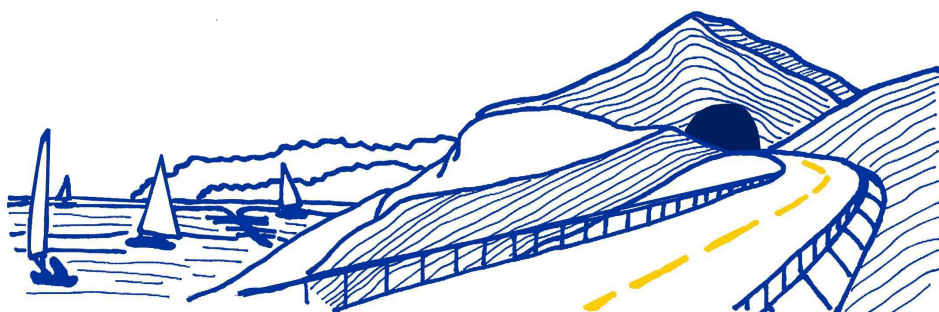


**VARIANTE ALLA S.S.1 AURELIA (AURELIA BIS)  
VIABILITA' DI ACCESSO ALL' HUB PORTUALE DI LA SPEZIA  
INTERCONNESSIONE TRA I CASELLI DELLA A-12 E IL PORTO DI LA SPEZIA  
3° LOTTO TRA FELETTINO E IL RACCORDO AUTOSTRADALE**

**PROGETTO ESECUTIVO DI STRALCIO E COMPLETAMENTO C - 3° TRATTO**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**GE265**



**CESI**  
Shaping a Better Energy Future  
Mandante

**TECHINT**  
Engineering & Construction  
Mandataria

**IGEOG**  
ENGINEERING S.p.A.  
SERVIZI INTEGRATI DI INGEGNERIA  
Mandante

VISTO: IL RESPONSABILE  
DEL PROCEDIMENTO

RESPONSABILE  
DELL'INTEGRAZIONE DELLE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

PROGETTISTA SPECIALISTA

IL COORDINATORE DELLA  
SICUREZZA IN FASE DI  
PROGETTAZIONE

Ing. Fabrizio CARDONE

Ing. Alessandro RODINO

Ing. Francesco CARNEVALE

Dott. Domenico TRIMBOLI

**STUDI, INDAGINI E RELAZIONI SPECIALISTICHE**

Indagini eseguite per il Progetto Esecutivo  
Relazione geofisica

CODICE PROGETTO

NOME FILE

T00GE00GETRE03\_A

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO

LIV. PROG. N. PROG.

DPGE0265 E 20

CODICE  
ELAB.

T00GE00GETRE03

A

-

C					
B					
A	EMISSIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ANAS	Ottobre 2021	-	F. Carnevale	A. Nardi
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

---

INDICE	Pag.
1. PREMESSA .....	1

## 1.Premessa

La presente Relazione viene redatta nell'ambito del Contratto applicativo per la progettazione esecutiva dell'intervento S.S. 1 "Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Aurelia (Aurelia bis), viabilità di accesso all'HUB portuale di La Spezia, interconnessione tra i caselli della A 12 e il porto di La Spezia – 3° lotto tra Felettino ed il raccordo autostradale - Progetto Esecutivo di Stralcio e completamento C – 3° tratto”.

La relazione riporta le informazioni sulle indagini eseguite per il Progetto Esecutivo del 2011.

Le indagini vengono allegare nella stessa forma e con gli stessi contenuti del Progetto Esecutivo originario (elaborato T00GE00GETRE04A del Marzo 2011) senza apportare variazioni ai contenuti di detto elaborato.



# Anas SpA

Compartimento della Viabilità per la Liguria



## COMUNE DELLA SPEZIA

VARIANTE ALLA SS N° 1 AURELIA (AURELIA BIS)  
VIABILITA' DI ACCESSO ALL' HUB PORTUALE DI LA SPEZIA  
INTERCONNESSIONE TRA I CASELLI DELLA A-12 ED IL PORTO DI LA SPEZIA

LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA VARIANTE ALLA S.S. 1 AURELIA - 3° LOTTO  
TRA FELETTINO ED IL RACCORDO AUTOSTRADALE

## PROGETTO ESECUTIVO

-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
A	MARZO.2011	EMISSIONE_PER_CONSEGNA	GIORGI	BALDI	FIMIANI
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

TITOLO ELABORATO:

### 3.STUDI\_INDAGINI\_E\_RELAZIONI\_SPECIALISTICHE

3.1.ELABORATI\_COMUNI  
RELAZIONE\_GEOFISICA

CODICE PROGETTO		CODICE ELABORATO			
L'0'9'0'2'A - E - 1'0'0'1		T'0'0 - G'E'0'0 - G'ET - R'E'0'4 - A			
SCALA:	DATA: MARZO.2011	COMMESSA: C287A	NOME FILE: T00GE00GETRE04_A .DOC		

### RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI IMPRESE

MANDATARIA	MANDANTE	MANDANTE	
PROGETTISTA INDICATO	IL PROGETTISTA	IL GEOLOGO	COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE
 C. LOTTI & ASSOCIATI SOCIETA' DI INGEGNERIA S.p.A. - ROMA			

### 3. STUDI INDAGINI E RELAZIONI SPECIALISTICHE

#### 3.1 ELABORATI COMUNI

#### RELAZIONE GEOFISICA

N° PROGETTO: <b>C287.A</b>		ELABORATO T00GE00GETRE04_A			
0	Marzo 2011	EMISSIONE	Giorgi	Baldi	Finiani
1					
2					
3					
4					
<i>revisione</i>	<i>data</i>	<i>descrizione</i>	<i>redatto</i>	<i>controllato</i>	<i>approvato</i>

## INDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>PROSPEZIONI ESEGUITE.....</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>PERSONALE E STRUMENTAZIONI IMPIEGATE .....</b>	<b>5</b>
4.1	STRUMENTAZIONI ED ATTREZZATURE IMPIEGATE.....	5
4.2	AUTOMEZZI .....	5
4.3	RISORSE COINVOLTE .....	5
4.4	SOFTWARE UTILIZZATI.....	6
<b>5.</b>	<b>SICUREZZA E “QUALITÀ” .....</b>	<b>7</b>
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA ESECUTIVA DEI RILIEVI.....</b>	<b>8</b>
6.1	OPERAZIONI PRELIMINARI.....	8
6.2	PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE.....	8
6.3	PROFILI SISMICI IBRIDI .....	8
6.4	PROVE MASW .....	9
6.5	MISURE HVSR .....	9
6.6	CAROTAGGI SISMICI TIPO DOWN-HOLE.....	10
<b>7.</b>	<b>METODOLOGIA INTERPRETATIVA .....</b>	<b>12</b>
7.1	PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE CON METODOLOGIA TOMOGRAFICA .....	12
7.2	PROFILI SISMICI A RIFLESSIONE.....	14
7.3	PROVE MASW .....	16
7.4	MISURE HVSR .....	19
7.5	CAROTAGGI SISMICI TIPO DOWN-HOLE.....	23
<b>8.</b>	<b>ANALISI DEI RISULTATI.....</b>	<b>26</b>

## 1. INTRODUZIONE

Nel presente rapporto vengono illustrati i risultati dell'indagine sismica eseguita per conto della società ANAS S.p.A. nell'ambito del "Progetto esecutivo della "variante alla S.S. 1 Aurelia (Aurelia bis) – lotto 3 tra Felettino ed il raccordo Autostradale" nel Comune di La Spezia (SP).

L'indagine sismica è stata eseguita allo scopo di fornire elementi utili alla definizione dell'assetto geologico del sottosuolo lungo tutto il tracciato e determinare le caratteristiche dei terreni interessati dalle opere in progetto.

A tale proposito sono stati eseguiti rilievi di superfici articolati:

1. profili sismici a rifrazione
2. profili sismici con tecnica ibrida, riflessione e rifrazione
3. prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves)
4. misure HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios)
5. carotaggi sismici down-hole

Il presente rapporto illustra le metodologie esecutive ed interpretative delle misure sismiche, ed i risultati della prospezione secondo un criterio essenzialmente geofisico.

## 2. FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE

Le finalità della prospezione sismica così possono essere sinteticamente riassunte:

### PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE

- *Ricostruzione dell'assetto geologico e stratigrafico della porzione più superficiale del sottosuolo;*
- *Definire la velocità sismica (onde P) dei vari terreni e rocce presenti nel sottosuolo.*

### PROFILI SISMICI A RIFLESSIONE

- *Ricostruzione dell'assetto geologico e tettonico del sottosuolo.*

### PROVE MASW

- *Ricostruzione sismostratigrafica indiretta delle onde S.*

### MISURE HVSR

- *Definire la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno.*

### PROVE DOWN-HOLE

- *Parametrizzare i terreni secondo il moduli elastici dinamici in riferimento alla velocità sismica delle onde P e onde S.*



### 3. PROSPEZIONI ESEGUITE

I rilievi di superficie si sono stati eseguiti nei giorni compresi tra il 29 settembre e il 3 novembre 2010, mentre le prove down-hole sono state realizzate nei giorni 10 e 11 dicembre 2010.

L'indagine eseguita ha avuto la seguente consistenza:

#### PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE

<b>Profili sismici a rifrazione</b>	<b>Lunghezza totale (m)</b>	<b>Interdistanza geofonica (m)</b>	<b>Prove MASW N°</b>
<b>150</b>	115	5	1
<b>151</b>	235	5	2
<b>152</b>	235	5	2
<b>153</b>	235	5	2
<b>154</b>	115	5	1
<b>250</b>	115	5	1
<b>251</b>	115	5	1
<b>252</b>	115	5	1
<b>253</b>	175	5	2
<b>254</b>	235	5	2
<b>255</b>	235	5	2
<b>256</b>	235	5	2
<b>450</b>	470	10	4
<b>550</b>	115	5	1
<b>650</b>	115	5	1
<b>651</b>	115	5	1
<b>652</b>	235	5	2
<b>653</b>	670	5	6

#### PROFILI SISMICI IBRIDI

<b>Profili sismici ibridi</b>	<b>Lunghezza totale (m)</b>	<b>Profilo composto da geofoni attivi n°</b>	<b>CDP n°</b>	<b>Prove MASW n°</b>
<b>170</b>	1.000	84	202	4
<b>370</b>	850	84	182	2
<b>570</b>	950	96	195	2

#### MISURE HVSR

<b>Misure HVSR</b>	<b>Lunghezza registrazione (s)</b>	<b>Registrazioni N°</b>	<b>Accelerometri attivi N°</b>	<b>Sismometri attivi N°</b>
<b>101</b>	960	1	3	3
<b>170</b>	960	3	3	3

<b>201</b>	960	1	3	3
<b>203</b>	960	1	3	3
<b>205</b>	960	1	3	3
<b>252</b>	960	1	3	3
<b>254</b>	960	1	3	3
<b>401</b>	960	1	3	3
<b>402</b>	960	1	3	3
<b>403</b>	960	1	3	3
<b>504</b>	960	1	3	3
<b>505</b>	960	1	3	3
<b>609</b>	960	1	3	3
<b>602</b>	960	1	3	3
<b>653</b>	960	2	3	3

#### CAROTAGGI SISMICI DOWN-HOLE

<b>Down-hole</b>	Profondità (m)	Interdistanza misure (m)
<b>101</b>	22	1.0
<b>203</b>	24	1.0
<b>205</b>	39	1.0
<b>401</b>	39	1.0
<b>402</b>	38	1.0
<b>505</b>	28	1.0
<b>602</b>	23	1.0
<b>609</b>	36	1.0

Complessivamente sono stati eseguiti 3.880 metri di profili sismici a rifrazione, 2.800 metri di profili sismici ibridi (riflessione e rifrazione), 42 prove MASW, 273 metri di carotaggio sismico in foro tipo down-hole e 19 misure HVRS .

#### 4. PERSONALE E STRUMENTAZIONI IMPIEGATE

##### 4.1 STRUMENTAZIONI ED ATTREZZATURE IMPIEGATE

Per l'esecuzione delle misure sperimentali sono state utilizzate le seguenti strumentazione ed attrezzature:

n°	Strumentazione per i rilievi topografici
1	Sistema GPS a doppia antenna – ASHTECH

n°	Strumentazione per la sismica a riflessione, rifrazione MASW e prove down-hole	COD. IDENT.
2	Sismografi GEOMETRICS “GEODE” 24 ch - 24 bit EG&G GEOMETRICS - USA	SGG-SI-52 SGG-SI-53
1	Computer portatile HP per registrazione dei dati di campagna;	
48	Stringhe di geofoni con 4 geofoni cadauna e frequenza pari a 28 Hz	SGG-SI-03
48	Geofoni con frequenza pari a 14 Hz	SGG-SI-02
2	Cavi di collegamento per geofoni con 24 prese intervallate ogni 5 metri	SGG-SI-39h SGG-SI-39i
4	Cavi di collegamento per geofoni con 12 prese intervallate ogni 10 metri	SGG-SI-52b SGG-SI-52b
2	Prolunghes per collegamento geode	SGG-SI-39g
1	Massa battente leggera ( 5 Kg)	
1	Energizzatore sismico Isotta (ESI)	SGG-SI-67
	Linea per trasmissione “trigger”	
	Cavi multipolari di raccordo	
4	Ricetrasmittenti VHF	

n°	Strumentazione per misure HVSR	COD. IDENT.
1	tromografo MICROMED SpA “TROMINO ENGY PLUS”	SGG-SI-65

Tutti gli strumenti di misura impiegati, in accordo con il calendario di taratura afferente al “sistema di qualità” in uso presso questo studio, sono tarati presso il LABORATORIO CETACE di Calenzano, afferente alla CESVIT S.p.A. ed accreditato SIT (Servizio di Taratura in Italia).

##### 4.2 AUTOMEZZI

- Fuoristrada Nissan pick-up;

##### 4.3 RISORSE COINVOLTE

Per l'esecuzione dell'incarico, sono state coinvolte le seguenti risorse:

**COORDINAMENTO GENERALE:**

- Responsabile dell'incarico ANTONIO MARIA BALDI
- Responsabile sicurezza MASSIMO SCHEGGI
- Responsabile sicurezza in cantiere FILIPPO GIORGI
- Responsabile Assicurazione Qualità per la prospezione ANTONIO MARIA BALDI

**ACQUISIZIONE DATI SISMICI**

- Responsabile della prospezione sismica FILIPPO GIORGI
- Progettazione rilievo a riflessione FRANCESCO BIANCHI
- Progettazione rilievo a rifrazione ANTONIO MARIA BALDI

**INTERPRETAZIONE SISMICA A RIFLESSIONE**

- Interpretazione rilievo sismico a riflessione FRANCESCO BIANCHI
- Editing FILIPPO GIORGI

**INTERPRETAZIONE SISMICA A RIFRAZIONE**

- Interpretazione rilievo sismico a rifrazione FILIPPO GIORGI
- Editing FILIPPO GIORGI

**ELABORAZIONE COMPLESSIVA**

- Responsabile dell'interpretazione e verifica dei dati ANTONIO MARIA BALDI
- Gruppo di elaborazione FILIPPO GIORGI  
FRANCESCO BIANCHI
- Editing FILIPPO GIORGI

#### 4.4 SOFTWARE UTILIZZATI

<b>Software per interpretazione dati sismici</b>		
Multiple Geode Software	GEOMETRICS – USA	Sistema di gestione del sismografo GEODE, acquisizione e registrazione dei dati sismici
Vista 1.1	GEDCO – USA	Sismica a riflessione
SeisOptPro v 2.5	Optim Software – USA	Sismica a rifrazione tomografica
SeisOptPicker	Optim Software – USA	Lettura tempi rifrazione
WinMASW pro v.4.1	Eliosoft - ITA	Interpretazione MASW
Grilla	Micromed - ITA	Interpretazione prove HVSR
<b>Software per editing</b>		
Word 2003	Microsoft	Editor di testi
Excel 2003	Microsoft	Foglio di calcolo
Surfer 8	Golden Software	Campiture, curve di livello,
Grapher	Golden Software	Costruzione grafici
Autocad 2010	Autodesk	Editing disegni
Corel Draw 9	Corel	Editing disegni

## 5. SICUREZZA E “QUALITÀ”

I lavori sono stati eseguiti in conformità al contratto e nello specifico, sono stati prodotti i relativi documenti.

### SICUREZZA DEL CANTIERE GEOFISICO

Preliminarmente all’inizio dei lavori per la prospezione geofisica gli operatori sono stati formati ed informati sui rischi della commessa in base a quanto previsto dal D.L. 9 Aprile 2008 n° 81 e s.m.

### SISTEMA QUALITÀ

In relazione alle “procedure di qualità” la prospezione geofisica è stata eseguita in riferimento alle specifiche SP0302 – SP0901 e all’istruzione IS09001

Per la registrazione delle varie attività sono stati utilizzati i moduli del sistema qualità in uso presso questo studio.

## 6. METODOLOGIA ESECUTIVA DEI RILIEVI

### 6.1 OPERAZIONI PRELIMINARI

La prima fase, preliminarmente all'esecuzione dei profili sismici ha previsto il tracciamento delle linee con sistemi di posizionamento a terra (Sistema a doppia antenna – ASHTECH), e si è provveduto al disboscamento e al decespugliamento lungo le direttrici individuate.

### 6.2 PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE

Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito attraverso la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di compressione (Vp), secondo fasi d'acquisizione differenti e determinare le geometrie sepolte (spessori e superfici di contatto) dei sismostrati individuati.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, delle sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori a componente verticale (geofoni).

In riferimento alle specifiche tecniche consegnateci dalla Committenza i profili sismici a rifrazione eseguiti presentano le seguenti caratteristiche:

- *Numero geofoni: 24;*
- *Spaziatura dei geofoni: 5 metri;*
- *Frequenza geofoni: 4,5 Hz;*
- *Spaziatura dei tiri: 20 metri;*
- *Sorgente: massa battente da 5 kg*

Inoltre il profilo 450 è stato realizzato con le seguenti caratteristiche:

- *Numero geofoni: 48;*
- *Spaziatura dei geofoni: 10 metri;*
- *Frequenza geofoni: 4,5 Hz;*
- *Spaziatura dei tiri: 40 metri;*
- *Sorgente: Energizzatore sismico Isotta (ESI)*

### 6.3 PROFILI SISMICI IBRIDI

Come definito dalla Committenza, i profili 170a, 170b, 370, 570a e 570b sono stati eseguiti con tecnica ibrida, cioè sono stati acquisiti sia con metodologia a riflessione che con metodologia a rifrazione. Su questi profili il rilievo a rifrazione ha utilizzato le stesse basi disposte per il rilievo a riflessione disponendo solo la sostituzione dei geofoni sullo stesso allineamento dei cavi e procedendo successivamente all'acquisizione del segnale.

Nello specifico le caratteristiche del rilievo sono state le seguenti:

#### Rilievo sismico a riflessione

- Gruppi di geofoni attivi simultaneamente: n° 48
- Gruppi composti da 4 geofoni in serie;
- N°max di geofoni utilizzati 192;
- Spaziatura tra i gruppi di geofoni: 10 metri;
- Spaziatura dei tiri : 20 metri;
- Sorgente sismica: Energizzatore sismico Isotta (ESI) ;
- Campionamento: 0.25 ms;
- Finestra registrazione: 1 s.

#### Rilievo sismico a rifrazione

- Numero geofoni: 48;
- Spaziatura dei geofoni: 10 metri;
- Frequenza geofoni: 4,5 Hz;
- Spaziatura dei tiri: 40 metri;
- Sorgente: Energizzatore sismico Isotta (ESI)

## 6.4 PROVE MASW

Lo scopo della prova MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) è quello di ricostruire il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh con un successivo processo d'inversione, attraverso il quale è fornita una stima indiretta della distribuzione delle Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova consiste nel produrre in un punto sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale in un determinato campo di frequenze e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo da 4,5 Hz) disposta sul terreno con array lineare da 24 geofoni.

## 6.5 MISURE HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale.

La misura della funzione H/V è stata eseguita tramite l'acquisizioni del rumore sismico ambientale per un tempo di 16 minuti; tale durata ha lo scopo di garantire la misura del campo di rumore generato da una molteplicità di sorgenti dalle diverse direzioni dello spazio.

Le misure sono state effettuate utilizzando il sistema di acquisizione tri-direzionale TROMINO ENGY PLUS (specifiche tecniche su [www.tromino.it](http://www.tromino.it)), strumento appositamente disegnato per questo scopo.

Il tromografo digitale viene posizionato sulla superficie del terreno appositamente ripulita e compattata, e messo in piano tramite una bolla sferica presente sullo strumento stesso

## 6.6 CAROTAGGI SISMICI TIPO DOWN-HOLE

Lo scopo della prova down-hole consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde  $S_H$ ), calcolando il tempo ad esse necessario per raggiungere il geofono ricevitore (all'interno del foro di sondaggio) dalla zona sorgente (su piano campagna a distanza nota dal foro). Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno d'ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo.

La prova consiste nel produrre in superficie sollecitazioni verticali per la generazione di onde di compressione P, ed orizzontali per la generazione di onde di taglio polarizzate orizzontalmente  $S_H$  e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto da una terna di geofoni, ancorati a profondità nota nel foro di sondaggio (fig. 6.6.1).

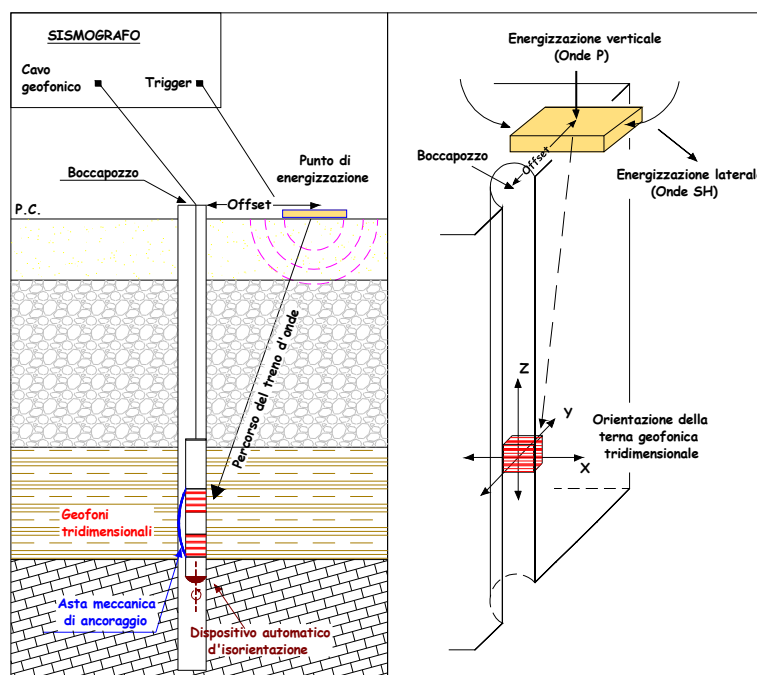


Figura 6.6.1 - Rappresentazione schematica di un carotaggio sismico down-hole.

Conosciuta la distanza tra la sorgente ed i ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P e  $S_H$ ) in corrispondenza della verticale di misura.



Per generare le onde di compressione P è stata utilizzata una massa battente da 5 kg. Per le onde  $S_H$  è stato invece utilizzato, come sorgente, un apposito dispositivo, la cui forma permette colpi laterali su entrambi i lati. Tale dispositivo viene gravato con sacchi di sabbia, al fine di assicurare una perfetta aderenza con il terreno, così da evitare ogni tipo di dispersione dell'energia prodotta. Il sistema energizzante adottato è in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza, con forme d'onda ripetibili e direzionali, vale a dire con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali, ed eventualmente anche verticali.

Come sistema di ricezione è stata utilizzata una sonda meccanizzata al cui interno sono alloggiati tre ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un geofono. Il geofono verticale è orientato secondo la lunghezza della sonda, mentre i trasduttori orizzontali, orientabili automaticamente secondo il Nord geografico, sono disposti in direzioni ad essa perpendicolare (N-S ed E-W). I trasduttori hanno una frequenza propria di 15 Hz ed una sensibilità tale da poter ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La sonda possiede un'asta meccanica motorizzata che garantisce l'aderenza tra i ricevitori e le pareti del rivestimento. Il sistema d'acquisizione dati è di tipo multicanale ed è in grado di registrare su ciascun canale in modo digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 24 bit.

La prova si è sviluppata secondo le seguenti fasi:

1. Dopo ad aver predisposto un opportuno piano d'appoggio, il dispositivo sorgente è stato collocato sulla superficie in prossimità del foro ad una distanza di 2,5 m ed orientato con direzione Est-Ovest perpendicolarmente al raggio condotto dal foro.
2. Il sistema, costituito dai tre ricevitori è stato calato a fondo foro collegandolo alla superficie mediante un sistema che ne consente l'orientamento assoluto dalla superficie.
3. Dopo aver ancorato la sonda geofonica alle pareti del rivestimento, si è proceduto con le fasi di orientamento dei trasduttori.
4. È stato quindi attivato il dispositivo sorgente, producendo una sollecitazione che, attivando il trigger (dispositivo "hammer-switch"), si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo compressionale; di seguito (con energizzazione separata e distinta) sono state generate vibrazioni di tipo  $S_H$ , dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Per l'ottenimento di una buona qualità dei dati, è necessario produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sommare le registrazioni d'ogni singolo arrivo, così da individuare in modo migliore l'istante di primo arrivo (metodo cross-over).
5. Campionamento del rumore ambientale.
6. La prova è stata quindi ripetuta con interdistanza fra le misure pari a 1,0 m per tutto il tratto di sondaggio.

## 7. METODOLOGIA INTERPRETATIVA

### 7.1 PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE CON METODOLOGIA TOMOGRAFICA

Lo studio del sottosuolo mediante metodologia sismica a rifrazione permette di fornire un modello bidimensionale in funzione della velocità sismica. Infatti dalla superficie sono state generate delle onde sismiche compressionali, in maniera tale da misurare il tempo occorrente all'onda sismica per raggiungere il geofono.

I tempi di transito sono legate alle caratteristiche meccaniche delle rocce: tanto più una roccia è tenace e maggiore risulterà la velocità sismica del litotipo interessato dal passaggio dell'onda sismica.

La propagazione delle onde sismiche attraverso i diversi strati del terreno è basata sulla teoria dell'elasticità; le rocce attraverso cui si propaga l'energia sono considerate come mezzi perfettamente elastici. Quindi da un punto di vista teorico la propagazione delle onde sismiche può essere associata alla propagazione delle onde attraverso un mezzo secondo le leggi dell'ottica. Il principio fondamentale è quello di Huygens, secondo il quale la propagazione avviene per fronti d'onda. Quando un fronte d'onda, in questo caso sismica, incontra una variazione delle proprietà elastiche del mezzo (diverso strato del sottosuolo) e siamo quindi in corrispondenza di una superficie di discontinuità, parte dell'onda viene riflessa e parte viene rifratta nello strato sottostante. Tali raggi vengono rifratti e riflessi con angoli che sono legati all'angolo di incidenza e alla diversa tenacia dei due mezzi: tali valori e geometrie sono regolati dalla legge di Snell.

Secondo questi concetti e facendo dei semplici calcoli si deduce che con la sismica a rifrazione non vengono evidenziati strati di terreno meno tenaci quindi con velocità sismica più bassa che si trovano compresi tra strati di terreno più tenaci e quindi con velocità sismica maggiore.

Inizialmente l'elaborazione delle tracce sismiche è consistita in un'analisi spettrale dell'intero set di dati raccolti in modo da verificare la distribuzione in frequenza del segnale sismico. Tale procedura ha permesso quindi di definire i suddetti valori per i filtri passa banda utili al conseguimento di una migliore qualità e leggibilità dei dati sismici, soprattutto in riferimento a quelli derivati dalle energizzazioni lontane.

I tempi di primo arrivo delle onde P poi sono stati individuati attraverso uno specifico programma di picking che consente di apprezzare variazioni di tempo nell'ordine di  $0,1 \times 10^{-3}$  sec. Successivamente i tempi letti sono stati tabellati in modo da poterli riportare su di un grafico spazio-tempo, denominato dromocrona, dove sull'asse delle ascisse è ricostruita la geometria dei geofoni e dei punti di scoppio secondo le reciproche distanze, e sull'asse delle ordinate sono riportati i tempi di transito dai vari punti di scoppio ai singoli geofoni.

L'interpretazione tomografica dei profili sismici è stata eseguita tramite lo specifico programma SEISOPT@PRO5 che prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle, di forma quadrata o rettangolare secondo una maglia prefissata, con l'attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica. Successivamente, il programma torna a calcolare il tempo di transito dell'onda sismica attraverso le maglie del modello e confronta tale valore con quello sperimentale, impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati ed effettuando un controllo sul tragitto dei raggi sismici. Per successive

iterazioni si perviene a dei valori di velocità sismica da associare alle diverse celle che soddisfino contemporaneamente più raggi sismici.

L'interpretazione dei dati, che viene sviluppata effettuando un'analisi di modellazione del sottosuolo su base anisotropia attraverso la suddivisione dello spazio in celle regolari, fornisce, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. e algoritmi di ricostruzione tomografica, il campo delle velocità sismiche del sottosuolo. Nel caso specifico per i modelli tomografici finali è stata sempre utilizzata una maglia quadrata di lato di dimensione metà dell'interdistanza geofonica (interdistanza geofonica 10 m, lato cella 5 m; interdistanza geofonica 5 m, lato cella 2,5 m) e nella restituzione i valori di velocità sismica attribuiti alle singole celle sono stati rappresentati mediante una scala colorimetrica da 300 a 3000 m/s.

Per la determinazione del modello di interpretazione il programma SEISOPTPRO v5.0 utilizza il metodo di inversione controllato "Monte Carlo" basato su una modellizzazione avanzata, ove i modelli derivati dagli algoritmi propri del programma vengono accettati o rifiutati basandosi su un criterio statistico.

L'accuratezza del modello inverso è definita dallo scarto quadratico medio calcolato tra i tempi di primo arrivo sperimentali ed i calcolati.

Il software di interpretazione (SeisOpt Pro ver. 5.0) restituisce i risultati in termini di affidabilità statistica, ove per *precisione* si intende la sommatoria degli scarti al quadrato tra i valori sperimentali e quelli calcolati fratto il numero dei punti di misura; per *iterazioni* il numero di volte che il programma ha eseguito la verifica del modello totale.

In particolare, i risultati in termine d'affidabilità statistica dell'interpretazione operata, risultano essere i seguenti:

<b>profilo sismico</b>	<b>precisione media (s<sup>2</sup>)</b>	<b>Iterazioni (n°)</b>
<b>150</b>	7,9 e <sup>-006</sup>	53.385
<b>151</b>	1,3 e <sup>-005</sup>	78.083
<b>152</b>	9,9 e <sup>-006</sup>	51.320
<b>153</b>	6,0 e <sup>-005</sup>	191.710
<b>154</b>	5,3 e <sup>-006</sup>	62.959
<b>250</b>	7,1 e <sup>-006</sup>	81.322
<b>251</b>	6,0 e <sup>-006</sup>	53.478
<b>252</b>	7,4 e <sup>-006</sup>	141.082
<b>253</b>	7,5 e <sup>-006</sup>	75.921
<b>254</b>	9,3 e <sup>-006</sup>	69.800
<b>255</b>	6,8 e <sup>-006</sup>	234.056
<b>256</b>	1,0 e <sup>-005</sup>	97.240
<b>450</b>	1,6 e <sup>-005</sup>	141.644
<b>550</b>	3,5 e <sup>-006</sup>	80.259
<b>650</b>	9,0 e <sup>-006</sup>	44.983
<b>651</b>	6,1 e <sup>-006</sup>	74.697
<b>652</b>	5,5 e <sup>-006</sup>	86.004
<b>653a</b>	6,8 e <sup>-006</sup>	72.413
<b>653b</b>	5,5 e <sup>-006</sup>	116.231
<b>653c</b>	3,1 e <sup>-006</sup>	147.605

profilo sismico	precisione media (s <sup>2</sup> )	Iterazioni (n°)
<b>653d</b>	8,1 e <sup>-006</sup>	73.650
<b>170a</b>	3,2 e <sup>-005</sup>	177.553
<b>170b</b>	3,3 e <sup>-005</sup>	83.783
<b>370</b>	2,7 e <sup>-005</sup>	214.728
<b>570a</b>	1,8 e <sup>-005</sup>	77.667
<b>570b</b>	5,4 e <sup>-005</sup>	57.237

## 7.2 PROFILI SISMICI A RIFLESSIONE

La sequenza di elaborazione utilizza le operazioni previste dalle specifiche tecniche concordate con la Committenza. In particolare sono state eseguite le correzioni statiche legate alle caratteristiche di spessore e velocità dello strato aerato (“piccole statiche”), ma si è anche proceduto a riportare i dati ad un livello (“riduzione al *datum*”) di riferimento. Inoltre il filtro FK è stato utilizzato con molta parsimonia, dal momento che disturbi coerenti, come le onde superficiali (“*ground-roll*”), erano già stati attenuati dal tipo di energizzazione e di stendimento utilizzati.

E’ normale procedura comunque scegliere la sequenza di processing in funzione delle caratteristiche dei dati acquisiti ed in funzione degli elementi che si intende evidenziare.

La normale sequenza di elaborazione dati si divide in tre fasi:

- 1) *Pre-processing*, per la preparazione dei dati;
- 2) *Processing nel dominio dei tiri*, per la riduzione dei disturbi;
- 3) *Processing nel dominio delle C.D.P.*, per arrivare ad una sola traccia per famiglia.

Nella prima fase (*pre-processing*) i dati vengono trasformati dal formato SEG2 in formato standard PC-SEG2, usato normalmente in sismica a riflessione, nello specifico si è operato nel modo seguente :

- trasferimento dati su PC;
- trasformazione di formato da SEG2 a standard PC-SEG2;
- creazione *header* con informazioni sulla geometria di acquisizione;
- *muting* dei primi arrivi;

La seconda fase (*processing nel dominio dei tiri*) è un’elaborazione che mira ad elevare la qualità delle singole tracce. nello specifico si è operato nel modo seguente:

- Analisi spettrale
- Filtraggio passabanda 0/5 – 450/255 Hz
- Ricampionamento da 0.25 a 0.5 msec
- Filtraggio dominio F-K
- Deconvoluzione “*spiking*”
- *Muting* nel dominio degli offset
- Trasformazione dati da dominio dei tiri a dominio delle C.D.P. (*sorting*)

Mediante l'analisi dello spettro di frequenza dei dati si rileva che il segnale è prevalentemente concentrato nella banda di frequenza compresa tra 20 e 100 Hz. L'applicazione di questo filtro passabanda consente, una buona attenuazione dei disturbi coerenti a bassa velocità apparente (*ground-roll*) concentrati su frequenze intorno ai 12 Hz.

Nei dati filtrati si presentava una frequenza massima del segnale inferiore ai 120 Hz, di conseguenza è stato deciso di procedere con un ricampionamento dei dati a 0.5 msec (prefiltrando le frequenze superiori a 500 Hz). Tale operazione comporta una notevole riduzione del numero di campioni per traccia, e quindi una maggiore rapidità in sede di elaborazione.

La presenza di disturbi organizzati legati a multiple negli strati superficiali richiedeva un'applicazione, peraltro selettiva e limitata ad alcuni tiri, del filtraggio FK.

Successivamente si è applicato ad ogni singola traccia un operatore di deconvoluzione del segnale opportunamente costruito in modo da attenuare la ripetitività della traccia, e di riportare il segnale riflesso il più possibile ad un'onda semplice priva di oscillazioni successive. All'individuazione dell'operatore da utilizzare si perviene dopo alcuni *tests* che consentono di verificare l'efficacia dell'operazione tramite autocorrelazione della traccia pre- e post-deconvoluzione. Nello specifico è stata utilizzata una deconvoluzione di tipo "*spiking*", con operatore di 50 msec.

Infine si è proceduto alla conversione dei dati da un'organizzazione nel dominio dei tiri ad un raggruppamento nel dominio delle famiglie C.D.P. (*Common Depth Point sorting*).

Successivamente si procede con la terza fase di elaborazione, ed operando secondo il seguente schema :

a) Fase *pre-stack*

- correzioni statiche;
- analisi di velocità ogni 10 C.D.P. ;
- correzione *Normal Move-Out* ;
- muting.

b) *Stack*

- sommatoria C.D.P. (*Stack*).

c) Fase *post-stack*

- correzione statiche residuali;
- migrazione.

Le analisi delle velocità sono state eseguite ad intervalli di 10 C.D.P. con tecnica "*semblance*" e "*CVS (Constant Velocity Stack)*"; il calcolo è stato effettuato per gruppi di C.D.P. , nell'intervallo di velocità da 1.000 a 5.000 m/s.

I picchi di massima coerenza indicano la velocità di *stack* ottimale al tempo relativo. Collegando i picchi di coerenza si ottiene una funzione di velocità da applicare ai dati per eliminare l'effetto freccia: questo effetto, denominato *Normal Move Out*, consiste nel riportare ad un allineamento orizzontale gli eventi riflessi altrimenti disposti su rami d'iperbole. Le velocità di *stack* calcolate sono mediamente comprese tra 2.500 e 4.000 m/s.

Il risultato finale è costituito dalle seguenti elaborazioni sezioni sismiche migrate tempi doppi-distanze, riportate per ciascun profilo nella parte bassa, il dato sismico è rappresentato con ampiezza in colore con sovrapposizione delle tracce (*wiggle*). Viene anche riportata una sezione delle velocità intervallo, utile invece per evidenziare brusche e/o localizzate variazioni di velocità legate a zone di frattura/faglia. Le velocità intervallo sono ricavate tramite la formula di Dix mediante confronto tra coppie contigue di velocità di stack (o  $V_{RMS}$ ) lungo la medesima verticale.

Il significato fisico delle velocità di stack, e quindi delle velocità intervallo, è comunque di tipo sismico, guidato cioè soprattutto da parametri di coerenza del segnale; ne consegue che l'interpretazione geologica delle velocità sismiche deve necessariamente limitarsi ad una valutazione in termini relativi (aree di diminuzione o di incremento). Inoltre si tratta di velocità medie dalla superficie (velocità di stack) o per ampi spezzoni di sezione verticale (velocità intervallo), quindi non direttamente confrontabili con le velocità derivate dalla sismica a rifrazione e/o con le velocità reali.

Infine, nella parte superiore delle tavole è mostrata una sezione sismica migrata convertita in profondità mediante una funzione di velocità media costante.

L'interpretazione dei dati sismici a riflessione si basa sull'individuazione di eventi riflettenti il più possibile continui, sull'analisi delle variazioni delle caratteristiche qualitative (frequenza, ampiezza, continuità), sul riconoscimento delle geometrie associate a particolari assetti strutturali e/o stratigrafici, e si conclude, normalmente, con una attribuzione stratigrafica a ciascun riflettore interpretato. Quest'ultima operazione necessita in generale di una taratura geologica, attraverso affioramenti con un chiaro assetto giaciturale o con le stratigrafie di sondaggi meccanici.

### 7.3 PROVE MASW

Le prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno lo scopo di determinare la sismo-stratigrafia indiretta delle onde S, e di calcolare il valore  $V_{S30}$  del sito mediante la propagazione delle onde di superficie.

Il parametro  $V_{S30}$ , corrisponde alla velocità equivalente di propagazione entro i primi 30 metri di profondità delle onde superficiali ed è calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano rispettivamente lo spessore (in m) e la velocità delle onde S (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti nei primi 30 metri di profondità. Il valore del parametro  $V_{S30}$  di ciascuna prova, Re.Mi. e MASW, è riportato, per convenzione, al centro del relativo stendimento geofonico.

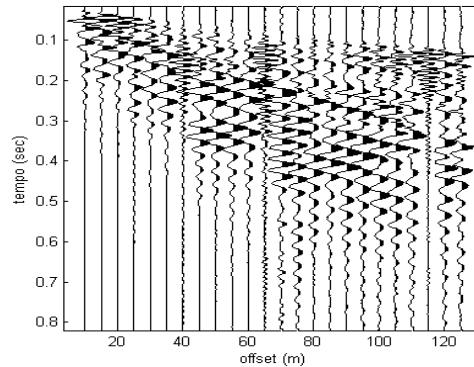
Per l'interpretazione dei dati sperimentali è stato utilizzato uno specifico programma (winMASW Version 4.1.1pro).

Il profilo verticale di Vs è ottenuto tramite l'inversione (considerando tanto il modo fondamentale che quelli superiori) delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

La procedura si sviluppa in due fasi:

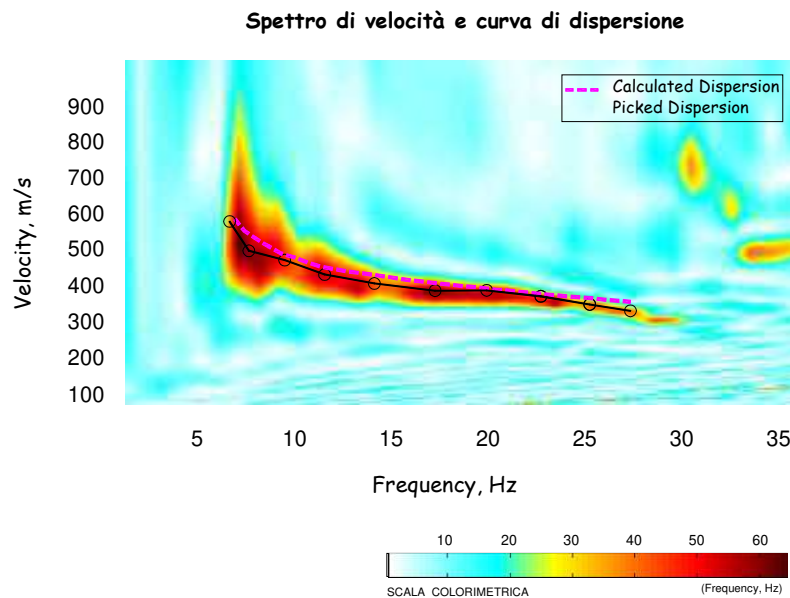
- determinazione dello spettro della velocità sulla quale si identifica la curva di dispersione;
- inversione della curva di dispersione attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici.

L'elaborazione del segnale consiste inizialmente nel calcolo dello spettro di velocità dei dati sismici acquisiti in campagna (fig. 7.3.1).



**Figura 7.3.1 - Dati di campagna.**

Sullo spettro di velocità (fig. 3.3.2) è eseguito un “picking” della curva di dispersione (soprassegno con cerchietti) individuando un insieme di punti che appartengono ad un certo modo (in questo caso al modo fondamentale) di propagazione dell'onda superficiale di Rayleigh.



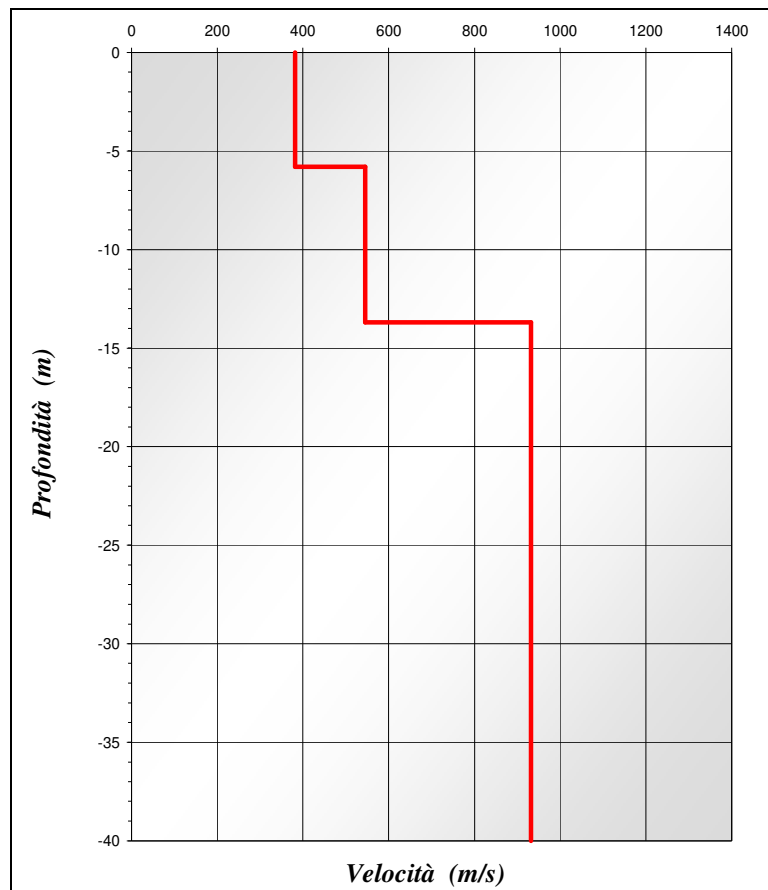
**Figura 7.3.2 - Spettro di velocità tratto dalla prova MASW e relativo picking.**

Allo scopo di ottenere una prima valutazione del possibile modello del terreno è altresì effettuata una modellazione diretta del terreno tramite il calcolo di una curva di dispersione appartenente ad un modello a tre strati, i cui valori di  $V_s$  e degli spessori sono definiti sulla base di osservazioni desunte e dalla tomografia sismica a rifrazione e delle stratigrafie dei sondaggi.

Successivamente per ottenere il profilo verticale di  $V_s$  è eseguita l'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata". Tale inversione è eseguita tramite l'utilizzo di algoritmi genetici che consentono di ottenere soluzioni affidabili ed una stima dell'attendibilità del modello ricavato in termini di deviazione standard.

L'operazione di inversione è ottimizzata definendo uno spazio di ricerca i cui confini sono definiti da valori di  $V_s$  e spessori all'interno dei quali si cerca la soluzione. Tali assunzioni sono fatte sulla base delle conoscenze geologiche del sito e delle informazioni derivate dalla sismica a rifrazione

Una volta fissati i limiti minimi e massimi dello spazio di ricerca, sono quindi impostati i parametri genetici che definiscono sia il numero di individui (ossia il numero di modelli che costituiscono la popolazione che si evolverà verso soluzioni sempre migliori) sia il numero di generazioni al passare delle quali sono esplorati modelli sempre migliori.



**Figura 7.3.3 - Modello interpretativo, tratto dalla prova MASW.**

L'analisi dei dati attraverso l'uso di algoritmi genetici porta in ultima analisi alla definizione del profilo verticale della  $V_s$  (fig. 7.3.3.) in funzione della profondità con associato il valore del  $V_s$  30.



## 7.4 MISURE HVSR

Come già detto la tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale. Le frequenze di risonanza corrispondono ai massimi della funzione che rappresenta rapporti spettrali medi in funzione della frequenza (funzione H/V). L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente

L'idea di base è quella secondo cui il rapporto H/V consente in media di eliminare il ruolo delle variazioni di intensità delle sorgenti nel corso della registrazione mettendo in evidenza il ruolo della struttura. Sperimentalmente si vede che, in presenza di un campo d'onde diffuso, la forma della funzione (e in particolare la posizione dei suoi valori massimi) risulta con buona approssimazione stabile nel tempo e fortemente correlata con le caratteristiche del sottosuolo al di sotto del sito di misura.

In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione H/V mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza  $f_r$  relativa a quella configurazione strutturale (con  $f_r$  circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde S fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità). Si osserva anche una certa correlazione (fortemente non lineare) fra l'entità della variazione di velocità responsabile del fenomeni di risonanza e l'ampiezza del massimo della funzione H/V (maggiore è il contrasto di impedenza sismica, maggiore è l'entità del massimo).

La struttura del campo d'onde presente nel terreno (rumore sismico ambientale, microtremore, rumore sismico o seismic noise) è condizionata dalle caratteristiche delle sorgenti che lo determinano (siano esse naturali o antropiche) e dalle proprietà meccaniche dei terreni. Infatti, ciascuna sorgente genera un treno d'onde che raggiunge il punto di misura con caratteristiche che dipendono dall'entità delle sollecitazioni nelle componenti orizzontali e verticali del moto e dalle modalità di propagazione fra la sorgente e il sito in funzione dei fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione che hanno luogo in corrispondenza di variazioni delle proprietà meccaniche dei terreni nel sottosuolo. In genere, nel campo di rumore ambientale, saranno presenti sia onde di volume (P e S in quantità variabili) che onde superficiali (Love e Rayleigh).

Se si considera un intervallo di tempo opportunamente lungo (dell'ordine delle decine di minuti), le proprietà medie di un campo d'onde sismiche generato da una molteplicità di sorgenti differenti, distribuite casualmente attorno a un punto di misura, tendono ad avere un andamento che non dipende dalle singole sorgenti che hanno generato il campo, ma solo dalle proprietà del mezzo in cui le onde si propagano e dal livello energetico medio dell'attività antropica o naturale.

In particolare, si può immaginare che, in media, le componenti orizzontali e verticali del moto del suolo tendano a essere sollecitate in modo equivalente, con un'ampiezza media pari al livello medio del rumore in quell'intervallo temporale. In questa ipotesi, i rapporti fra le ampiezze verticali e orizzontali del moto (H/V) saranno statisticamente indipendenti dalle caratteristiche delle sorgenti (dato che le ampiezze delle sollecitazioni sul piano orizzontale e verticale sono mediamente le stesse) e saranno condizionate dai soli effetti di propagazione ovvero dalle caratteristiche del mezzo interessato dal moto sismico. Queste ultime influenzeranno l'ampiezza relativa delle

diverse fasi sismiche (onde P, S, Rayleigh e Love) e le direzioni di emergenza delle onde al punto di misura.

Si può dimostrare che la frequenza di risonanza  $\nu_0$  di una copertura sedimentaria di spessore  $H$  sovrapposta a un basamento rigido e in condizioni di stratificazione piana è data dal rapporto fra la velocità media delle onde S nel sedimento ( $V_s$ ) e 4 volte lo spessore  $H$  ( $\nu_0 = V_s/4H$ ). Utilizzando questa relazione è possibile risalire dalla frequenza di risonanza misurata allo spessore della copertura una volta nota la velocità delle onde di taglio o, viceversa a questa ultima se lo spessore  $H$  è noto.

Studi teorici mostrano che se il rumore è effettivamente dominato da onde di volume emergenti da direzioni sub-verticali, l'andamento e l'ampiezza della funzione  $H/V$  riflettono quelle della funzione di risposta del deposito sedimentario analizzato. In caso contrario si vede che l'ampiezza dei massimi della funzione  $H/V$  è correlata (ma non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica presente alla base della copertura.

L'assenza di massimi della funzione  $H/V$  suggerisce l'assenza di fenomeni di amplificazione sismica dovuti a fenomeni di risonanza.

La misura della funzione  $H/V$  è stata effettuata tramite l'acquisizione del rumore sismico ambientale in un punto per un tempo di venti minuti. Questa durata ha lo scopo di garantire la misura del campo di rumore generato da una molteplicità di sorgenti dalle diverse direzioni dello spazio.

La misura è stata effettuata utilizzando un sistema di acquisizione tri-direzionale caratterizzato da sufficiente sensibilità.

I risultati di ogni analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con il software GRILLA, che permette di determinare i rapporti medi fra le componenti spettrali del rumore misurate sul piano orizzontale e verticale. A questo scopo, la serie di rumore ambientale è stata suddivisa in una serie di finestre temporali di uguale durata (finestre di 20 secondi) per ciascuna delle quali è stato determinato lo spettro del moto. Su ciascuna di queste finestre viene calcolato lo spettro di ampiezza del segnale nelle tre componenti. In questa fase è stata applicato un sistema di lisciamento (smoothing) triangolare del 10% adottato per la determinazione dello spettro.

Dopo un opportuno lisciamento, le ordinate spettrali del moto sul piano orizzontale, ottenute mediando opportunamente i valori ottenuti nelle due direzioni principali, sono state divise per quelle ottenute nella direzione verticale.

L'andamento dei rapporti spettrali è stato quindi ottenuto mediando i valori ottenuti per le diverse finestre temporali considerate. Per definire la qualità delle misure sono state anche valutate le variazioni temporali e azimutali dei rapporti spettrali nel corso della sessione di misura e fatta una stima del relativo intervallo di confidenza.

Di seguito sarà brevemente descritta la procedura di analisi seguita:

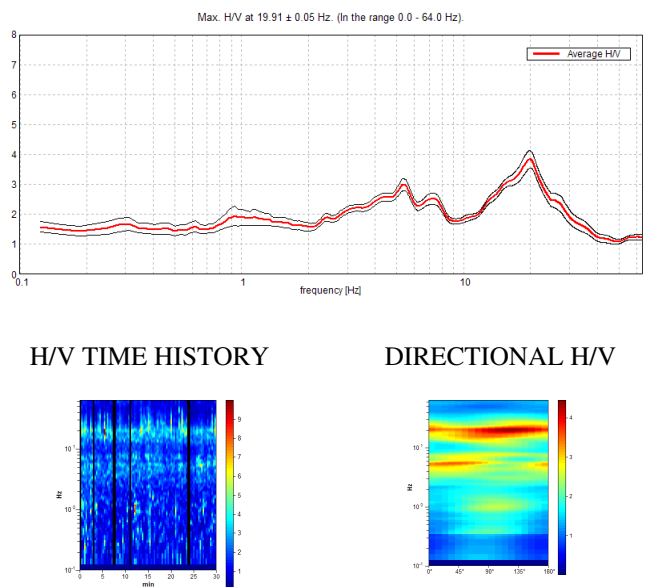
- Ciascuna delle tracce è suddivisa in segmenti o finestre di 20 secondi.
- In ogni finestra e per ciascuna delle tracce viene eseguita:
  - un'analisi preliminare: eliminazione di trend lineari (detrend) e tapering delle estremità;
  - la trasformata di Fourier (FFT);
  - il lisciamento degli spettri con finestra triangolare ampia una frazione della frequenza centrale (in questo lavoro generalmente il 10%).
- Le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali vengono mediate in modo geometrico, e vengono calcolati i rapporti HVSR (f), in ciascuna finestra temporale.

- Si calcolano i rapporti HVSR medi ed il relativo intervallo di confidenza al 95%. Alla frequenza di risonanza viene associata una stima dell'incertezza sperimentale.

Lo spettro relativo alla componente orizzontale viene ottenuto effettuando la media (solitamente geometrica) delle due componenti spettrali del rumore sul piano orizzontale. La combinazione delle stime ottenute nelle diverse finestre temporali viene poi utilizzata per costruire la funzione H/V finale e stimare il relativo intervallo di confidenza. In particolare, la funzione H/V è ottenuta facendo la media dei valori delle funzioni H/V calcolate in ogni finestra temporale.

Per verificare se le misure sono state effettuate in condizioni ottimali per i fini geognostici (campo d'onde diffuso), oltre alla stima della curva H/V, risulta quindi utile valutare l'eventuale presenza di fenomeni direzionali (eterogeneità del campo di rumore) e la stabilità nel tempo della funzione H/V durante la misura (stazionarietà). In presenza di un campo di rumore diffuso il valore della funzione H/V non deve cambiare nel tempo o al variare della direzione.

Al contrario, la presenza di sorgenti dominanti o il cattivo posizionamento dello strumento (basculamento) si manifesta come una variazione direzionale e/o temporale dei rapporti H/V. Sperimentalmente, l'analisi di qualità della misura può essere effettuata confrontando le ampiezze spettrali medie del rumore misurato lungo le due componenti orizzontali, oppure calcolare diversi valori della funzione H/V di volta in volta proiettando lungo direzioni differenti le ampiezze spettrali ottenute sul piano orizzontale (Figura 7.4.1). La stazionarietà nel tempo, invece, può essere valutata rappresentando in funzione del tempo le funzioni H/V ottenute nelle diverse finestre temporali considerate (Figura 7.4.1).



**Figura 7.4.1** - Esempio di risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura H/V. In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. Sono anche indicati i valori delle frequenze corrispondenti ai massimi della funzione H/V. In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei valori H/V (colori) in funzione della frequenza (ordinata): il grafico ha lo scopo di valutare la stabilità nel tempo della curva H/V. In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione H/V (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa): il grafico serve a valutare la direzionalità del segnale registrato.

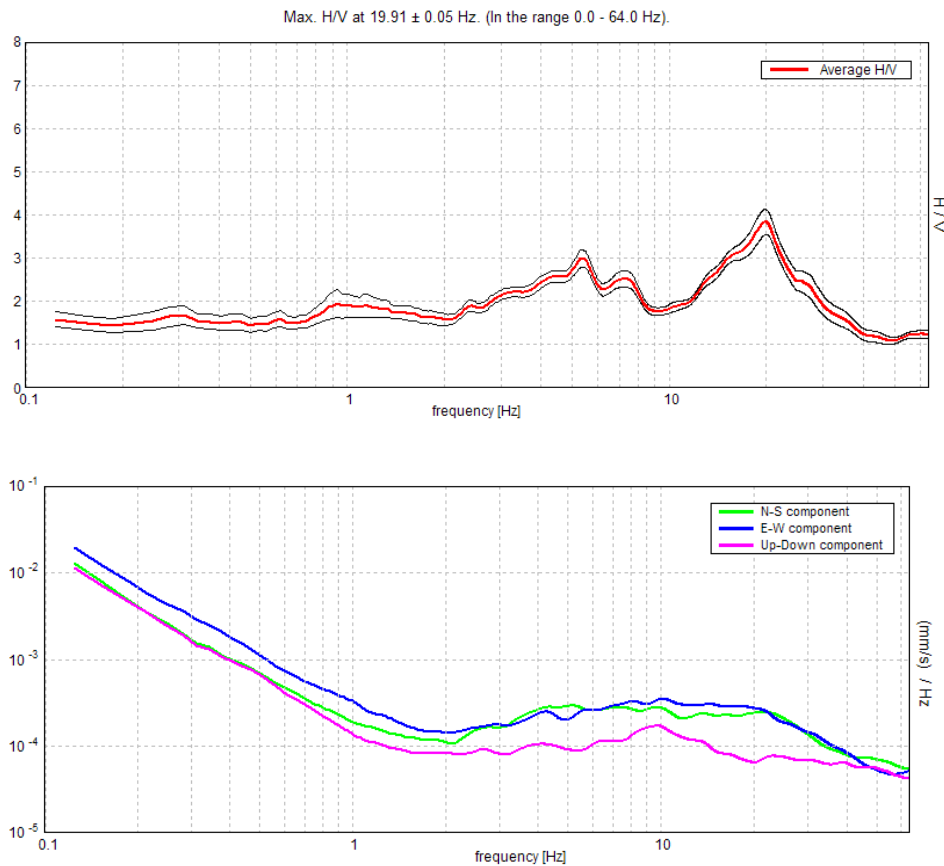
Ai fini dell'affidabilità e della chiarezza del massimo della funzione H/V, infine è effettuata una analisi secondo i criteri determinati nell'ambito del progetto europeo SESAME per l'eliminazione di massimi spuri della funzione H/V, la cui presenza è frutto delle caratteristiche del campo d'onde sismiche e non della struttura locale del sottosuolo (Figura 7.4.2).

<b>Max. H/V at 19.91 ± 0.05 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz).</b>			
<b>CRITERIA FOR A RELIABLE HVSR CURVE</b>			
<b>[ALL 3 SHOULD BE FULFILLED]</b>			
$f_0 > 10 / L_w$	19.91 > 0.50	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	33044.4 > 200	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 956 times	<b>OK</b>	
<b>Criteria for a clear HVSR peak</b>			
<b>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]</b>			
Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	10.875 Hz	<b>OK</b>	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	29.969 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	3.84 > 2	<b>OK</b>	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00121  < 0.05$	<b>OK</b>	
$\sigma_f < \sigma(f_0)$	0.02401 < 0.99531	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f_0) < \sigma(f_0)$	0.1455 < 1.58	<b>OK</b>	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\sigma(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \sigma(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\sigma(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \sigma(f_0)$
Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$	
<b>Freq.range [Hz]</b>	<b>&lt; 0.2</b> <b>0.2 – 0.5</b> <b>0.5 – 1.0</b> <b>1.0 – 2.0</b> <b>&gt; 2.0</b>
$\sigma(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$ 0.2 $f_0$ 0.15 $f_0$ 0.10 $f_0$ 0.05 $f_0$
$\sigma(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0    2.5    2.0    1.78    1.58
Log $\sigma(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48    0.40    0.30    0.25    0.20

**Figura 7.4.2** - Esempificazione dei criteri da rispettare per l'ottenimento di una realistica curva HVSR.

Infine, un buon indicatore della qualità del picco H/V può essere ottenuto dall'esame degli spettri singoli. Infatti, massimi fisicamente significativi sono generalmente associati a valori di ampiezza spettrale minima sulla componente verticale. La curva sottostante può essere considerata come un esempio di picco H/V chiaro e fisicamente significativo (fig: 7.4.3).



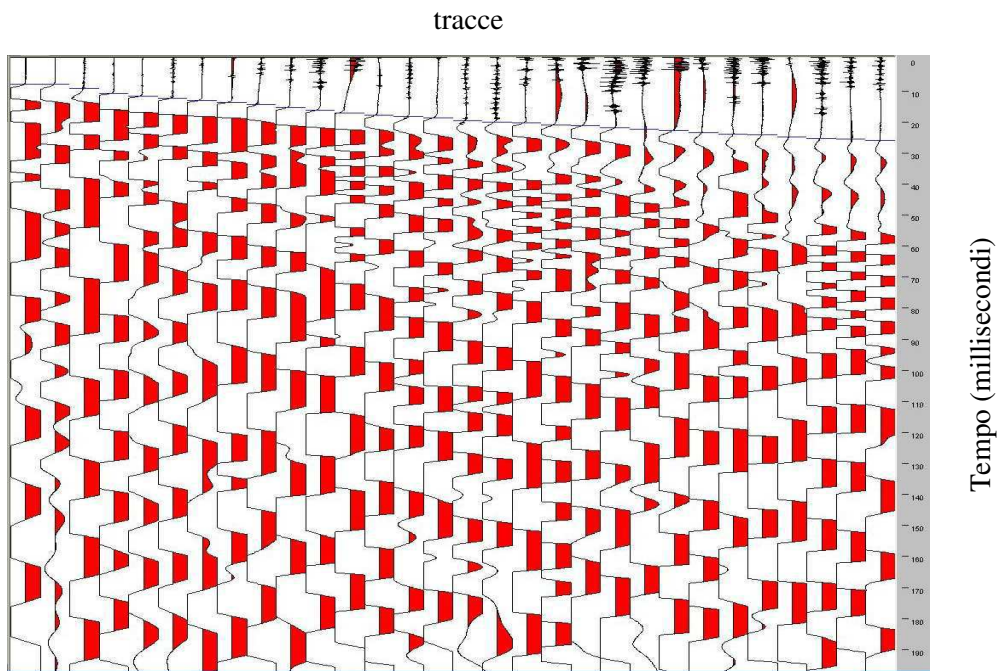
**Figura 7.4.3** - Esempio di andamento degli spettri relativi a una corretta misura H/V nella quale viene identificato un picco fisicamente significativo. Nella figura superiore è riportato l'andamento della curva H/V (curva rossa) e il relativo intervallo di confidenza (curve nere). Nella figura in basso sono riportati gli andamenti degli spettri di ampiezza del rumore sulla componente verticale (curva magenta) e sulle componenti orizzontali (curve verde e blu).

## 7.5 CAROTAGGI SISMICI TIPO DOWN-HOLE

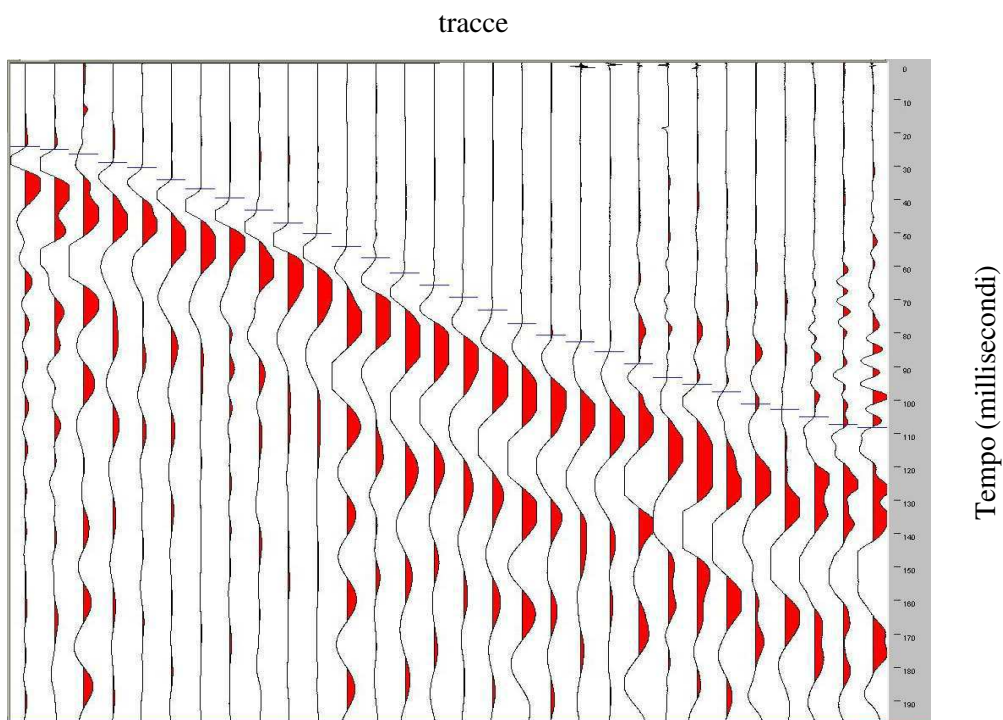
I tempi relativi alle onde P ed  $S_H$  sono stati letti attraverso uno specifico programma di picking SEISOPTICKER.

Per avere un buon controllo sulla procedura di lettura dei tempi e valutare al contempo la qualità dei dati sismici acquisiti per tutto il tragitto di ogni sondaggio, i valori numerici dei primi arrivi delle onde sismiche P ed  $S_H$  sono stati riportati su sezioni tempo/tracce ove le varie tracce sono scelte in funzione dell'orientamento del sistema ricevitore/sorgente (figure 7.5.1 e 7.5.2).

Tale procedura consente di ottenere così delle forme d'onda più definite nelle ampiezze. In particolare con riferimento alle onde di taglio sono state scelte le tracce riferite alla somma tra la battuta destra e quella sinistra.



*Figura 7.5.1 – Sismogramma completo delle onde P.*



*Figura 7.5.2 – Sismogramma completo delle onde S.*

I tempi d'arrivo delle onde di compressione e di taglio sono stati quindi corretti, rispetto alla verticale, e riportati su un diagramma profondità – tempi sui quali sono stati individuati i tratti a pendenza circa costante. Dalla pendenza dei tratti sono state determinate le velocità intervallari delle onde P ed  $S_H$  nel terreno (figura 7.5.3).

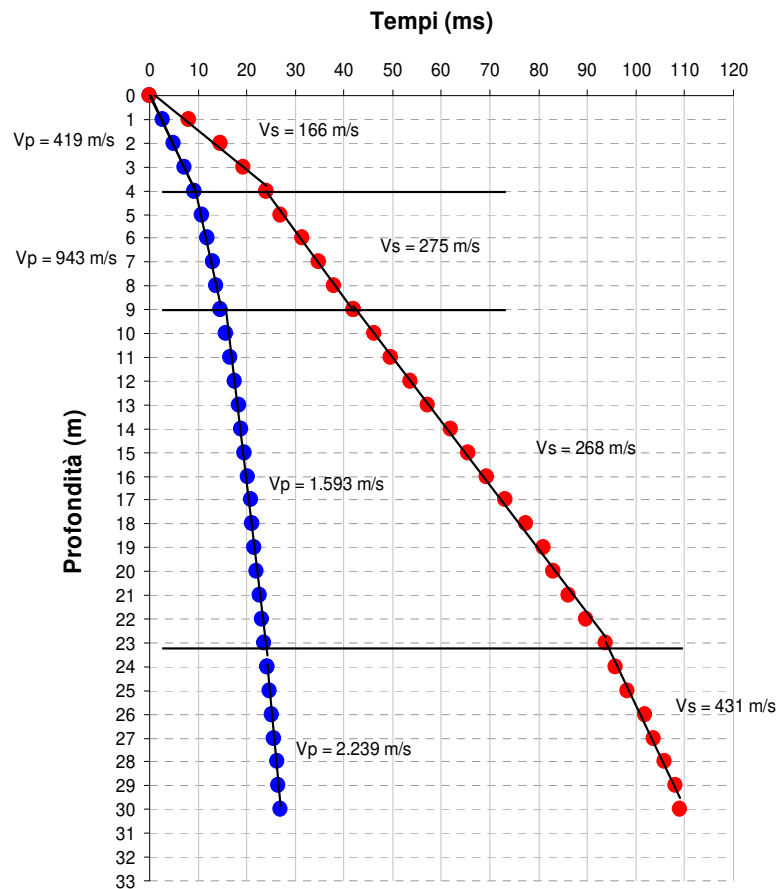


Figura 7.5.2 – Dromocrone sismiche in onde P ed SH

Sulla base delle velocità sismiche ( $V_P$  e  $V_{SH}$ ) è stato possibile calcolare i *moduli elastici dinamici* dei terreni attraversati secondo lo schema riportato nella stratigrafia di ogni singolo sondaggio. I valori di densità attribuiti a ciascuno strato sono stati desunti da dati reperibili in bibliografia. I risultati sono riportati nelle tabelle riportate sulle tavole allegate.

## 8. ANALISI DEI RISULTATI

Il rilievo geofisico nel suo complesso ha permesso fornire elementi utili alla definizione dell'assetto geologico dell'intera area interessata dall'opera in progetto. In particolare ha fornito anche valori fisici per parametrizzare i terreni interessati dalle infrastrutture. In particolare andiamo ad analizzare zona per zona i risultati geofisici ottenuti:

### ZONA SVINCOLO VIA DEL FORNO

Nell'area in esame sono stati realizzati tre profili sismici a rifrazione interpretati tomograficamente (150 – 151 – 152) comprensivi delle rispettive prove MASW, una registrazione HVSR e un carotaggio sismico tipo down-hole.

In riferimento ai dati geologici e geognostici si è potuto ricostruire la struttura geologica nel sottosuolo e caratterizzare i litotipi presenti anche in funzione ai parametri fisici misurati. Il risultato del modello sismico tomografico derivato dai profili sismici ha permesso di effettuare una diversificazione di ogni litotipo, in funzione dei valori di velocità sismica, in più classi riferite al grado di alterazione.

Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie del Monte Gottero (G)
- Argille e Calcari di Canetolo (C)

come già detto tali formazioni sono state suddivise in classi rispettando i seguenti limiti di velocità sismica, che possono essere riassunte nella tabella sottostante:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie de monte Gottero	G1	detritico	<1.200
	G2	allentato	1.200<x<1.800
	G3	compatto	>1.800
Argille e Calcari di Canetolo	C1	allentato	<2.000
	C2	compatto	>2.000

In particolare deve essere fatta una trattazione specifica sul contatto tettonico per sovrascorrimento tra la formazione Arenarie del Gottero con la sottostante formazione Argille e Calcari di Canetolo; tale struttura è stata verificata sia con il rilievo geologico di dettaglio che con il sondaggio geognostico 105, inoltre è anche chiaramente individuata con il rilievo sismico a riflessione che incide sul l'opera Galleria Pellizzarda.

Sugli allineamenti sismici sono stati operati anche le prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) che hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S. In funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S è stato calcolato il relativo valore di Vs30.



prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>150</b>	637
<b>151a</b>	586
<b>151b</b>	560
<b>152a</b>	831
<b>152b</b>	835

In considerazione dei risultati ottenuti e in riferimento alla normativa antisismica vigente (modifiche del D.M. 14/09/2005 Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. Infrastrutture del 14/01/2008, pubblicato su Gazzetta Ufficiale Supplemento ordinario n° 29 del 04/02/2008) possiamo fare le seguenti distinzioni: Da tali risultati si evidenzia che l'area collocata a Sud-Ovest interessata dai rilievi 152a e 152b presentino un valore di Vs30 abbondantemente superiore al resto dell'area. A tale proposito possiamo asserire che la porzione posizionata più a Sud-Ovest dell'opera in progetto dello svincolo via del Forno con valore Vs30 830 m/s ricade in Classe **A**, mentre la restante opera fino all'imbocco galleria Pellizzarda andrà a incidere su terreni con Vs30 medio di circa 580 m/s che ricadono in Classe **B**.

Il carotaggio sismico Down-hole ha permesso di effettuare una parametrizzazione dei litotipi incontrati dalla perforazione, in funzione dei dati stratigrafici del sondaggio a carotaggio continuo si è potuto calcolare i moduli elastici dinamici in sito in funzione dei valori di velocità sismica. Di seguito si riporta la tabella riassuntiva.

#### DOWN-HOLE 101

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>P</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson □	modulo taglio dinamico G	modulo Young E	modulo bulk K
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s		(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
<i>Arenarie del Monte Gottero</i>	0 - 2	20.0	362	172	0.35	6.03E+04	1.63E+05	1.87E+05
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	2 - 4	21.0	1109	284	0.46	1.73E+05	5.06E+05	2.40E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	4 - 10	22.0	1978	688	0.43	1.06E+06	3.04E+06	7.36E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	10 - 22	22.0	3736	1429	0.41	4.58E+06	1.30E+07	2.52E+07

Inoltre il rilievo geofisico nell'area prevedeva anche le registrazioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) per definire la frequenza fondamentale del sito che mediamente risulta 16 Hz.

#### ZONA GALLERIA PELLIZZARDA

Nell'area in esame sono stati realizzati due profili sismici ibridi (170a - 170b) quattro profili sismici a rifrazione (153 - 154 - 250 - 251) i due tipi di rilievi hanno previsto le rispettive prove MASW; inoltre sono state effettuate anche le registrazioni HVSR.

Il rilievo sismico ibrido ha previsto due profili lungo l'asse, tale interruzione è stata dovuta a causa di condizioni logistiche che hanno impedito la realizzazione continua del rilievo lungo tutto l'asse.

Il tratto di profilo sismico 170a ha una lunghezza di 450 m, dalla prog. 384 alla prog. 834. La parte finale è stata acquisita con tecnica undershooting per la presenza di un agglomerato di edifici.

Il profilo è caratterizzato dalla presenza di una serie di eventi sub-paralleli a bassa frequenza e buona continuità particolarmente nel tratto tra 100 e 300 msec di profondità. Sono stati interpretati diversi orizzonti sismici, denominati superficiale (colore giallo) intermedio (colore verde) e profondo (colore celeste). Talora questi orizzonti non sono singoli ma multipli.

L'assetto geologico interpretato è di tipo genericamente sinclinalico, con una risalita sia verso il lato dell'imbocco che verso il proseguimento della galleria. Nel tratto iniziale con l'imbocco l'assetto appare complicato per la presenza di numerose faglie; si tratta per lo più di faglie antitetiche rispetto ad una faglia inversa principale, posta alla prog. 560, che borda l'asse della sinclinale, posto alla prog. 580 circa.

Nel tratto successivo si ha una risalita degli orizzonti sismici con pendenze accentuate e con diverse faglie con rigetti per lo più diretti. L'assetto è ancora frammentato in più blocchi ma più ampi. Verso la coda della linea compare una nuova faglia inversa importante, circa alla prog. 780, che determina un aumento della pendenza degli strati.

La sezione della velocità intervallo mostra che l'asse della galleria separa la zona superficiale con velocità intervallo media di 2600-2800 m/sec, da una zona sottostante nettamente più veloce, con valori fino a 3600 m/sec. A partire dall'orizzonte celeste la velocità incrementa ulteriormente, fino a valori di 4500 m/sec.

Il tratto di profilo sismico 170b ha una lunghezza di 465 m dalla prog. 905 alla prog. 1375. Cosituisce la prosecuzione del tratto 170b dopo un gap di copertura di oltre 70 m legato a problemi di accesso in superficie.

L'assetto geologico-strutturale mostrato da questo spezzone di profilo evidenzia la prosecuzione della risalita degli orizzonti interpretati, tanto che il più superficiale arriva in affioramento nel tratto centrale, circa alla prog. 1100.

La risalita viene accompagnata da faglie prevalentemente con rigetto diretto. Di queste quella interpretata alla prog. 1017-1020 è di gran lunga la principale, con un rigetto di quasi 40 m. Questa faglia controlla anche la presenza nel blocco ribassato di una serie a bassa velocità sismica, evidenziata da una profonda anomalia sulla sezione di velocità intervallo tra le prog. 1120 e 1200.

La geometria dei riflettori evidenzia anche come la tettonica distensiva sia recente, ed interessi vecchie superfici di sovrascorrimento relitte, visibili tra le prog. 900 e 1100.

Superato il blocco ribassato, prosegue la risalita degli orizzonti intermedio e profondo, segmentati in diversi blocchi di faglia. La risalita provoca l'affioramento dell'orizzonte intermedio alla prog. 1370, in corrispondenza dello sbocco della galleria.

Questo assetto generale è ben evidenziato anche dalla sezione di velocità intervallo.

L'orizzonte profondo è caratterizzato da una velocità marcatamente inferiore rispetto al tratto precedente.

La definizione del modello sismico tomografico derivato dall'interpretazione dei sismici a rifrazione ha permesso anche in questa zona di caratterizzare le litologie presenti secondo il parametro velocità sismica e di suddividerli in classi riferite al gado di alterazione.

Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie del Monte Gottero (G)
- Argille e Calcari di Canetolo (C)

come già detto tali formazioni sono state suddivise in classi rispettando i seguenti limiti di velocità sismica, che possono essere riassunte nella tabella sottostante:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie del monte Gottero	G1	detritico	<1.200
	G2	allentato	1.200<x<1.800
	G3	compatto	>1.800
Argille e Calcari di Canetolo	C1	allentato	<2.000
	C2	compatto	>2.000
Arenarie di Ponte Bratica	B1	detritico	<1.000
	B2	allentato	1.000<x<2.000
	B3	compatto	>2.000

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>170aa</b>	630
<b>170ab</b>	616
<b>170ba</b>	961
<b>170bb</b>	779
<b>153a</b>	804
<b>153b</b>	806
<b>154</b>	789
<b>250</b>	631
<b>251</b>	765

In considerazione dei risultati ottenuti e in riferimento alla normativa antisismica vigente possiamo fare le seguenti distinzioni:

- Il versante sud occidentale che interessa lo scavo della galleria Pellizzarda (Profilo sismico 170A) presenta un valore medio Vs30 di circa 620 m/s e quindi l'area può essere collocata in Classe **B**;
- Nel versante che degrada su via dei Pilastrini e anche nell'area successiva che ci porta fino allo svincolo Buonviaggio (profilo sismico 170B) si evidenzia un valore medio di circa 800 m/s. Tale valore è il limite tra la classe A e la classe B quindi riteniamo di posizionare tale area cautelativamente in Classe **B**.

Inoltre nell'area sono state fatte tre registrazioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) per definire la frequenza fondamentale del sito che risulta compresa tra 3,5 e 16 Hz.

### ZONA SVINCOLO BUONVIAGGIO

Il rilievo geofisico condotto in questa zona è composto da tre profili sismici a rifrazione con le relative prove MASW, due Carotaggi sismici e tre misure HVSR.

Il modello sismico tomografico ha permesso di distinguere all'interno delle formazioni geologiche delle classi riferite all'alterazione in funzione del valore di velocità sismica.

Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie di Ponte Bratica (B)
- Argille e Calcari di Canetolo (C)

come già detto tali formazioni sono state suddivise in classi rispettando i seguenti limiti di velocità sismica, che possono essere riassunte nella tabella sottostante:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie di Ponte Bratica	B1	detritico	<1.000
	B2	allentato	1.000<x<2.000
	B3	compatto	>2.000
Argille e Calcari di Canetolo	C1	allentato	<2.000
	C2	compatto	>2.000

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>252</b>	837
<b>255a</b>	881
<b>255b</b>	847
<b>256a</b>	797
<b>256b</b>	860

In considerazione dei risultati ottenuti possiamo affermare che l'area interessata dallo svincolo Buonviaggio è caratterizzata da terreni che ricadono in Classe **A**.

I carotaggi sismici Down-hole hanno permesso di calcolare i moduli elastici dinamici in sito in funzione dei valori di velocità sismica.

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei risultati delle prove Down-hole.

#### DOWN-HOLE 203

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>P</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	□	G	E	K
<i>Arenarie di ponte Bratica</i>	0 - 3	19.5	282	170	0.21	5.74E+04	1.40E+05	8.15E+04
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	3 - 6	20.5	1432	313	0.47	2.05E+05	6.04E+05	4.01E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	6 - 19	21.0	2094	480	0.47	4.93E+05	1.45E+06	8.73E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	19 - 24	22.0	2593	597	0.47	7.99E+05	2.35E+06	1.40E+07

## DOWN-HOLE 205

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>p</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	□	G	E	K
						(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
<i>Terreno di riporto</i>	0 - 2	18.5	354	172	0.35	5.58E+04	1.50E+05	1.62E+05
<i>Arenarie di ponte Bratica</i>	2 - 5	19.0	851	410	0.35	3.26E+05	8.78E+05	9.69E+05
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	5 - 7	21.0	1817	536	0.45	6.15E+05	1.79E+06	6.25E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	7 - 23	21.0	2955	654	0.47	9.16E+05	2.70E+06	1.75E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	23 - 35	22.0	3051	1102	0.42	2.72E+06	7.76E+06	1.72E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	35 - 39	22.0	3615	1909	0.31	8.17E+06	2.14E+07	1.84E+07

Infine il rilievo geofisico nell'area prevedeva anche le registrazioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) per definire la frequenza fondamentale del sito risulta compresa tra 12 e 18 Hz.

### ZONA GALLERIA FELETTINO1

Il rilievo geofisico che è stato realizzato per studiare l'area di incidenza dell'opera, consta di un profilo sismico ibrido (profilo sismico 370) che segue l'asse della Galleria in progetto. Inoltre sono stati eseguiti due profili sismici a rifrazione dal lato imbocco Nord per la verifica dei versanti adiacenti l'opera in progetto. I profili sismici sia ibridi che a rifrazione hanno previsto anche le prove MASW; infine è stata eseguita una registrazione HVSR.

Questo tratto di profilo sismico ha una lunghezza di 878 ml dalla prog. 1716 alla prog. 2594. L'aspetto generale del profilo è analogo ai tratti precedenti, con un set di riflettori sismici principali, con bassa frequenza e buona continuità. Si evidenzia come questo set di riflettori sia quasi sub-orizzontale o poco inclinato, e quindi completamente indipendente dall'assetto morfologico.

In questo tratto sono stati nuovamente interpretati 3 orizzonti sismici, denominati superficiale (colore giallo) intermedio (colore verde) e profondo (colore celeste). L'orizzonte profondo appare più discontinuo.

L'assetto giaciturale è con pendenza generale verso le progressive crescenti; in particolare gli orizzonti superficiale ed intermedio sono affioranti nella zona dell'imbocco tra le prog. 1700 e 1750, e si immergono gradualmente verso l'altro imbocco. Lungo il profilo si hanno due punti in cui la sequenza viene rialzata da blocchi di faglia, in particolare alla prog. 2050 e successivamente alla prog. 2400. Con l'approfondimento degli orizzonti, quello più profondo tende a divenire poco visibile.

Questo assetto è ben evidenziato anche dalla sezione di velocità intervallo, con aumenti localizzati di velocità in corrispondenza dei due punti di sollevamento tettonico prima visti. Mediamente le velocità sismiche lungo questo profilo sono più omogenee.

Il modello sismico tomografico ha evidenziato principalmente il grado di alterazione delle litologie indagate. Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie di Ponte Bratica (B)
- Argille e Calcari di Canetolo (C)

In funzione ai valori di velocità sismica sono state fatte le seguenti distinzioni in classi:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie di Ponte Bratica	B1	detritico	<1.000
	B2	allentato	1.000<x<2.000
	B3	compatto	>2.000
Argille e Calcari di Canetolo	C1	allentato	<2.000
	C2	compatto	>2.000

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>253a</b>	773
<b>253b</b>	775
<b>254a</b>	787
<b>254b</b>	703
<b>370a</b>	889
<b>370b</b>	765

In considerazione dei risultati ottenuti possiamo affermare che l'area interessata dalla galleria Felettino 1 presenta terreni che ricadono in Classe **A**.

Infine la registrazione HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) eseguita nell'area dell'imbocco nord ha definito la frequenza fondamentale del sito che risulta 13 Hz.

#### **ZONA VIADOTTI SAN VENERIO**

Il rilievo geofisico condotto in questa zona è composto da un profilo sismico a rifrazione (profilo sismico 450) con le relative prove MASW, due Carotaggi sismici e tre misure HVSr.

Il modello sismico tomografico ha permesso di distinguere all'interno delle formazioni geologiche delle classi riferite all'alterazione in funzione del valore di velocità sismica. Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie di Ponte Bratica (B)
- Argille e Calcari di Canetolo (C)

come già detto tali formazioni sono state suddivise in classi rispettando i seguenti limiti di velocità sismica, che possono essere riassunte nella tabella sottostante:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie di Ponte Bratica	B1	detritico	<1.000
	B2	allentato	1.000<x<2.000
	B3	compatto	>2.000
Argille e Calcari di Canetolo	C1	allentato	<2.000
	C2	compatto	>2.000

Il profilo sismico a rifrazione 450 interessa se pur marginalmente i fenomeni gravitativi individuati sulla carta geomorfologica. In particolare il viadotto San Venerio I posizionato lungo il profilo 450 tra il punto di scoppio 1 e il punto di scoppio 5 che ricadente all'interno di un fenomeno franoso, è stato interessato dal rilievo sismico.

In tale tratto il modello sismico tomografico individua terreni con velocità sismica che possono essere considerati da compatti a allentati, ma principalmente non interessati da fenomeni gravitativi in atto.

Inoltre il modello sismico tomografico evidenzia terreni detritici o sciolti, che potrebbero essere la conseguenza di passati movimenti franosi nella porzione di profilo compresa tra i punti di scoppio 10 e 13. Tale tratto di profilo interessa parte del viadotto San Venerio II (spalla sul versante a Sud) e la galleria artificiale Felettino II.

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>450a</b>	928
<b>450b</b>	930
<b>450c</b>	852
<b>450d</b>	868

In considerazione dei risultati ottenuti possiamo affermare che l'area interessata dai viadotti e lo svincolo San Venerio è caratterizzata da terreni che ricadono in Classe A.

I carotaggi sismici Down-hole hanno permesso di calcolare i moduli elastici dinamici in sito in funzione dei valori di velocità sismica.

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei risultati delle prove Down-hole.

#### DOWN-HOLE 401

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>p</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	□	G	E	K
						(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
<i>Arenarie di ponte Bratica</i>	0 - 2	18.0	461	219	0.35	8.80E+04	2.38E+05	2.73E+05
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	2 - 4	20.5	1056	356	0.44	2.65E+05	7.61E+05	1.98E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	4 - 8	21.0	2271	707	0.45	1.07E+06	3.10E+06	9.61E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	8 - 13	21.0	2632	976	0.42	2.04E+06	5.79E+06	1.21E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	13 - 30	21.0	3199	1510	0.36	4.88E+06	1.32E+07	1.54E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	30 - 39	21.0	3779	2042	0.29	8.93E+06	2.31E+07	1.87E+07

## DOWN-HOLE 402

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>p</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	□	G	E	K
						(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
<i>Terreno di riporto</i>	0 - 2	18.0	461	222	0.35	9.04E+04	2.44E+05	2.69E+05
<i>Arenarie di ponte Bratica</i>	2 - 4	20.5	1056	356	0.44	2.65E+05	7.61E+05	1.98E+06
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	4 - 8	21.0	2554	787	0.45	1.33E+06	3.84E+06	1.22E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	8 - 13	21.0	2750	1167	0.39	2.92E+06	8.11E+06	1.23E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	13 - 30	22.0	3165	1620	0.32	5.89E+06	1.56E+07	1.46E+07
<i>Argille e Calcari di Canetolo</i>	30 - 39	22.0	3992	2338	0.24	1.23E+07	3.04E+07	1.94E+07

Infine le registrazioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) hanno definito la frequenza fondamentale del sito risulta compresa tra 8 e 17 Hz.

### ZONA GALLERIE FELETTINO 2 – FELETTINO 3 E FORNACI

Il rilievo geofisico che è stato realizzato per studiare l'area di incidenza delle opere in oggetto, è stato compiuto con la realizzazione di due profili sismici ibridi (profili sismici 570a e 570b) che principalmente seguono l'asse della Galleria in progetto;. I profili sismici hanno previsto anche le prove MASW; infine è stato eseguito un carotaggio sismico Down-hole (DH505).

La galleria in progetto segue un tracciato curvo, quindi anche in questo caso il rilievo è stato condotto acquisendo due tratti separati e uniti successivamente graficamente

Il tratto di profilo sismico 570a ha una lunghezza di 523 ml dalla prog. 2906 alla prog. 3429. In questo tratto, come nel successivo, si assiste ad un cambiamento nell'aspetto del profilo sismico; si hanno molti più orizzonti, una minore continuità, il tutto legato ad una maggiore complessità strutturale e presumibilmente ad una minore riflettività della serie.

In questa situazione si sono marcati numerosi livelli, talora anche più di tre in sequenza verticale, ma per la complessità dell'assetto non è stata data una continuità laterale da un blocco all'altro attraverso un colore. Quindi l'assetto di ciascun blocco potrebbe essere diverso.

Nel tratto iniziale si ha una struttura compressiva legata a faglie inverse a basso angolo che emergono in superficie alle prog. 3150 e 3420; le strutture rialzate sono quindi segmentate in diversi blocchi da faglie distensive, con immersione omogenea verso l'imbocco. Le faglie sono marcate da variazioni di velocità intervallo; una risalita omogenea della velocità si osserva nel blocco rialzato dal lato dello sbocco della galleria su una piccola valletta.

Il tratto di profilo sismico 570b ha una lunghezza di 471 ml dalla prog. 3357 alla prog. 3828. Esso costituisce la prosecuzione del tratto precedente, da cui è separato per la presenza di un'ampia curva del tracciato che ha impedito la stesura di un profilo unico.

Questo tratto del profilo ha caratteristiche simili al precedente in termini di carattere sismico, di caratteristiche degli orizzonti in continuità e frequenza.



Tuttavia l'assetto strutturale è diverso in quanto appare legato a faglie inverse ma con immersione opposta rispetto alle precedenti, e geometria a basso angolo. L'assetto giaciturale degli strati è sub-orizzontale e solo nel tratto iniziale del profilo viene accennata una pendenza maggiore.

Le faglie inverse principali sono nella zona d'imbocco della galleria, e sono accompagnate da una blanda risalita della velocità intervallo.

Il modello sismico tomografico ha evidenziato principalmente il grado di alterazione delle litologie indagate. Nell'area è stata rilevata la presenza dei litotipi associabili alle formazioni:

- Arenarie di Ponte Bratica (B)
- Macigno (M)
- Calcare Cavernoso (Cc)
- Verrucano (V)

In funzione ai valori di velocità sismica sono state fatte le seguenti distinzioni in classi:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Arenarie di Ponte Bratica	B1	detritico	<1.000
	B2	allentato	1.000<x<2.000
	B3	compatto	>2.000
Macigno	M1	detritico	<1.200
	M2	allentato	1.200<x<2.000
	M3	compatto	>2.000
Calcare Cavernoso	Cc1	detritico	<1.000
	Cc2	allentato	1.000<x<2.000
	Cc3	compatto	>2.000
Verrucano	V1	detritico	<1.000
	V2	allentato	1.000<x<2.000
	V3a	compatto	2.000<x<2.800
	V3b	compatto con falda	>2.800

In particolare il profilo sismico 570b evidenzia la presenza di terreni detritici sul versante a nord interessato dall'imbocco della galleria Fornaci 1 che in relazione alla carta geomorfologica si trova in corrispondenza di una frana attiva (figura 8.1)

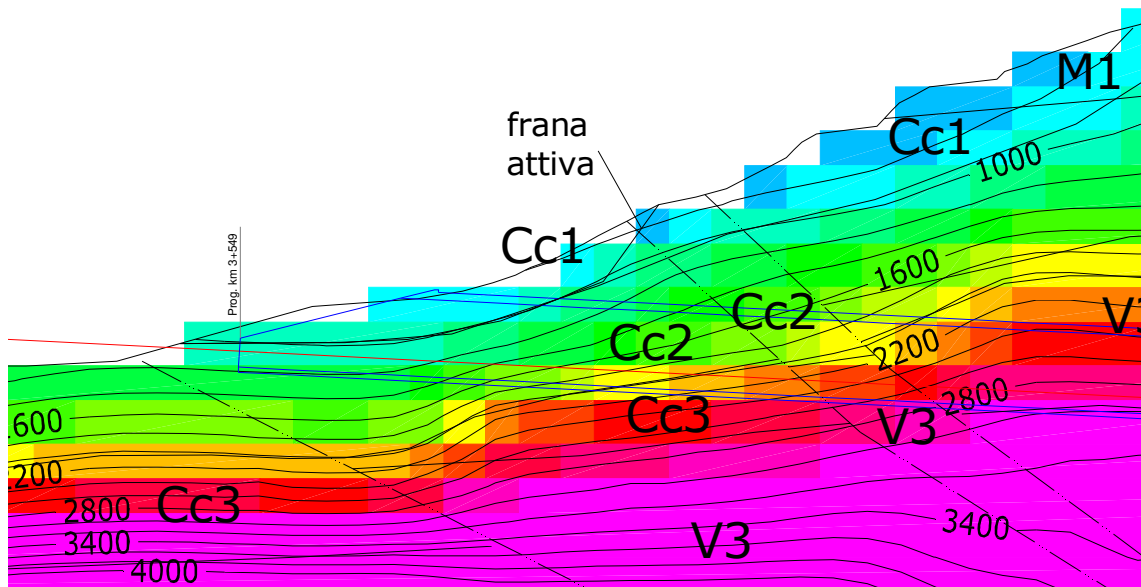


Figura 8.1 - Particolare dell'imbocco Galleria Fornaci 1 (tav.9)

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>570a</b>	652
<b>570b</b>	692

In considerazione dei risultati ottenuti possiamo affermare che l'area interessata dalla galleria artificiale Felettino 2, dalla galleria naturale Felettino 3 e dalla galleria Fornaci 1 è caratterizzata da terreni che ricadono in Classe **B**.

Il carotaggio sismico Down-hole ha permesso di calcolare i moduli elastici dinamici in sito in funzione dei valori di velocità sismica.

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva dei risultati della prova Down-hole.

DOWN-HOLE 505

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>p</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	m	(kN/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	□	G	E	K
						(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
detrito	0 - 3	18.0	565	257	0.37	1.21E+05	3.32E+05	4.24E+05
Verrucano	3 - 8	20.0	757	480	0.16	4.70E+05	1.09E+06	5.42E+05
Verrucano	8 - 18	21.0	981	571	0.24	6.98E+05	1.74E+06	1.13E+06
Verrucano	18 - 21	21.0	2624	841	0.44	1.51E+06	4.37E+06	1.27E+07
Verrucano	21 - 30	21.0	2393	908	0.42	1.76E+06	5.00E+06	9.91E+06
Verrucano	22 - 30	21.0	3051	1129	0.42	2.73E+06	7.75E+06	1.63E+07
Verrucano	23 - 30	21.0	2851	1097	0.41	2.58E+06	7.28E+06	1.40E+07

### ZONA MELARA

Nell'area in esame è stato realizzato un rilievo sismico a rifrazione interpretato tomograficamente composto di più profili sismici che sono stati posizionati in funzione alle problematiche logistiche infrastrutturali esistenti. Sui profili sismici son state realizzate le relative prove sismiche MASW, inoltre sono stati eseguite registrazioni HVSR e carotaggi sismici down-hole.

Complessivamente il rilievo sismico tomografico ha evidenziato principalmente il grado di alterazione delle litologie indagate. Nell'area è stata rilevata la presenza delle litologie e terreni classificati nelle seguenti distinzioni:

- Detrito – comprende principalmente riporti antropici e (D)
- Alluvioni (A1)
- Verrucano (V)

In funzione ai valori di velocità sismica sono state fatte le seguenti distinzioni in classi:

Formazioni geologiche	Classe	Grado di alterazione	Velocità sismica (m/s)
Detrito	D		<1.000
Alluvioni	A1		<1.200
Verrucano	V1	detritico	<1.000
	V2	allentato	1.000<x<2.000
	V3a	compatto	2.000<x<2.800
	V3b	compatto con falda	>2.800

In particolare è da evidenziare che la distinzione tra V3a e V3b è stato possibile in riferimento ai risultati geognostici, questo però è spiegabile in quanto il Verrucano ospitante la falda in pressione è caratterizzata dalla presenza maggiore componente anagenitica.

I risultati delle prove MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) hanno permesso di individuare un modello medio stratigrafico delle onde S e in funzione di ogni singola sismo-stratigrafia delle onde S e stato calcolato il relativo valore di Vs30.

prova MASW n°	valore Vs30 (m/s)
<b>550</b>	589
<b>650</b>	534
<b>651</b>	530
<b>652a</b>	539
<b>652b</b>	547
<b>653a</b>	470
<b>653ba</b>	588
<b>653bb</b>	546
<b>653ca</b>	470
<b>653cb</b>	456
<b>653d</b>	493

In considerazione dei risultati ottenuti possiamo affermare che l'area interessata dalle opere in progetto nell'area di Melara, è caratterizzata da terreni che ricadono in Classe **B**.

I carotaggi sismici Down-hole hanno permesso di calcolare i moduli elastici dinamici in sito in funzione dei valori di velocità sismica.

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei risultati delle prove Down-hole.

**DOWN-HOLE 602**

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>P</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	<b>m</b>	<b>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>	<b>□</b>	<b>G</b>	<b>E</b>	<b>K</b>
						<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>
<i>detrito</i>	0 - 2	18.0	282	170	0.21	5.30E+04	1.29E+05	7.52E+04
<i>Alluvioni</i>	2 - 5	19.5	1432	313	0.47	1.95E+05	5.74E+05	3.82E+06
<i>verrucano</i>	5 - 10	20.5	2094	480	0.47	4.81E+05	1.42E+06	8.52E+06
<i>verrucano</i>	10 - 14	21.0	2593	597	0.47	7.63E+05	2.25E+06	1.34E+07
<i>verrucano</i>	14 - 17	21.0	1448	557	0.41	6.64E+05	1.88E+06	3.60E+06
<i>verrucano</i>	17 - 23	21.0	2315	1062	0.37	2.41E+06	6.60E+06	8.25E+06

**OWN-HOLE 609**

Litotipo	Profondità	densità	V <sub>P</sub>	V <sub>SH</sub>	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico	modulo Young	modulo bulk
	<b>m</b>	<b>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>m/s</b>	<b>m/s</b>	<b>□</b>	<b>G</b>	<b>E</b>	<b>K</b>
						<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>(kN/m<sup>2</sup>)</b>
<i>detrito</i>	0 - 3	18.0	268	146	0.29	3.91E+04	1.01E+05	7.96E+04
<i>verrucano alterato</i>	3 - 7	19.0	962	282	0.45	1.54E+05	4.48E+05	1.59E+06
<i>verrucano</i>	7 - 17	20.0	1941	504	0.46	5.18E+05	1.52E+06	6.99E+06
<i>verrucano</i>	17 - 27	21.0	2087	578	0.46	7.15E+05	2.09E+06	8.37E+06
<i>verrucano</i>	27 - 36	21.0	2437	691	0.46	1.02E+06	2.98E+06	1.14E+07

Infine le registrazioni HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) hanno definito la frequenza fondamentale del sito risulta compresa tra 5 e 12 Hz.