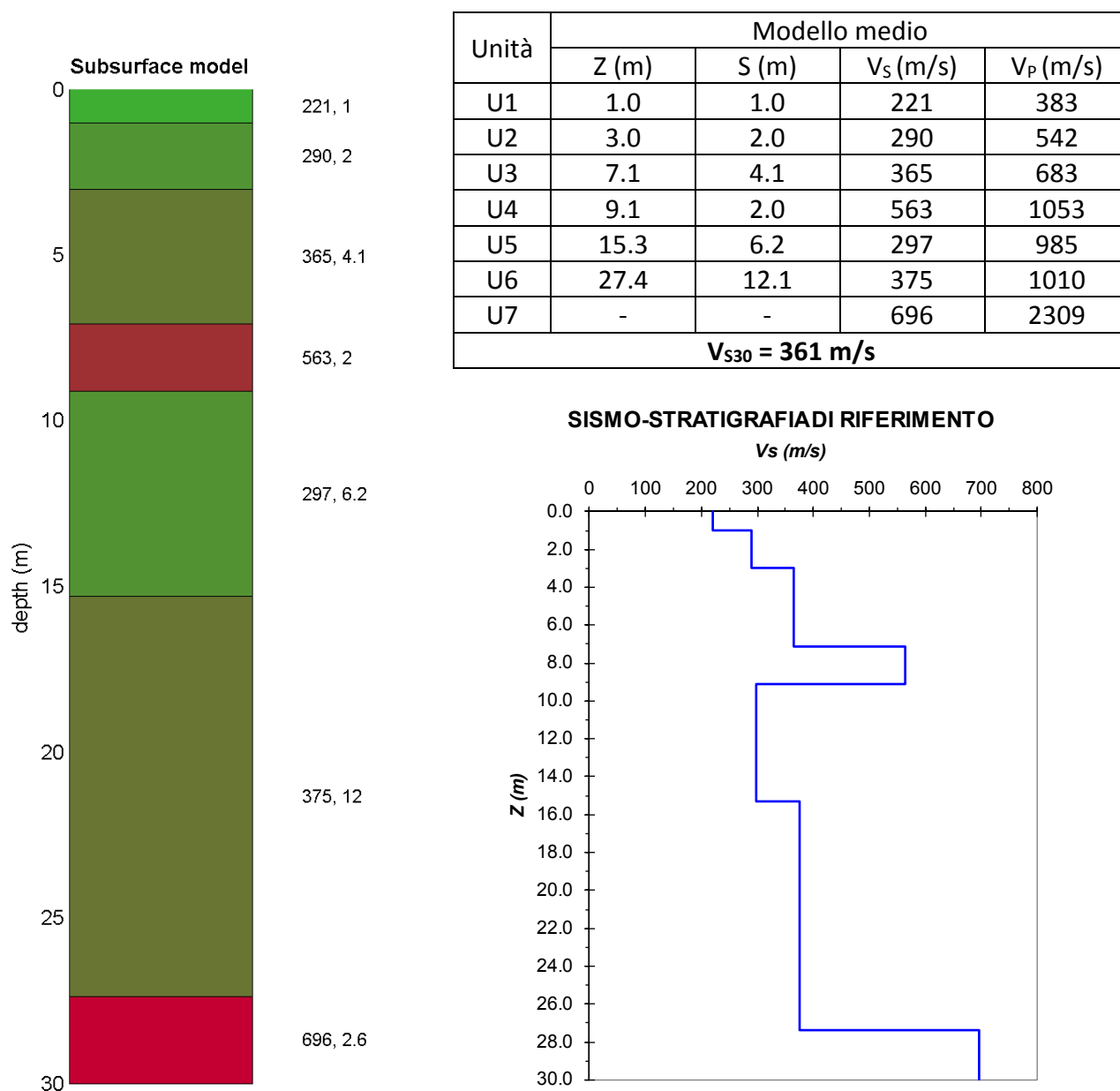
**SOLUZIONE TEORICA CALCOLATA IN PROCEDURA DIRETTA PER LA CONFIGURAZIONE RVF:
MODO FONDAMENTALE E PRIMI DUE MODI SUPERIORI DELL'ONDA DI RAYLEIGH**



Il modello preliminare scelto rappresenta il modello di partenza assegnato al processo d'inversione automatico, al quale è stato assegnato il seguente campo di ricerca:



Il modello medio calcolato secondo l'operazione statistica MPPD (Dal Moro et al., 2006) è riportato nella tabella seguente, ove Z, S, V_s e V_p indicano rispettivamente la profondità del letto, lo spessore e la velocità delle onde SH e P di ciascun sismo-strato considerato:



L'interfaccia U6-U7 è responsabile della generazione del picco 1 della curva HV a circa 3.3-3.6 Hz, coerentemente con il modello geologico del sito; oltre tale interfaccia l'unità U7 si sviluppa per almeno 10-15 m con un graduale aumento di rigidità con la profondità fino ad incontrare l'unità conglomeratica compatta; il successivo forte contrasto d'impedenza sismica si ritrova a profondità superiori ai 200 m (picco 2 della curva HV).

9 Considerazioni finali

L'indagine di sismica superficiale combinata attiva ha permesso di individuare il profilo di rigidità dei primi 30 m di profondità del sito, corrispondente ad una tra le migliori soluzioni possibili al problema inverso della definizione del profilo di rigidità del sottosuolo da dati MASW.

I risultati in termini di V_{S30} si collocano in prossimità del limite normativo fissato tra le categorie di sottosuolo B e C.

Ai sensi della normativa tecnica nazionale di cui al DM 17-01-2018 gli effetti di amplificazione sismica di tipo topografico e stratigrafico possono essere tenuti in considerazione attraverso la procedura semplificata basata sulla definizione della categoria topografica e della categoria di sottosuolo, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni presenti nel sito siano chiaramente riconducibili ad una delle categorie considerate in Tab. 3.2.II delle NTC 2018.

Nell'ambito della progettazione delle strutture previste per la bonifica e messa in sicurezza dello stabilimento Caffaro, ai sensi delle NTC 2018 e delle prescrizioni dello studio geologico comunale del Comune di Brescia, in via cautelativa, si potrà far riferimento:

- alla categoria topografica T1
- alla categoria di sottosuolo C

La forma spettrale assegnata al sito è da ritenersi compatibile dal punto di vista energetico con i fenomeni di amplificazione ivi attesi, in base a quanto stabilito dalla normativa regionale di cui alla DGR 2616/2011.

Qualora si volesse aumentare il dettaglio delle analisi e pervenire alla definizione dell'azione sismica specifica per il sito si potranno eseguire indagini più accurate di Risposta Sismica Locale.

Rovato , 22 febbraio 2019

Il geologo incaricato

Dott. Geol. Massimo Compagnoni



The image shows a handwritten signature in blue ink over a circular professional stamp. The stamp contains the text: "ORDINE DEI GEOLOGI della LOMBARDIA", "MASSIMO COMPAGNONI", "geologo specialista", "Albo n. 1217 A/B", and "sezione A".

BIBLIOGRAFIA

- Achenbach, J.D.**, 1999 - Wave Propagation in Elastic Solids. North-Holland, Amsterdam, Netherlands
- Aki, K. and Richards, P.G.**, 1980 - Quantitative Seismology, Theory and Methods, Vol. 1-2 W.H. Freeman & Co., New York
- Dal Moro G., Forte E., Pipan M. & Sugan M.**, 2006 - Velocity Spectra and Seismic Signal Identification for Surface Wave Analysis, Near-Surface Geophysics, 4, 243-251
- Herman, G. T.** *Image reconstruction from projections - The fundamentals of computerized tomography*, Academic Press, New York, 316 pp., 1980
- Nakamura, Y.**, 1989 - A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1
- Nogoshi M. e Igarashi T.**, 1970 - On the propagation characteristics of microtremor. J. Seism. Soc. Jpn., 23, 264-280
- Nolet, G.** *Seismic tomography*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, pp. 386, 1987
- Palmer, D.** *The Generalized Reciprocal Method of Seismic Refraction Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1980
- Park C. B., Miller R. D., & Xia J.**, 1999 - Multichannel analysis of surface waves, Geophysics, 64, 3; 800–808
- Sandmeier software** *Reflexw versione 7.5*, 2014
- SESAME Project**, 2004 - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation, WP12, deliverable no. D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf
- Worthington, M. H.** *An introduction to geophysical tomography*, First Break, 20-26, 1984
- www.geopsy.org
- www.winmasw.com

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



Indagine lineare: vista verso E



Indagine lineare: vista verso W



Dettaglio sensore trasversale con basetta



Dettaglio fucile sismico per energizzazione