

**Comune di**

**Trani**



**Provincia di**

**Barletta-Andria-Trani**



**VARIANTE AL PIANO URBANISTICO GENERALE STRUTTURALE (PUG/S) E  
PROGRAMMATICO (PUG/P) PER MODIFICARE LA DESTINAZIONE URBANISTICA  
AL SUOLO IN CATASTO AL FOGLIO 25/A PART.LLE 1108 E 1865**

GENNAIO 2019

*Committente:*

**ARCH. Francesco Innino**

*Elaborato:*

**RELAZIONE GEOFISICA**

**PRO  
GEO**

Geologia e Geofisica  
Prospezioni geofisiche in superficie e in foro  
Indagini idrogeologiche e geotecniche

**PRO-GEO s.a.s.**  
di Alberto Angelo Raffaele Quarto & C.  
Via M. R. Imbriani, 13 – 76121 Barletta  
P. IVA: 05578650722  
TEL.E FAX: 0883-390511  
EMAIL: progeosas@alice.it  
MOB. 3356098214  
PEC: info@pec.progeosas.net

**PRO-GEO s.a.s.**  
di Alberto A.R. Quarto & C.  
Via M.R. Imbriani, 13  
76121 BARLETTA  
P.IVA 05578650722

GEOLOGIA E GEOFISICA  
PROSPEZIONI GEOFISICHE IN SUPERFICIE ED IN FORO  
INDAGINI IDROGEOLOGICHE E GEOLOGICO-TECNICHE

## Indice

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>AZIONE SISMICA</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>INDAGINE M.A.S.W.</b> .....	<b>6</b>
3.1	Metodologia indagine M.A.S.W. ....	6
3.2	Attrezzature e tecniche operative.....	8
3.3	Risultati .....	9
<b>4</b>	<b>PROSPEZIONE SISMICA</b> .....	<b>11</b>
4.1	Metodologia sismica a rifrazione.....	11
4.2	Attrezzature e tecniche operative.....	13
4.3	Risultati .....	14
<b>5</b>	<b>MISURE DI MICROTREMORI IN CAMPO LIBERO</b> .....	<b>16</b>
5.1	Cenni teorici della tecnica HVSR .....	16
5.2	Strumentazione e modalità operative .....	19
5.3	Analisi dei risultati .....	22
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>23</b>

### ALLEGATI

*Ubicazione area d'indagine (da CTR) - scala 1:10.000*

*Ubicazione misure geofisiche (da CTR) - scala 1:1.000*

*Ubicazione misure geofisiche (da Ortofoto) - scala 1:1000*

#### Allegato profilo sismico

- Sismogrammi analisi MASW (metodo Re.Mi.)
- Analisi profilo MASW (metodo Re.Mi.)
- Sismogrammi sismica a rifrazione onde P
- Dromocrone
- Tomografia sismica ed interpretazione sismostratigrafica
- Documentazione fotografica

#### Allegato misura HVSR

- Report misure HVSR
- Documentazione fotografica

## 1 PREMESSA

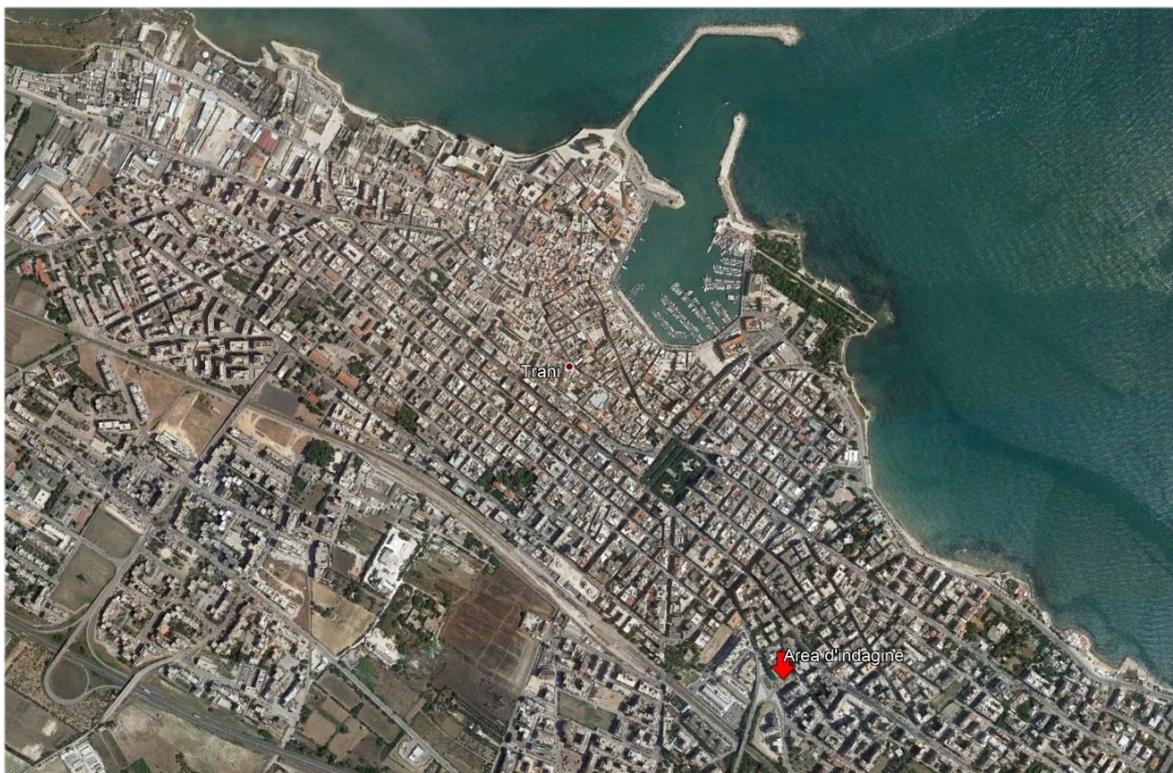
Per incarico conferito alla "PRO-GEO s.a.s." dall'Arch. Francesco Innino è stata eseguita una prospezione geofisica propedeutica alla variante al Piano Urbanistico Generale Strutturale (PUG/S) e Programmatico (PUG/P) per modificare la destinazione urbanistica al suolo in catasto al foglio 25/A part.IIe 1108 1 1865, comune di **Trani** (BT).

L'indagine è stata mirata alla definizione delle caratteristiche fisico-dinamiche ed elettriche dei terreni, alla ricostruzione stratigrafica del sito e alla classificazione del sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Inoltre, per una valutazione degli effetti sismici locali, sono state ricavate le frequenze fondamentali di vibrazione del sottosuolo mediante la tecnica di indagine sismica passiva HVSR (Metodo di Nakamura).

A tal fine sono state effettuate le seguenti indagini geognostiche:

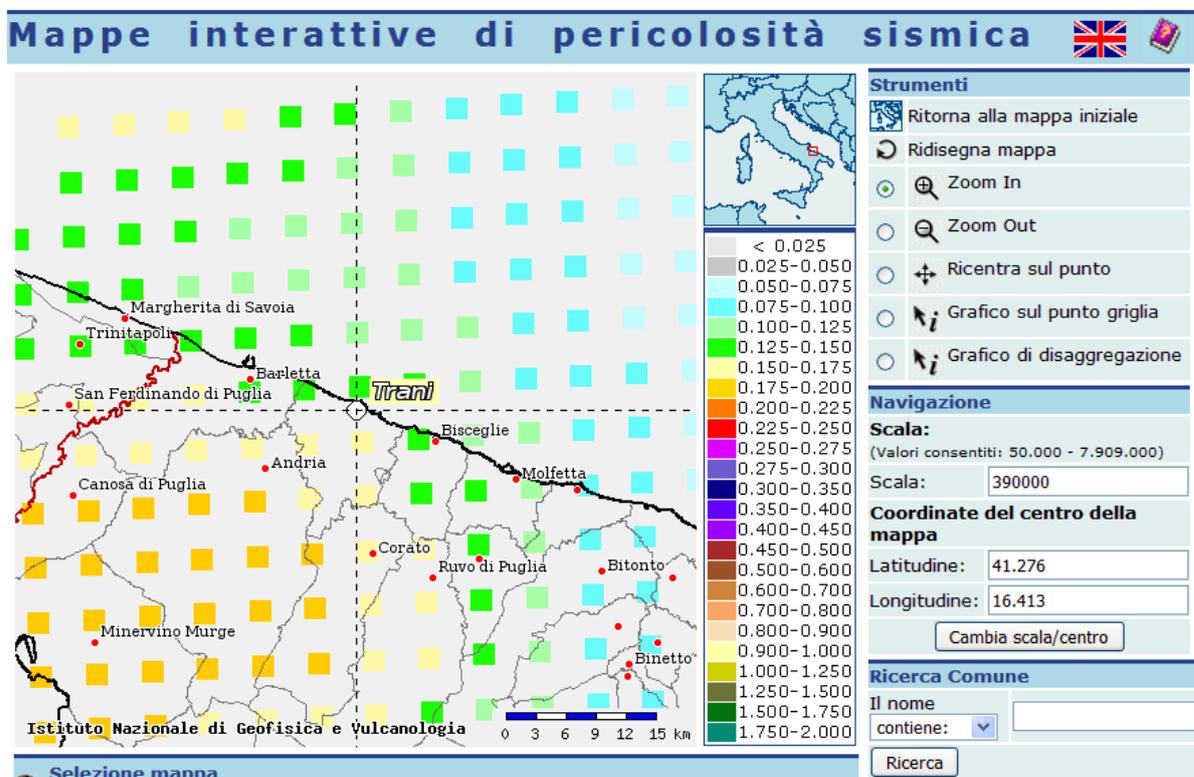
- n. 1 profilo sismico con la tecnica MASW (metodo Re.Mi.);
- n. 1 profilo sismico a rifrazione in onde P;
- n. 1 misura HVSR di microtremori in campo libero.



Ubicazione del sito d'indagine

## 2 AZIONE SISMICA

Le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 e l'OPCM del 20 marzo 2003 n. 3274, superano il concetto della classificazione del territorio in zone, imponendo nuovi e precisi criteri di verifica dell'azione sismica nella progettazione delle nuove opere ed in quelle esistenti, valutata mediante una analisi della risposta sismica locale. In assenza di queste analisi, la stima preliminare dell'azione sismica può essere effettuata sulla scorta delle "categorie di sottosuolo" e della definizione di una "pericolosità di base" fondata su un reticolo di punti di riferimento, costruito per l'intero territorio nazionale. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di  $a_g$  e dei principali "parametri spettrali" riferiti all'accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell'azione sismica (fattore di amplificazione massima  $F_0$  e periodo di inizio del tratto a velocità costante  $T^*C$ ). Il reticolo di riferimento ed i dati di pericolosità sismica vengono forniti dall'INGV e pubblicati nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.



Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni riferita a suoli rigidi (Ordinanza 3274)

Secondo le NTC l'area in questione è caratterizzata da un'accelerazione compresa tra **0.125-0.150 g**, come evidenziato nella figura a, in cui è riportata la mappa di pericolosità sismica per il sito in questione con una probabilità di eccedenza del 5% in 50 anni (riferita a suoli rigidi - categoria A).

Tale mappa di pericolosità sismica è riferita ad un periodo di ritorno  $TR=975$ , corrispondente ad una vita nominale dell'opera  $VN=50$  anni e ad un coefficiente d'uso  $CU=1.5$  (strutture importanti), parametri legati tra loro dalla seguente formula:

$$TR = -V_R / \ln(1 - P_{VR}) \text{ dove } V_R = V_N \cdot C_U$$

Valori dei parametri per la definizione del periodo di ritorno		
$P_{V_R}$ (Stato Limite)	$C_U$	$V_N$ [anni]
81% Operatività (SLO)	0.7 (I. Strutture secondarie)	$\leq 10$ (Opere provvisorie)
63% Danno (SLD)	1.0 (II. Strutture ordinarie)	$\geq 50$ (Opere ordinarie)
10% Salvaguardia della vita (SLV)	1.5 (III. Strutture importanti)	$\geq 100$ (Grandi opere)
5% Prevenzione del Collasso (SLC)	2.0 (IV. Strutture strategiche)	

I nuovi criteri di caratterizzazione sismica locale, come accennato in precedenza, sono menzionati nelle "Nuove Norme Tecniche per le costruzioni 2018", entrate ufficialmente in vigore in data 22/03/2018, per le quali è necessario, inoltre, caratterizzare il sito in funzione degli spettri di risposta sismica delle componenti orizzontali e verticali del suolo. Gli spettri di risposta sismica vanno stimati in relazione ai differenti Stati Limite a cui un manufatto è potenzialmente sottoposto; tale stima è stata effettuata mediante l'applicazione della GEOSTRU al seguente link:

<http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx>

Essa fornisce i parametri sismici ( $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$ ) per gli stati limite SLO, SLD, SLV, SLC, tipici del luogo o della costruzione in esame.

Di seguito vengono mostrati i risultati riferiti alla seguente maglia sismica in cui ricade il sito:

Indirizzo Coordinate Isole

Indirizzo

TRANI

WGS84: Lat 41.277485 - Lng 16.417833

ED50: Lat 41.278459 - Lng 16.418662

Mappa Satellite

### Stati limite

Classe Edificio

II. Affollamento normale. Assenza di funz. pur...

Vita Nominale: 50

Interpolazione: Media ponderata

**CU = 1**

Stato Limite	Tr [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$	$T_c^*$ [s]
Operatività (SLO)	30	0.035	2.503	0.258
Danno (SLD)	50	0.044	2.515	0.294
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.140	2.524	0.366
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.199	2.486	0.370

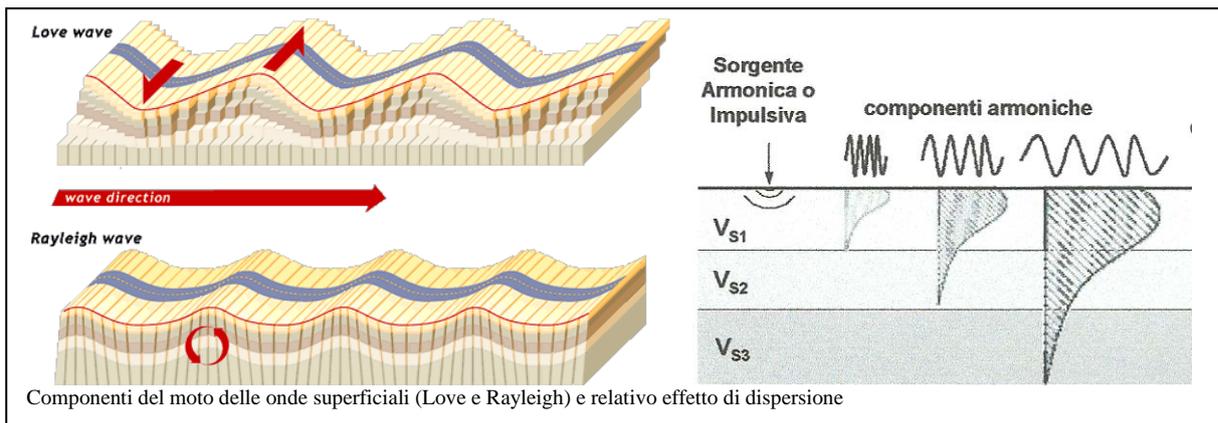
Periodo di riferimento per l'azione sismica: 50

Ubicazione dell'area all'interno della maglia sismica di riferimento e relativi parametri sismici

### 3 INDAGINE M.A.S.W

#### 3.1 Metodologia indagine M.A.S.W.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva 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 (nel nostro caso 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 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 interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW si distingue in "attivo" e "passivo" (Zywicki, 1999; Park e Miller, 2006; Roma, 2006):

- Nel "metodo attivo" le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno

stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica).

- **Nel “metodo passivo”** (Re.Mi.) lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche “microtremori”) prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali). E’ possibile utilizzare alcune varianti geometriche del metodo passivo (disposizione dei geofoni a cerchio, quadrato, triangolo e croce) per una valutazione più accurata del trend dispersivo delle onde superficiali (Park e Miller, 2006).

**In questa indagine** è stato utilizzato il **“metodo Masw passivo”** (metodo Re.Mi.) poiché rappresenta il metodo più indicato in ambito urbano, dove è presente una grande quantità di “rumore” generato dal traffico.

### 3.2 Attrezzature e tecniche operative

Per la misura eseguita sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni.
- 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz.
- SeisOpt ReMi v.2.0 della Optim LLC.

**Il profilo eseguito ha una lunghezza di 46 metri; l'acquisizione è stata effettuata con uno stendimento di 24 geofoni interdistanziati di 2.0 metri.** Sono state acquisite sei registrazioni di 20 secondi con una frequenza di campionamento di 500 Hz.

I sismogrammi ottenuti sono stati elaborati con una trasformazione bidimensionale dal dominio tempo-distanza (t-x), al dominio velocità di fase-frequenza (p-f). E' stato così possibile analizzare l'energia di propagazione del "rumore ambientale" lungo tutte le direzioni della linea sismica e riconoscere le onde superficiali con carattere dispersivo.

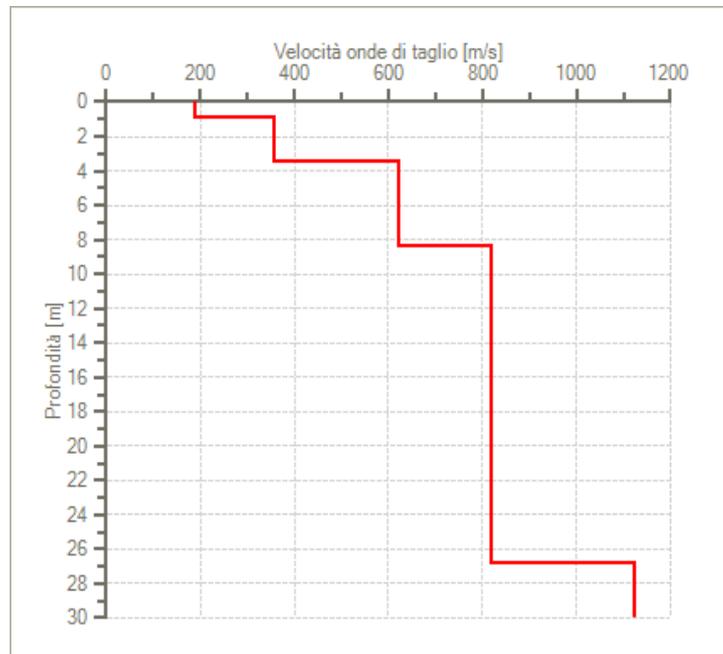
I sei spettri di potenza p-f ottenuti sono stati sommati e sullo spettro risultante sono stati individuati una serie di punti sul confine inferiore dell'area ad alta energia (piking).

Tali valori sono stati riportati su un grafico velocità di fase/periodo ed è stata analizzata la relativa curva di dispersione. E' stato poi calcolato un modello ottimale di velocità di onde trasversali mediante il "fitting" tra curva di dispersione e valori sperimentali.

### 3.3 Risultati

Il modello di Vs-profondità, ottenuto mediante l'analisi MASW, è schematizzato di seguito:

Masw 1	
Vs (m/s)	Profondità (mt)
188.8	0.0÷0.9
356.8	0.9÷3.5
619.9	3.5÷8.4
817.1	8.4÷26.8
1124	26.8÷30



In conformità al D.M. 17/01/2018 "Norme tecniche per le costruzioni" 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:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

- $h_i$  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  $V_{s,30}$  ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Poiché le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni sono chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II (di seguito), si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ .

Pertanto il sito in esame rientra in **categoria di sottosuolo B** con  $V_{s,eq}$  di **419 m/s**

Categoria	Descrizione	$V_s$ min [m/s]	$V_s$ max [m/s]
A	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.	800	-
B	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 e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.	360	800
C	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.	180	360
D	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 m/s e 180 m/s.	100	180
E	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.	-	-

NB: In molti casi (contrastati di impedenza\*, inversioni di velocità\*\*, depositi di elevato spessore, etc.), la stima degli effetti di sito mediante la  $V_{s,eq}$  risulta affetta da notevoli incertezze e si deve fare riferimento, come del resto prescritto in generale dalle NTC2018, alla RSL mediante analisi numerica: v. RSL III Geostru.

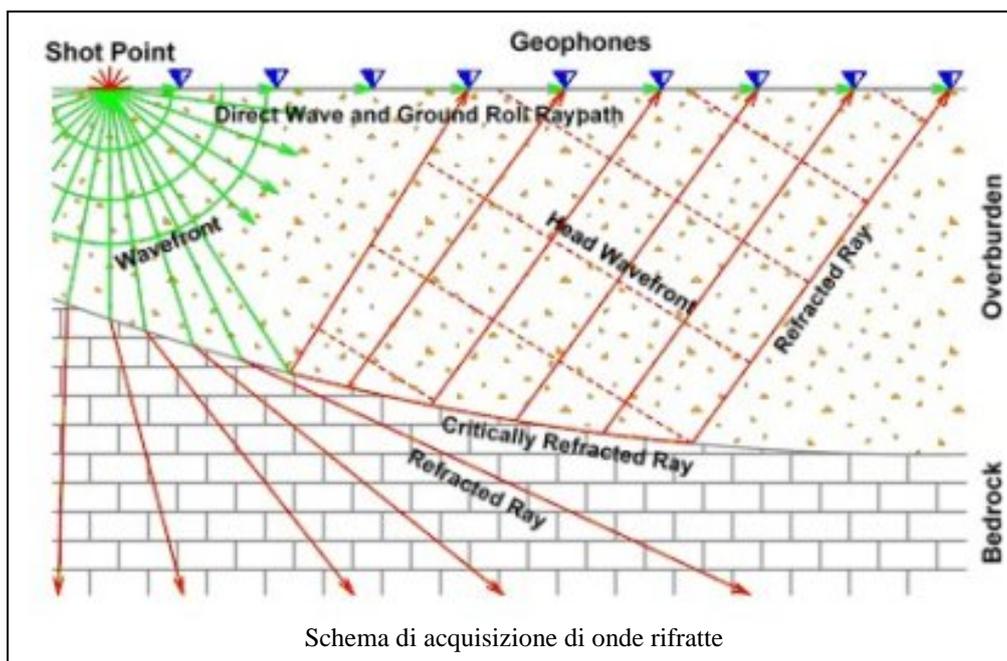
## 4 PROSPEZIONE SISMICA

### 4.1 Metodologia sismica a rifrazione

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto sorgente), in corrispondenza di una molteplicità di punti disposti allineati sulla superficie topografica (geofoni). Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà geometriche e fisico-meccaniche dei terreni.

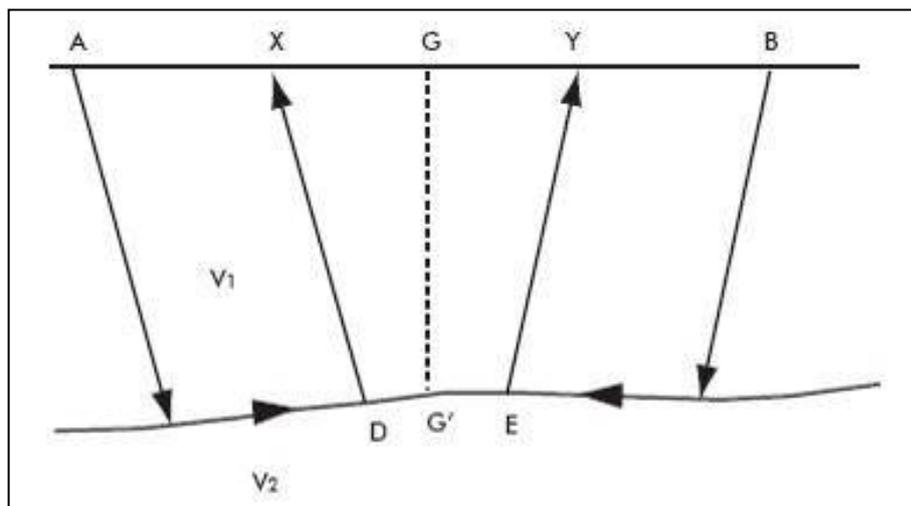
Mediante questo tipo di indagine si può risalire alla composizione litologica di massa dei terreni, al loro grado di fratturazione, alla geometria delle prime unità sottostanti la coltre superficiale, alla profondità in cui si trova la roccia di fondo ("bedrock").

L'unica condizione per eseguire studi di sismica a rifrazione è che la successione rocciosa da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità.



Normalmente il sottosuolo è caratterizzato da strati piano-paralleli con velocità crescente all'aumentare della profondità. In contesti più complessi (inversioni di velocità o presenza di corpi non stratificati) bisogna tener conto del modello tridimensionale del sottosuolo ed intervenire con indagini più specifiche (misure sismiche in foro), per non incorrere in errori interpretativi.

Il metodo di elaborazione utilizzato nel corso delle analisi dei dati a rifrazione è stato il Generalized Reciprocal Method (GRM: Palmer - 1980). L'analisi GRM (metodo reciproco generalizzato) si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del riflettore (G'). Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.



Successivamente, con l'ausilio del software "Rayfract" della Intelligent Resources Inc., si è proceduti all'analisi del sottosuolo in tomografia sismica. Il software, utilizzando i tempi d'arrivo delle onde lette sui sismogrammi sperimentali, permette di eseguire delle ottimizzazioni del modello di velocità. Tali interpretazioni danno modo di rappresentare le velocità sismiche sia secondo sismostrati e sia secondo un'imaging bidimensionale a colori.

## 4.2 Attrezzature e tecniche operative

Per il profilo eseguito è stata utilizzata le seguenti attrezzature:

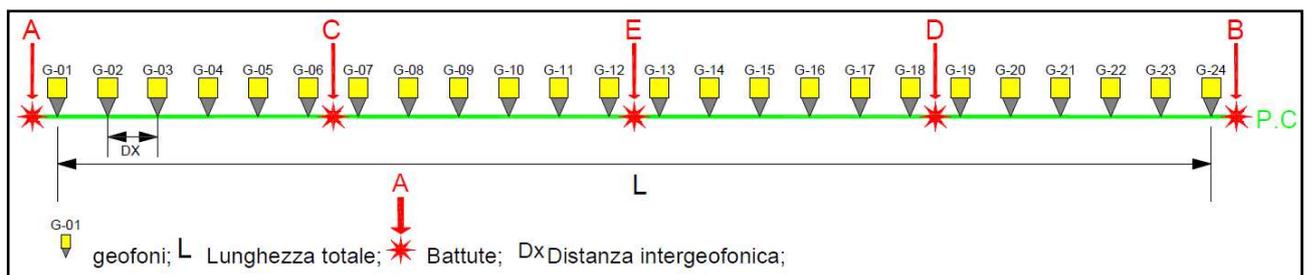
- Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni;
- Ventiquattro geofoni a componente verticale con frequenza di 14 Hz;
- Un piattello in alluminio;
- Un martello di 8 Kg dotato di trigger.

	Lunghezza (metri)	Distanza geofonica (metri)
Profilo sismico	48	2.0

Di seguito è mostrato lo schema geometrico di acquisizione:



Il picking delle onde sismiche è stato effettuato sui sismogrammi sperimentali (vedi allegato) mediante il software TomTime della Geotom, LCC, dopo un opportuno filtraggio delle tracce. I primi arrivi sono riportati nei diagrammi tempo-distanza “dromocrone” (vedi allegato).

### 4.3 Risultati

L'elaborazione dei dati ha permesso di ricostruire il sottosuolo secondo 3 "sismostrati", così caratterizzati:

1. **Il primo sismostrato** (si approfondisce fino a 1.0 mt circa dal p.c.) ha velocità  $V_p$  di 460 m/s e  $V_s$  di 189 m/s;
2. **Il secondo sismostrato** (è profondo mediamente da 1.0 fino a 3.3 mt dal p.c.) ha velocità  $V_p$  di 840 m/s e  $V_s$  di 357 m/s;
3. **Il substrato rifratore** ha velocità  $V_p$  di 1580 m/s e  $V_s$  di 620 m/s.

Per ciò che concerne la correlazione delle caratteristiche fisico-dinamiche con quelle geologico-tecniche del sottosuolo esplorato, si può ritenere che:

1. **Il primo sismostrato** è associabile a *Terreno di riporto*;
2. **Il secondo sismostrato** è associabile a *Sabbie poco cementate*;
3. **Il substrato rifratore** è associabile a *alternanza di livelli limoso sabbiosi con livelli di sabbie addensate*.

Nella tabella che segue sono mostrati tutti i valori delle velocità sismiche, il coefficiente di Poisson ed i valori dei moduli dinamici  $E$  (di Young),  $G$  (di taglio) e  $K$  (di compressibilità), espressi in  $\text{Kg/cm}^2$ . Questi valori sono calcolati considerando un peso di volume tipico della litologia presente in sito.

Le velocità  $V_s$  sono state ricavate dall'indagine sismica MASW eseguita.

Profondità media strato	Vp	Vs	$\sigma$	$\gamma$	E	G	K
0÷1.0	460	189	0.40	1.80	1833	655	3009
1.0÷3.3	840	357	0.39	1.90	6861	2468	10375
>3.3	1580	620	0.41	2.00	22084	7837	40446

$V_p$  = velocità onde longitudinali in m/s

$V_s$  = velocità onde trasversali in m/s

$\sigma$  = coefficiente di Poisson

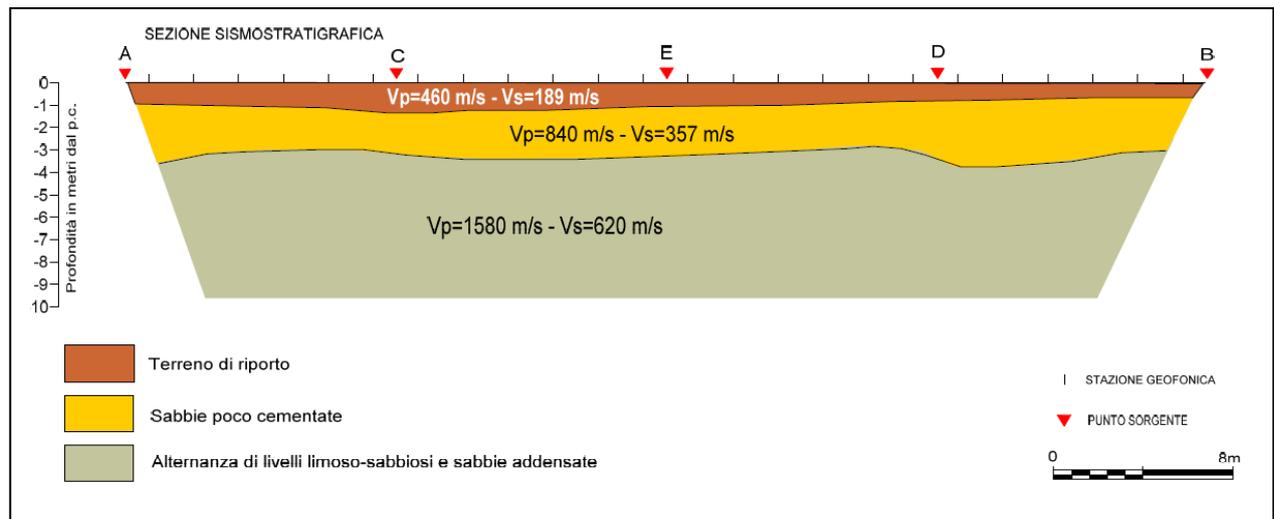
$\gamma$  = peso di volume in g/cm<sup>3</sup>

E = modulo dinamico di Young in Kg/cm<sup>2</sup>

G = modulo dinamico di taglio in Kg/cm<sup>2</sup>

K = modulo dinamico di compressibilità in Kg/cm<sup>2</sup>

Di seguito viene rappresentata la sezione sismostratigrafica ottenuta dall'interpretazione dei risultati. In allegato vengono riportati i tutti gli elaborati relativi all'analisi di sismica a rifrazione in oggetto.



## 5 MISURE DI MICROTREMORI IN CAMPO LIBERO

### 5.1 Cenni teorici della tecnica HVSR

La tecnica dei rapporti spettrali o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento delle strutture in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nella progettazione per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di una struttura**, qualora la misura venga effettuata all'interno della stessa. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio  $V_s$**  calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{s30}$  e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 de 22/03/2018;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità, anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

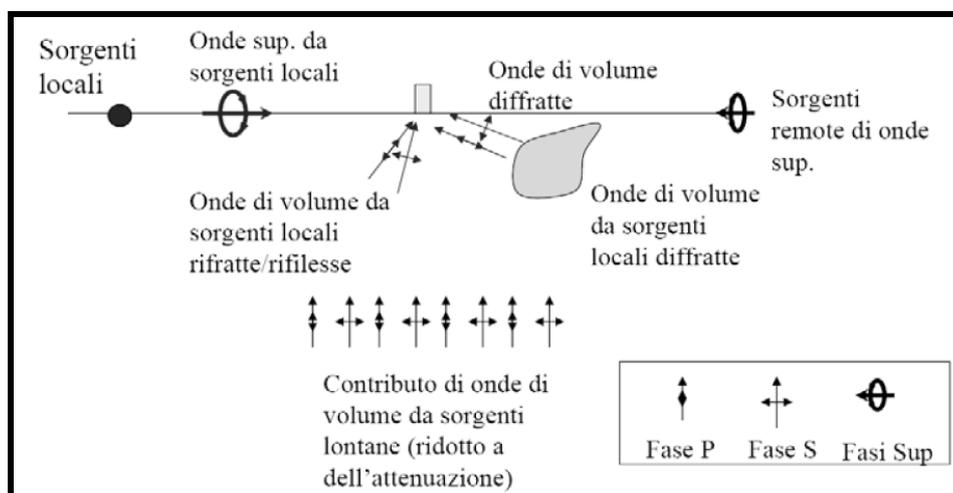
1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s;
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
3. dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

**segnale registrazione al sito**

$$x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche "microtremore" poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.



Nel tragitto dalla sorgente  $s$  al sito  $x$  le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato e dalle strutture edificate. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore.

Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartate dalla sismologia classica, contiene informazioni. Queste informazioni sono "sepolte" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di vibrazione dei suoli e delle strutture; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

In questa tecnica, viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto.

## 5.2 Strumentazione e modalità operative

La misura dei microtremori in campo libero è stata effettuata mediante 1 punto di registrazione.

L'ubicazione di dettaglio è mostrata in allegato.

Successivamente è avvenuta l'elaborazione delle tracce registrate e l'analisi del rapporto spettrale fra la componente orizzontale e quella verticale del noise (rumore). Ciò ha permesso di stimare le frequenze fondamentali di vibrazione del cavalcavia.

Le misure sono state effettuate col sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della "Seismic Source Company" mediante un geofono tridimensionale a frequenza di 2 Hz che dispone di tre sensori disposti secondo tre direzioni ortogonali:

- Verticale
- NS
- EW



Prima di dare inizio a ciascuna prova si è posta molta attenzione al posizionamento a terra del geofono tridimensionale al fine di ottenere un buon accoppiamento tra pavimento e geofono, avendo cura di livellare e orientare lo stesso verso le direzioni citate.



La misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento di 500 Hz con tempo di acquisizione compreso tra di 20 minuti.

Il moto del terreno amplificato e convertito in forma digitale è stato successivamente elaborato mediante il software Easy HVSR della "Geostru".

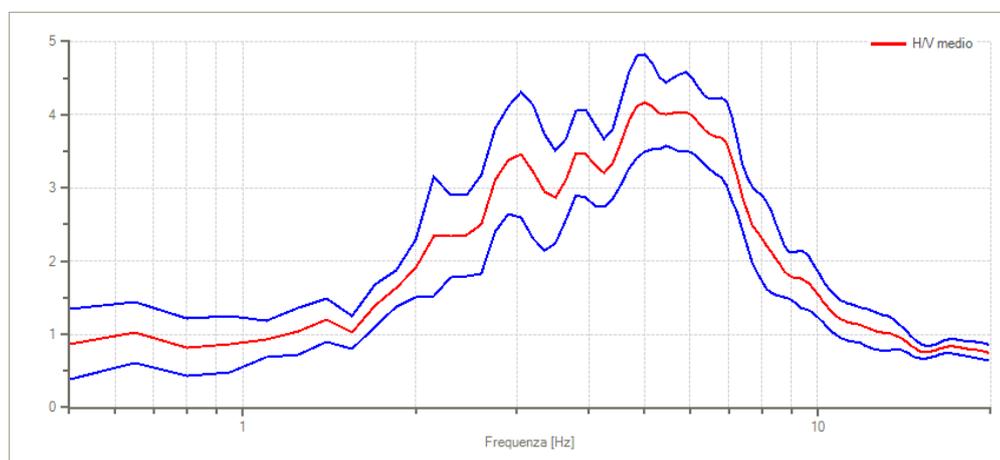
Per definire un chiaro picco, devono essere soddisfatte le condizioni definite dalle direttive del progetto SESAME (vedi report allegato). Nelle linee guida SESAME ci sono due serie di criteri per stimare se la frequenza del picco principale di una curva H/V può essere considerato attendibile come frequenza fondamentale del sito (o la frequenza relativa al primo forte contrasto di impedenza in profondità).

Il primo set è finalizzato a valutare l'affidabilità della curva H/V e la qualità della registrazione; mentre il secondo gruppo è utilizzato per valutare la chiarezza del picco. Questi criteri sono adatti a quasi tutte le situazioni e sono stati ideati per usarli senza alcuna informazione sulle condizioni geologiche e sul sito di registrazione.

In fase di elaborazione è stata utilizzata una finestra di campionamento di 20 secondi, che è risultata la migliore in relazione al tempo totale di acquisizione.

Le misure che presentano disturbi dovuti a rumore antropico istantaneo o di breve durata sono state ripulite escludendo dall'analisi le finestre temporali interessate dal disturbo.

La risultanza è riassunta nel grafico (figura seguente) in cui in ascissa è riportata la frequenza di vibrazione  $f$ , ed in ordinata il rapporto H/V (Horizontal to Vertical spectral ratio).



Misura 1 - grafico HVSR

La frequenza fondamentale di vibrazione è definita dal valore in frequenza corrispondente al massimo valore H/V registrato.

Va ricordato che il valore del rapporto H/V è tanto più grande quanto più è alta l'impedenza sismica di due sismostrati a contatto e che il valore di frequenza dipende dallo spessore del sismostrato  $h$  e dalla velocità delle onde  $V_s$  ad esso riferite, così come descritto dalla seguente relazione:

$$f = \frac{V_s}{4h}$$

dalla quale emerge come la tecnica H/V possa fornire anche indicazioni di carattere stratigrafico: a partire da una misura H/V che vincola il valore di  $f$ , nota la  $V_s$  media delle coperture, si può stimare la profondità  $h$  dei riflettori sismici principali o viceversa.

A titolo d'esempio viene citato il seguente abaco che consente di fare una stima approssimativa degli spessori della coltre in funzione delle frequenze di vibrazione di sito.

$f_0$ (Hz)	$h$ (m)
< 1	> 100
1 – 2	50 – 100
2 – 3	30 – 50
3 – 5	20 – 30
5 – 8	10 – 20
8 – 20	5 – 10
> 20	< 5

### 5.3 Analisi dei risultati

Dall'analisi HVSR, eseguita sul terreno, è possibile riconoscere la frequenza del picco del rapporto H/V: **5.00 Hz ±0.16 Hz.**

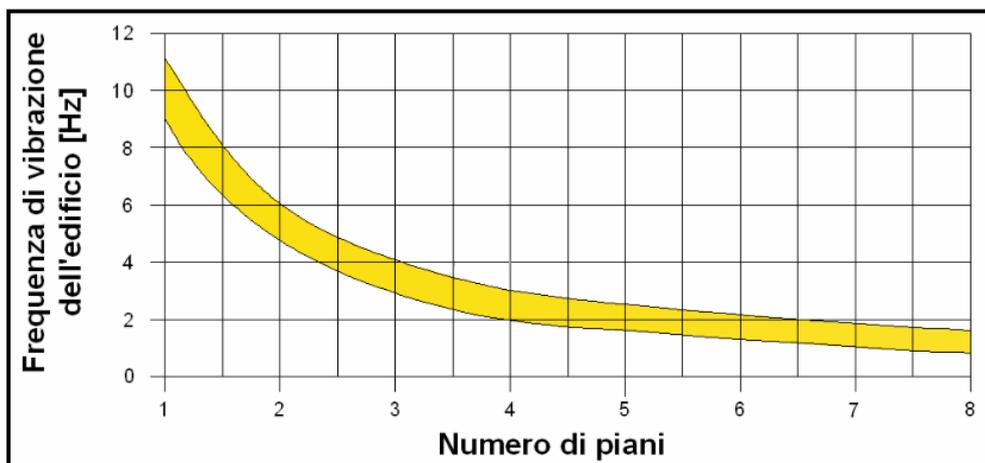
Tale frequenza rinvenuta potrebbero correlarsi a cambi litologici presenti a profondità superiori a 20 m.

E 'quindi necessario porre estrema attenzione a fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei manufatti ivi edificati in quanto le azioni sismiche su di essi sarebbero, a dir poco, gravose.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura ad essere particolarmente pericolosa, poiché da luogo alla massima amplificazione sismica.



## 6 CONCLUSIONI

Riassumendo quanto esposto il **profilo sismico a rifrazione** eseguito ha rilevato la presenza di terreni caratterizzati prevalentemente da sabbie passanti, più in profondità, a limi sabbiosi in alternanza a sabbie addensate le cui caratteristiche fisiche-dinamiche migliorano con la profondità. In superficie è presente un piccolo spessore **di terreni di copertura** di circa un metro.

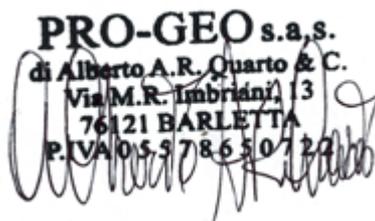
I **moduli dinamici** e le **velocità** delle onde sismiche riscontrate sono schematizzati nella seguente tabella:

Profondità media strato	Vp	Vs	$\sigma$	$\gamma$	E	G	K
0÷1.0	460	189	0.40	1.80	1833	655	3009
1.0÷3.3	840	357	0.39	1.90	6861	2468	10375
>3.3	1580	620	0.41	2.00	22084	7837	40446

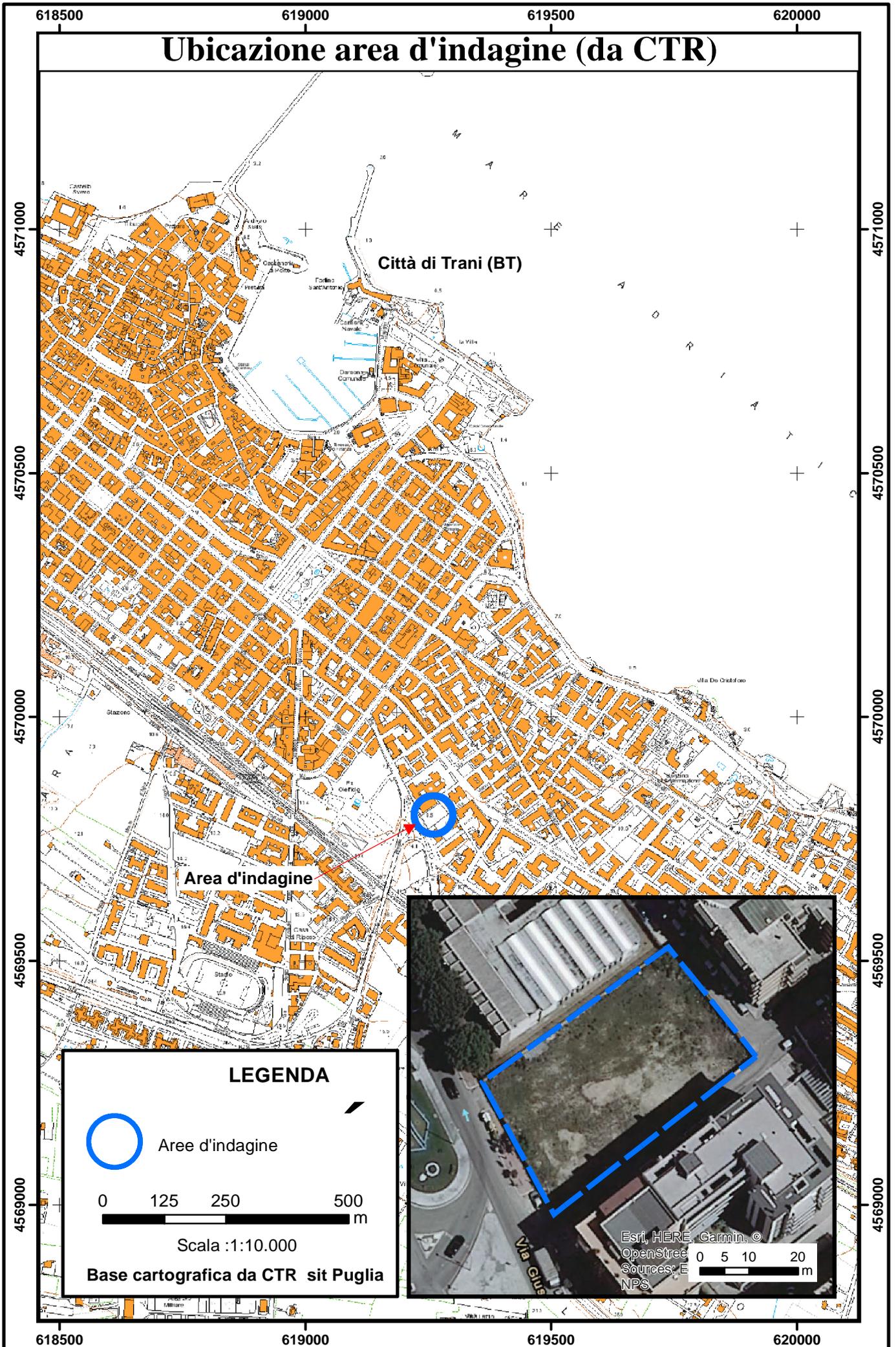
L'indagine **MASW** ha permesso di collocare il sito in **CATEGORIA B** (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.) con una **Vs,eq = 419 m/s**.

Infine, per ciò che riguarda l'**analisi HVSR**, è stata riscontrata una frequenza del picco del rapporto H/V di **5.00 Hz**, per la quale bisogna porre attenzione, durante i calcoli ingegneristici, al fenomeno di "doppia risonanza" tra suolo e strutture.

Bisogna tener presente che l'analisi HVSR rappresenta solo una stima di quelli che potrebbero essere gli effetti di amplificazione di sito.



# Ubicazione area d'indagine (da CTR)



Città di Trani (BT)

Area d'indagine

## LEGENDA



Aree d'indagine

0 125 250 500 m

Scala :1:10.000

Base cartografica da CTR sit Puglia

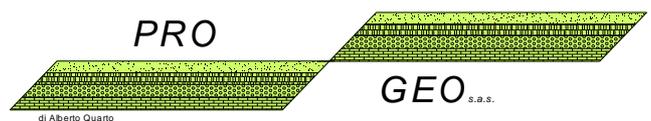
Esri, HERE, Garmin, ©  
OpenStreetMap  
Sources: E  
NPS

0 5 10 20 m



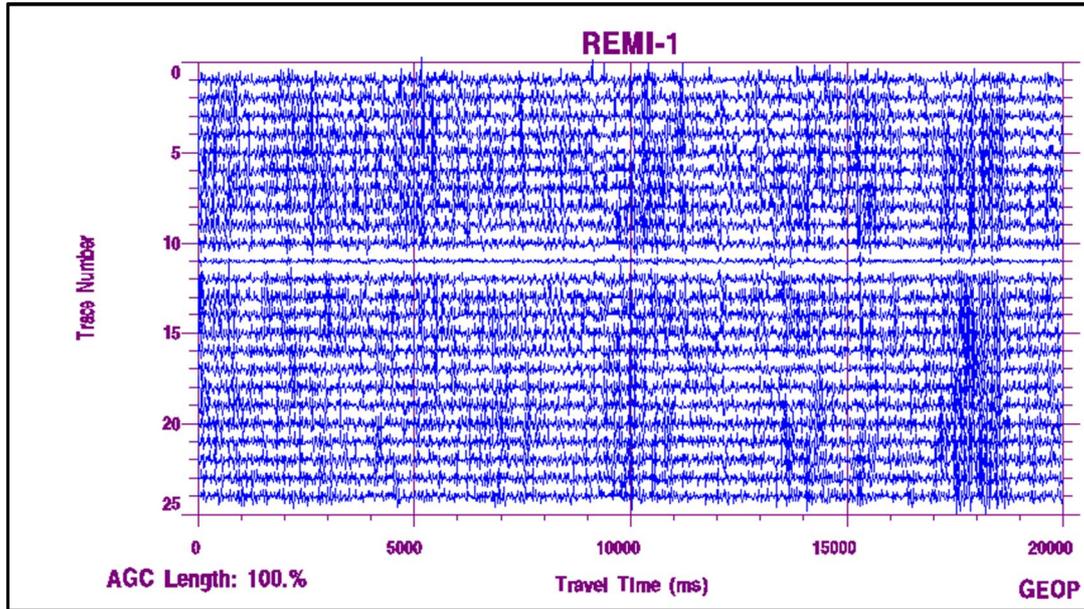
## ALLEGATO "PROFILO SISMICO"

- 
- *Sismogrammi analisi MASW (metodo Re.Mi.)*
  - *Analisi profilo MASW (metodo Re.Mi.)*
  - *Sismogrammi sismica a rifrazione onde P*
  - *Dromocrone*
  - *Tomografia sismica ed interpretazione sismostratigrafica*
  - *Documentazione fotografica*
- 



di Alberto Quarto

# SISMOGRAMMI ANALISI MASW (METODO RE.MI.) PROFILO SISMICO



# Analisi Re.Mi. (Metodo Passivo)

Immagine p-f

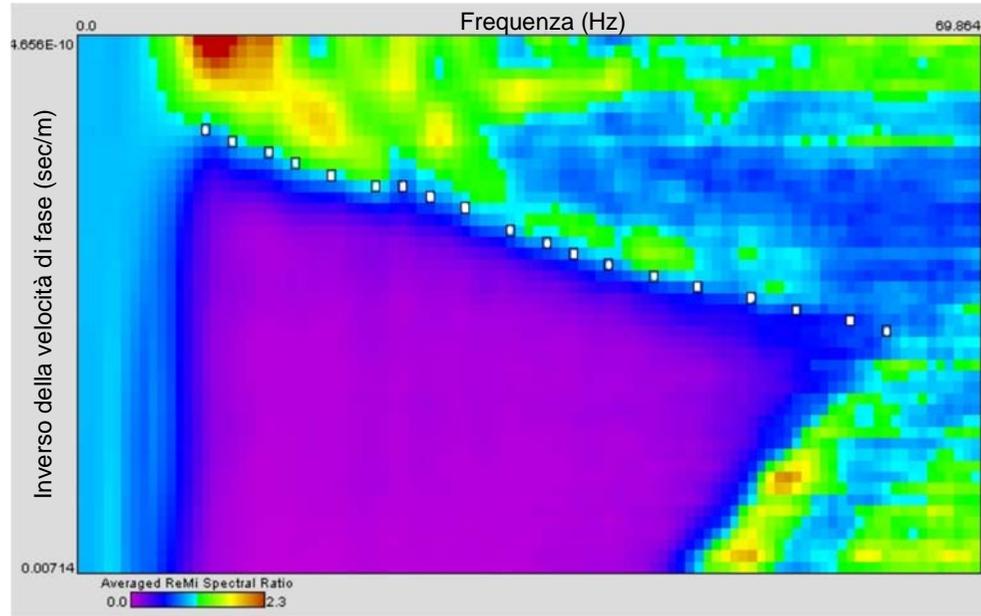


Grafico del modello di velocità  
Delle onde trasversali

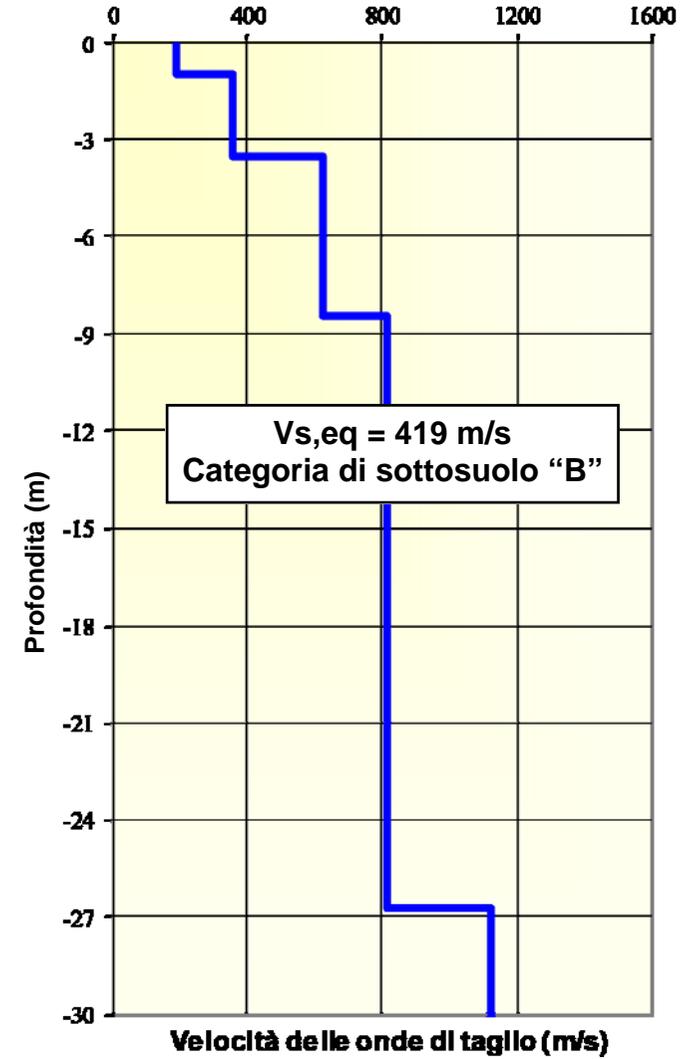
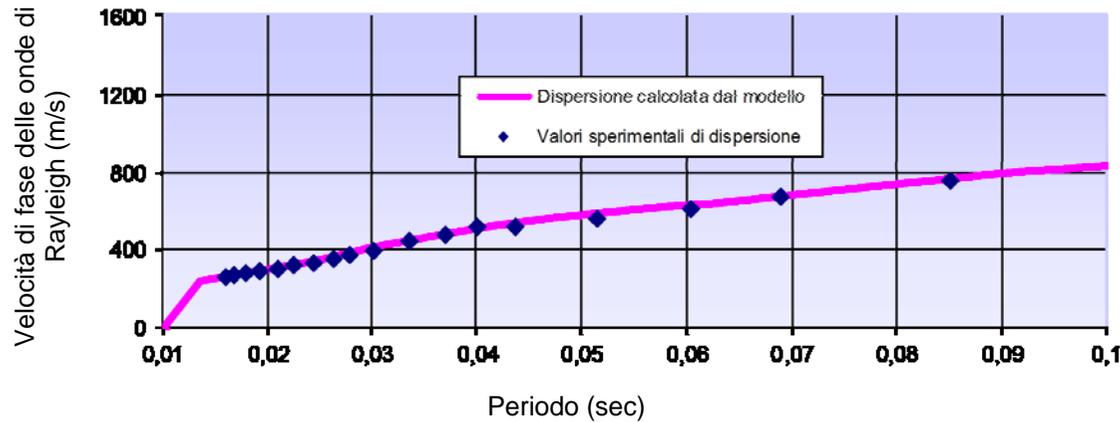
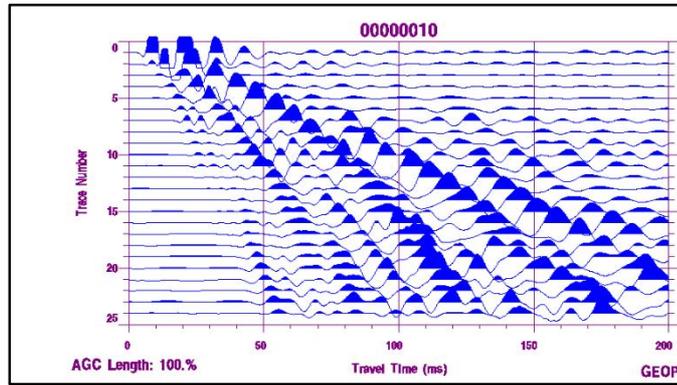


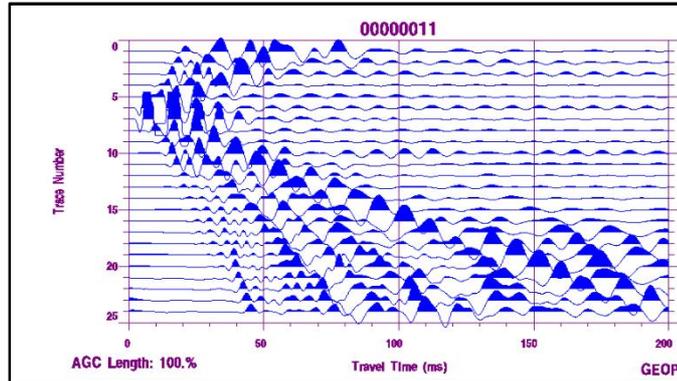
Diagramma velocità di fase-periodo



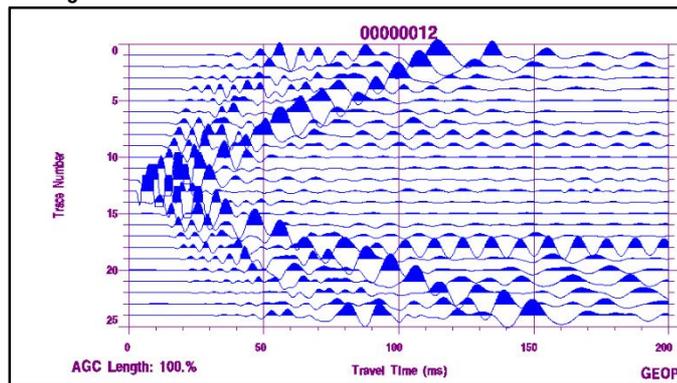
# SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) PROFILO SISMICO



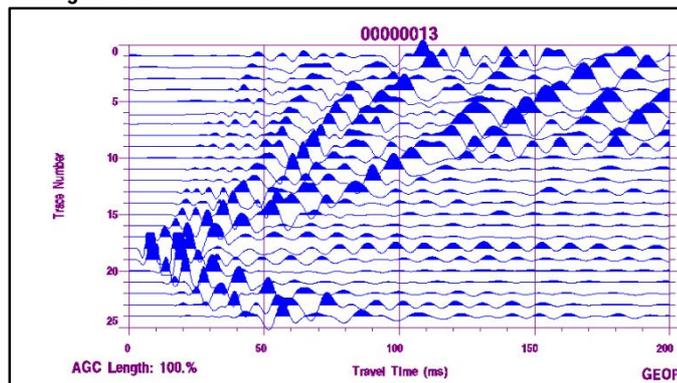
Punto sorgente "A"



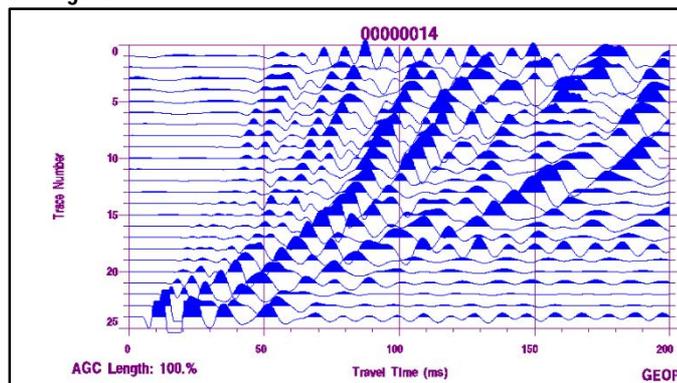
Punto sorgente "C"



Punto sorgente "E"

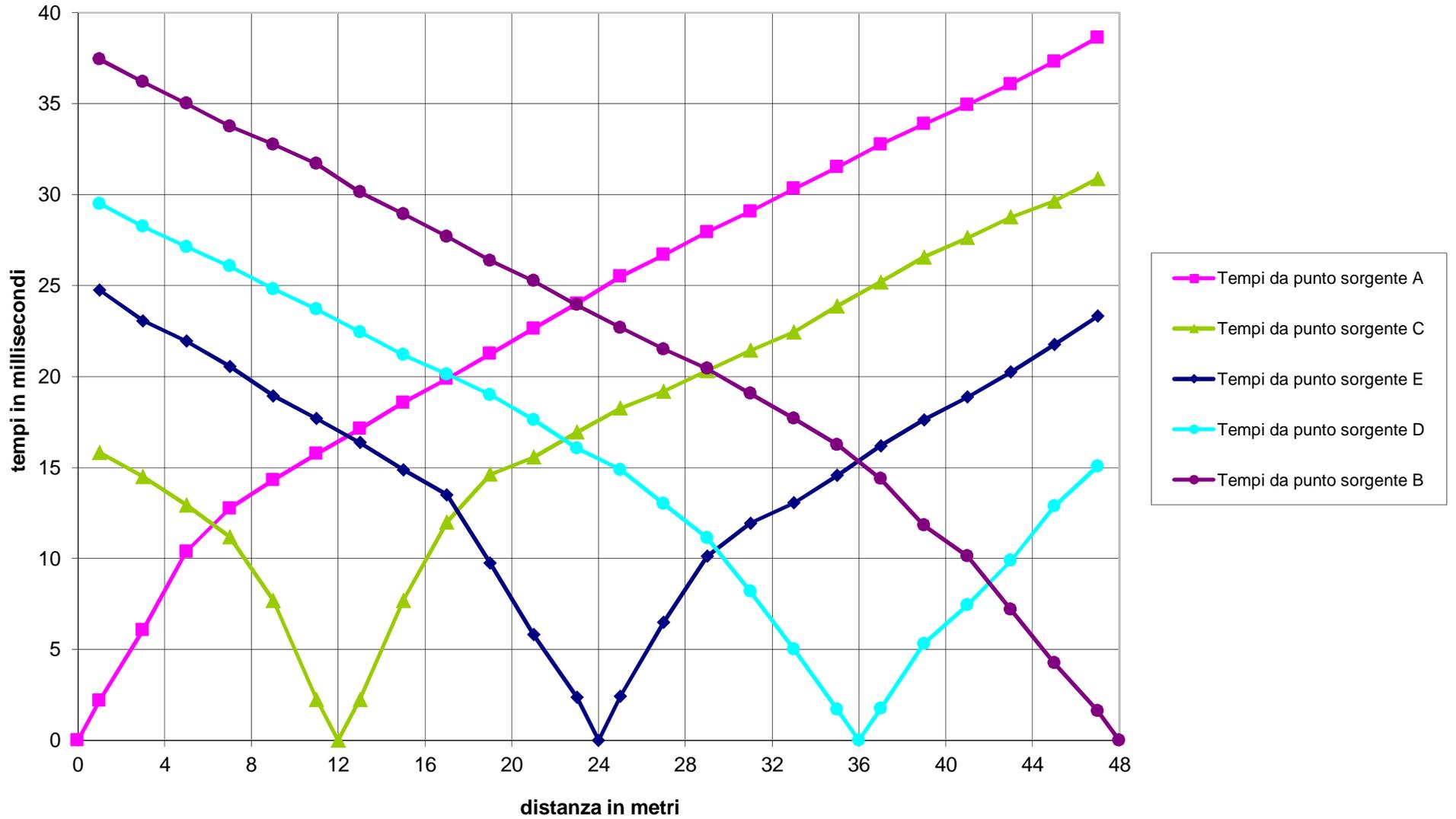


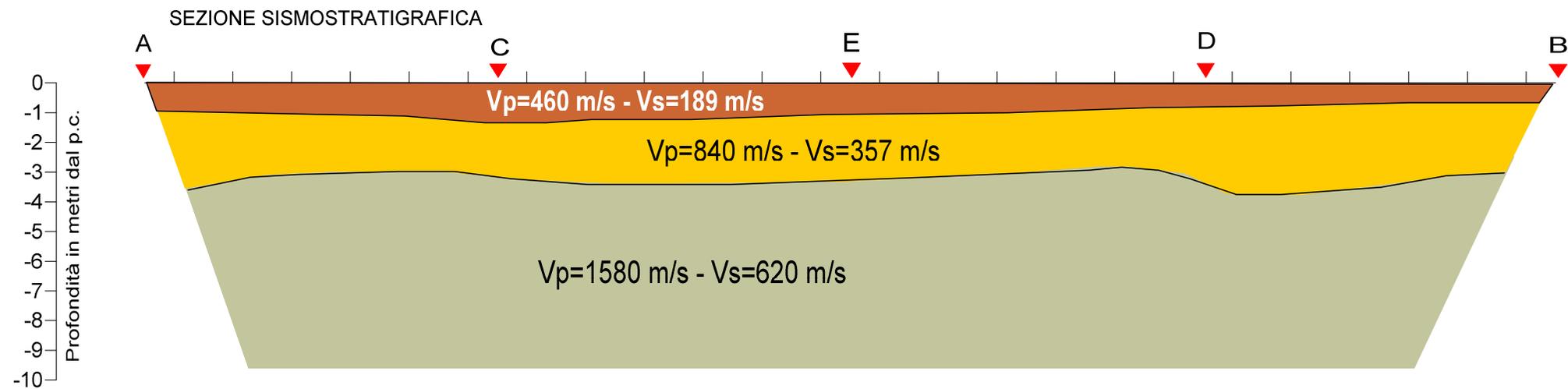
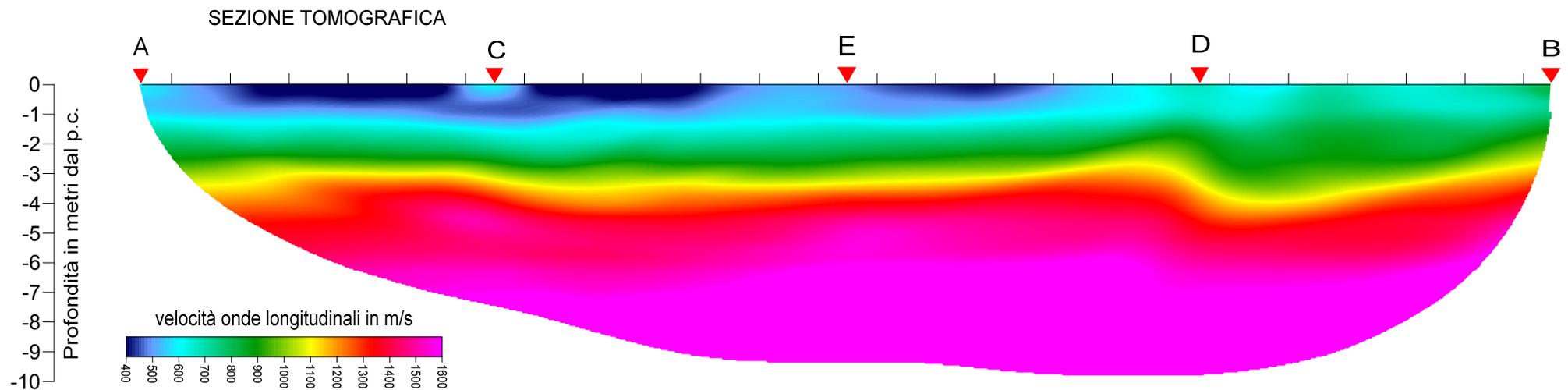
Punto sorgente "D"



Punto sorgente "B"

## Dromocrone profilo sismico - ONDE LONGITUDINALI





- Terreno di riporto
- Sabbie poco cementate
- Alternanza di livelli limoso-sabbiosi e sabbie addensate

I STAZIONE GEOFONICA

▼ PUNTO SORGENTE

0 8m

# DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA STENDIMENTO SISMICO

## INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE LONGITUDINALI (ONDE P)



Acquisizione dati misure sismiche



Energizzazione con mazza battente onde longitudinali (onde P)

## ALLEGATO "misura HVSR"

- 
- **Report misure HVSR**
  - **Documentazione fotografica**
- 

**PRO**

**GEO** s.r.l.

di Alberto Quarto

GEOLOGIA E GEOFISICA

## Tracce in input

### Dati riepilogativi:

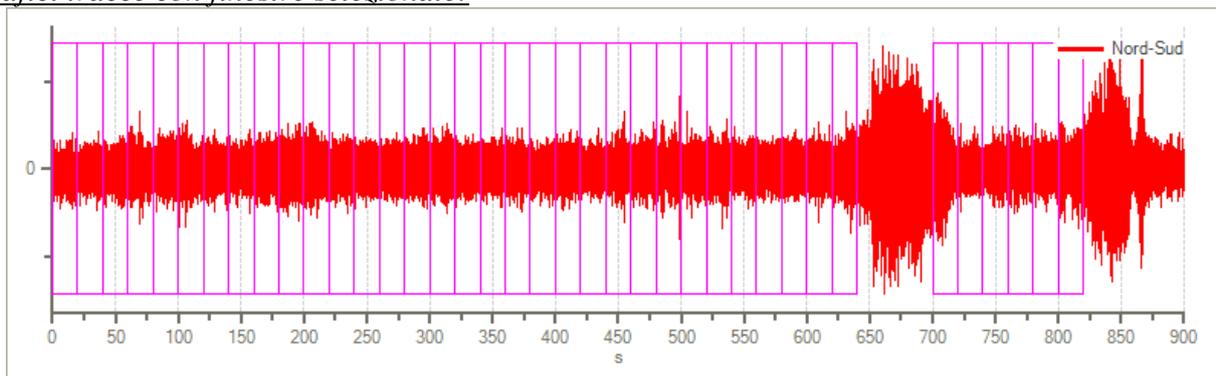
Numero tracce: 3  
Durata registrazione: 900 s  
Frequenza di campionamento: 500.00 Hz  
Numero campioni: 450000  
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

## Finestre selezionate

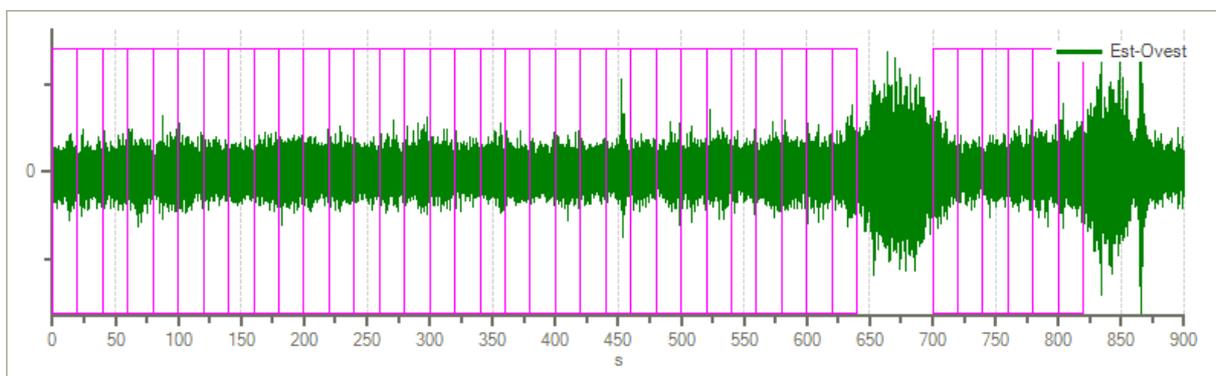
### Dati riepilogativi:

Numero totale finestre selezionate: 38  
Numero finestre incluse nel calcolo: 38  
Dimensione temporale finestre: 20.000 s  
Tipo di lisciamento: Triangolare proporzionale  
Percentuale di lisciamento: 10.00 %

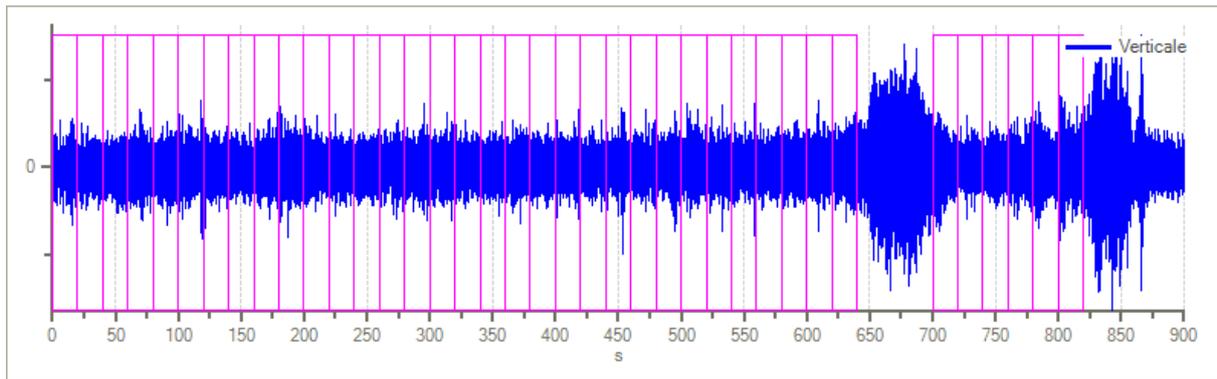
### Grafici tracce con finestre selezionate:



Traccia e finestre selezionate in direzione Nord-Sud

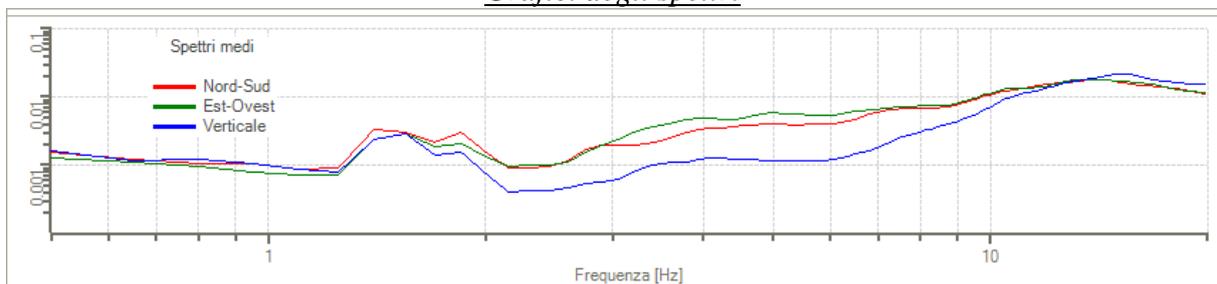


Traccia e finestre selezionate in direzione Est-Ovest

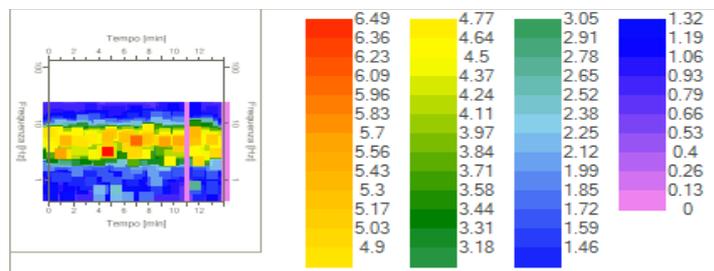


Traccia e finestre selezionate in direzione Verticale

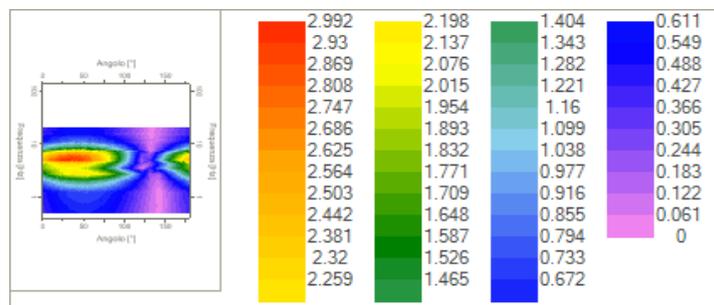
*Grafici degli spettri*



Spettri medi nelle tre direzioni



Mappa della stazionarietà degli spettri



Mappa della direzionalità degli spettri

## Rapporto spettrale H/V

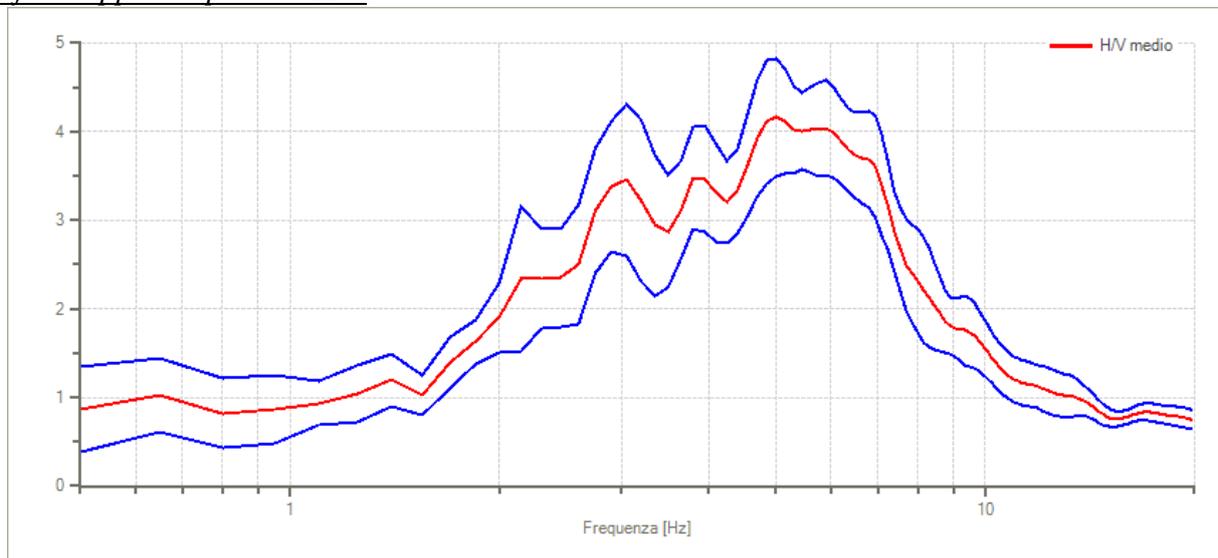
### Dati riepilogativi:

Frequenza massima: 20.00 Hz  
 Frequenza minima: 0.50 Hz  
 Passo frequenze: 0.15 Hz  
 Tipo lisciamento: Triangolare proporzionale  
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %  
 Tipo di somma direzionale: Media aritmetica

### Risultati:

**Frequenza del picco del rapporto H/V: 5.00 Hz  $\pm$ 0.16 Hz**

### Grafico rapporto spettrale H/V



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

### Verifiche SESAME:

Verifica	Esito
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5H$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5H$	Ok
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Non superato
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

# DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MISURE HVSR

Postazione HVSR ; Geofono 3D da superficie per indagini HVSR, con un sensore verticale e due sensori orizzontali .

