

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J94J17000040001

## U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

### PROGETTO DEFINITIVO

LINEA BOLZANO – MERANO

REALIZZAZIONE NUOVO TUNNEL DEL VIRGOLO A 3 BINARI  
SPOSTAMENTO BIVIO LINEA MERANESE

GEOLOGIA ED IDROGEOLOGIA

REPORT INDAGINI GEOFISICHE (Campagna 2020)

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

N B 1 D 0 1 D 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 2 A

| Rev. | Descrizione         | Redatto           | Data | Verificato    | Data | Approvato        | Data | Autorizzato Data  |
|------|---------------------|-------------------|------|---------------|------|------------------|------|---|
| A    | Emissione esecutiva | D. Roverselli<br> |      | S. Rodani<br> |      | C. Mazzocchi<br> |      | M. Comedini<br><br>Luglio 2021<br>ITALFERR<br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE<br>Dott. Geol. Massimo Comedini<br>Ordine dei Geologi del Lazio<br>n° 2103 |
|      |                     |                   |      |               |      |                  |      |   |
|      |                     |                   |      |               |      |                  |      |   |
|      |                     |                   |      |               |      |                  |      |   |

File:NB1D01D69IGGE0005002A

n. Elab.:

## INDICE

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | PREMESSA .....  | 3  |
| 1.1   | DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DELLE ATTIVITÀ SVOLTE .....                                | 6  |
| 2     | INDAGINI SISMICHE M.A.S.W./RE.MI. ....  | 8  |
| 2.1   | M.A.S.W./RE.MI. – RIFERIMENTO NORMATIVO ( <i>N.T.C. 2018, DM 17/01/2018</i> ) .....   | 8  |
| 2.2   | STENDIMENTI SISMICI CON METODO “M.A.S.W.” E “RE.MI.”: CENNI METODOLOGICI .....        | 10 |
| 2.3   | MODALITÀ ESECUTIVE DELL’INDAGINE .....  | 11 |
| 2.4   | ELABORAZIONE DATI .....   | 11 |
|       | ALLEGATO 1 SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE LOG VELOCITÀ ONDE VS (M.A.S.W./RE.MI.) ..... | 13 |
| 3     | PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE ( $V_P - V_S$ ).....                                | 30 |
| 3.1   | CENNI TEORICI .....   | 31 |
| 3.2   | ACQUISIZIONE DATI .....   | 31 |
| 3.3   | ELABORAZIONE DATI .....   | 33 |
| 3.4   | ANALISI DEI RISULTATI .....   | 34 |
| 3.4.1 | <i>Sezione P1</i> .....   | 34 |
| 3.4.2 | <i>Sezione P2</i> .....   | 35 |
| 3.4.3 | <i>Sezione P3</i> .....   | 36 |

## 1 PREMESSA

La presente relazione illustra i risultati delle specifiche prospezioni geofisiche eseguite a supporto del Progetto relativo alla realizzazione del nuovo tunnel del Virgolo a Bolzano (BZ).

Le indagini geofisiche sono state eseguite in prossimità dell'asse di tracciato ferroviario. Le planimetrie di riferimento dell'area di studio in scala 1:15.000 e delle indagini eseguite in scala 1:2.000 sono inserite nell'elaborato **NB1D01D69IGGE0005001A**; da Fig. 1 a Fig. 4 sono riportati gli elaborati planimetrici sopra menzionati in formato ridotto.

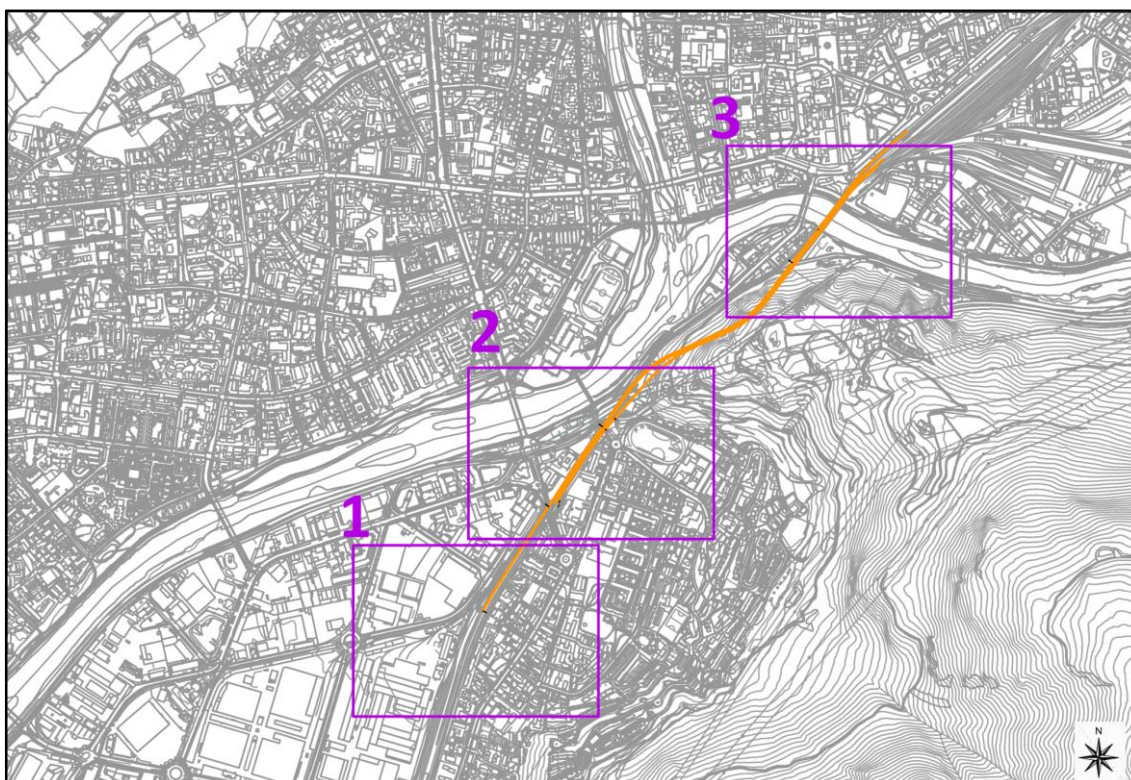


Fig. 1 - Estratto quadro di unione delle aree oggetto di indagine rispetto lo sviluppo del tracciato ferroviario in progetto (in arancione).



Fig. 2 - Estratto planimetrico delle indagini effettuate (Area 1).

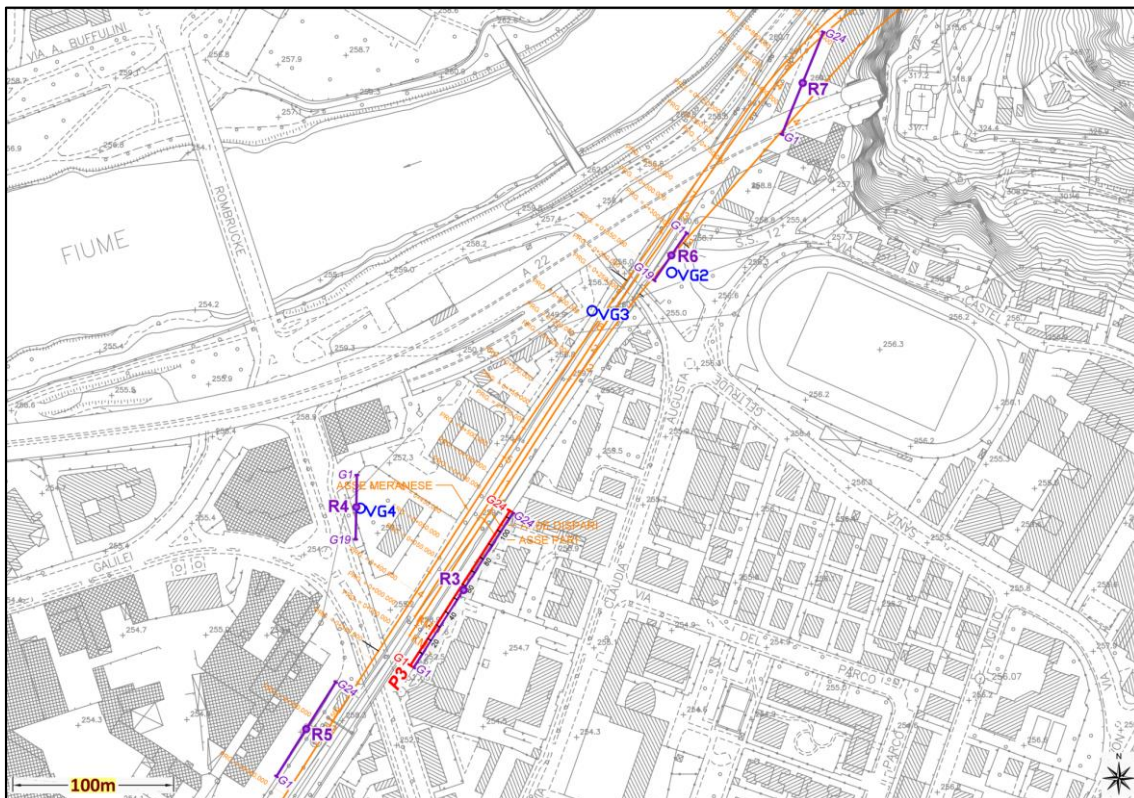
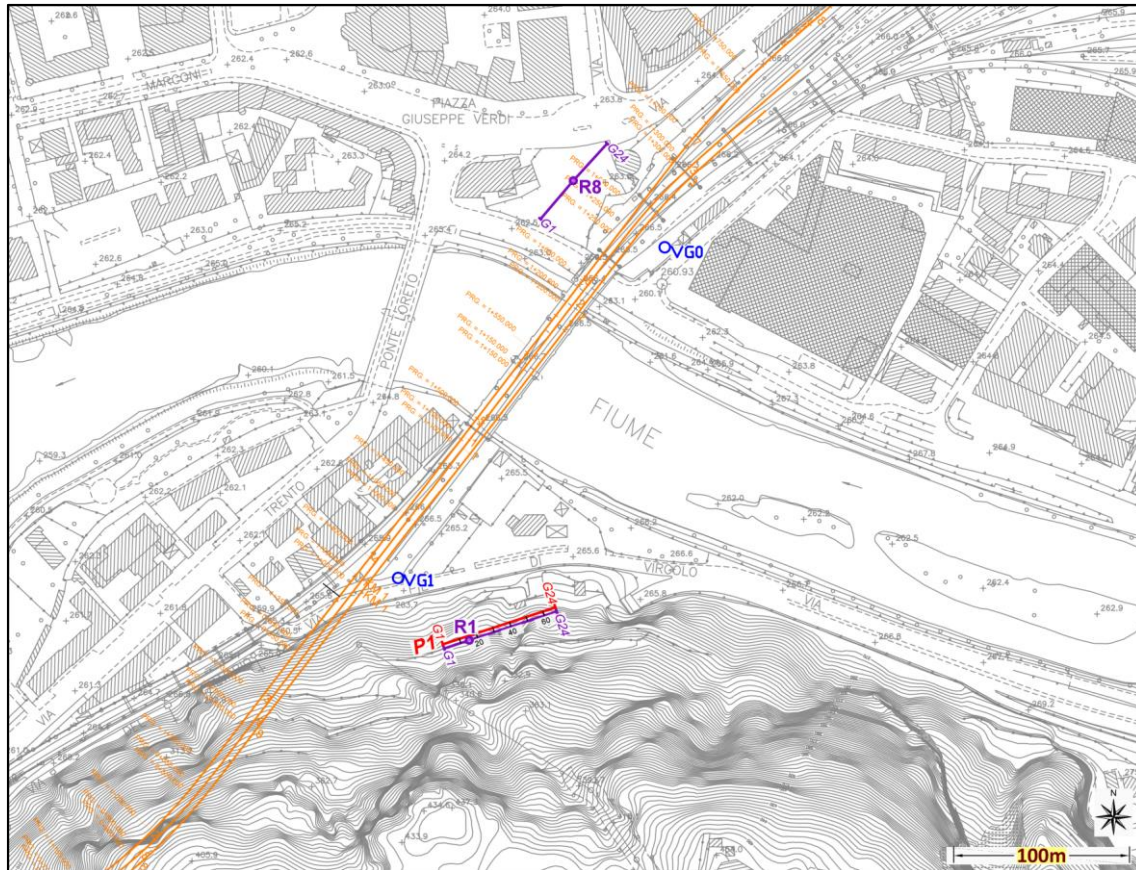


Fig. 3 - Estratto planimetrico delle indagini effettuate (Area 2).



**Fig. 4 - Estratto planimetrico delle indagini effettuate (Area 3).**

L'attività si è articolata in differenti metodologie geofisiche strutturate in:

- N. 8 stendimenti sismici con acquisizione prove di tipo Re.Mi./M.A.S.W., denominate con sigla da **R1** a **R8** finalizzate alla determinazione del parametro  $V_{seq}$  ed alla definizione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle N.T.C. 2018; gli stendimenti sono stati costituiti da un numero variabile di geofoni da n. 19 (R4 e R6) a n. 24 (R1, R2, R3, R5, R7 e R8) posizionati ad intervalli anch'essi variabili da 2.0 m (R4 e R6), 2.5 m (R8), 3.0 m (R1, R5 e R7) e 5.0 m (R2 e R3). Gli stendimenti con l'indicazione del punto centrale di riferimento rappresentativo del volume di terreno indagato sono posizionati su foto aerea nella relativa scheda monografica nello specifico capitolo dedicato.
- N. 3 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione in onde P e S per l'elaborazione di profili interpretativi in termini di velocità sismiche, denominati da **P1** a **P3**; gli stendimenti sono stati costituiti da n. 24 geofoni posizionati ad intervalli regolari di 3.0 m (P1) e di 5.0 m (P2 e P3), pari ad uno sviluppo lineare rispettivamente di 69.0 m e 115.0 m.

Ai fini di un'adeguata localizzazione plano-altimetrica delle indagini è stata realizzato un dettagliato rilievo topografico con strumentazione GPS "**Trimble R2**" dotata di "GNSS Receiver" e di "TSC3 Controller".

Di seguito vengono descritte le singole attività svolte con le relative interpretazioni dei dati geofisici acquisiti unitamente agli allegati di riferimento e specifica documentazione fotografica.

## 1.1 Documentazione fotografica delle attività svolte

INDAGINE SISMICA Prova Re.Mi./M.A.S.W. – *Stendimento geofonico (sopra) e strumentazione (sotto).*



INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE – *Punto di energizzazione (sopra) e stendimento geofonico (sotto).*



## 2 INDAGINI SISMICHE M.A.S.W./RE.MI.

Per la determinazione del parametro  $V_{seq}$  e la classificazione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle N.T.C. 2018 sono state eseguite n.8 prove sismiche di tipo M.A.S.W./Re.Mi., denominate con sigla da **R1** a **R8**.

L'ubicazione territoriale delle prove sismiche è riportata nell'elaborato **NB1D01D69IGGE0005001A** e su foto aerea in Fig. 5.

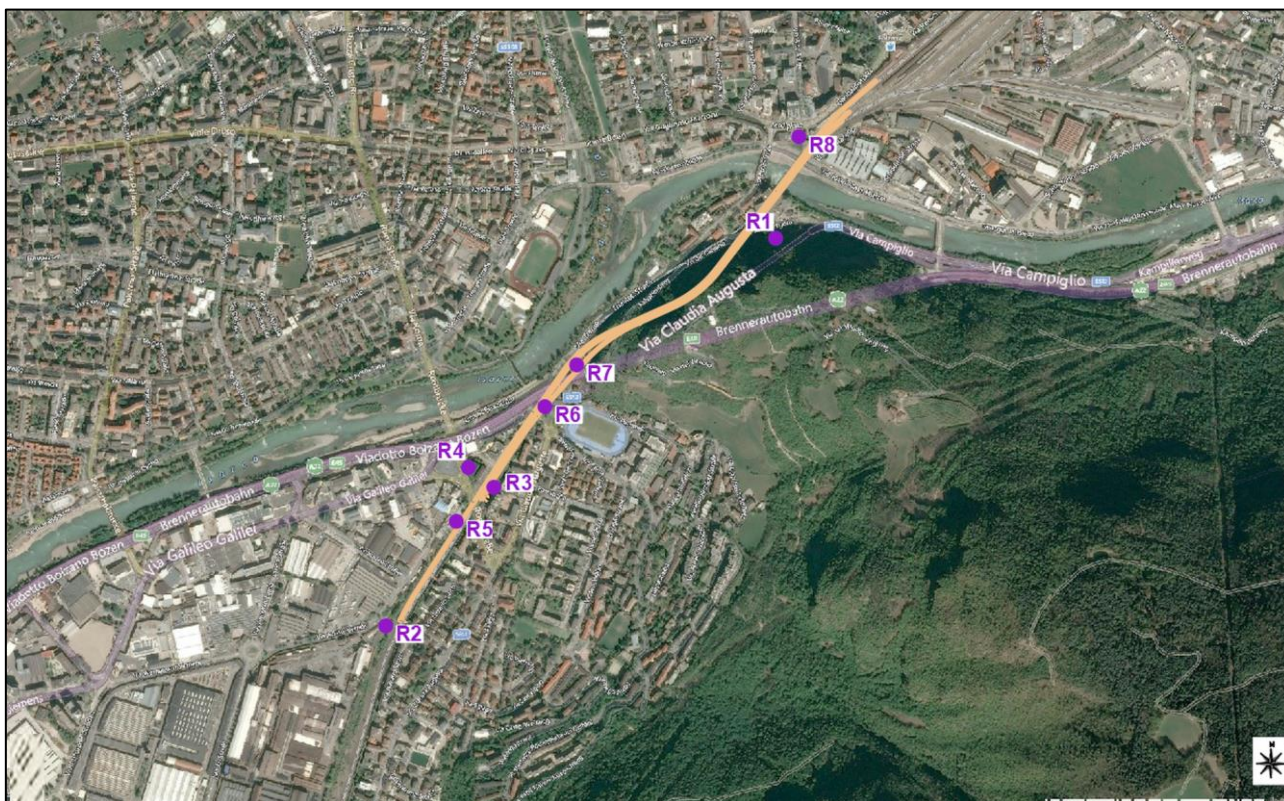


Fig. 5 - Inquadramento territoriale delle prove M.A.S.W./Re.Mi. rispetto al tracciato ferroviario in progetto e su foto aerea.

L'ubicazione di dettaglio su foto aerea delle prove sismiche è riportata in Allegato 1 "SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE e LOG VELOCITÀ ONDE  $V_s$  M.A.S.W. / Re.Mi..

### 2.1 M.A.S.W./Re.Mi. – Riferimento normativo (N.T.C. 2018, DM 17/01/2018)

La normativa D.M. 14.01.08 "Norme tecniche per le costruzioni", aggiornata con D.M. del 17 gennaio 2018, indica che ai fini della definizione della azione sismica di progetto (punto 3.2.2), deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale.

In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuti mediante specifiche prove geofisiche.



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad [3.2.1]$$

con:

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

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

$N$  numero di strati;

$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

| Categoria | Caratteristiche sismiche del sottosuolo   |
|-----------|---|
| A         | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>   |
| B         | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>  |
| C         | <i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>   |
| D         | <i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i> |
| E         | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>  |

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018.

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

|   |   |                  |             |                     |                           |           |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|
|  | LINEA BOLZANO - MERANO<br>REALIZZAZIONE NUOVO TUNNEL DEL VIRGOLO A 3 BINARI<br>SPOSTAMENTO BIVIO LINEA MERANESE |                  |             |                     |                           |           |
|   | <b>REPORT INDAGINI GEOFISICHE</b>   | COMMESSA<br>NB1D | LOTTO<br>01 | CODIFICA<br>D 69 IG | DOCUMENTO<br>GE 00 05 002 | REV.<br>A |

## 2.2 Stendimenti sismici con metodo “M.A.S.W.” e “Re.Mi.”: cenni metodologici

Il metodo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica d’indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) 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 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 (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 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, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi danno informazioni sulla parte più profonda del suolo. Il metodo d’indagine M.A.S.W. si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi.

Nel metodo attivo, utilizzato nell’indagine, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori.

Nel metodo passivo lo stendimento dei sensori può essere sia lineare che circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50m, in funzione della rigidità del suolo.

L’elaborazione dei dati con il metodo M.A.S.W. prevede tre fasi di lavoro:

1. la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale,
2. la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica,
3. la terza ed ultima fase consiste nell’individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa  $\rho$  e si variano lo spessore  $h$  e la velocità  $V_s$  degli strati.

Nella procedura manuale l’utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità  $V_s$  e degli spessori  $h$ , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale. Nella procedura automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l’errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l’errore relativo, tra curva sperimentale e curva numerica è compresa tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

La tecnica di prospezione “Refraction Microtremor“ (Re.Mi.), utilizzata nell’ambito di questo progetto, capovolge il concetto comune del parametro “segnale-disturbo”, per il quale tradizionalmente il primo (segnale) ha necessità di essere rilevato in condizioni favorevoli quindi in assenza o scarsità di rumore. Viceversa, in presenza di forte rumore

|   |   |                  |             |                     |                           |           |
|---|---|------------------|-------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| <br><b>ITAFERR</b><br>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | LINEA BOLZANO - MERANO<br>REALIZZAZIONE NUOVO TUNNEL DEL VIRGOLO A 3 BINARI<br>SPOSTAMENTO BIVIO LINEA MERANESE |                  |             |                     |                           |           |
|   | <b>REPORT INDAGINI GEOFISICHE</b>   | COMMESSA<br>NB1D | LOTTO<br>01 | CODIFICA<br>D 69 IG | DOCUMENTO<br>GE 00 05 002 | REV.<br>A |

di fondo (es. ambiente urbano), le tradizionali rilevazioni sismiche hanno sempre trovato una condizione di difficile applicazione a causa della difficoltà di discriminare il segnale dal rumore.

Con questa tecnica, il disturbo, il “noise” ambientale diventa il segnale utilizzato per la caratterizzazione sismica. Sono i microtremori (rumore di fondo generato dal traffico stradale, ferroviario e comunque il rumore presente costantemente in ambito urbanizzato) a costituire la sorgente di energia utile allo scopo.

Numerose sperimentazioni hanno consentito di appurare che le registrazioni del rumore di fondo ambientale, effettuate con uno stendimento sismico normalmente utilizzato per la sismica a rifrazione, possono essere utilizzate, con opportune procedure di acquisizione ed elaborazione, per stimare la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) fino a profondità che possono essere superiori a 100m. La metodologia d’indagine più applicata per la determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , è stata proposta e sperimentata da J.N.Louie del Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences dell’Università del Nevada, ed è basata su due aspetti fondamentali:

- uno pratico, rappresentato dal fatto che alcuni sistemi di acquisizione di sismica a rifrazione (con dinamica a 24bit) sono in grado di registrare onde di superficie con frequenze fino a 2 Hz per intervalli di tempo sufficientemente lunghi (almeno 10 sec);
- uno teorico, sulla base del quale una semplice trasformata bidimensionale (p-f) slowness-frequency della registrazione di un rumore di fondo (microtremore) è in grado di separare le onde di Rayleigh (onde di superficie) da altri tipi di onde che compongono il sismogramma, rendendo possibile il riconoscimento delle vere velocità di fase dalle velocità apparenti.

### 2.3 Modalità esecutive dell’indagine

In considerazione delle particolari condizioni logistiche locali, per poter definire con una discreta certezza il dato medio di  $V_{seq}$ , si è proceduto ad acquisire sia profili sismici di tipo “M.A.S.W.” che “Re.Mi.” impiegando geofoni da 4.5Hz ed un acquisitore digitale a 24 canali della Geometrics tipo “Geode” con dinamica a 24bit.

Per quanto riguarda la prova sismica attiva M.A.S.W. sono state effettuate molteplici registrazioni energizzando agli estremi dello stendimento sismico (minimo n.3 per estremo) a distanze diverse dal geofono iniziale o finale; i film e gli spettri delle registrazioni, effettivamente utilizzate per il “processing”, sono riportati in **All.1**.

Per le prove sismiche passive (Re.Mi.) in ogni punto d’indagine sono state effettuate molteplici acquisizioni con l’intento di ottenere statisticamente un migliore dato da processare, in **All.1** nella pagina “Prova M.A.S.W./Re.Mi. - ...” è graficizzato lo “spettro medio” ottenuto dall’elaborazione congiunta delle singole registrazioni. In questa stessa pagina è riportato anche lo “spettro medio” delle prove M.A.S.W. acquisite secondo lo schema descritto precedentemente.

### 2.4 Elaborazione dati

I dati della prova “M.A.S.W.” sono stati elaborati con il software “WinMasw – Eliosoft”.



Per la metodologia “Re.Mi.” per l’elaborazione dei dati si è utilizzato il pacchetto software SeisOpt Re.Mi. 5.0 prodotto dalla Optim Software LLC.



Come prima fase è stata eseguita un’analisi spettrale di più sismogrammi che ha consentito di elaborare un’immagine della distribuzione media del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono. Da tale elaborazione è stata estrapolata la curva di attenuazione del segnale caratteristico e in funzione del suo andamento (curva di dispersione) si è risaliti alla stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ). Il risultato finale dell’elaborazione è consistito, quindi, nella rappresentazione grafica del profilo di velocità.

In particolare nella prova R1 data la scarsa qualità di numerose delle tracce/registrazioni sismiche acquisite durante la prova M.A.S.W./Re.Mi. si è scelto di operare un’analisi della *velocità di gruppo* del singolo geofono n. 6. Successivamente si è proceduto al picking dello spettro e ad una inversione della curva di dispersione. Il modello così ottenuto ha permesso di ottenere il profilo di velocità in onde S.

La velocità delle onde di taglio, essendo legata alle caratteristiche dello scheletro del materiale, costituisce un parametro di grande rilevanza per la definizione delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali. Risulta

evidente che a velocità elevate corrispondono materiali con buone caratteristiche geomeccaniche, viceversa a bassi valori corrispondono materiali con scadenti caratteristiche geotecniche.

La tabella seguente sintetizza i valori di  $V_{seq}$  calcolati e conseguente categoria di suolo sismico:

| <b>Sigla Prova</b> | <b><math>V_{seq}</math> (m/sec)</b> | <b>Profondità di riferimento (m)</b> | <b>Categoria suolo</b> |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| R1                 | <b>1019</b>                         | <b>30</b>                            | <b>A</b>               |
| R2                 | <b>392</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R3                 | <b>395</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R4                 | <b>398</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R5                 | <b>381</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R6                 | <b>418</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R7                 | <b>393</b>                          | <b>30</b>                            | <b>B</b>               |
| R8                 | <b>334</b>                          | <b>30</b>                            | <b>C</b>               |

**ALLEGATO 1**  
**SPETTRI, CURVE DI DISPERSIONE**  
**LOG VELOCITÀ ONDE  $V_s$  (M.A.S.W./Re.Mi.)**

**E**

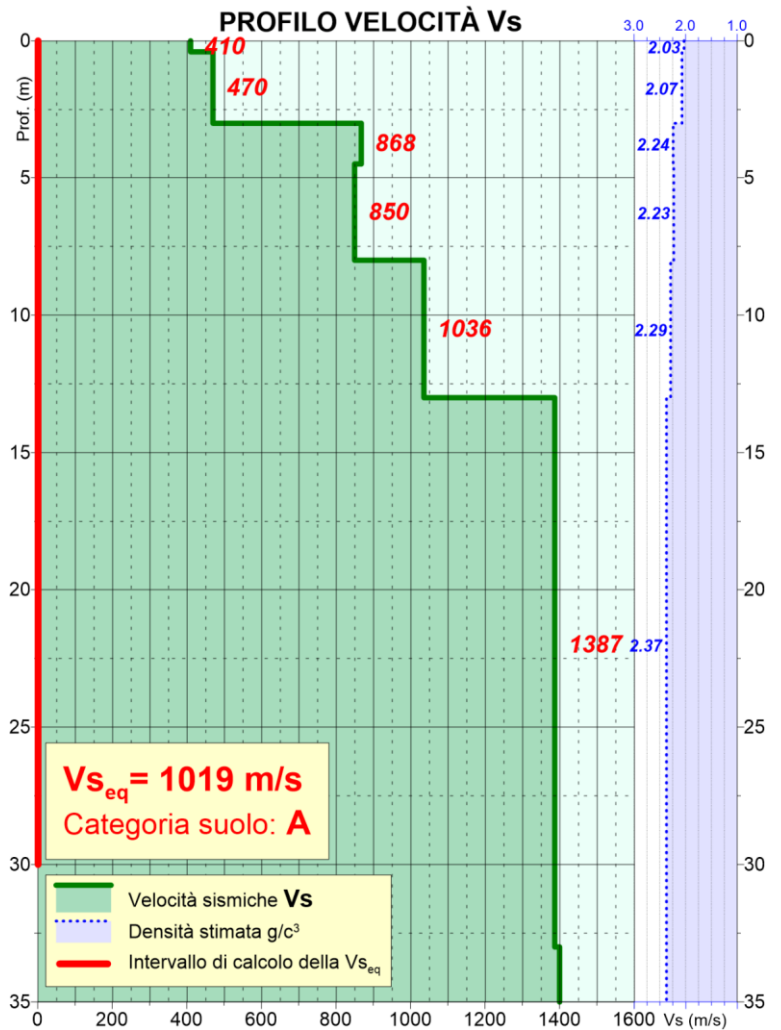
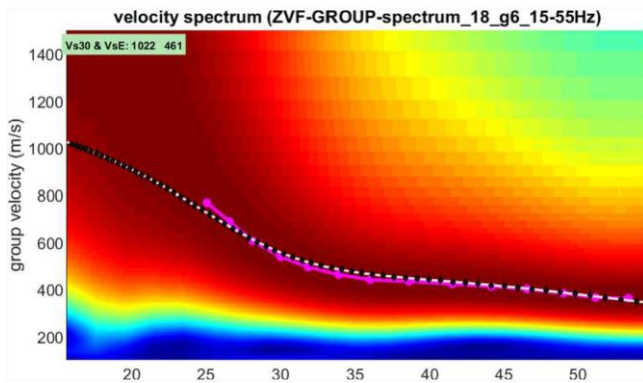
**REGISTRAZIONI / SPETTRI**  
**PROVE M.A.S.W.**

**R1 / R2 / R3 / R4 /**

**R5 / R6 / R7 / R8**

## Prova M.A.S.W. - R1

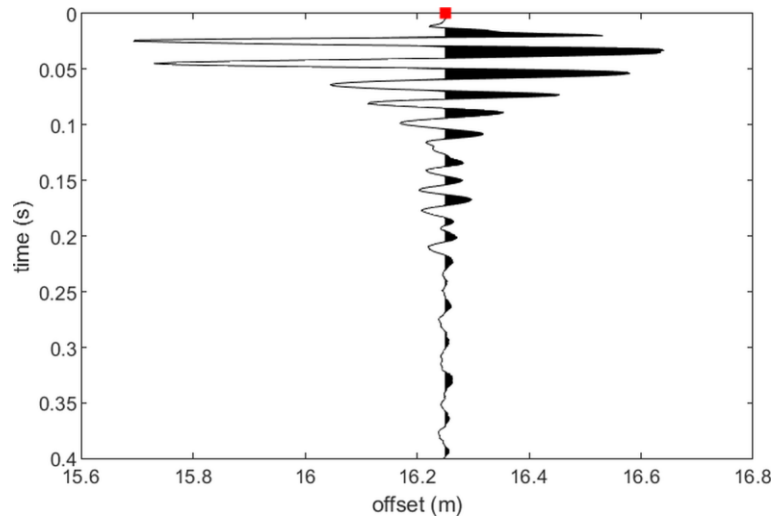
### PROVA M.A.S.W. - Spettro di velocità Vs



### Note:

- Per la determinazione del profilo Vs è stata eseguita un'analisi della velocità di gruppo del singolo geofono n.6;

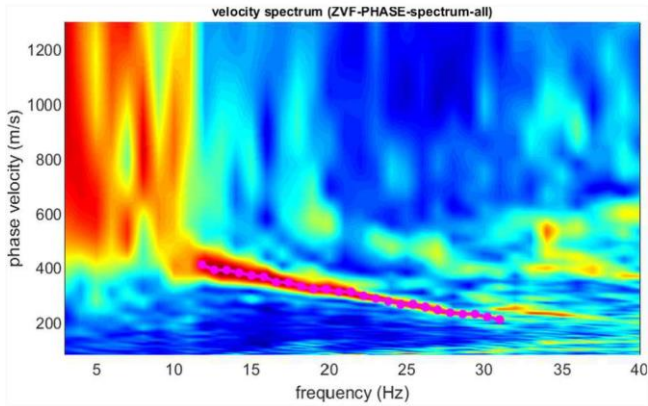
### Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per - **R1**



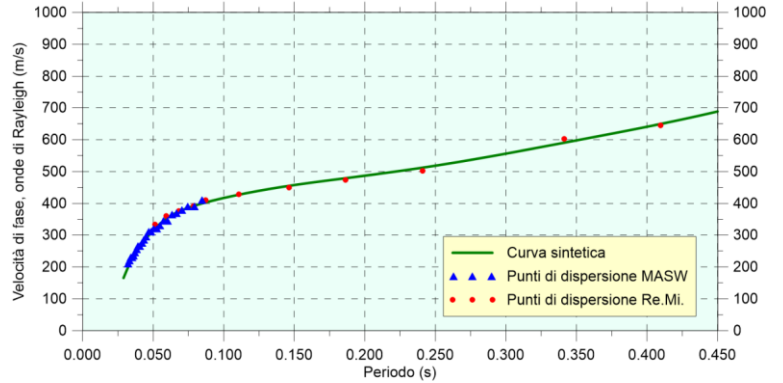
Traccia relativa al geofono n.6 (sismogramma).

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R2

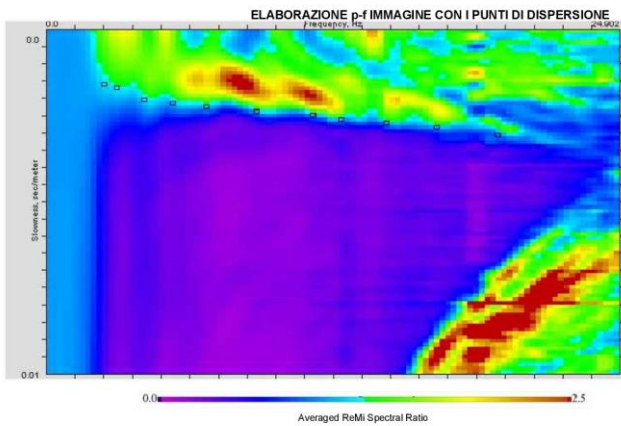
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



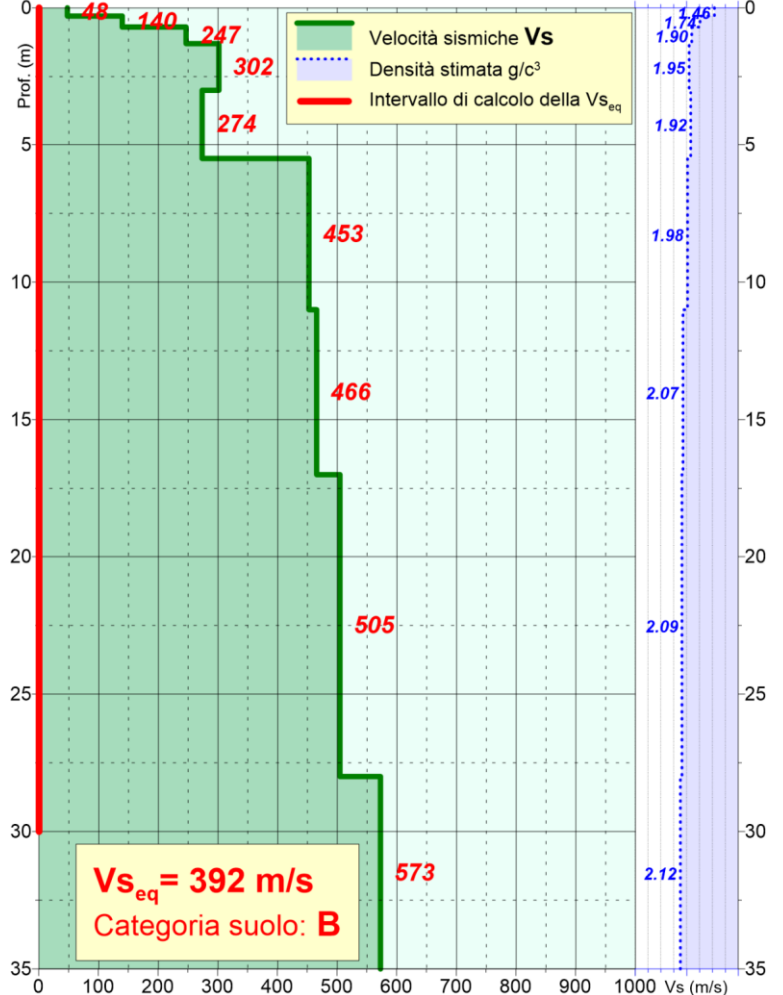
### CURVA DI DISPERSIONE



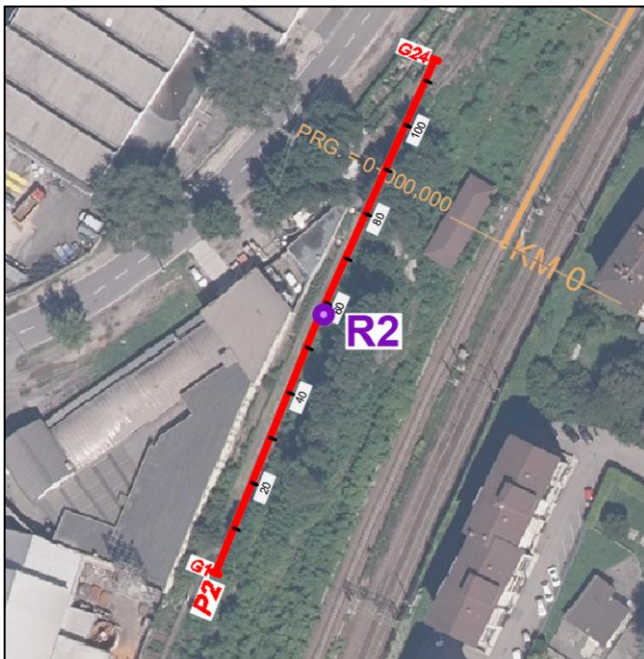
### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



### PROFILO VELOCITÀ Vs

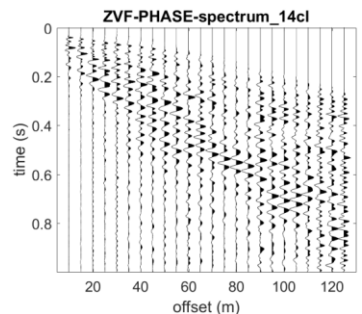
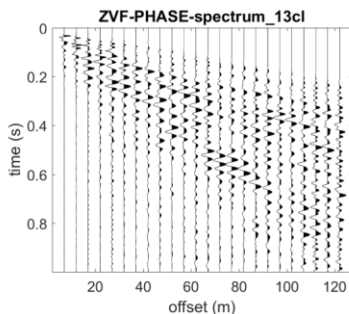
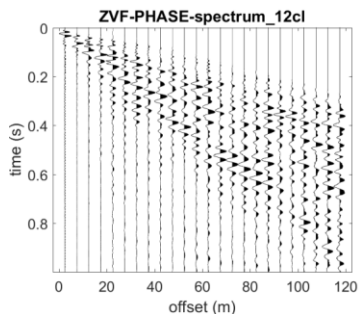
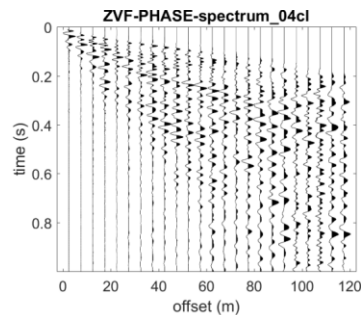
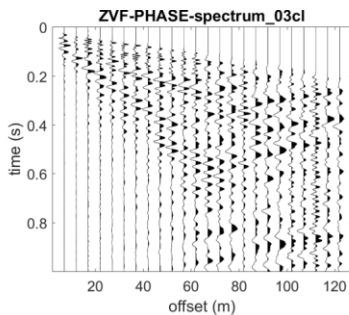
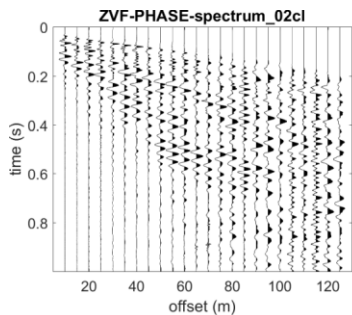


### Ubicazione prova

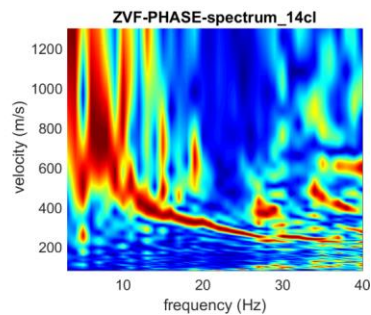
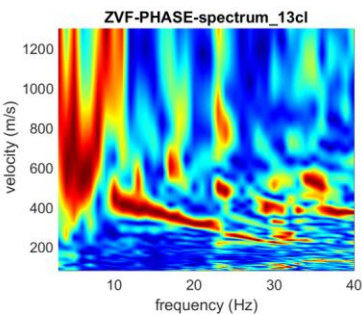
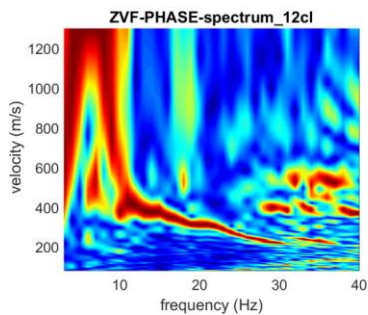
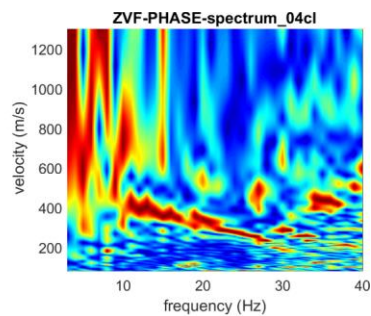
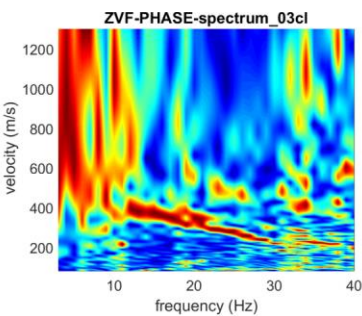
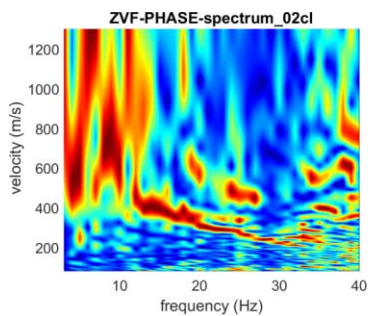




## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R2



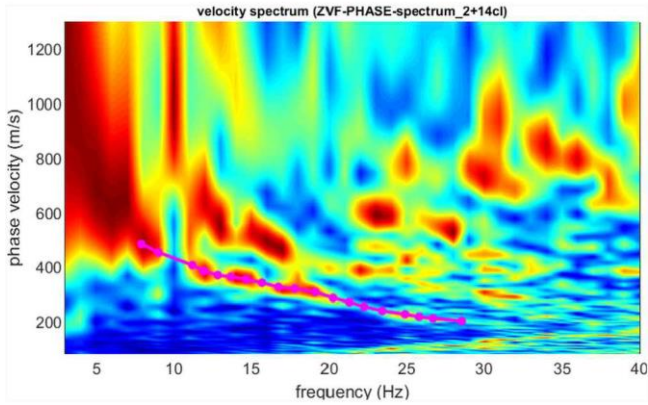
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio  
(energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



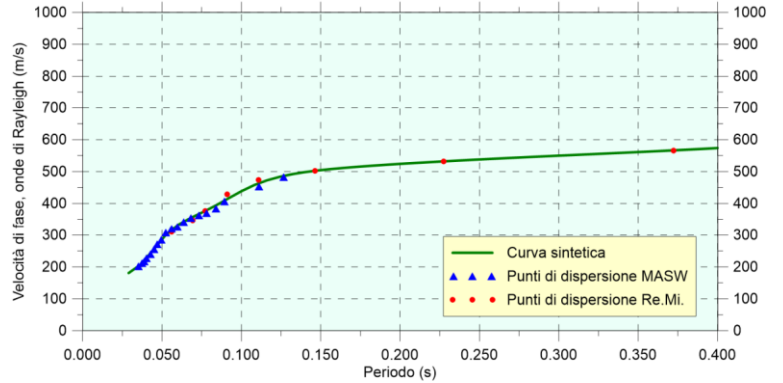
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio.

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R3

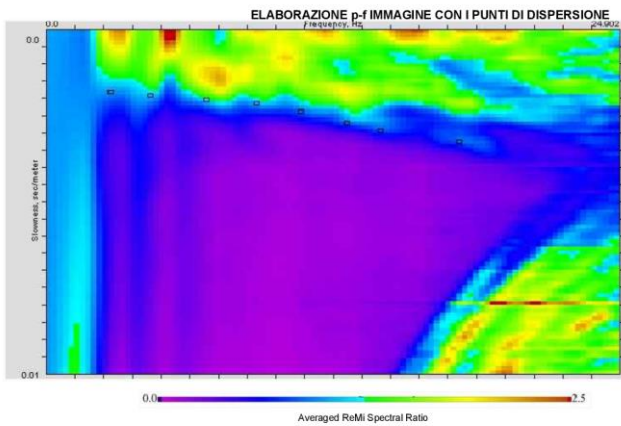
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



### CURVA DI DISPERSIONE



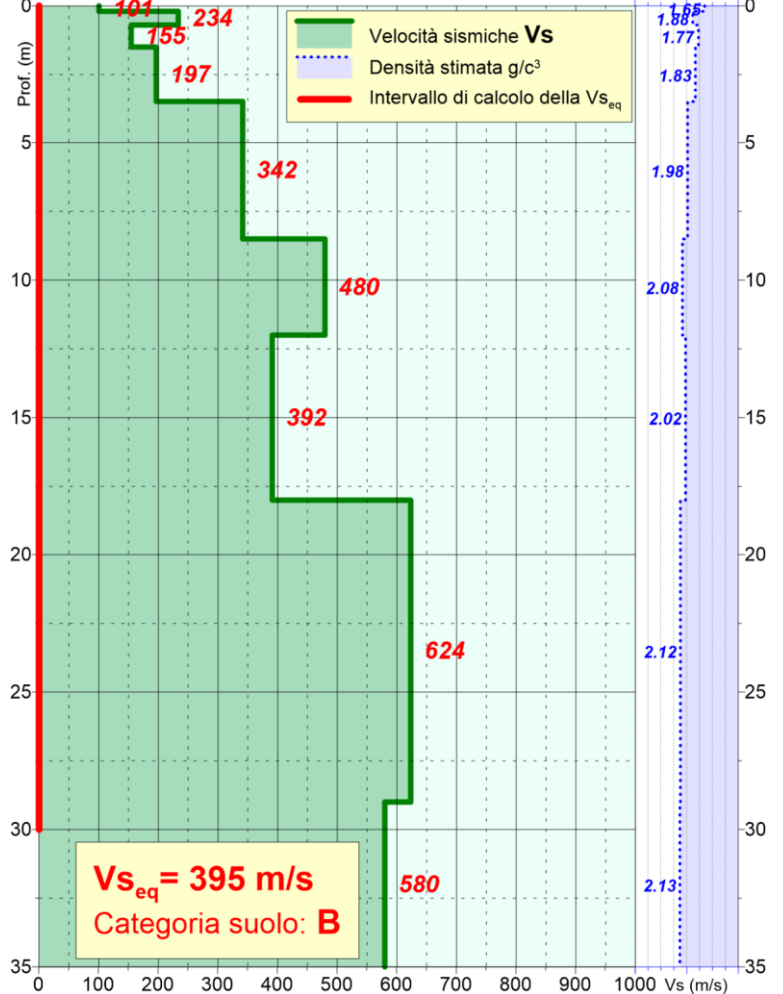
### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



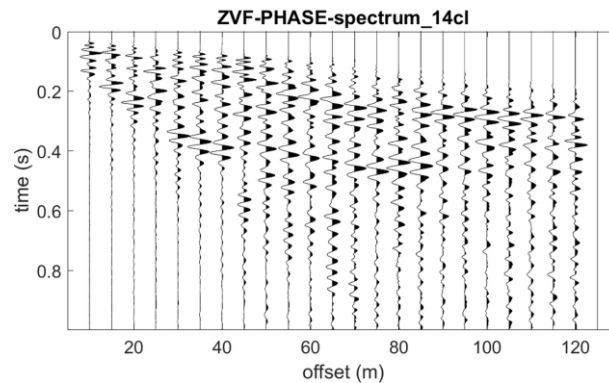
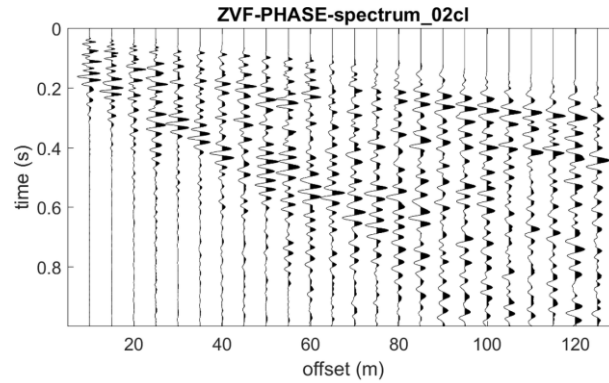
### Ubicazione prova



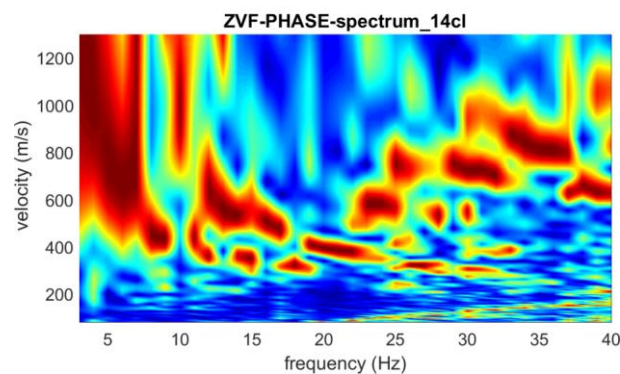
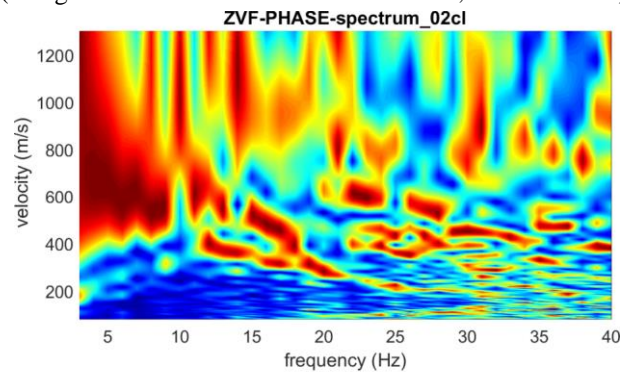
### PROFILO VELOCITÀ Vs



## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R3



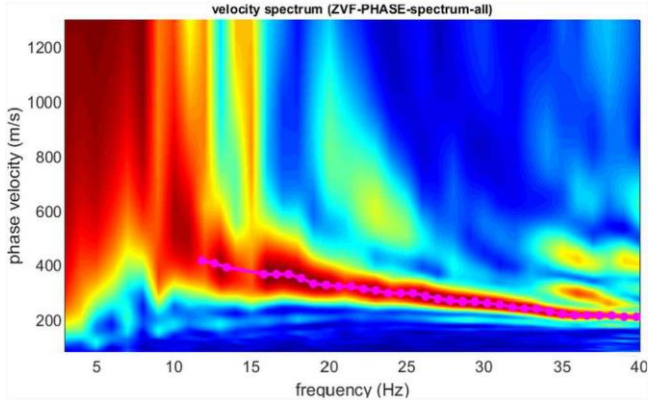
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



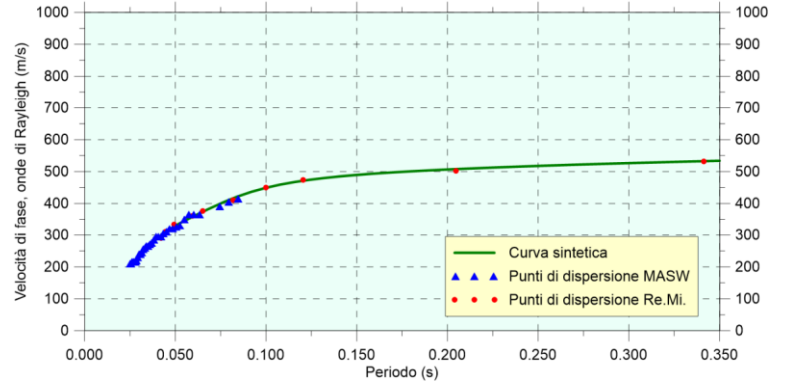
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R4

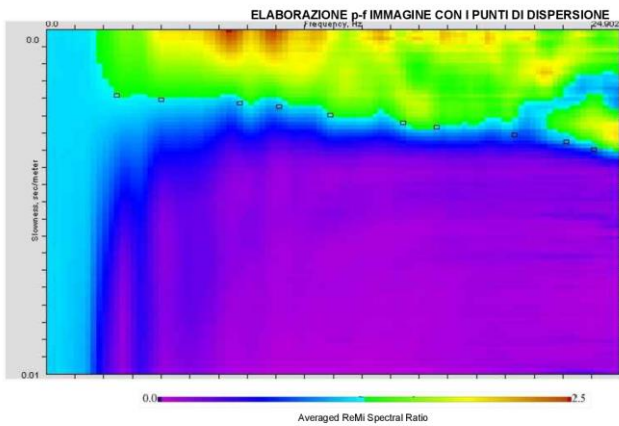
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



### CURVA DI DISPERSIONE



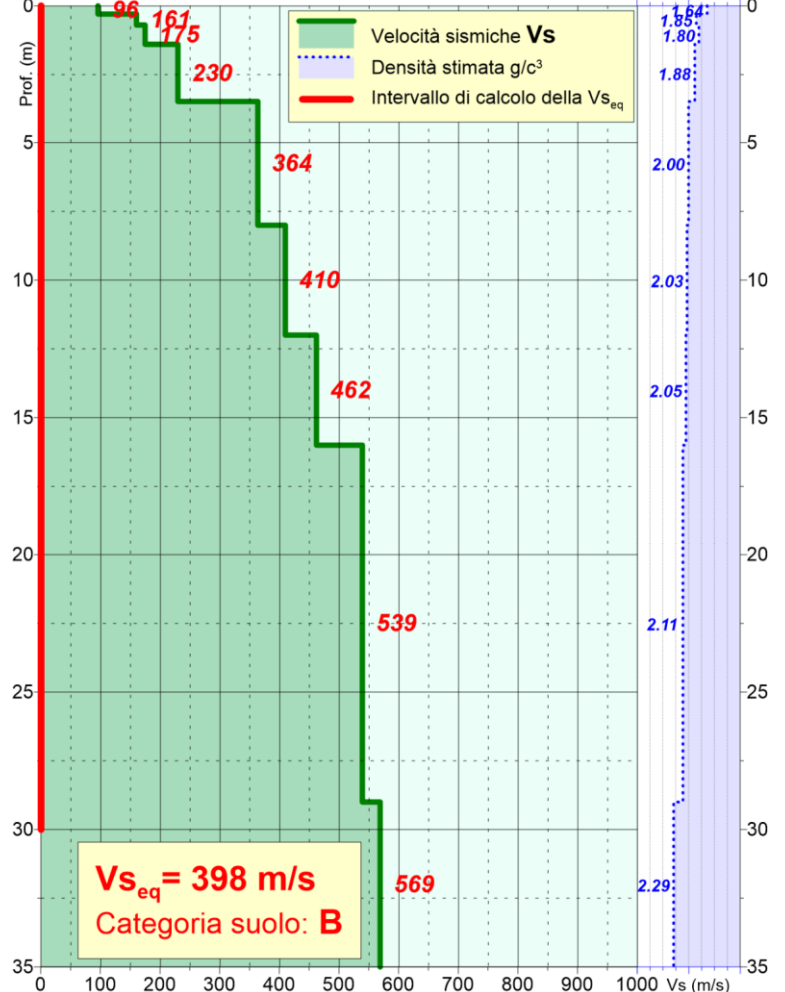
### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



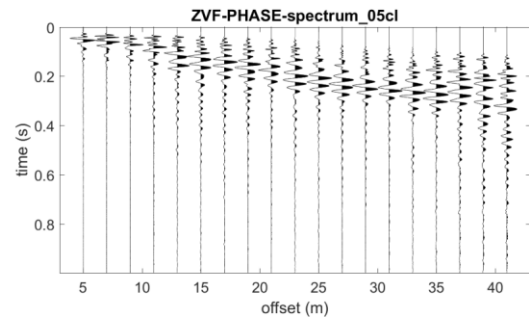
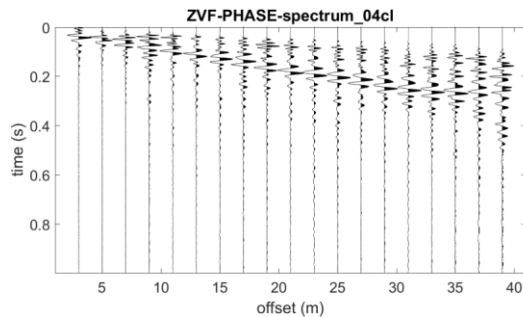
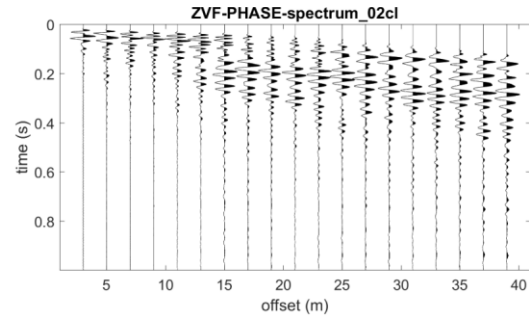
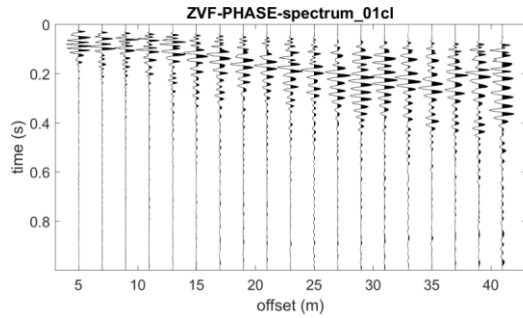
### Ubicazione prova



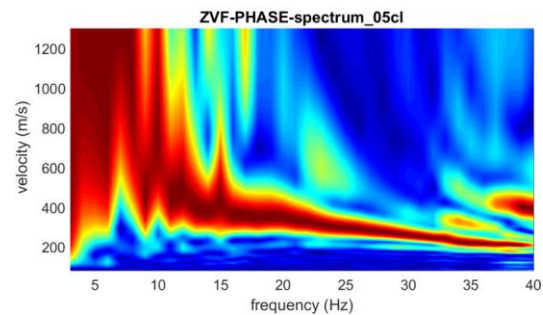
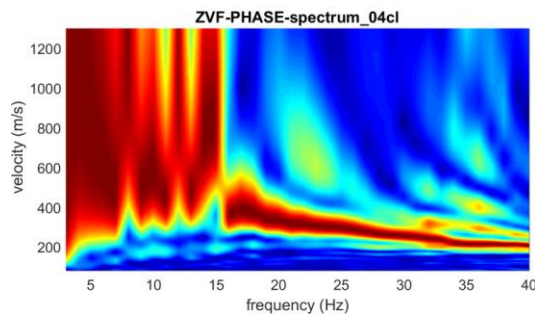
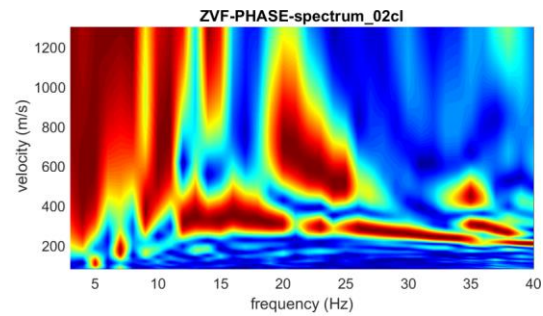
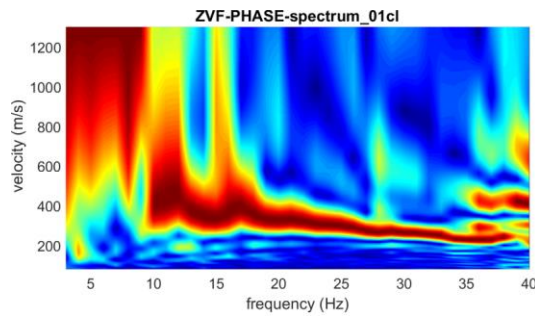
### PROFILO VELOCITÀ Vs



## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R4



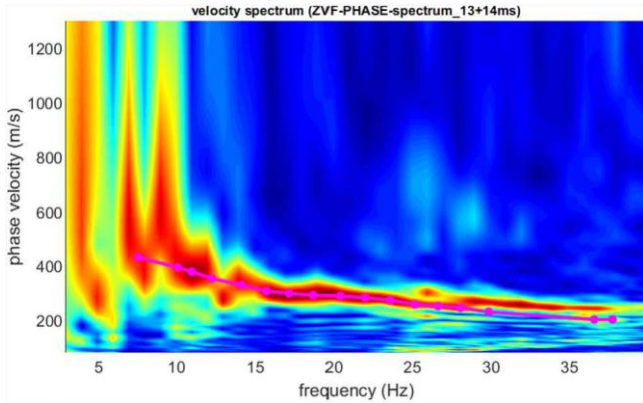
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio  
(energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



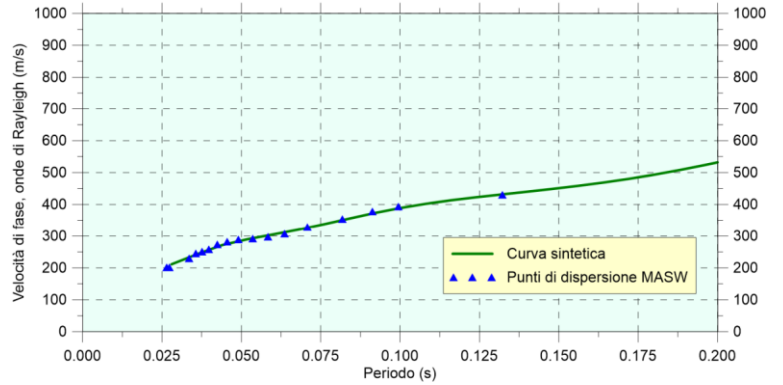
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio.

## Prova M.A.S.W. - R5

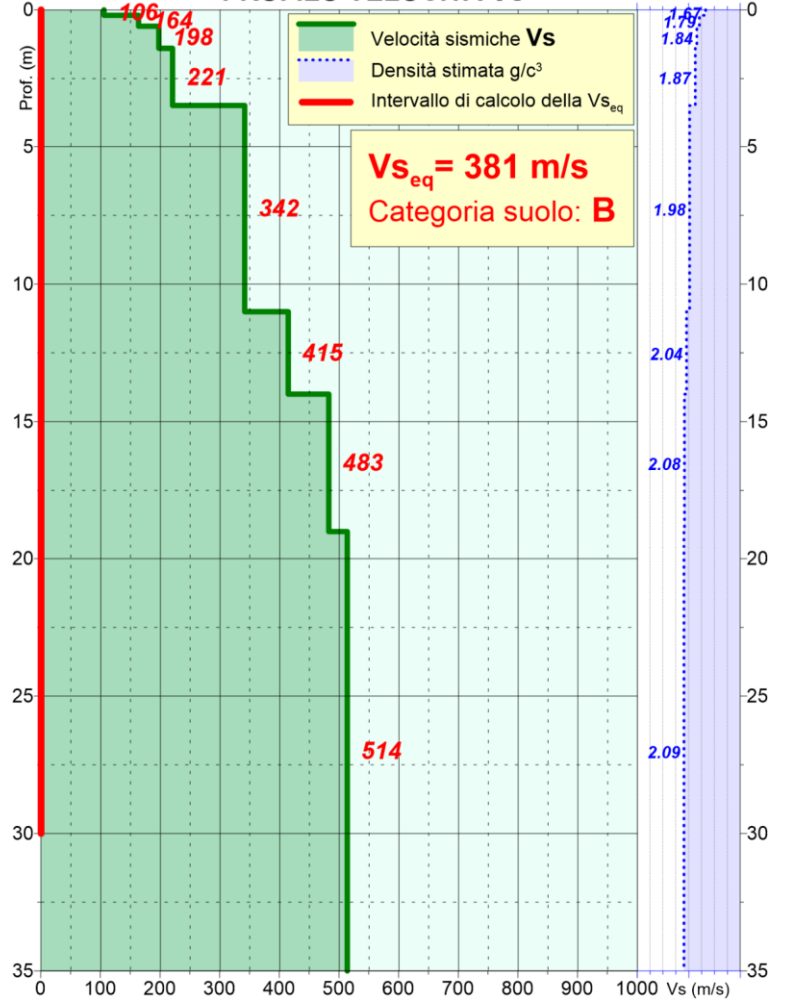
PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



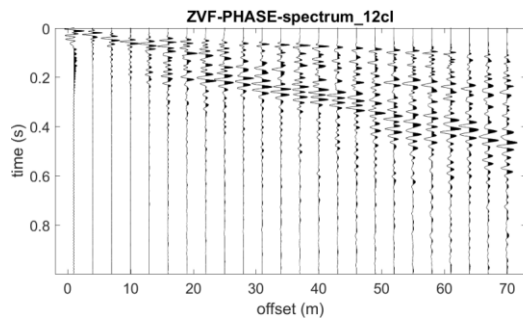
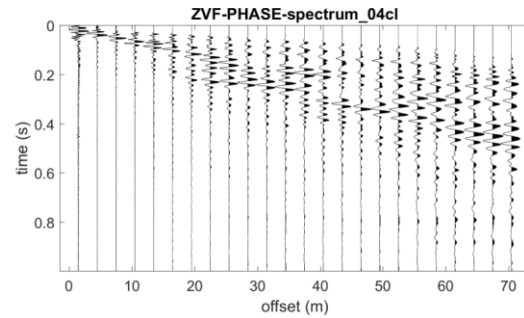
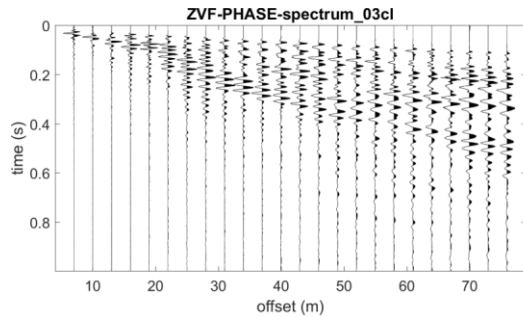
CURVA DI DISPERSIONE



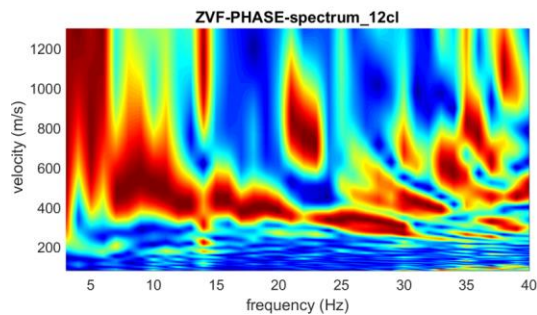
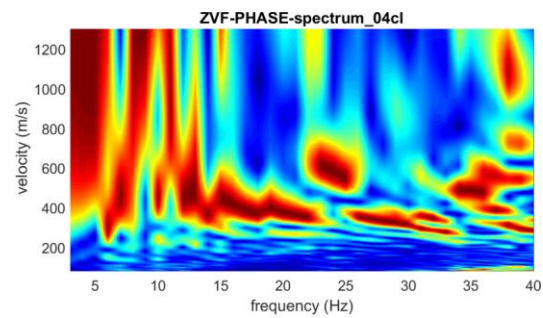
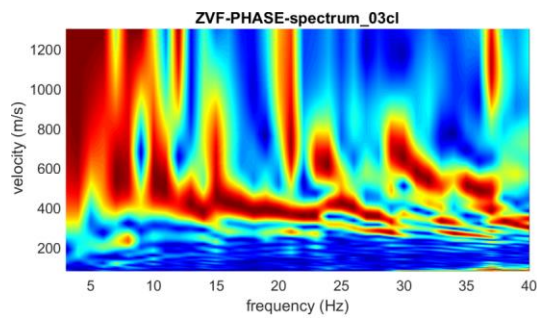
PROFILO VELOCITÀ Vs



## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R5



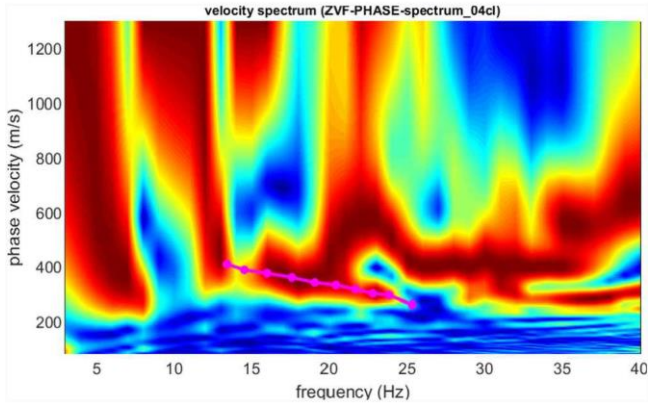
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio  
(energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



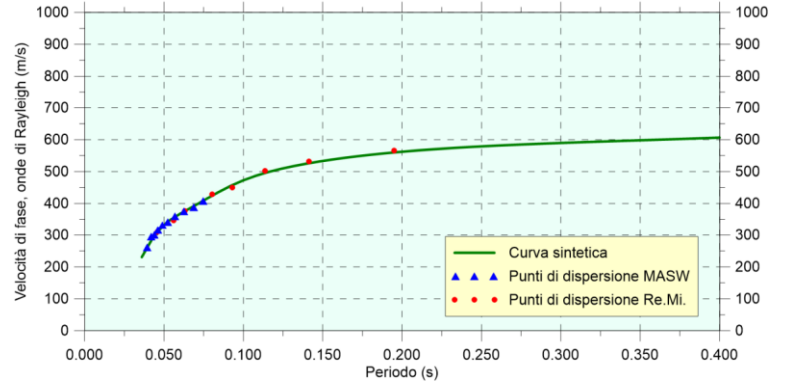
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio.

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R6

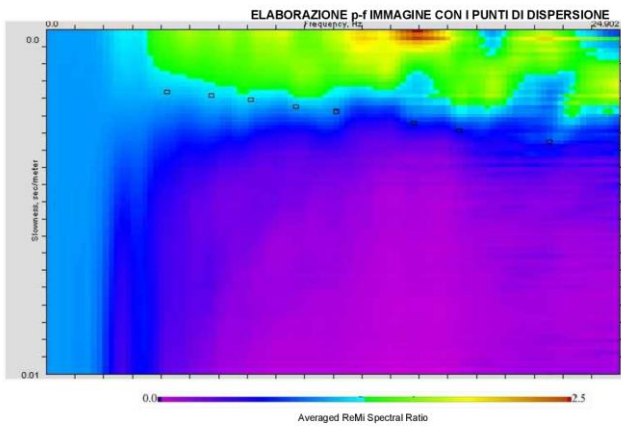
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



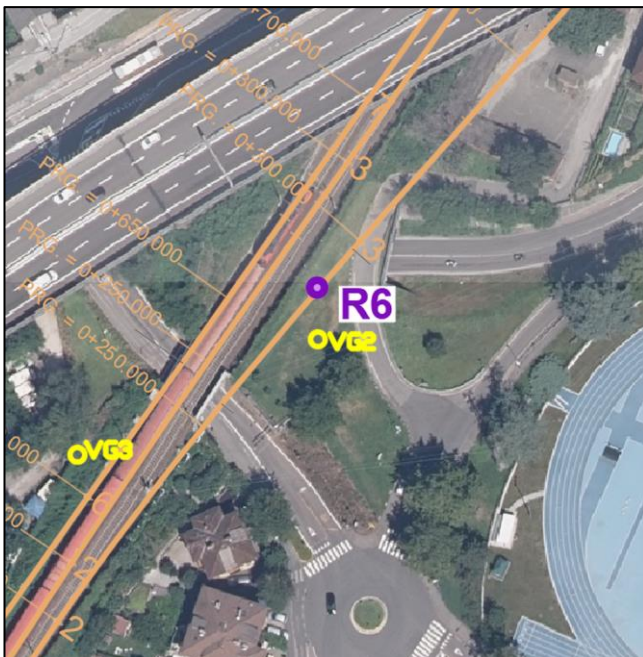
### CURVA DI DISPERSIONE



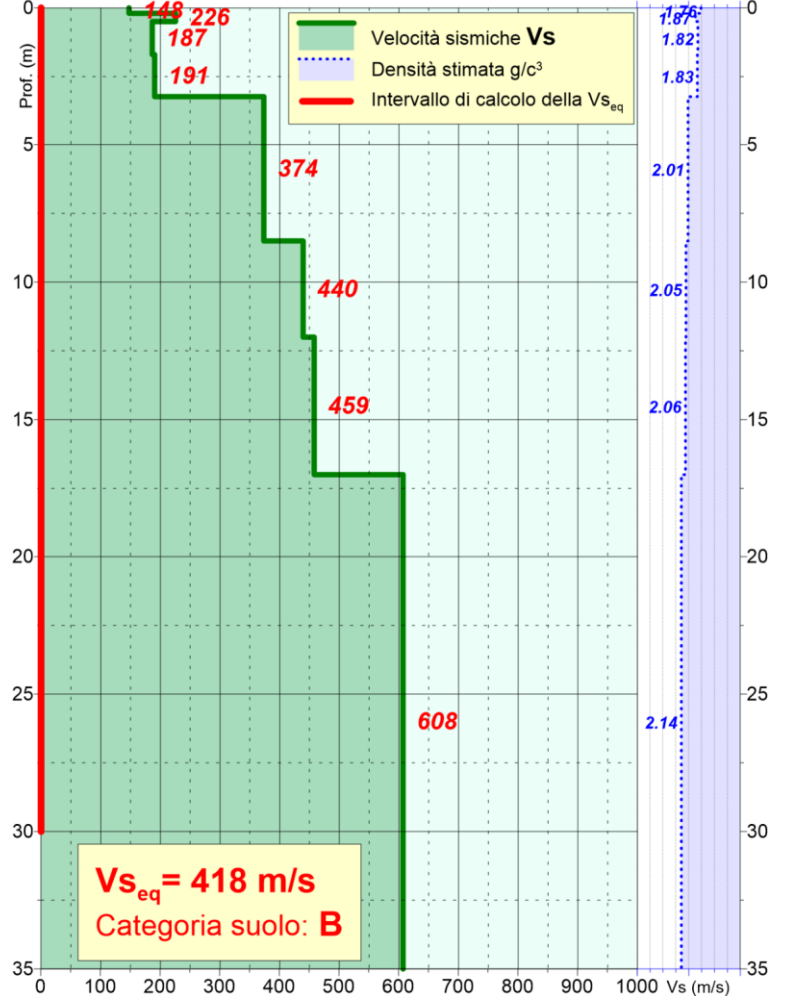
### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



### Ubicazione prova

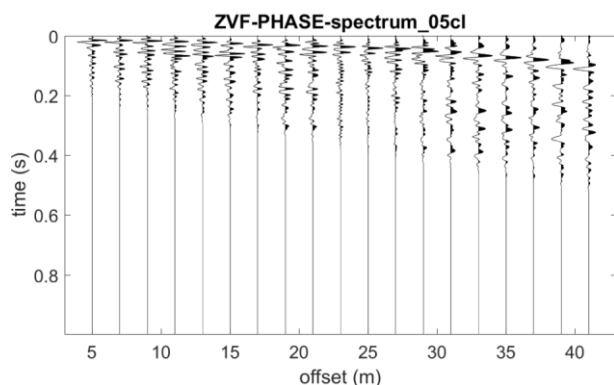
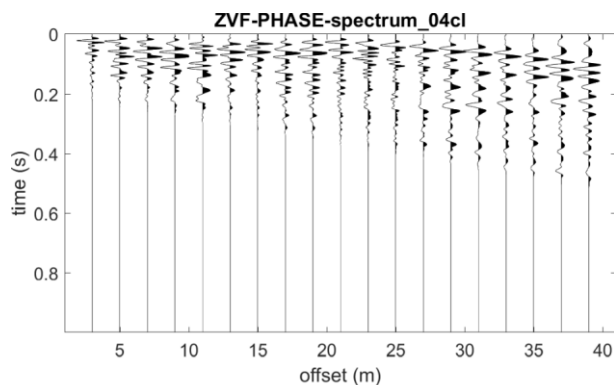


### PROFILO VELOCITÀ Vs

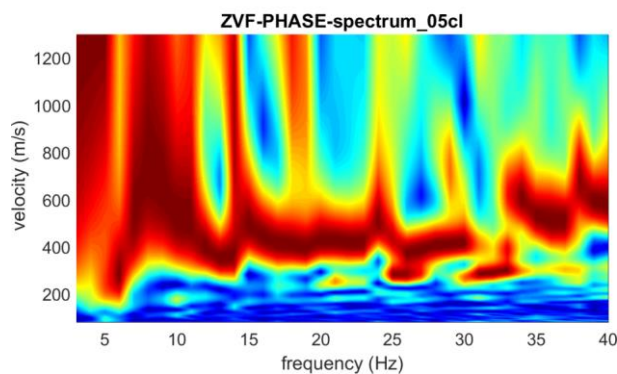
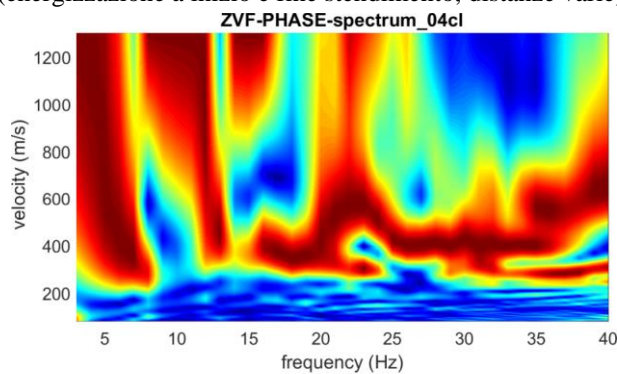




## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R6



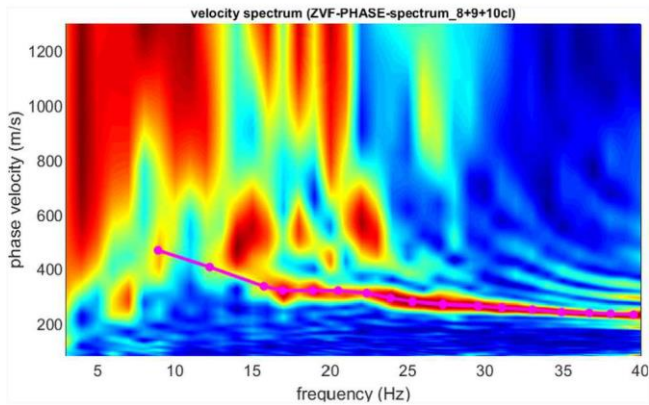
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



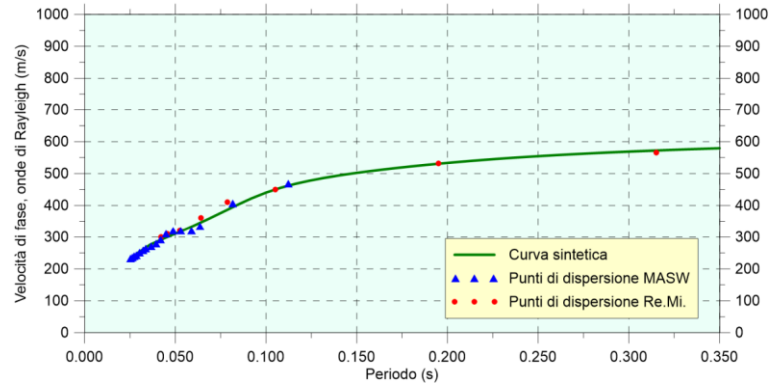
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio.

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R7

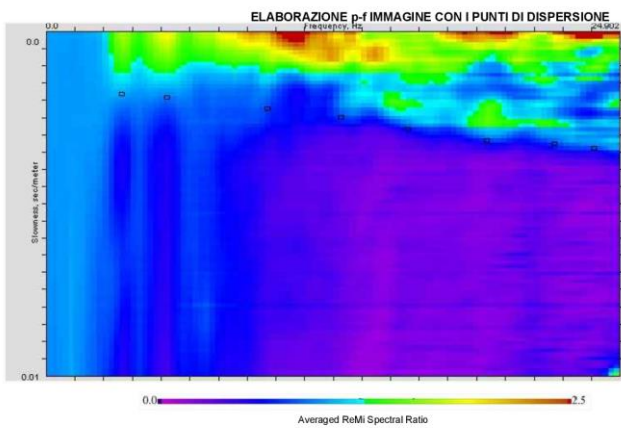
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



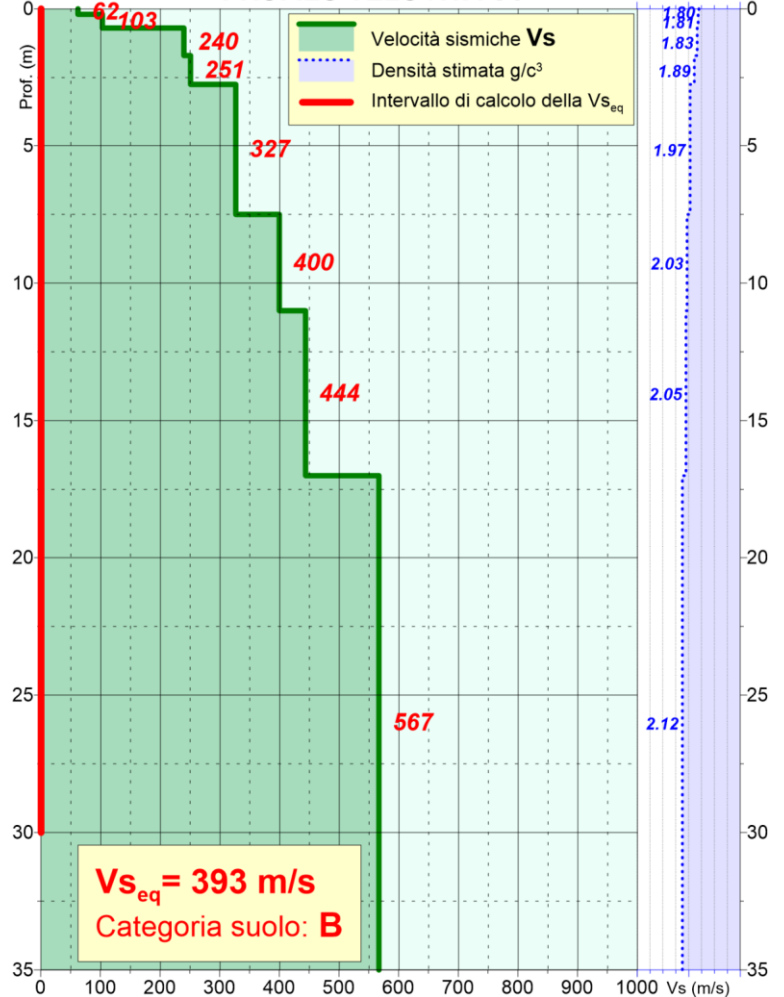
### CURVA DI DISPERSIONE



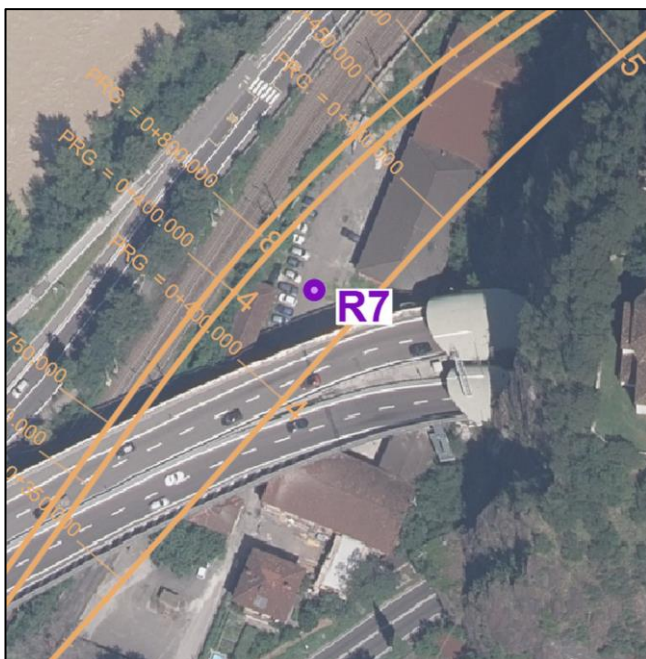
### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



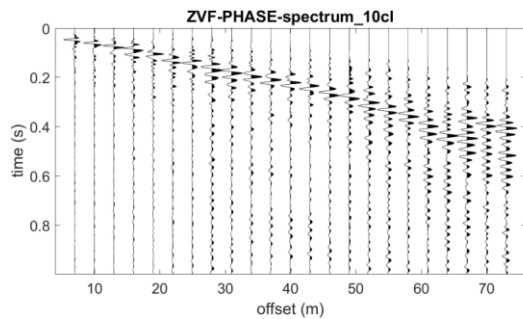
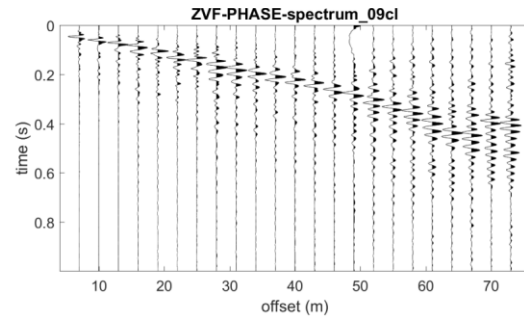
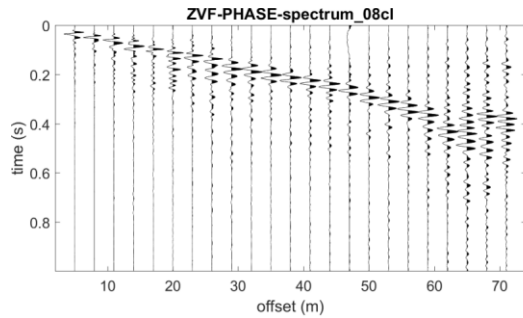
### PROFILO VELOCITÀ Vs



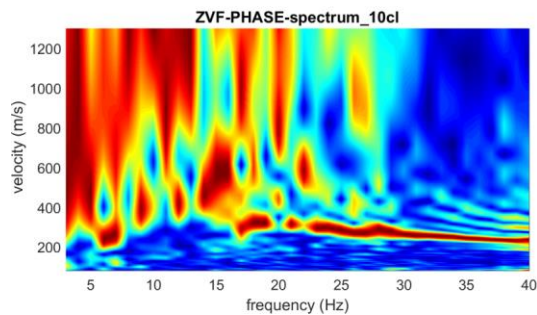
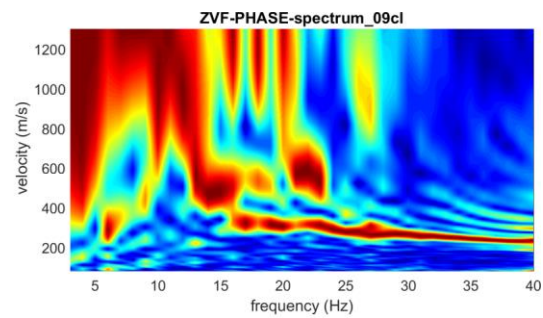
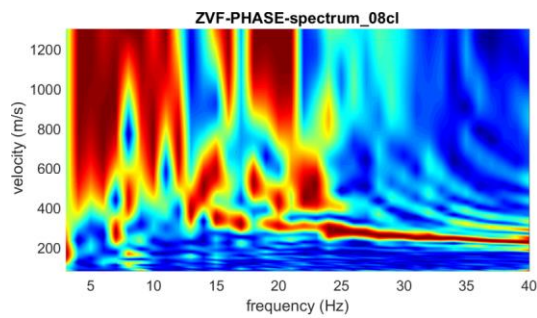
### Ubicazione prova



## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R7



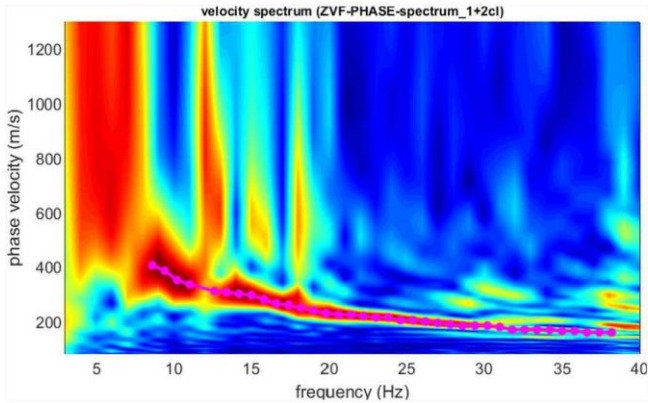
Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio  
(energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



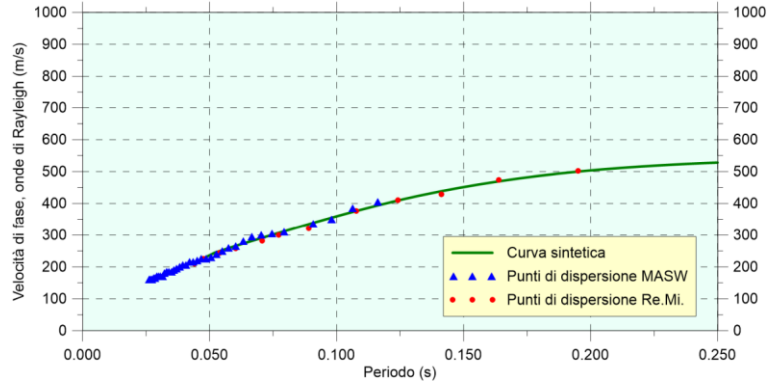
Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio.

## Prova M.A.S.W./Re.Mi. - R8

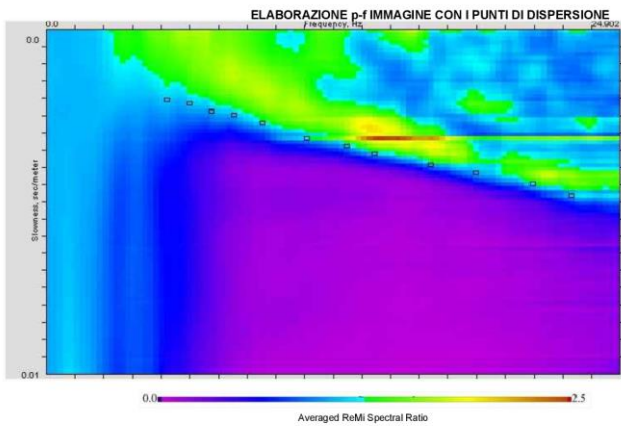
### PROVA M.A.S.W. - Spettro medio



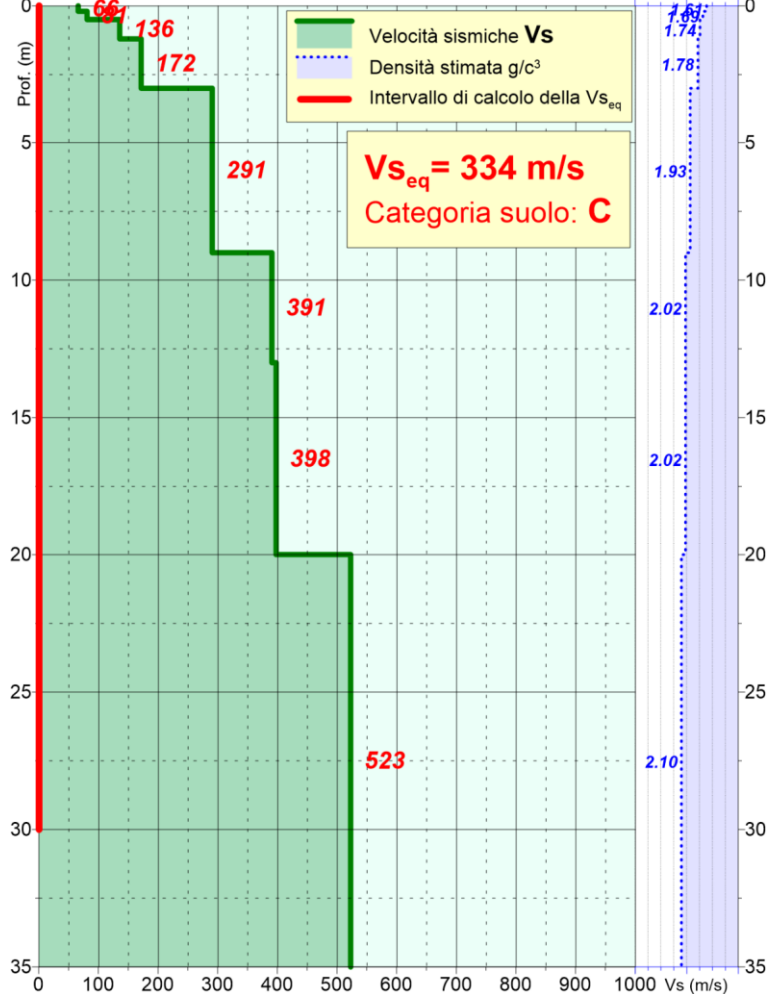
### CURVA DI DISPERSIONE



### PROVA Re.Mi. - Spettro medio



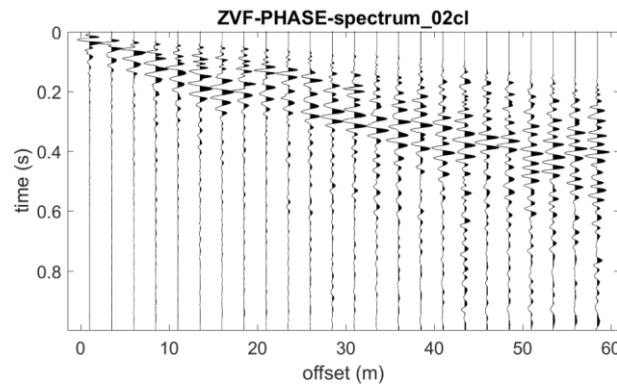
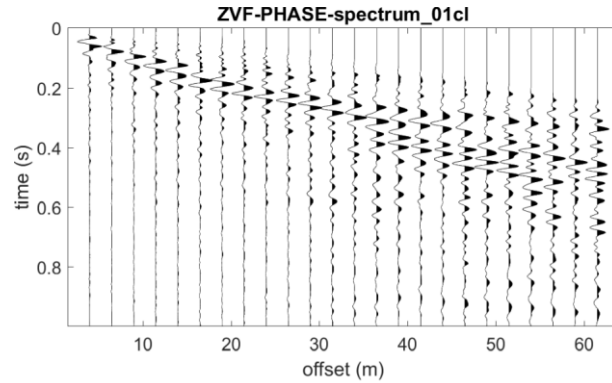
### PROFILO VELOCITÀ Vs



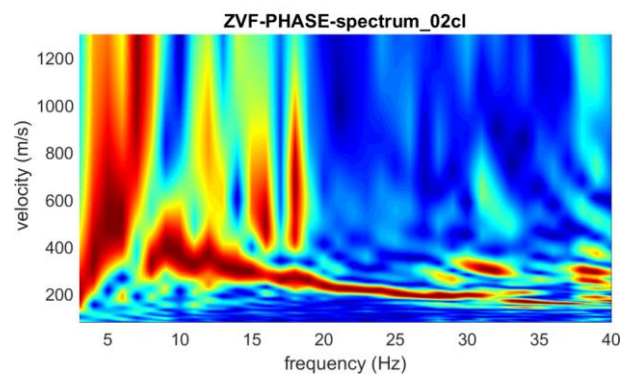
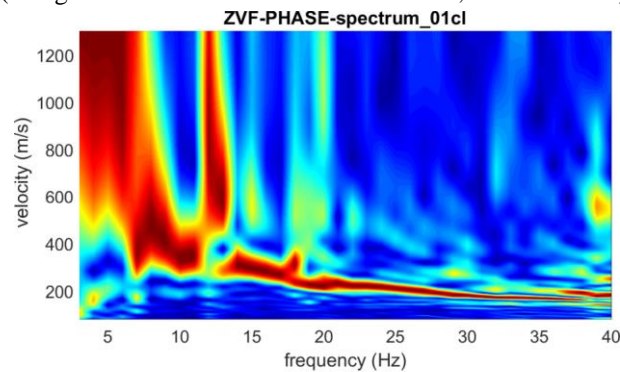
### Ubicazione prova



## Prova M.A.S.W. – Acquisizioni elaborate per R8



Tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio (energizzazione a inizio e fine stendimento, distanze varie).



Spettri delle tracce utilizzate per l'elaborazione dello spettro M.A.S.W. medio

### 3 PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE ( $V_P - V_S$ )

Sono state eseguite n. 3 prospezioni sismiche a rifrazione con registrazione delle velocità delle onde sismiche **P** (onde di compressione) e **P** ed **S** (onde di taglio), denominate da **P1** a **P3**.

I n. 3 profili sismici a rifrazione sono stati costituiti da n. 24 geofoni posizionati ad interdistanza di 3.0 m (P1) e di 5.0 m (P2 e P3). Lo sviluppo lineare in lunghezza di ogni singolo profilo è stato rispettivamente di 69.0 m (P1) e di 115.0 m (P2 e P3). L'ubicazione planimetrica è riportata nell'elaborato **NB1D01D69IGGE0005001A**.

La tabella seguente sintetizza per ogni singola acquisizione il numero di geofoni, interdistanza geofonica, lunghezza del profilo, tipo di acquisizione, tavola planimetrica di riferimento e tavola elaborato.

| Profilo   | N. Geofoni | Interdistanza geofonica (m) | Lunghezza (m) | Tipo di acquisizione |
|-----------|------------|-----------------------------|---------------|----------------------|
| <b>P1</b> | 24         | 3.0                         | 69.0          | Onde P               |
| <b>P2</b> | 24         | 5.0                         | 115.0         | Onde P e S           |
| <b>P3</b> | 24         | 5.0                         | 115.0         | Onde P e S           |

La Fig. 6 sintetizza l'ubicazione delle stese sismiche a rifrazione su foto aerea



Fig. 6 - Ubicazione territoriale indagini sismiche a rifrazione P – S rispetto al tracciato ferroviario in progetto e su foto aerea.

### 3.1 Cenni teorici

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura dei tempi di percorso delle onde sismiche di volume (**P** e **S**) dirette e rifratte che, partendo in un istante noto da una sorgente artificiale di posizione nota, arrivano ai diversi geofoni (sensori collocati a distanze note dalla sorgente). Le onde dirette sono quelle che si propagano direttamente dalla sorgente ai geofoni, senza scendere in profondità, invece, le onde rifratte sono quelle che, dopo essere penetrate in profondità nel sottosuolo, incontrano un rifratore (superficie di aumento brusco della velocità di propagazione) e vengono da esso trasmesse in superficie (a causa del fenomeno dell'incidenza critica dei raggi sismici).

Pertanto, i dati ricavati da tale tipo di indagine consentono la definizione di un modello bidimensionale del sottosuolo. Utilizzando le distanze tra il punto di scoppio e i vari geofoni e i tempi di arrivo del segnale sismico, si ricavano delle curve tempo-distanza (dromocrone). Dalle dromocrone dei primi arrivi (curve che rappresentano la variazione del tempo di percorso in funzione della distanza sorgente - geofono) si risale al modello di velocità sismica del sottosuolo, fino alla base del rifratore più profondo individuato (poiché i raggi sismici che scendono a profondità superiori non ritornano in superficie nei punti in cui sono collocati i geofoni).

### 3.2 Acquisizione dati

Negli stendimenti sono stati utilizzati n.24 geofoni "Geospace" con frequenza propria di 14 Hz per registrazioni **V<sub>p</sub>** e di 10 Hz per registrazioni **V<sub>s</sub>**, posizionati ad una distanza intergeofonica di 3.0 m (P1) e 5.0 (P2 e P3).

In punti predefiniti del profilo, nello specifico ogni 3 geofoni, sono stati creati artificialmente degli impulsi elastici mediante l'utilizzo di una massa battente da 8.0 Kg; per ogni punto di energizzazione, per migliorare il rapporto segnale-rumore, sono state sommate diverse battute. Il "time-break", tempo zero di inizio registrazione, è stato fissato attraverso l'apertura di un circuito elettrico posizionato sulla massa battente.



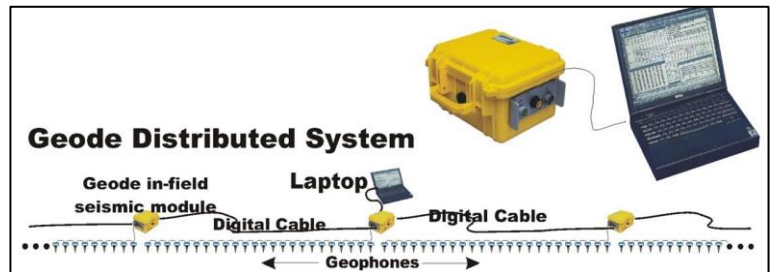
Fig. 7 – Energizzazione con massa battente.



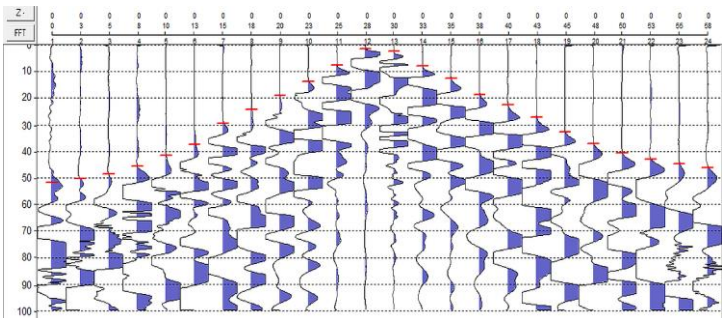
Fig. 8 - Vista panoramica dell'area di registrazione della sismica a rifrazione P3.

La registrazione dei sismogrammi è stata effettuata mediante n.1 sismografo digitale modello "Geode" della Geometrics a 24 canali.

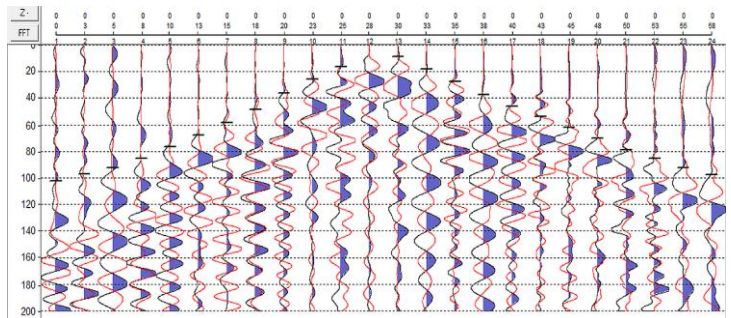
Il tempo di acquisizione è stato di 1 secondo, con un passo di campionamento di 0.125 ms.



Di seguito un esempio di registrazione sismica utilizzata per il picking dei primi arrivi delle onde **P** tagliata a 0.100 secondi e delle onde **S** tagliata 0.200 secondi.



Esempio registrazione onde P.



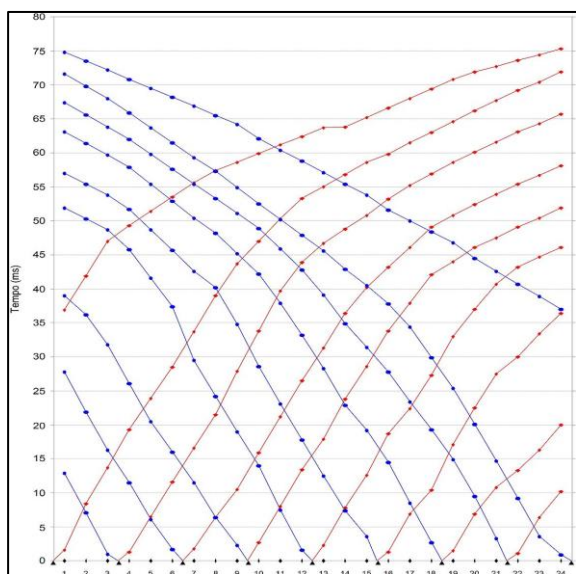
Esempio registrazione onde S (sismogramma con sovrapposizione della battuta SIN e DES).



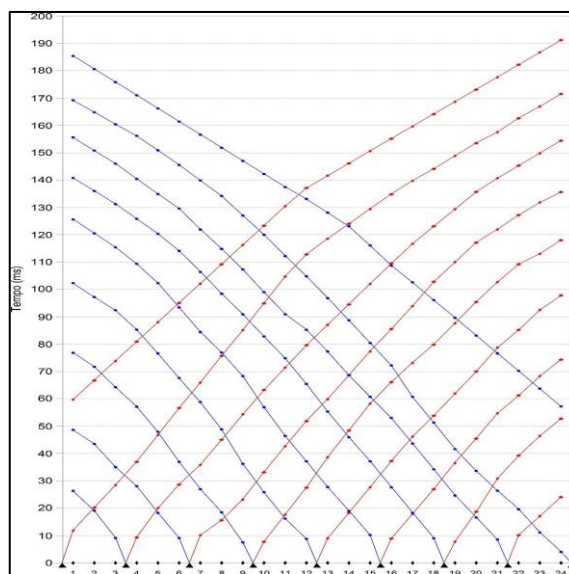
### 3.3 Elaborazione dati

Tramite software dedicato, sono stati letti i tempi di “primo arrivo” degli impulsi sismici ai vari geofoni (raggi diretti e rifratti) e ricostruiti i relativi diagrammi spazio-tempo.

Le dromocrone sono state interpretate applicando algoritmi di calcolo basati sul metodo “time delay” di Hawkins e sul metodo “delle intercette”. I risultati di tale interpretazione hanno consentito la caratterizzazione in termini di velocità sismica dei materiali costituenti il sottosuolo dell’area indagata e la ricostruzione geometrica delle unità sismiche caratterizzanti il sottosuolo stesso.

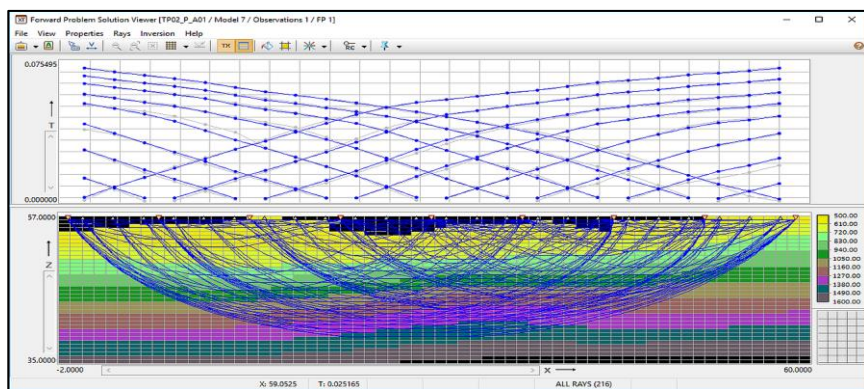


**Esemplare Dromocrone Onde P.**



**Esemplare Dromocrone Onde S.**

Lo schema di velocità ottenuto è quindi stato utilizzato come modello iniziale per l’elaborazione tomografica mediante il programma d’inversione “XTomo-LM3” di Xgeo. La tecnica tomografica analizza



e ricostruisce, tramite i tempi di primo arrivo, i percorsi dei raggi sismici grazie ad un algoritmo di “ray-tracing”. La sezione indagata viene suddivisa in celle di dimensioni regolari in modo che ogni elemento sia attraversato dai molteplici raggi sismici, compresi tra i punti di sparò e i punti di ricezione. La prima fase di “processing” prevede il calcolo, a partire da un semplice modello iniziale, di un modello “diretto”, mentre la successiva inversione è basata su un algoritmo di

ottimizzazione e regolarizzazione. La routine di “inversione” bidimensionale attraverso l’assegnazione di una velocità teorica ad ogni singola cella, per iterazioni successive, ne calcola la velocità “reale”. Le iterazioni vengono ripetute fino al raggiungimento del minor scarto possibile tra i valori di velocità teorica e calcolata.

Il risultato finale dell’elaborazione consiste in una sezione di velocità sismica nella quale ad ogni cella è stato assegnato un valore di velocità. Tali valori vengono infine elaborati graficamente tramite apposite “routine” di “gridding” e “countouring”. Queste sezioni non presentano una distinzione in unità sismiche caratterizzate da precisi valori di velocità sismica, ma da una variazione continua della velocità stessa, risultando particolarmente efficace nella individuazione delle variazioni laterali e/o con maggior gradiente di velocità sismica presenti lungo le sezioni.

### 3.4 Analisi dei risultati

Le sezioni sismiche a rifrazione hanno permesso di ricostruire i rapporti stratigrafici fra le differenti unità sismiche elaborate sulla base delle differenti velocità sismiche, la Fig. 9 mostra le scale colorimetriche utilizzate.

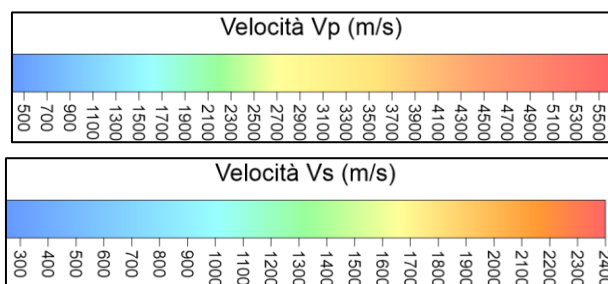


Fig. 9 – Scale colorimetriche di velocità Vp (sopra) e Vs (sotto).

Vengono di seguito inserite gli estratti delle singole sezioni sismiche acquisite con le relative interpretazioni. Nell'elaborato **NB1D01D69IGGE0005001A**, sono inseriti i medesimi elaborati in scala 1:500.

#### 3.4.1 Sezione P1

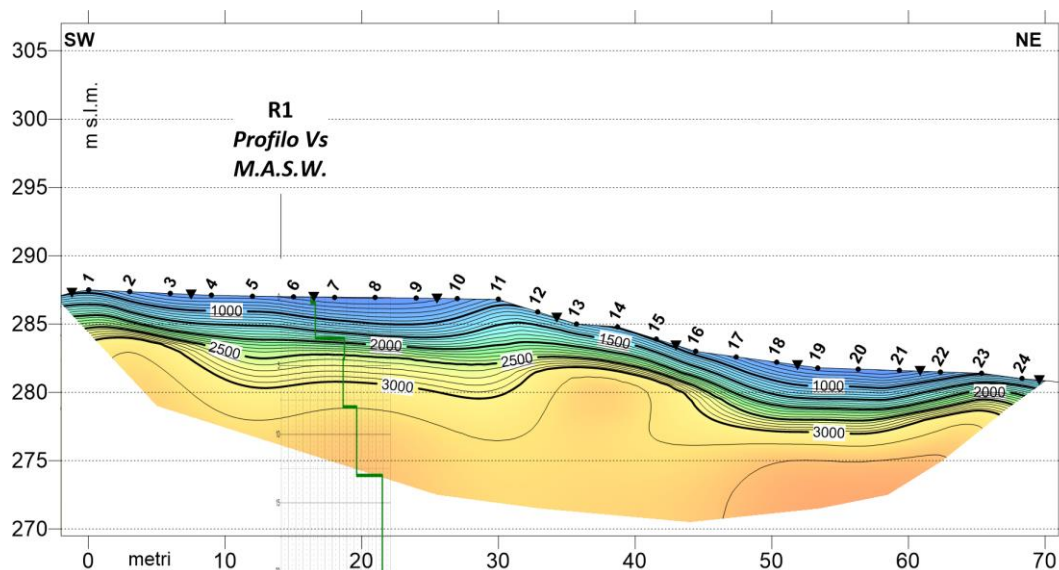


Fig. 10 – Sezione sismica a rifrazione P1 in onde P.

Si osserva un'unità superficiale sviluppata con continuità mediamente per spessori di 2.0/3.0 m caratterizzata da valori delle velocità sismiche Vp inferiori a 2000 m/s (colore blu-azzurro), riferibili a materiali a grado di addensamento crescente con la profondità e associabili alle coltri di copertura sovrastanti l'unità del substrato roccioso sottostante.

Al di sotto si differenzia l'unità inferiore caratterizzata da valori di velocità Vp che superano i 2000 m/s fino a raggiungere rapidamente i 3000 m/s (colore verde-giallo), riferibili al substrato roccioso progressivamente più compatto scendendo in profondità. In particolare nel settore nord-orientale, oltre la progr. 45.0 m, le velocità oltrepassano i 3000 m/s sino a 3200 m/s (colore arancione) definendo un settore caratterizzato da un grado di compattazione del substrato particolarmente elevato.

### 3.4.2 Sezione P2

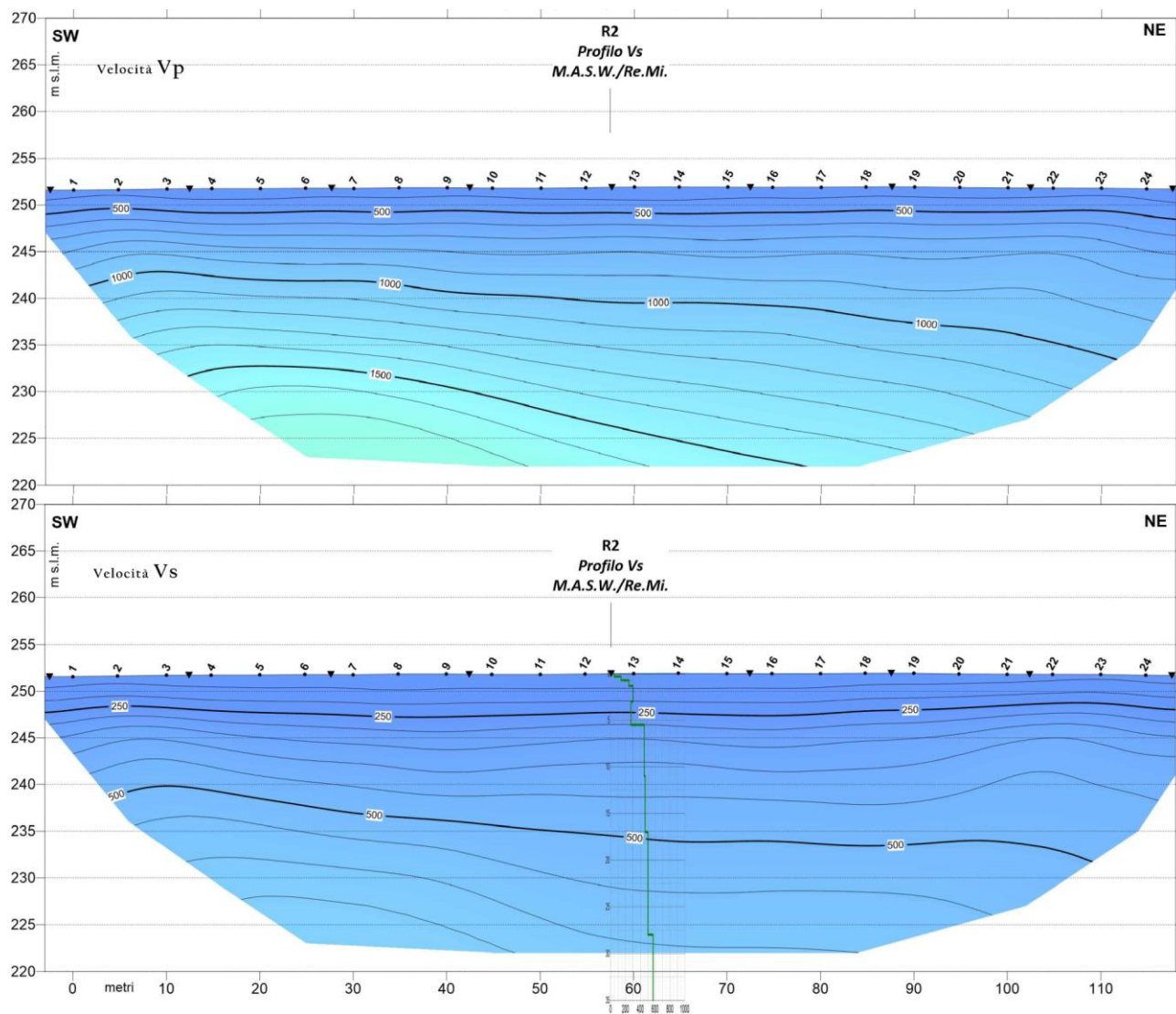


Fig. 11 – Sezione sismica a rifrazione P2 in onde P (sopra) e in onde S (sotto).

In entrambe le sezioni è possibile distinguere un'unità superficiale caratterizzata da velocità  $V_p$  e  $V_s$  rispettivamente inferiori a 1000 m/s e 500 m/s, riferibili a materiali moderatamente addensati. L'unità presenta uno spessore variabile da 10.0 m nel settore sud-occidentale a 16.0 m nel settore nord-orientale.

A maggiori profondità si registra un incremento delle velocità sismiche  $V_p$  fino a 1700 m/s e  $V_s$  sino a 650 m/s indicativi di un incremento del grado di addensamento dei materiali; lo sviluppo di tale unità incrementa progressivamente da sud-ovest a nord-est, con andamento analogo all'unità superficiale.

### 3.4.3 Sezione P3

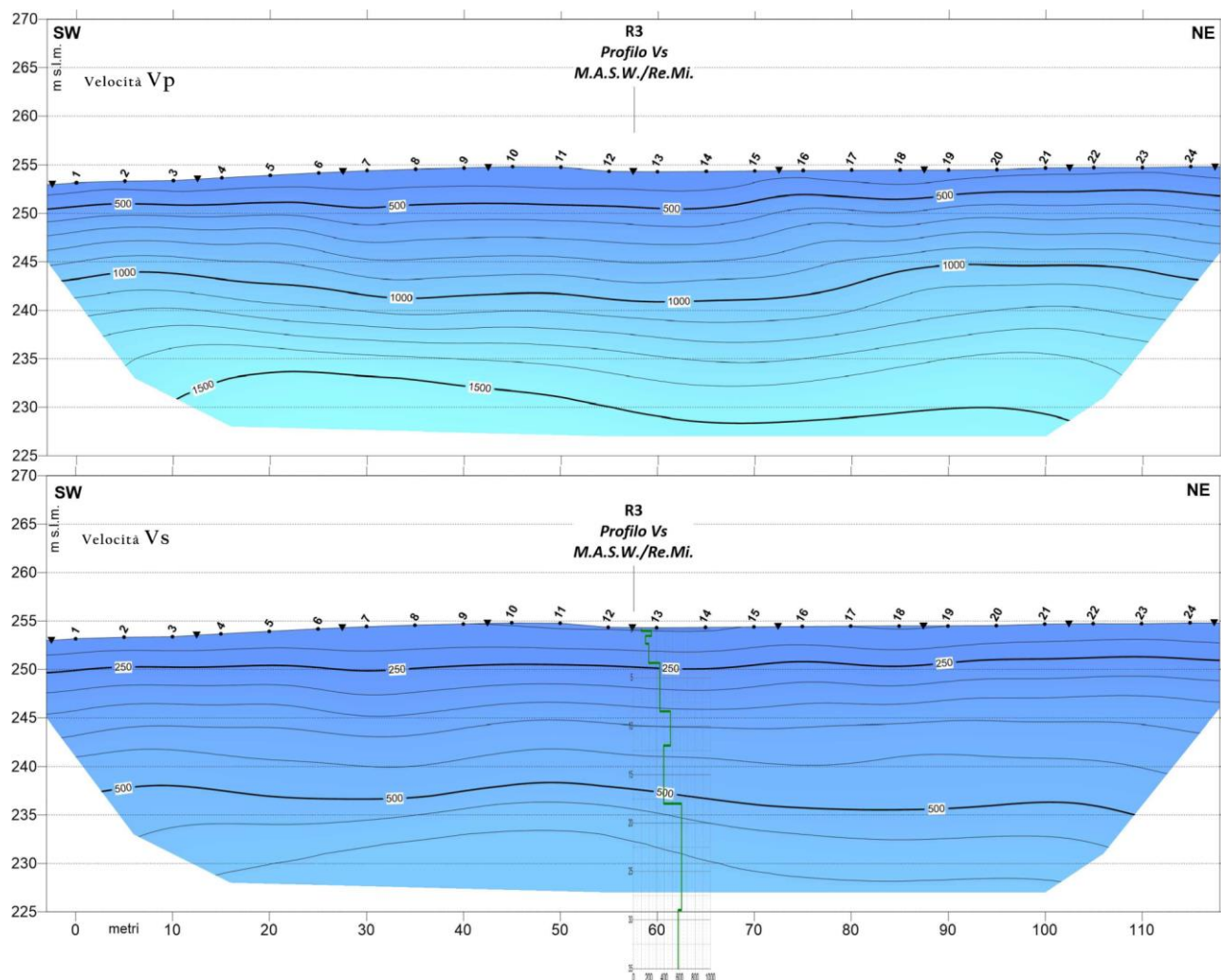


Fig. 12 - Sezione sismica a rifrazione P3 in onde P (sopra) e in onde S (sotto).

In entrambe le sezioni si distingue un'unità superficiale costituita da velocità  $V_p$  e  $V_s$  rispettivamente inferiori a 1000 m/s e 450 m/s mediamente per spessori dell'ordine di 15.0/16.0 m riferibili a materiali moderatamente addensati.

Al di sotto si definisce il passaggio all'unità di fondo più addensata, caratterizzata da un incremento delle velocità sismiche  $V_p$  e  $V_s$  che raggiungono rispettivamente valori di 1500 m/s e i 600 m/s.