

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE

OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000

PROGETTO DEFINITIVO

COMUNE DI CASCINA

CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031

INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

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

D 1 4 Z 0 2 D 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 1 A

| Rev. | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Approvato | Data | Autorizzato | Data |
|------|-------------|-----------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| A | EMISSIONE | P. CHIARA | Maggio 2018 | M. SCIACCA | Maggio 2018 | R. SCIACCA | Maggio 2018 | El. Malinse | Maggio 2018 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

ITALFERR S.p.A.
Geologo Francesco Marchi
Resp. UO GEOLOGIA
Elab. Online Geologi
Elab.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|---------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 2 di 66 |

INDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE..... | 4 |
| 1.1 PREMESSA E SCOPI DELL'INDAGINE GEOFISICA..... | 4 |
| 2. METODOLOGIE IMPIEGATE..... | 6 |
| 2.1 INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA..... | 6 |
| 2.1.1 Strumentazione..... | 6 |
| 2.1.2 Principi base della tecnica sismica a rifrazione..... | 6 |
| 2.1.3 Configurazione delle misure ed elaborazione dati | 7 |
| 2.2 INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA | 9 |
| 2.2.1 Strumentazione..... | 9 |
| 2.2.2 Principi base della tecnica tomografica elettrica (ERT)..... | 9 |
| 2.2.3 Proprietà elettriche del suolo ed interpretazione dei valori di resistività | 10 |
| 2.2.4 Configurazione delle misure ed elaborazione dati | 11 |
| 2.3 INDAGINE SISMICA PER ONDE SUPERFICIALI MASW | 12 |
| 2.3.1 Principi di funzionamento e cenni sul metodo..... | 12 |
| 2.3.2 Strumentazione utilizzata, configurazione di indagine, codice di configurazione ed inversione dati | 13 |
| 2.4 INDAGINE HVSR | 14 |
| 2.4.1 Principi di funzionamento e cenni sul metodo..... | 14 |
| 2.4.2 Metodologia di misura, strumentazione e software utilizzati | 16 |
| 2.5 PROVE PENETROMETRICHE S-CPTU..... | 18 |
| 2.5.1 Principi di funzionamento e cenni sul metodo..... | 18 |
| 3. RISULTATI..... | 20 |
| 3.1 RISULTATI DELLA TOMOGRAFIA SISMICA – ALLEGATO 1 | 20 |
| 3.1.1 Linea RIFR + ERT 2 | 20 |
| 3.2 RISULTATI MASW – ALLEGATO 2 | 21 |
| 3.2.1 MASW 4 | 22 |
| 3.2.2 MASW 5 | 23 |

INDAGINI GEOFISICHE

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|---------|
| D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 3 di 66 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.3 | MASW 6 | 24 |
| 3.3 | RISULTATI HVSR – ALLEGATO 3..... | 25 |
| 3.3.1 | HVSR4..... | 25 |
| 3.3.2 | HVSR5..... | 26 |
| 3.3.3 | HVSR6..... | 27 |
| 3.3.4 | HVSR7..... | 28 |
| 3.4 | RISULTATI S-CPTU – ALLEGATO 4 | 30 |
| 3.4.1 | S-CPTU 3 | 30 |
| 3.4.2 | S-CPTU 4 | 31 |
| 4. | BIBLIOGRAFIA | 32 |
| 5. | ALLEGATO GRAFICO N.1 – TOMOGRAFIA SISMICA ED ELETTRICA | 36 |
| 6. | ALLEGATO GRAFICO N.2 – INDAGINI MASW | 40 |
| 7. | ALLEGATO GRAFICO N.3 – INDAGINI HVSR | 47 |
| 8. | ALLEGATO GRAFICO N.4 – INDAGINI SCPTU | 58 |

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|---------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 4 di 66 |

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa e scopi dell'indagine geofisica

La presente relazione illustra i risultati della campagna di prospezioni geofisiche, condotte secondo le modalità previste nelle specifiche Italferr, eseguite per la prima fase di attuazione del piano redatto ai sensi del D.M. Ambiente 29/11/2000 relativo nell'ambito del Progetto Definitivo del Piano di Risanamento Acustico di Cascina.

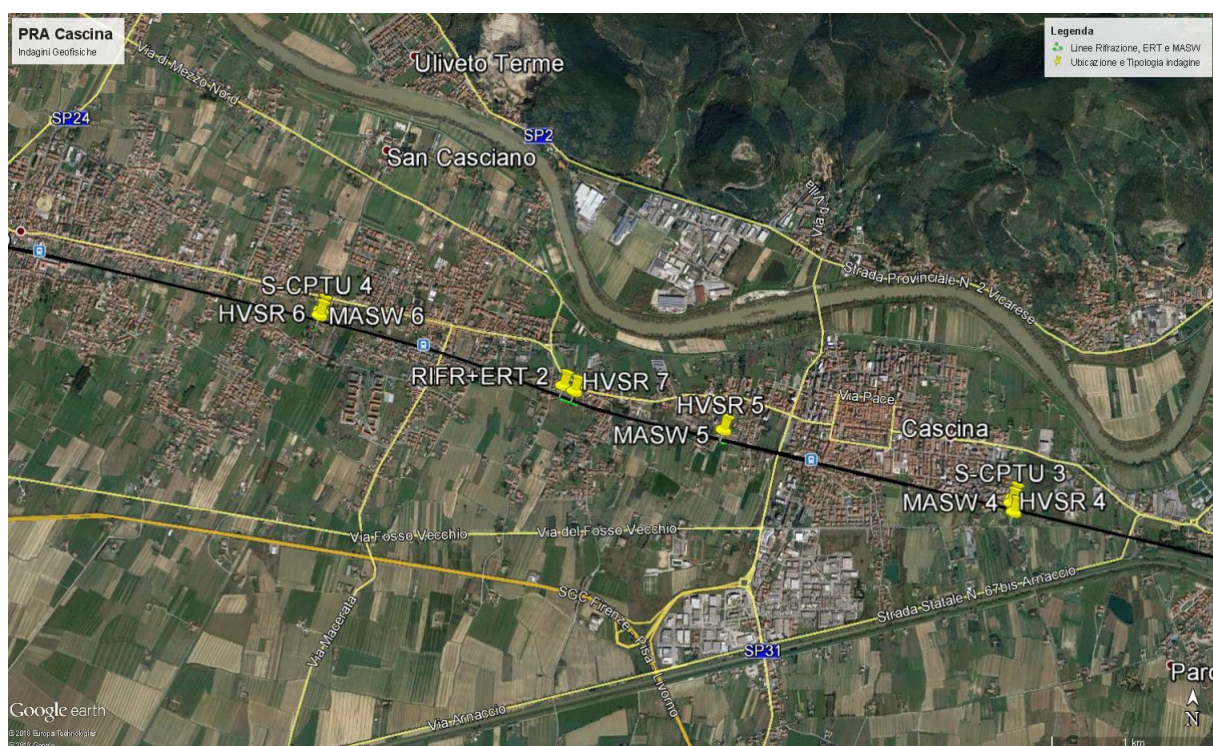


Figura 1: Posizioni delle indagini sismiche eseguite a Cascina – foto satellitare

Le prospezioni geofisiche sono state condotte utilizzando le seguenti metodologie:

- tomografie sismiche a rifrazione per onde P ed SH;
- tomografie elettriche 2D (ERT, Electrical Resistivity Tomography);
- indagini M.A.S.W;
- indagini HVSr;
- prove S-CPTU.

L'indagine sismica a rifrazione con interpretazione tomografica è stata eseguita in doppia acquisizione, rispettivamente per onde di compressione P e di taglio SH; è stata impiegata al fine di definire, nei limiti delle metodologie impiegate, gli spessori dei terreni alluvionali della piana e, ovviamente, per fornire supporto alla definizione della classe dei suoli secondo le NTC 2008, cui le opere in Progetto Definitivo si

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|---------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO</p> <p>CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 5 di 66 |

riferiscono.

La tomografia elettrica (ERT, electrical resistivity tomography) bidimensionale, è stata eseguita in sovrapposizione agli stendimenti sismici con lo scopo di aumentare l'efficacia diagnostica ed il dettaglio all'interno della successione stratigrafica terrigena della piana di Cascina, attraverso la misura della distribuzione del parametro di resistività estesa al volume di terreno soggetto ad indagine.

Nel presente studio le linee di indagine tomografiche sismiche e di tomografia elettrica sono indicate nella precedente Figura 1 con la nomenclatura Rifr+ERT 2.

Le indagini sismiche per onde superficiali con metodologie M.A.S.W. realizzate (stese M.A.S.W. 4, 5 e 6) hanno lo scopo di ottenere la distribuzione monodimensionale della velocità di propagazione delle Onde di Taglio Vs, lungo un profilo verticale, utile alla attribuzione della categoria del suolo pertinente, con riferimento, come già introdotto in precedenza, rispetto alle NTC 08.

Al fine di ottenere delle misure dirette delle frequenze di risonanza dei livelli sedimentari sovrastanti il "bedrock", sono state effettuate delle registrazioni di microtremore sismico ambientale (HVSr 4, 5, 6 e 7).

Infine, sulle verticali S-CPTU 3 e S-CPTU 4, sono state eseguite delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica (piezocono) e, a mezzo di un cono sismico installato sulla batteria di aste durante la penetrometria, sono stati acquisiti dati sismici in foro (cono sismico), allo scopo di determinare le caratteristiche dinamiche del sito, in termini di velocità di onde di taglio dei terreni, e metterle in relazione ai parametri geotecnici.

Il presente documento, oltre a riportare le evidenze dei risultati emersi dalle campagne di acquisizione dati condotte in sito, contiene una breve descrizione della metodologie geofisiche utilizzate.

| | | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|-----------|-------------------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA D14A | LOTTO 02 D 69 | CODIFICA IG | DOCUMENTO GE0005 001 | REV. A | FOGLIO 6 di 66 |

2. METODOLOGIE IMPIEGATE

2.1 INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA

2.1.1 *Strumentazione*

Per il presente lavoro è stato utilizzato un sismografo ECHO 48/2014. Lo strumento, prodotto dalla Ambrogeo (Piacenza, Italia), è un sistema a 48 canali e possiede le seguenti caratteristiche tecniche principali:

- Convertitore analogico digitale A/D a 24-bits
- intervalli di campionamento: 1/32, 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1, 1 ½, 2 ms.



Figura 2: Sismografo digitale a 24 bit.

2.1.2 *Principi base della tecnica sismica a rifrazione*

Per sismica a rifrazione si indicano una serie di tecniche basate sul principio fisico del fenomeno della rifrazione di un'onda sismica che incide su una discontinuità individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattore). Sulla superficie da investigare si posizionano i trasduttori del moto del suolo (geofoni) ad una certa distanza dalla sorgente sismica che può essere una massa battente (diversamente applicata e guidata) o una carica esplosiva a seconda della lunghezza dello stendimento e della profondità di indagine richiesta. Nel nostro caso è stata impiegata una massa battente.

Nell'indagine sismica a rifrazione i trasduttori situati più vicino alla sorgente rilevano prima l'onda diretta che arriva con velocità legata alle caratteristiche meccaniche dello strato di terreno più superficiale, mentre quelli più lontani rilevano le onde rifratte che viaggiano a velocità più elevata. Conoscendo i tempi di primo arrivo e la distanza geofono-sorgente, tramite l'analisi delle curve dei primi arrivi ad ogni trasduttore (dromocrone) con i metodi descritti al successivo paragrafo, si possono determinare i campi di velocità delle onde di compressione P e delle onde di taglio Sh che caratterizzano i vari strati interessati dall'indagine; da qui produrre una stratigrafia sismica da correlare alle formazioni geologiche o discontinuità presenti nella serie investigata nel sottosuolo.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|---------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 7 di 66 |

2.1.3 Configurazione delle misure ed elaborazione dati

Per l'esecuzione dei profili sismici sono stati utilizzati n. 2 cavi sismici multiconduttori a 24 geofoni ciascuno, impiegati simultaneamente per ottenere basi a 48 stazioni (geofoni).

Sono state utilizzate quindi singole basi a 48 stazioni con 10 postazioni di energizzazione interne allo stendimento; per ogni postazione sono state acquisite molteplici registrazioni al fine di ottimizzare il segnale in risposta.

Per il processing dei dati è stato utilizzato il Software RAYFRACT (ver. 3.35) della Intelligent Resources Inc. (Canada), creato per l'elaborazione di dati tomografici sismici a rifrazione, realizzabili sia con acquisizioni per onde di compressione P che di taglio SH, per scopi geologici, geotecnico-ingegneristici, ambientali, nonché per l'esplorazione nel campo delle georisorse.

Il software citato consente la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche, al fine di caratterizzarne gli orizzonti presenti in termini sismo-stratigrafici.

Lo schema di interpretazione utilizzato nel presente lavoro è basato sulla creazione di un modello iniziale ottenuto mediante interpretazione con una tecnica sofisticata di processo dei tempi di primo arrivo basata sui metodi dei "Volumi di Fresnel" (Watanabe 1999) al fine di elaborare un primo modello di partenza con una tecnica del Gradiente "smooth" 1D, a partire dal modello sopraccitato; il codice di calcolo per la modellazione tomografica utilizza, nell'algoritmo d'inversione, un "raytracing" con raggi curvilinei e metodi di calcolo ai minimi quadrati attraverso il metodo Delta t-v (Gebrande and Miller 1985), al fine di migliorare il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala, stabilizzando la soluzione dell'algoritmo d'iterazione.

In generale, il tempo di percorrenza di un'onda sismica lungo un percorso S attraverso un mezzo bidimensionale (2D) può essere scritto come

$$t = \int_S u[\mathbf{r}(x, y)] \quad (2)$$

dove $u(\mathbf{r})$ è il campo delle lentezze (l'inverso delle velocità) e \mathbf{r} è il vettore posizione. Discretizzando il campo di lentezze $u(\mathbf{r})$ con m celle equidimensionali ognuna caratterizzata da una lentezza costante u_k ($k=1, 2, \dots, m$) la dromocrona i -esima delle n disponibili può essere scritta come

$$t_i = \sum_{k=1}^m l_{ik} \cdot u_k \quad (3)$$

dove l_{ik} rappresenta la porzione dell' i -esima dromocrona nella cella k -esima.

Considerando tutte le dromocrone disponibili si ottiene il seguente sistema

$$\mathbf{t} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|---------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 8 di 66 |

dove \mathbf{t} è il vettore dei dati sperimentali (tempi di primo arrivo letti sui sismogrammi), \mathbf{M} è la matrice rettangolare contenente le porzioni dei percorsi nelle varie celle, \mathbf{u} è il vettore delle lentezze (incognite del problema). Il problema inverso da risolvere è pertanto

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{M}}^{-1} \cdot \mathbf{t} \quad (5)$$

dove $\tilde{\mathbf{M}}^{-1}$ è la matrice inversa generalizzata. Poiché i percorsi sismici dipendono dalle lentezze, la matrice \mathbf{M} dipende anche dalle lentezze e quindi il problema inverso (5) è un problema non-lineare che deve essere risolto iterativamente partendo da una soluzione iniziale (modello di partenza). L'equazione da considerare è pertanto la seguente

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{t} \quad (5)$$

dove $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t} - \mathbf{t}(\mathbf{u}_0)$ è la differenza tra i tempi sperimentali e i tempi calcolati per il modello di lentezze iniziale \mathbf{u}_0 ; $\Delta \mathbf{u}$ è la perturbazione del modello iniziale; e \mathbf{J} è la matrice jacobiana contenente le derivate parziali delle dromocrone rispetto alle lentezze nelle celle $\frac{\partial t_i}{\partial u_k}$.

Poiché il problema è parzialmente sovradeterminato (per alcune celle si hanno molti percorsi) e parzialmente sottodeterminato (per alcune celle non è disponibile nessun percorso) esso è stato risolto con la tecnica dei minimi quadrati smorzati, cioè è stata minimizzata con la seguente funzione errore

$$\varphi = \|\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{t}\|^2 + \lambda \|\mathbf{L}_2 \mathbf{u}\|^2 \quad (6)$$

dove λ è il fattore di smorzamento e la matrice \mathbf{L}_2 è una matrice derivata seconda (operatore laplaciano) che forza la soluzione verso la soluzione più regolare possibile (smoothest solution).

L'affinamento della soluzione è stato ottenuto attraverso un processo tomografico di inversione basato sul metodo WET (Wavepath Eikonal Traveltime inversion: Theory, 1993, Geophysics, Volume 58, Issue 9, pp. 1314-1323), spinto fino a 100 iterazioni per ottimizzarne il risultato finale e risolvere al meglio le zone con inversioni di velocità.

I risultati grafici che rappresentano la distribuzione delle velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s) nei terreni indagati, sono visualizzati nell'Allegato con campiture a colori caratterizzate da una scala cromatica rappresentativa della dinamica dei valori di velocità incontrati (espressi in m/s, metri al secondo). Tale rappresentazione consente di identificare aree omogenee (medesimo comportamento cromatico) in termini sismo-stratigrafici. Queste zone di isovalori, di V_p per le onde di compressione, e di V_s , per quelle di taglio, sono correlabili ad ammassi di materiale con caratteristiche affini.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|---------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 9 di 66 |

2.2 INDAGINE TOMOGRAFICA ELETTRICA

2.2.1 Strumentazione

La strumentazione adottata (Syscal Pro fino a 96 canali a commutazione concentrata, prodotto da IRIS Instruments, Francia), ha permesso di eseguire misure di alta precisione, con correnti indotte fino ad oltre 2 Ampere. Fondamentale in fase di acquisizione dati è stata la continua ed automatica compensazione del potenziale spontaneo, specie nei casi in cui tale valore è risultato essere dell'ordine di qualche decina di millivolts.



Figura 3: Syscal Pro.

Il Syscal-Pro utilizzato, rispetto ai resistivimetri di più classica concezione, ha la possibilità di ricevere su 10 coppie di elettrodi contemporaneamente, abbattendo di un ordine di grandezza il tempo necessario per l'acquisizione.

2.2.2 Principi base della tecnica tomografica elettrica (ERT)

Il metodo della tomografia elettrica (ERT, Electrical Resistivity Tomography), si basa sulla misura eseguita sulla sequenza di migliaia di quadripoli, ciascuno di essi caratterizzato da due elettrodi di potenziale (detti convenzionalmente MN) che misurano la caduta di potenziale " ΔV " a seguito di una corrente elettrica " I " immessa nel sottosuolo da una diversa coppia di elettrodi, detti AB. I diversi valori di resistività elettrica misurati (resistività apparenti ρ_a), ciascuno aggregato ad un punto diverso nel volume del terreno, in profondità, dipendono pertanto da " ΔV " e " I " secondo la seguente relazione generale:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 10 di 66 |

che è funzione, oltre che della posizione reciproca dei quattro elettrodi anzidetti (dipendenza contenuta nella costante K, che ne definisce il fattore geometrico), della distribuzione del valore del parametro di resistività elettrica nel sottosuolo interessato dalla propagazione della corrente "I"; il parametro citato della resistività elettrica è quello che permette di caratterizzare il diverso comportamento elettrico dei materiali indagati. Esso fornisce un supporto in termini di caratterizzazione del sottosuolo, nonché informazioni estensive per integrare le conoscenze derivanti dalle informazioni stratigrafiche provenienti dalle indagini dirette puntuali, quali sondaggi geognostici, allo scopo di estendere sensibilmente la conoscenza della stratigrafia e di altri attributi geologici, geomorfologici e idrogeologica dei terreni all'intera area oggetto di indagine geofisica.

2.2.3 Proprietà elettriche del suolo ed interpretazione dei valori di resistività

La resistività dei sedimenti è controllata principalmente dai seguenti fattori:

- grado di saturazione dei pori,
- porosità,
- fluidi,
- salinità del fluido, se presente nei pori,
- temperatura,
- eventuale presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.),
- presenza di argilla,
- presenza di minerali particolari (ad esempio le miche, minerali metalli),
- grado di compattazione.

La relazione empirica proposta da Archie è valida per suoli avente scarsa componente argillosa (sabbie, ghiaie) :

$$\rho_s = \rho_f a \phi^{-n} S^{-m}$$

dove:

- ρ_s : resistività ($\Omega \cdot m$) del suolo parzialmente saturo di fluido,
- ρ_f : resistività ($\Omega \cdot m$) del fluido presente nei pori,
- S : frazione del volume di pori occupata dal fluido,
- m : coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2),
- a : costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia : 0.62)
- n : coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia: 2.15),
- ϕ : porosità del suolo .

La resistività del fluido ρ_f è calcolabile qualora si conoscano le concentrazioni di ioni

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 11 di 66 |

in soluzione (ad es. Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , ecc.) utilizzando la formula

$$\rho_f = 0.0123 + 10^{(3.562 - 0.955 \log_{10} \mathbf{C})}$$

dove **C** è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

In linea generale, la distribuzione della resistività elettrica consente di discriminare eventuali variazioni dei/nei geomateriali dovute alla presenza di litologie differenti o con caratteristiche di maggior o minor cementazione, fratture o discontinuità tettoniche, presenza di sostanze fluidi a comportamento elettrico resistivo o conduttivo all'interno dei pori o fratture dell'ammasso oggetto d'indagine.

Rispetto al modello elettrostratigrafico medio rappresentativo di un sito d'indagine, le variazioni di resistività verso valori più alti sono rappresentate da viraggi verso il colore rosso (così come sono rappresentate le scale di rappresentazione della resistività nelle tavole degli allegati grafici); oppure nel caso di variazioni di umidità, circolazione d'acqua, maggior contenuto in componenti limo-argillose o fini, le resistività si evidenziano graficamente con viraggi verso valori relativamente più bassi (rappresentati dal colore viola-blu-azzurro nelle medesime tavole degli allegati grafici succitati).

Nel caso di presenza di argilla, i cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di tale sostanza offrono cammini addizionali per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti. Esistono relazioni semi-empiriche valide per il calcolo della resistività di sedimenti con componente argillosa non trascurabile, che non porteremo in questo contesto.

Terreni sabbio-limosi o ghiaioso-sabbiosi, se saturi, risultano sempre più conduttivi rispetto ai medesimi asciutti.

Nell'ambito del presente lavoro, i depositi argillosi, limo-argillosi e limo sabbiosi, specie se umidi, manifestano valori di resistività elettrica estremamente bassi, in certe circostanze inferiori alla decina di Ohm·m e fino a pochi Ohm·m.

La presenza di materiali consistenti litoidi superficiali ("trovanti") con litotipi riconducibili ad arenarie presentano comportamento maggiormente resistivo rispetto alle marne argillose od argilliti; ghiaie poligeniche asciutte con scarsa o nulla matrice limosa o limo-argillosa rispondono in modo maggiormente resistivo; qualora sia presente abbondante matrice limo-argillosa e naturalmente in presenza di acque di circolazione, anche tali formazioni possono manifestare comportamenti maggiormente e talvolta marcatamente conduttivi.

2.2.4 Configurazione delle misure ed elaborazione dati

Per l'esecuzione della linea sono state utilizzate basi con cavi multiconduttori fino a 96 elettrodi.

La spaziatura elettrodica (pari a 2,5 m) ha fornito una risoluzione ed un dettaglio ottimali per gli scopi prefissati.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 12 di 66 |

Nel profilo d'indagine sono state impiegate configurazioni miste Wenner-Schlumberger e Dipolo-Dipolo, in modo da sfruttare, di ognuna, le diverse sensibilità intrinseche laterali e verticali.

L'elaborazione bidimensionale delle misure di campagna, è stata effettuata con software proprietario a discretizzazione FEM (elementi finiti), correzione topografica, procedura di inversione robusta con possibile inserimento di vincoli complessi, capace di ricostruire la distribuzione di resistività reale in due e tre dimensioni attraverso inversione completa dei dati (basata sulla "Occam inversion").

Ciascuna sezione geoelettrica è rappresentata nelle figure degli allegati grafici seguendo un criterio di presentazione sinottica. La rappresentazione dei dati consiste in una o più immagini o viste tomografiche del parametro di resistività elettrica.

I risultati grafici di resistività elettrica presentati nell'allegato, sono visualizzati con campiture a colori caratterizzate da una scala cromatica rappresentativa della dinamica dei valori di resistività elettrica incontrati (espressi in Ohm·m); tale rappresentazione consente di identificare aree elettricamente omogenee (medesimo comportamento cromatico). Queste zone di isovalori di resistività elettrica sono anche correlabili ad ammassi di materiale con caratteristiche affini.

2.3 INDAGINE SISMICA PER ONDE SUPERFICIALI MASW

2.3.1 Principi di funzionamento e cenni sul metodo

Nelle diverse aree sono state allestite stese sismiche per onde superficiali con tecnica multicanale identificata con l'acronimo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La propagazione delle onde superficiali (o di Rayleigh) avviene, in un mezzo eterogeneo, secondo modalità dispersive. Cioè, a differenti frequenze, corrispondono velocità di fase diverse: in particolare la dispersione geometrica, in opposizione alla dispersione intrinseca dei materiali, dipende dalle geometrie (spessori) delle formazioni o delle stratificazioni attraversate.

In un terreno non omogeneo o stratificato avente proprietà meccaniche variabili, il comportamento delle onde superficiali varia con tali caratteristiche. Differenti lunghezze d'onda, pertinenti a diverse profondità, coinvolgono materiali con disuguali proprietà meccaniche: ciascuna lunghezza d'onda si propaga secondo velocità di fase dipendenti dalle medesime proprietà meccaniche di cui sopra.

Le onde di superficie dunque non possiedono una singola velocità bensì una velocità di fase in funzione della frequenza; la relazione tra frequenza e velocità di fase è contenuta nelle curve di dispersione e di attenuazione. Attraverso un procedimento matematico di inversione è possibile risalire ai profili verticali delle onde di taglio S, proporzionali alle velocità di fase delle onde di superficie secondo un coefficiente invariabile.

Il metodo MASW, impiegato solo qualitativamente ai fini della ricostruzione sismo-stratigrafica di massima, è invece efficace per il calcolo speditivo del parametro V_{s30} .

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 13 di 66 |

Il parametro V_{s30} è calcolato come sommatoria (nei 30 metri di spessore del sottosuolo, nel nostro caso a partire dalla quota del piano campagna) dei valori delle velocità di intervallo, pesati rispetto agli spessori associati alla stratificazione dei materiali.

$$V_{s30} = 30 \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}}$$

Dal valore del parametro V_{s30} è possibile risalire alla categoria di suolo secondo il D.M. 14 Gennaio 2008 dal quale sono tratte le successive tabelle.

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

| Categoria | Descrizione |
|-----------|---|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| C | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| D | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina). |
| E | <i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s). |

Tabella 3.2.III – Categorie aggiuntive di sottosuolo.

| Categoria | Descrizione |
|-----------|--|
| S1 | Depositi di terreni caratterizzati da valori di V_{s30} inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche. |
| S2 | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti. |

2.3.2 Strumentazione utilizzata, configurazione di indagine, codice di configurazione ed inversione dati

L'indagine per onde superficiali è stata condotta secondo le seguenti specifiche:

- la strumentazione impiegata è la medesima illustrata al precedente paragrafo §2.1.1, nella quale il sismografo è utilizzato in configurazione a 24-48 canali;
- 24-48 geofoni con frequenza naturale a 4.5 Hz, distanza intergeofonica pari a

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 14 di 66 |

2 m;

- piastra di battuta in alluminio;
- massa battente da 12 Kg con interruttore starter e cavo trigger;
- finestra di acquisizione pari a 2 secondi.

La tecnica di trattamento dati utilizzata è basata sul “f-k processing”. I file grezzi subiscono un primo “processing” di muting selettivo per eliminare le tracce o le porzioni di tracce ad elevato rumore. Quindi si esegue un calcolo della FFT usando un “windowing” opportuno. Attraverso una procedura semiautomatica si ricercano i massimi dello spettro (ricerca degli zeri della funzione secolare di Rayleigh) per ricavare i punti appropriati per la costruzione della curva di dispersione da utilizzarsi in un processo di inversione multimodale.

La tecnica di trattamento dati utilizzata è stata ottimizzata utilizzando un Software commerciale validato (SWAN, Italia).

2.4 Indagine HVSR

2.4.1 *Principi di funzionamento e cenni sul metodo*

Le registrazioni di microtremore sismico ambientale forniscono la misura diretta delle frequenze di risonanza dei livelli sedimentari sovrastanti il “bedrock”.

In particolare la tecnica di sismica passiva si basa sul concetto di contrasto di impedenza.

Per sismostrato si intende un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche e la densità del mezzo attraversato dalle medesime.

Il rumore sismico ambientale è l'insieme delle piccole vibrazioni sismiche presenti ovunque sulla superficie terrestre e generate da sorgenti naturali o antropiche, per esempio le perturbazioni atmosferiche, l'effetto delle onde del mare, il traffico veicolare e le attività industriali.

Il rumore sismico ambientale diventa una sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo ma anche delle strutture e degli Edifici, da cui la possibilità di estrarre da esso, mediante opportune tecniche di analisi, alcune informazioni sui sistemi risonanti studiati e, nel nostro caso sui modi di vibrare dei suoli correlata alla amplificazione sismica di sito.

Nel caso del presente studio, si tratta pertanto di misurare la distribuzione delle frequenze di risonanza dei suoli (laddove per frequenza di risonanza si intende la frequenza a cui l'amplificazione è massima), la quale è correlata generalmente alla profondità dei riflettori che la creano.

I metodi basati su dati acquisiti con tecniche di sismica passiva, consentono di estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 15 di 66 |

Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSr o H/V), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970).

Studi recenti hanno dimostrato che picchi a frequenza maggiori di quelle del bedrock sono riconducibili a contrasti di impedenza interni alla copertura sedimentaria e picchi a frequenze minori di quella del bedrock sono invece riconducibili a contrasti di impedenza interni al bedrock stesso (es. Guillier et al., 2005). Riconosciuta questa capacità è possibile anche, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, convertire in stratigrafia le frequenze di risonanza (e.g., Kanai e Tanaka, 1954; Lermo, 1993; Yamanaka et al., 1993, Ibs-Von Seht and Wohlenberg 1999; Castellaro et al., 2005; Guillier et al., 2005 e molti altri); ne risulta che il metodo H/V può essere usato come strumento stratigrafico efficace, se correttamente impiegata, con una accuratezza comparabile a quella delle tecniche classiche di prospezione geofisica.

Si rimanda in ogni caso per la trattazione teorica sui modi di vibrare dei suoli ai testi degli Autori in precedenza citati e contenuti in Bibliografia, non ultimo il programma SESAME, 2005, impiegato talora, nonostante la sua non completa esaustività nell'affrontare le diverse condizioni sismostratigrafiche, come criterio di significatività dei picchi di risonanza.

In questa sede si rammenta solamente che le basi teoriche dell'H/V sono relativamente semplici in un sistema bistrato del tipo sedimenti + bedrock in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Il microtremore sismico è basato sul calcolo del rapporto degli spettri di Fourier del rumore nel piano orizzontale H (generalmente lo spettro H viene calcolato come media degli spettri di Fourier delle componenti orizzontali NS ed EW) e della componente verticale V (Nakamura, 1989).

L'onda di superficie che viaggia nello strato superficiale viene riflessa all'interfaccia tra gli strati. Nel caso in cui la frequenza dell'onda f_m sia uguale a:

$$f_m = \frac{V_s}{4H} (2m - 1)$$

dove V_s è la velocità di propagazione dell'onda di superficie ed m rappresenta i vari modi di vibrazione incidente, l'onda riflessa interferisce costruttivamente con le onde incidenti, si somma e raggiunge ampiezze massime per l'effetto di risonanza.

Quindi ritornando al nostro mezzo semplice, formato da due soli strati, tutto sommato molto simile al caso di studio, ovvero uno strato superficiale più soffice che poggia su di uno strato profondo e rigido, denominato bedrock la profondità h della discontinuità sismica viene ricavata tramite la formula semplice della risonanza $H = V_s / (4 f_r)$, ovvero

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

o, al più, tramite la formula [1] in cui V_0 è la velocità delle onde di taglio al tetto dello

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 16 di 66 |

strato, x un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.) e f_r la frequenza fondamentale di risonanza (cf. ad esempio Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

$$h = \left[\frac{V_0(1-x)}{4f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \quad [1]$$

Nei sistemi multistrato, come precedentemente notato, teoricamente l'effetto di risonanza è sommabile, ma non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1].

L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per

- il contenuto in frequenza,
- la risposta strumentale e
- l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli "sintetici", cioè con quelli calcolati relativamente ad un modello in cui si simula il campo d'onde di superficie completo (Rayleigh e Love), nei modi fondamentale e superiori, in sistemi multistrato 1-D.

L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini (si rimanda alla letteratura per le basi teoriche, es. Aki, 1964; Ben-Menahem e Singh, 1981, Fäh et al. 2001-2003; Castellaro and Mulargia, 2007, Mulargia and Castellaro, 2007).

La f_r in precedenza citata, può essere individuata come picco del rapporto H/V.

Le frequenze proprie del sottosuolo possono essere quindi eccitate dal rumore di fondo e diventare visibili nello spettro del rumore sismico misurato in superficie.

2.4.2 Metodologia di misura, strumentazione e software utilizzati

La strumentazione utilizzata in questa indagine consiste in un sismometro costruito e commercializzato dalla MOHO S.r.l. (Italia), impiegato per le misure HVSR.

Il TROMINO ENGI® impiegato, nello specifico, nel presente studio è un sensore passivo (tromografo) progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico.

Questo sensore è dotato di una doppia terna di accelerometri e velocimetri (questi ultimi anche di doppia sensibilità), capaci di misurare vibrazioni e microtremori in continuo secondo le tre componenti spaziali con una autonomia di oltre 100 ore di

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 17 di 66 |

registrazione in continuo.

Le principali caratteristiche del Tromino Engi impiegato, sono di seguito elencate:

- Alimentazione con 2 batterie AA da 1.5 V.
- canali velocimetrici per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ± 1.5 mm/s ~).
- 3 canali velocimetrici per la registrazione di vibrazioni forti (fino a ± 5 cm/s ~).
- 3 canali accelerometrici per monitoraggio di vibrazioni.
- Ricevitore GPS integrato, antenna interna e/o esterna per eventuale localizzazione e/o sincronizzazione tra diverse unità, senza cavi esterni.
- Modulo radio per eventuale sincronizzazione tra diverse unità e trasmissione di allarmi.
- I dati di rumore sono amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti.



Figura 4: Tromografo per la misura microtremori - TROMINO©Engi

Tutte le misure sono state effettuate poggiando gli strumenti direttamente sul terreno.

Sono state effettuate misure di lunghezza pari a 30 min, con attivi tutti e 9 i sensori e con una frequenza di campionamento pari a 128 Hz.

L'elaborazione delle tracce acquisite è stata effettuata mediante il software Grilla realizzato dalla stessa ditta produttrice dello strumento. Tale software permette l'analisi della vibrazione, l'equalizzazione del segnale, l'analisi della traccia e l'analisi H/V per valutare gli effetti di sito.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO</p> <p>CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 18 di 66 |

2.5 Prove penetrometriche S-CPTU

2.5.1 *Principi di funzionamento e cenni sul metodo*

La prova penetrometrica statica, o CPT (Cone Penetration Test), è una prova eseguita in situ per poter determinare la stratificazione e le proprietà meccaniche del terreno. La prova consiste nell'infissione di una punta di forma conica (angolo di 60°, superficie di 10 cm², diametro di 35.7 mm, eventuale manicotto di superficie laterale di 150 cm²) all'interno del terreno.

Durante l'avanzamento della punta, che avviene a velocità costante pari a 2 cm/s, vengono misurati la resistenza alla penetrazione della punta (q_c) e l'attrito laterale (f_s). Per il presenta lavoro, sul penetrometro sono stati installati ulteriori sensori: un trasduttore di pressione (per consentire la misura della pressione interstiziale-CPTU) ed un cono sismico.

| Canali di misura: | | Dimensioni: | |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|
| Resistenza di punta (q_c): | 50; 100 MPa | Angolo di apertura cono: | 60° |
| Attrito laterale (f_s): | 1,6 MPa (titanio) | Diametro: | 36 mm |
| Pressione nei pori (U): | 2,5 MPa | Sezione di spinta: | 10 cm ² |
| Inclinazione: | 0 – 20° | Superficie laterale: | 150 cm ² |

Tabella 2.5.1.1: Caratteristiche del piezocono

Il cono sismico consiste in una punta metallica opportunamente equipaggiata con due terne accelerometriche distanti tra loro 0,5 m.



Figura 5: Cono sismico

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 19 di 66 |

Su ogni verticale, la prova del cono sismico è stata svolta durante l'avanzamento delle aste nella prova CPTU, con fermata ogni metro per l'acquisizione delle tracce sismiche, allo scopo di determinare sia le caratteristiche geotecniche statiche dei terreni che le proprietà dinamiche dei medesimi nel sito di indagine.



Figura 6: Penetrometro PAGANI in assetto statico per la realizzazione delle Prove con Cono sismico

| | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Tipo di sensore: | Accelerometro triassiale |
| Numero di sensori: | 2 |
| Distanza tra i sensori: | 0,5 metri |
| Frequenza di campionamento: | 30000 campioni al secondo |

Tabella 2.5.1.2: Caratteristiche del cono sismico

Il cono sismico utilizza lo stesso principio della prova down-hole: vengono misurati i tempi di percorrenza delle onde sismiche che si propagano dal piano campagna ad ogni terna accelerometrica all'interno della punta sismica posta a profondità diverse.

Per come viene concepito il sistema di acquisizione, il cono sismico fornisce dati attendibile relativi alle onde di taglio mentre per quanto concerne le onde di compressione il sistema risulta carente. Per tale motivazione nell'Allegato grafico 4, oltre ai grafici delle singole CPTU, sono analizzati e forniti esclusivamente i profili di velocità delle onde S.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 20 di 66 |

3. RISULTATI

3.1 Risultati della tomografia sismica – Allegato 1

L'ubicazione delle sezioni sismiche e geoelettriche tomografiche RIFR + ERT 2 acquisite, sono ben visibili nelle tavole 1 e 4 dell'Allegato grafico 1.

I profili sono stati eseguiti con passo intergeofonico ed elettrodico pari a 2,5 m ed hanno permesso di investigare, con un alto grado di dettaglio, fino a circa 30 m di profondità dal piano campagna, con la sismica, e fino a circa 18m, con la tomografia elettrica.

3.1.1 Linea RIFR + ERT 2

L'ubicazione dei profili sovrapposti acquisiti è ben visibili nella Tavole 1 dell'Allegato grafico 1.

I profili, eseguiti con passo intergeofonico ed elettrodico pari a 2,5 m, hanno indagato una lunghezza totale di circa 120 m di terreno.

Nella porzione superficiale delle sezioni sismiche per onde P e SH, un primo sismostrato assume uno spessore medio di circa 2,5-3 m. All'interno del sismostrato le onde di compressione (P) e di taglio (S) si propagano rispettivamente con velocità comprese negli intervalli 300-800/900 m/s e 100-160 m/s (si veda la Tavola 1 dell'Allegato 1).

Tale sismostrato trova corrispondenza con l'elettrostrato più superficiale (elettrostrato 1) della tomografia elettrica (Tavola 3). Lungo la sezione elettrica i valori di resistività dell'elettrostrato sono maggiori di 10 Ohm·m ed indicano la presenza di geomateriali rimaneggiati ed areati.

Segue un secondo sismostrato, con velocità delle onde P comprese tra 800-900 m/s e 1.350 m/s, il quale mostra variazioni laterali ed inversioni di velocità. Le onde di taglio assumono valori generalmente non elevati, variabili entro un limitato intervallo, compreso tra 160 m/s e 170-175 m/s.

Lungo la sezione elettrica citata, all'interno del corrispondente elettrostrato 2, il parametro resistività elettrica assume valori relativamente bassi, inferiori ai 10 Ohm·m, con minimi di 2, 3 e 4 Ohm·m tra le progressive 0 m e 55 m. Sia i valori di velocità delle onde sismiche che i dati di resistività elettrica sembrano indicare la presenza di sedimenti fini, nel campo di variazione compreso tra le argille ed i limi. I bassi valori di resistività e le velocità delle onde P notevolmente elevati rispetto alle S, indicano la presenza di una falda molto superficiale.

Seguono in profondità i sismostrati 3 e 4.

Il sismostrato 3 risulta piuttosto caotico per quanto concerne la distribuzione di velocità delle onde sismiche. Le onde di compressione assumono valori compresi tra 1.350 m/s e 1.600 m/s, mentre le onde S sono comprese tra 170-175 m/s e 190 m/s.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 21 di 66 |

Sia le onde P che S individuano zone con inversioni di velocità tra l'inizio della sezione e la progressiva 50 m e verso la fine della medesima; i massimi di velocità sono focalizzati nella porzione centrale e superficiale dell'orizzonte. Sulle immagini ottenute dall'indagine sismica infatti, con linea bianca in tratteggio, è rappresentata la variazione laterale di resistività elettrica individuata sulla relativa sezione. Nella Tavola 2 infatti, l'elettrostrato 3 presenta variazioni laterali e tra le progressive 40 m e la fine della sezione vengono intercettati i picchi massimi di resistività elettrica di 15 e 20 Ohm·m.

Dal confronto delle sezioni sismiche ed elettriche si nota una buona corrispondenza tra i massimi di resistività elettrica ed i massimi di velocità delle onde sismiche (v. zone B) che possono essere attribuiti ad un arricchimento in sabbie all'interno dell'elettrostrato 3 di natura mediamente limosa, limo-argillosa.

Segue lo strato 4, individuato esclusivamente nelle sezioni sismiche (sismostrato 4), che presenta una distribuzione di velocità piuttosto ordinata, con valori in aumento con la profondità.

3.2 Risultati MASW – Allegato 2

Nell'Allegato grafico 2, per ciascuno dei MASW (3, 4 e 5), sono riportati il sismogramma medio utilizzato per l'elaborazione, il profilo monodimensionale di velocità onde S inerente, lo spettro F-K e la curva di dispersione sperimentale oggetto del "picking" dei massimi sulla curva F-K sovrapposta a quella ottimizzata secondo il modello interpretativo che meglio si accoppia a quello sperimentale.

Per ciascun punto di indagine MASW, sono riportati il calcolo della V_{S30} e l'attribuzione del valore alla classe di suolo idonea. Si ricorda che, per la progettazione di opere civili, il DM 2008 non prevede l'applicabilità del metodo semplificato con attribuzione della categoria di suolo nei casi siano presenti inversioni di velocità lungo il profilo verticale.

Nella presente indagine, in fase di elaborazione dei dati, il comportamento sismostratigrafico nei primi 30 m a partire dal piano di calpestio (di seguito indicato come p.c.) è stato ottimizzato con un modello a 30 sismostrati, ciascuno indicativamente di uguale spessore minimo pari a 1 m.

Questa procedura permette di approssimare al meglio il modello fisico reale della velocità delle onde S nel sottosuolo, caratterizzandolo secondo variazioni graduali quasi continue all'interno dei terreni oggetto di prospezione. Tale approccio consente un processo di affinamento dei risultati e accresce la confidenza tra la curva sperimentale di dispersione e quella del modello ai fini dell'inversione, permettendo di ottenere una curva Velocità onde S – Spessori in funzione della profondità del sottosuolo, la più attendibile possibile.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 22 di 66 |

3.2.1 MASW 4

A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati del MASW 4 acquisito a Cascina sono riassunti nella tabella sottostante.

| <u>Sismostrato</u> | <u>Spessore (m)</u> | <u>Profondità (m dal p.c.)</u> | <u>Vs (m/s)</u> |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 | 136 |
| 2 | 1 | 1 | 176 |
| 3 | 1 | 2 | 196 |
| 4 | 1 | 3 | 190 |
| 5 | 1 | 4 | 174 |
| 6 | 1 | 5 | 164 |
| 7 | 1 | 6 | 162 |
| 8 | 1 | 7 | 167 |
| 9 | 1 | 8 | 177 |
| 10 | 1 | 9 | 188 |
| 11 | 1 | 10 | 197 |
| 12 | 1 | 11 | 205 |
| 13 | 1 | 12 | 209 |
| 14 | 1 | 13 | 212 |
| 15 | 1 | 14 | 212 |
| 16 | 1 | 15 | 211 |
| 17 | 1 | 16 | 211 |
| 18 | 1 | 17 | 210 |
| 19 | 1 | 18 | 212 |
| 20 | 1 | 19 | 215 |
| 21 | 1 | 20 | 220 |
| 22 | 1 | 21 | 229 |
| 23 | 1 | 22 | 240 |
| 24 | 1 | 23 | 253 |
| 25 | 1 | 24 | 268 |
| 26 | 1 | 25 | 286 |
| 27 | 1 | 26 | 304 |
| 28 | 1 | 27 | 324 |
| 29 | 1 | 28 | 344 |
| 30 | INF | 29 | 365 |

Tabella 3.2.1.1 – Modello a 30 sismostrati, con distribuzione di velocità dei terreni.

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio Vs nei primi 30 m di profondità, è possibile determinare una velocità equivalente V_{s30} rappresentativa del sito in esame. Secondo la normativa italiana in materia di progettazione antisismica “O.P.C.M. n° 3274/2003” e sue modifiche e le Norme Tecniche di Costruzione (D.M. 14/01/2008) e sue modifiche e, ancora, secondo la normativa europea Eurocodice 8, il valore calcolato di V_{s30} è pari a **$V_{s30} = 211$ m/s.**

Sulla base del valore del parametro V_{s30} la categoria di suolo di fondazione di riferimento è la “**C**”.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 23 di 66 |

3.2.2 MASW 5

A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati del MASW 5 acquisito a Cascina sono riassunti nella tabella sottostante.

| <u>Sismostrato</u> | <u>Spessore (m)</u> | <u>Profondità (m dal p.c.)</u> | <u>Vs (m/s)</u> |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 | 156 |
| 2 | 1 | 1 | 148 |
| 3 | 1 | 2 | 128 |
| 4 | 1 | 3 | 116 |
| 5 | 1 | 4 | 117 |
| 6 | 1 | 5 | 122 |
| 7 | 1 | 6 | 125 |
| 8 | 1 | 7 | 128 |
| 9 | 1 | 8 | 132 |
| 10 | 1 | 9 | 140 |
| 11 | 1 | 10 | 147 |
| 12 | 1 | 11 | 153 |
| 13 | 1 | 12 | 154 |
| 14 | 1 | 13 | 152 |
| 15 | 1 | 14 | 147 |
| 16 | 1 | 15 | 140 |
| 17 | 1 | 16 | 134 |
| 18 | 1 | 17 | 130 |
| 19 | 1 | 18 | 129 |
| 20 | 1 | 19 | 132 |
| 21 | 1 | 20 | 140 |
| 22 | 1 | 21 | 154 |
| 23 | 1 | 22 | 174 |
| 24 | 1 | 23 | 200 |
| 25 | 1 | 24 | 230 |
| 26 | 1 | 25 | 263 |
| 27 | 1 | 26 | 299 |
| 28 | 1 | 27 | 338 |
| 29 | 1 | 28 | 379 |
| 30 | INF | 29 | 421 |

Tabella 3.2.2.1 – Modello a 30 sismostrati, con distribuzione di velocità dei terreni.

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio Vs nei primi 30 m di profondità, è possibile determinare una velocità equivalente V_{s30} rappresentativa del sito in esame. Secondo la normativa italiana in materia di progettazione antisismica “O.P.C.M. n° 3274/2003” e sue modifiche e le Norme Tecniche di Costruzione (D.M. 14/01/2008) e sue modifiche e, ancora, secondo la normativa europea Eurocodice 8, il valore calcolato di V_{s30} è pari a **$V_{s30} = 157$ m/s.**

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 24 di 66 |

Sulla base del valore del parametro V_{s30} la categoria di suolo di fondazione di riferimento è la “D”.

3.2.3 MASW 6

A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati del MASW 6 acquisito a Cascina sono riassunti nella tabella sottostante.

| <u>Sismostrato</u> | <u>Spessore (m)</u> | <u>Profondità (m dal p.c.)</u> | <u>Vs (m/s)</u> |
|--------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | 1 | 0 | 120 |
| 2 | 1 | 1 | 149 |
| 3 | 1 | 2 | 186 |
| 4 | 1 | 3 | 199 |
| 5 | 1 | 4 | 193 |
| 6 | 1 | 5 | 179 |
| 7 | 1 | 6 | 166 |
| 8 | 1 | 7 | 158 |
| 9 | 1 | 8 | 157 |
| 10 | 1 | 9 | 160 |
| 11 | 1 | 10 | 165 |
| 12 | 1 | 11 | 172 |
| 13 | 1 | 12 | 178 |
| 14 | 1 | 13 | 184 |
| 15 | 1 | 14 | 190 |
| 16 | 1 | 15 | 196 |
| 17 | 1 | 16 | 203 |
| 18 | 1 | 17 | 210 |
| 19 | 1 | 18 | 218 |
| 20 | 1 | 19 | 228 |
| 21 | 1 | 20 | 239 |
| 22 | 1 | 21 | 251 |
| 23 | 1 | 22 | 265 |
| 24 | 1 | 23 | 280 |
| 25 | 1 | 24 | 297 |
| 26 | 1 | 25 | 313 |
| 27 | 1 | 26 | 330 |
| 28 | 1 | 27 | 348 |
| 29 | 1 | 28 | 366 |
| 30 | INF | 29 | 383 |

Tabella 3.2.3.1 – Modello a 30 sismostrati, con distribuzione di velocità dei terreni.

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio V_s nei primi 30 m di profondità, è possibile determinare una velocità equivalente V_{s30} rappresentativa del sito in esame. Secondo la normativa italiana in materia di progettazione antisismica “O.P.C.M. n° 3274/2003” e sue modifiche e le Norme Tecniche di Costruzione (D.M.

INDAGINI GEOFISICHE

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 25 di 66 |

14/01/2008) e sue modifiche e, ancora, secondo la normativa europea Eurocodice 8, il valore calcolato di V_{s30} è pari a **$V_{s30} = 205 \text{ m/s}$** .

Sulla base del valore del parametro V_{s30} la categoria di suolo di fondazione di riferimento è la “C”.

3.3 Risultati HVSR – Allegato 3

Nell'Allegato grafico 3, per ciascun HVSR (4, 5, 6 e 7), sono riportati lo spettro del rapporto H/V, il grafico del rapporto H/V nel tempo e lo spettro delle varie componenti. Inoltre per ogni picco di H/V evidenziato, è presente la verifica ai criteri SESAME.

3.3.1 HVSR4

I risultati completi comprensivi del report sul rispetto degli aspetti SESAME sono visibili nelle tavole allegate.

| Picco rilevato | Frequenza (Hz) |
|----------------|----------------|
| 1 | 1.38 |

Tabella 3.3.4.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

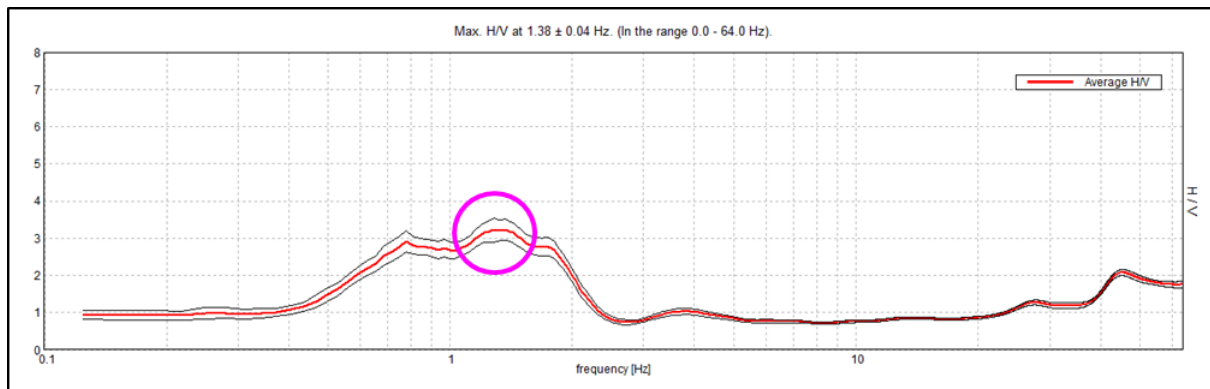


Figura 7: Rapporto H/V in funzione della frequenza

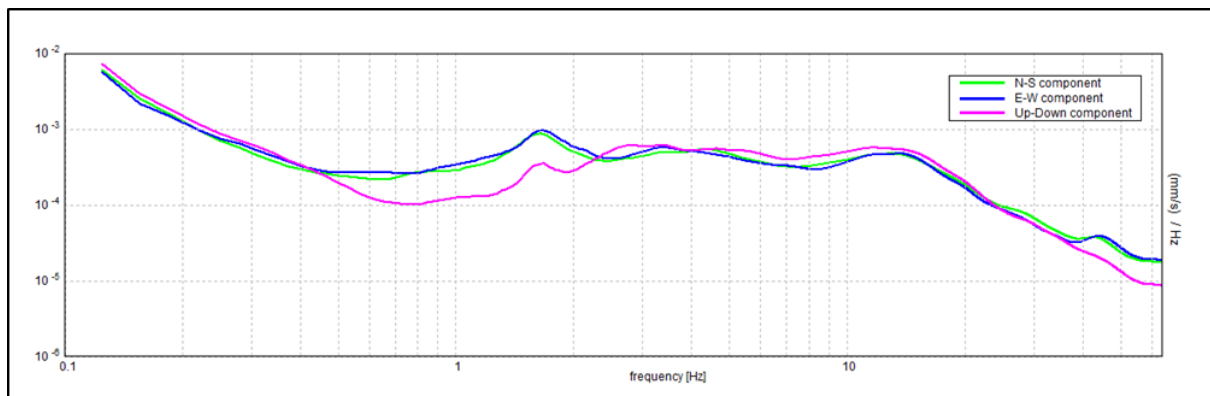


Figura 8: Spettro delle singole componenti

| | | | | | |
|---|--|------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA D14A | LOTTO 02 D 69 | CODIFICA IG | DOCUMENTO GE0005 001 | REV. A FOGLIO 26 di 66 |

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di singolo picco.

Il picco a 1,38 Hz rispetta tutti i criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra depositi alluvionali fini e grossolani (ghiaie).

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 400 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 72 m.

3.3.2 HVSR5

I risultati completi comprensivi del report sul rispetto degli aspetti SESAME sono visibili nelle tavole allegate.

| Picco rilevato | Frequenza (Hz) |
|----------------|----------------|
| 1 | 1.06 |

Tabella 3.3.5.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

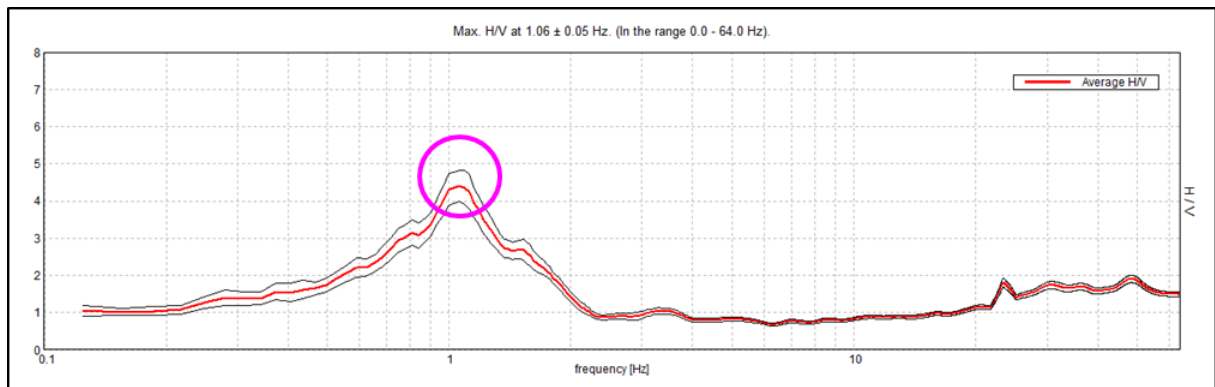


Figura 9: Rapporto H/V in funzione della frequenza

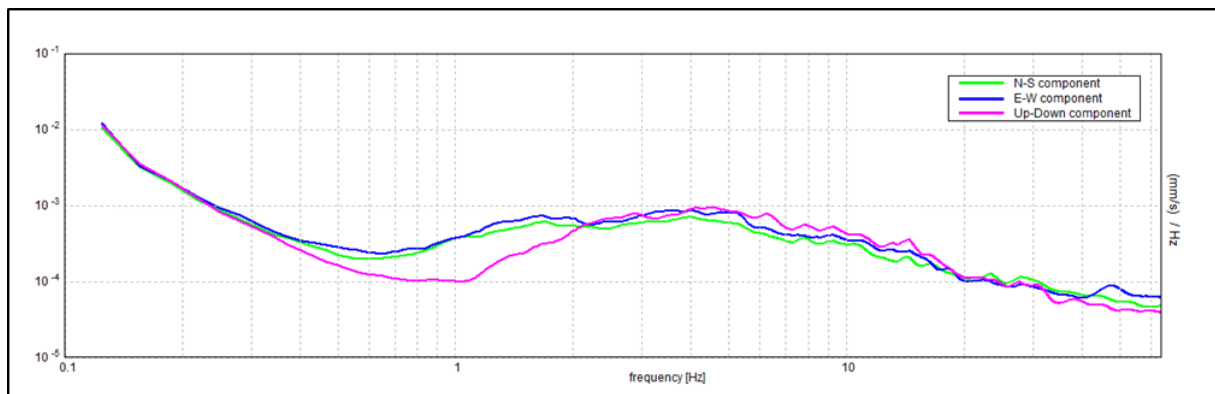


Figura 10: Spettro delle singole componenti

INDAGINI GEOFISICHE

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 27 di 66 |

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di singolo picco.

Il picco a 1,06 Hz rispetta tutti i criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra depositi alluvionali fini e grossolani (ghiaie).

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 400 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 94 m.

3.3.3 HVSR6

I risultati completi comprensivi del report sul rispetto degli aspetti SESAME sono visibili nelle tavole allegate.

| Picco rilevato | Frequenza (Hz) |
|----------------|----------------|
| 1 | 0.41 |
| 2 | 1.16 |

Tabella 3.3.6.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

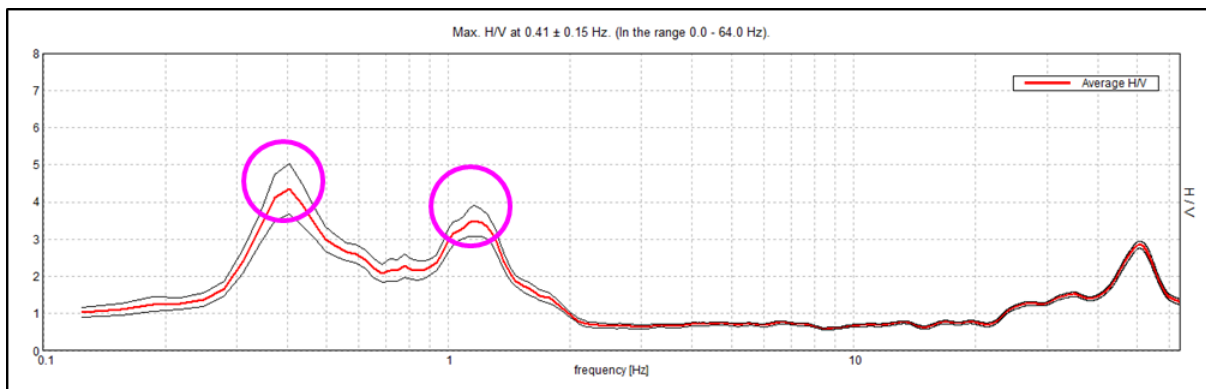


Figura 11: Rapporto H/V in funzione della frequenza

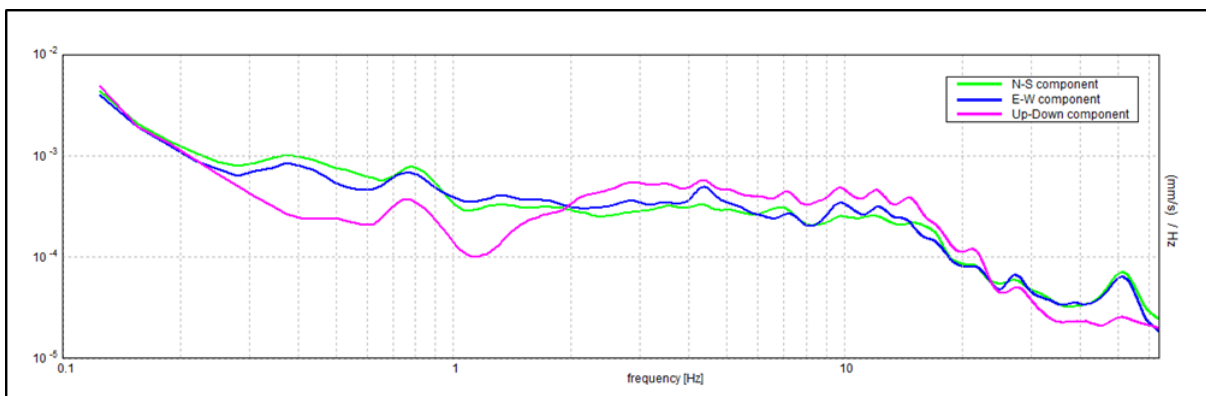


Figura 12: Spettro delle singole componenti

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p> | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 28 di 66 |

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di due picchi distinti.

Il primo picco a 0,41 Hz non rispetta due dei criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra i depositi alluvionali e il basamento oppure tra sedimenti fini ed un orizzonte di ghiaie.

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 600 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 365 m.

Il secondo picco a 1,16 Hz rispetta tutti i criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra depositi alluvionali fini e grossolani (ghiaie).

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 400 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 86 m.

3.3.4 HVSR7

I risultati completi comprensivi del report sul rispetto degli aspetti SESAME sono visibili nelle tavole allegate.

| Picco rilevato | Frequenza (Hz) |
|----------------|----------------|
| 1 | 0.53 |
| 2 | 1.03 |

Tabella 4.2.6.1 – Picchi in frequenza evidenziati nell'indagine HVSR.

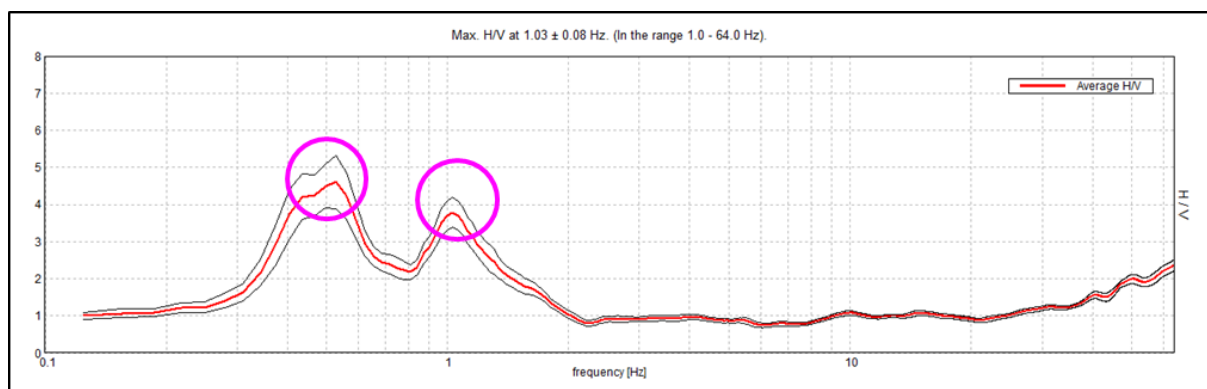


Figura 13: Rapporto H/V in funzione della frequenza

INDAGINI GEOFISICHE

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
|----------|---------|----------|------------|------|----------|
| D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 29 di 66 |

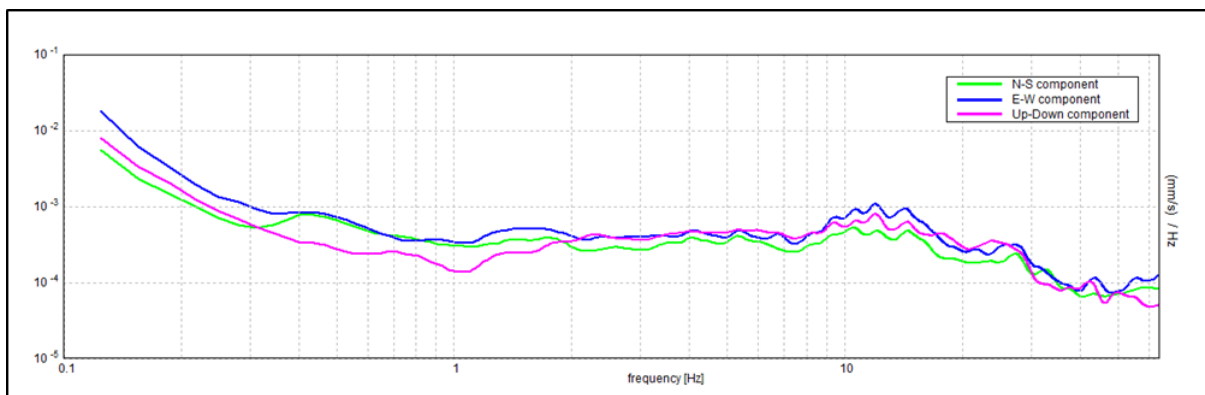


Figura 14: Spettro delle singole componenti

L'analisi dei risultati ottenuti ha mostrato la presenza di due picchi distinti.

Il primo picco a 0,53 Hz non rispetta due dei criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra i depositi alluvionali e il basamento oppure tra sedimenti fini ed un orizzonte di ghiaie.

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 600 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 283 m.

Il secondo picco a 1,03 Hz non rispetta uno dei criteri SESAME ed è generato plausibilmente dal contrasto di impedenza tra depositi alluvionali fini e grossolani (ghiaie).

Considerando una velocità media delle onde di taglio in tali depositi di circa 400 m/s e sfruttando la seguente formula:

$$f_r = \frac{V_s}{4H}$$

si evince una profondità del contatto di circa 97 m.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 30 di 66 |

3.4 Risultati S-CPTU – Allegato 4

Nell'Allegato grafico 4, per ciascun S-CPTU (3 e 4) sono riportati, oltre ai profili monodimensionali delle proprietà geotecniche di base, il sismogramma ottenuto per le onde di taglio, la tabella dei tempi osservati e corretti in relazione alla distanza della sorgente dalla verticale, la tabella profondità-velocità ed il profilo di velocità relativo.

3.4.1 S-CPTU 3

A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati sismici della prova sono riassunti nelle tabelle sottostanti.

| Profondità (m) | Tempi oss (ms) | Tempi corr (ms) |
|----------------|----------------|-----------------|
| | S | S |
| 0 | 0 | |
| 1 | 66.22 | 40.37 |
| 2 | 70.11 | 58.78 |
| 3 | 74.98 | 68.80 |
| 4 | 78.88 | 75.01 |
| 5 | 87.00 | 84.20 |
| 6 | 95.43 | 93.27 |
| 7 | 103.22 | 101.48 |
| 8 | 109.06 | 107.65 |
| 9 | 113.93 | 112.76 |
| 10 | 119.77 | 118.77 |
| 11 | 124.64 | 123.78 |
| 12 | 130.00 | 129.24 |
| 13 | 137.00 | 136.32 |
| 14 | 145.00 | 144.38 |
| 15 | 149.70 | 149.14 |
| 16 | 155.80 | 155.29 |
| 17 | 158.50 | 158.04 |
| 18 | 162.00 | 161.58 |
| 19 | 165.20 | 164.81 |
| 20 | 168.00 | 167.65 |

| Profondità (m) | Profondità (m) | Velocità (m/s) |
|----------------|----------------|----------------|
| da | a | S |
| 0 | | |
| 1 | 2 | 54.31 |
| 2 | 3 | 99.86 |
| 3 | 4 | 160.91 |
| 4 | 5 | 108.84 |
| 5 | 6 | 110.31 |
| 6 | 7 | 121.67 |
| 7 | 8 | 162.20 |
| 8 | 9 | 195.66 |
| 9 | 10 | 166.28 |
| 10 | 11 | 199.72 |
| 11 | 12 | 183.08 |
| 12 | 13 | 141.32 |
| 13 | 14 | 124.09 |
| 14 | 15 | 209.99 |
| 15 | 16 | 162.59 |
| 16 | 17 | 363.99 |
| 17 | 18 | 282.44 |
| 18 | 19 | 309.07 |
| 19 | 20 | 353.16 |

Tabella 3.4.1.1 – Tempi osservati e corretti – velocità media interstrato

La prova CPTU 3, i cui certificati sono oggetto di specifico allegato, esibisce le seguenti specifiche litostratigrafiche:

- la litologia principale risulta caratterizzata da terreni di natura prevalentemente limosa ($2 < R_f < 4$) e limoso-argilloso ($4 < R_f < 6$) a scarsa consistenza e/o addensamento, eccetto che nei primi 2 m di profondità, dove sono presenti argille limose e argille ($6 < R_f < 10$) a consistenza da plastica a plastica dura; le intercalazioni presenti, di dimensioni decimetriche, sabbiose e mediamente addensate, si rinvencono ad oltre 14.0 m di profondità dal piano di calpestio.

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 31 di 66 |

3.4.2 S-CPTU 4

A seguito dell'indagine e dell'elaborazione effettuata, i risultati sismici della prova sono riassunti nelle tabelle sottostanti.

| Profondità (m) | Tempi oss (ms) | Tempi corr (ms) |
|----------------|----------------|-----------------|
| | S | S |
| 0 | 0 | |
| 1 | 64.27 | 39.19 |
| 2 | 70.11 | 58.78 |
| 3 | 74.01 | 67.91 |
| 4 | 80.82 | 76.87 |
| 5 | 85.00 | 82.26 |
| 6 | 90.00 | 87.96 |
| 7 | 95.50 | 93.89 |
| 8 | 103.00 | 101.67 |
| 9 | 109.06 | 107.94 |
| 10 | 113.93 | 112.98 |
| 11 | 119.77 | 118.95 |
| 12 | 124.64 | 123.92 |
| 13 | 132.43 | 131.78 |
| 14 | 139.00 | 138.40 |
| 15 | 143.00 | 142.47 |
| 16 | 147.50 | 147.02 |
| 17 | 153.86 | 153.41 |
| 18 | 158.73 | 158.31 |
| 19 | 164.57 | 164.18 |
| 20 | 169.44 | 169.08 |

| Profondità (m) | Profondità (m) | Velocità (m/s) |
|----------------|----------------|----------------|
| da | a | S |
| 0 | | |
| 1 | 2 | 51.02 |
| 2 | 3 | 109.63 |
| 3 | 4 | 111.61 |
| 4 | 5 | 185.20 |
| 5 | 6 | 175.62 |
| 6 | 7 | 168.48 |
| 7 | 8 | 128.67 |
| 8 | 9 | 159.35 |
| 9 | 10 | 198.47 |
| 10 | 11 | 167.62 |
| 11 | 12 | 201.14 |
| 12 | 13 | 127.26 |
| 13 | 14 | 150.86 |
| 14 | 15 | 246.22 |
| 15 | 16 | 219.80 |
| 16 | 17 | 156.43 |
| 17 | 18 | 203.89 |
| 18 | 19 | 170.34 |
| 19 | 20 | 204.25 |

Tabella 3.4.2.1 – *Tempi osservati e corretti – velocità media interstrato*

La prova CPTU 4, i cui certificati sono oggetto di specifico allegato, esibisce le seguenti specifiche litostratigrafiche:

- la litologia principale risulta caratterizzata da terreni di natura prevalentemente limosa ($2 < R_f < 4$) a scarsa consistenza e/o addensamento; sono presenti intercalazioni centimetriche sabbiose da 14.5 a 16.0 m di profondità dal piano di calpestio.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 32 di 66 |

4. BIBLIOGRAFIA

- Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, 665–666.
- Archie G.E., 1942. "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics". *Transaction of the AIME* 146, 54-62.
- Ben-Menahem A. E SINGH S.J., 1981. *Seismic Waves and Sources*, Springer-Verlag, New York.
- Bindi D., Parolai S., Spallarossa D., Cattaneo M., 2000. Site effects by H/V ratio: comparison of two different procedures, *J. Earthq. Eng.*, 4, 97-113.
- Castellaro S., Mulargia F. E Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, *Geologia Tecnica e Ambientale*, vol. 3.
- Castellaro, S., and Mulargia, F., 2007. Constrained H/V only estimates of Vs30, *Bull. Seism. Soc. Am.*, submitted.
- Castellaro, S., and Mulargia, F., Estimates of Vs30 Based on Constrained H/V Ratio Measurements Alone, in: *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data*, DORDRECHT, Springer, 2009, pp. 85 – 97
- Castellaro, S., and Mulargia, F, The Effect of Velocity Inversions on H/V, «PURE AND APPLIED GEOPHYSICS», 2009, 166, pp. 567 – 592
- Castellaro, S., and Mulargia, F., VS30 Estimates Using Constrained H/V Measurements, «BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA», 2009, 99, pp. 761 – 773
- Cavinato, G. P., Di Luzio, E., Moscatelli, M., Vallone, R., Averardi, M., Valente, A., and Papale, S. [2006] The new Col di Tenda tunnel between Italy and France: Integrated geological investigations and geophysical prospections for preliminary studies on the Italian side. *Engineering Geology* 88, 90-109.
- Coffeen, J.A., 1978. "Seismic exploration fundamentals". Pubb. Co.;
- Dahlin, T., Bjelm, L., and Svensson, C. [1999] Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Hallandsås Horst, Sweden. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 32, 163-172.
- D. ALBARELLO, S. CASTELLARO, Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola, «INGEGNERIA SISMICA», 2012, 2, pp. 32 – 61
- Diebold J.B. and Stoffa P.L. 1981. The travelttime equation, tau-p mapping, and inversion of common midpoint data. *Geophysics*, volume 46, p. 238-254.
- Dey A. and Morrison H.F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting*, 27(1), 106-136.
- Dobrin, M.B., 1976. "Introduction to Geophysical prospecting". McGraw-Hill Book Co.;
- European Commission (2005), User guideline for the implementation of the H/V

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 33 di 66 |

spectral ratio technique on ambient vibration: Measurement, processing and interpretation, Res. Gen. Dir. Proj. EVG1-CT-2000- 00026 SESAME, Rep. D23.12, 62 pp., Brussels. (Available at <http://SESAME-fp5.obs.ujf-grenoble.fr>.)

Fa`H, D., et al. (2001), A theoretical investigation of average H/V ratios, Geophys. J. Int., 145, 535–549.

Fa`H, D., et al. (2003), Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects, J. Seismol., 7, 449–467.

Foti S., 2000, Multi-Station Methods for Geotechnical Characterisation Using Surface Waves, PhD Diss., Politecnico di Torino, 229 pp.;

Ganerød, G. V., Rønning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B., and Braathen, A. [2006] Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 65, 231-243.

Gebrande H and Miller H., 1985. Refraktionsseismik (in German). In: F. Bender (Editor), Angewandte Geowissenschaften II. Ferdinand Enke, Stuttgart; pp. 226-260. ISBN 3-432-91021-5.

Hagedoorn J.G. 1959. The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections. Geophysical Prospecting, volume 7, p. 158-182.

Herrmann R.B. and Ammon C. J., 2002. “ Computer Programs in Seismology” ver. 3.20.

Kanai, K., Tanaka, T. (1954). Measurement of the microtremor, Bulletin of Earthquake Research Institute 32, 199–209.

Ibs-Von Seht M., and Wohlenberg J., Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No. 1, pp. 250-259, February 1999.

Jansen S. 2010. Parameter investigation for subsurface tomography with refraction seismic data, Master thesis, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen.

John m. Reynolds, (1997). “An introduction to applied and environmental geophysics”, pp. 415-488, Wiley, England.

Jones G.M. and Jovanovich D.B. 1985. A ray inversion method for refraction analysis. Geophysics, volume 50, p. 1701-1720.

Jun-Su Choi , Hee-Hwan Ryu, In-Mo Lee , Gye-Chun Cho, (2006). “Rock Mass Classification Using Electrical Resistivity – an Analytical Study”, Key Engineering Material, Vols. 321-323, pp. 1411-1414, Trans Tech Publications, Switzerland.

LaBrecque, D. J., Morelli, G., Daily, W., Ramirez, A. and Lundegard, P. - Occam's inversion of 3-D electrical resistivity tomography, in Oristaglio, M. and Spies, B., Ed., Three-dimensional electromagnetics: Soc. of Expl. Geophys., 575-590, 1999 .

Lecomte, I.; Gjoystdal, H.; Dahle, A.; Pedersen, O.C., 2000, Improving modeling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver, Geophysical Prospecting, Vol. 48, 437-454.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| <p>INDAGINI GEOFISICHE</p> | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 34 di 66 |

Lermo J., Chavez-Garcia F.J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, Bulletin of Seismological Society of America, 83, 1574–1594.

Lobkis, O. I. and L. Weaver, R. L., 2001 “On the emergence of the Green’s function in the correlations of a diffuse field”. The Journal of the Acoustical Society of America, 110: 3011-3017.

Loke, M.H., A practical guide to 2D & 3D electrical imaging surveys (10th Aug. 2000).

MacPhail M.R. 1967. The midpoint method of interpreting a refraction survey. In: Musgrave A.W. (Editor), Seismic.

Milton B. Dobrin, Carl H. Savit, 1988, Introduction to Geophysical Prospecting, fourth Edition, McGraw-Hill International Editions e R.E. Goodman, 1989, Introduction to Rock Mechanics, second Edition, John Wiley & Sons.

Morelli, G., Morelli, A., Chiara, P., Pacchini, A., Fischanger, F., 2004. “Characterization of Complex Archaeological Sites Using 3D Electrical Resistivity Tomography”. Proceedings of the SAGEEP 2004, 185-192.

Mcmechan G.A., Yedlin M.J., 1981, Analysis of dispersive wave by wave field transformation, Geophysics, 46, 869-874;

Morelli G. and LaBrecque D.J., 1996, Advances in ERT modeling, Eur. J. Environ. Eng. Geophys., 1, 171-186.

Mulargia F., Castellaro S., Passive Imaging in Nondiffuse Acoustic Wavefields, «PHYSICAL REVIEW LETTERS», 2008, 100, pp. 218501-1 - 218501-4

Nakamura, Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quat. Rep. Railway Tech. Res. Inst., 30 (1), 25–30.

Nazarian S., Stokoe K.H., 1986, Use of surface waves in pavement evaluation, Transp. Res. Rec, 1070, 132-144;

Palmer, D., 2010, Non-uniqueness with refraction inversion – a syncline model study, Geophysical Prospecting, Vol. 58, 203-218.

Park C.B., Miller R.D., Xia J., 2001, Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW), proc. SAGEEP 2001;

Park S.K. and Van G.P., 1991, Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes, Geophysics, 56, 951-960.

Ramirez A., Daily W., Binley A., and LaBrecque D.J., 1999, Electrical impedance tomography of known targets, J. of Environmental and Engineering Geophysics, 4(1), 11-26, 1999.

Sasaki Y., 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method, Geophysics, 59(11), 1839-1848.

Schuster G T, Aksel Q B. 1993. Wave-path Eikonal travel-time inversion: Theory. Geophysics, 58(9): 1314–1323.

Stokoe K.H., Wright S.G., Bay J., Roesset J.M., 1994, characterization of

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 35 di 66 |

geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites, (ISSMFE TC#10) by R.D. Woods (ed), Oxford & IBH Publ., pp. 15-25;

Xia J., Miller R.D., Park C.B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, Geophysics, 64, 691-700.

Yamanaka, H., Dravinski, M., Kagami, H. (1993). Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 83,1595–1609.

Watanabe, T.; Matsuoka, T.; Ashida, Y., 1999, Seismic travelttime tomography using Fresnel volume approach, SEG Houston 1999, Expanded Abstracts. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1820777>.

| | | | | | | |
|---|---|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 36 di 66 |

5. ALLEGATO GRAFICO N.1 – TOMOGRAFIA SISMICA ED ELETTRICA

INDAGINE SISMICA ED ELETTRICA TOMOGRAFICA
RIFR + ERT 2 – CASCINA



Ubicazione Indagine



Immagine Area Indagine: geofoni G1-G24 del profilo



Immagine Area Indagine: geofoni G25-G48 del profilo

TAVOLA

1

OGGETTO

Indagini geofisiche
sismiche ed elettriche
tomografiche
RIFR + ERT 2

Progetto Definitivo

Piano di Risanamento
Acustico Cascina



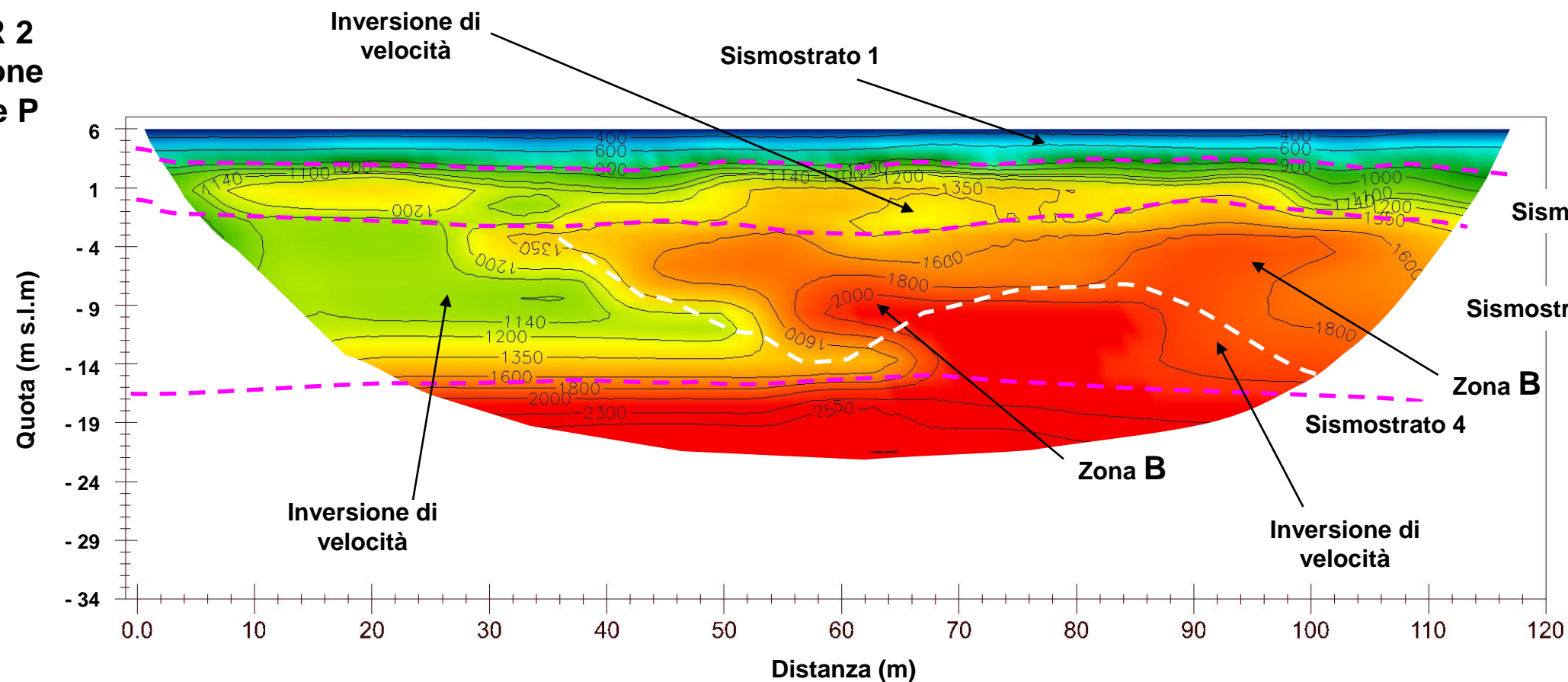
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

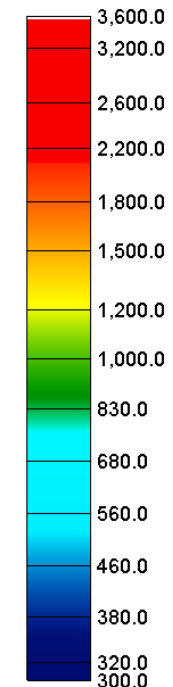
VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

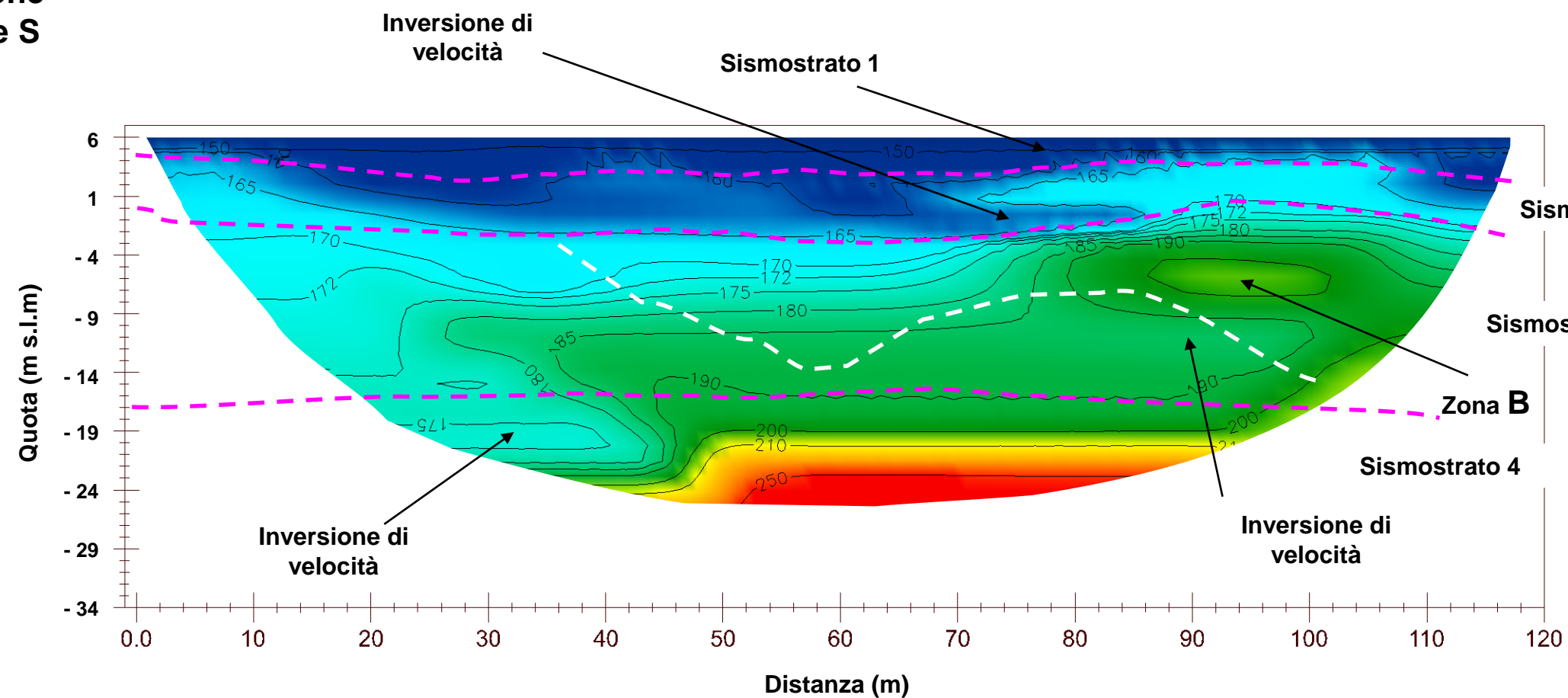
RIFR 2 Sezione Onde P



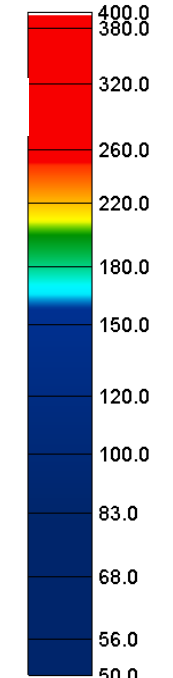
Scala di velocità
Onde P (m/s)



RIFR 2 Sezione Onde S



Scala di velocità
Onde S (m/s)



TAVOLA

2

OGGETTO

Indagini geofisiche
sismiche ed elettriche
tomografiche
RIFR + ERT 2

Progetto Definitivo

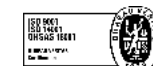
Piano di Risanamento
Acustico Cascina

Interfaccia tra
sismostrati

Scala della sezione
1 cm = 5 m



SOING
STRUTTURE & AMBIENTE



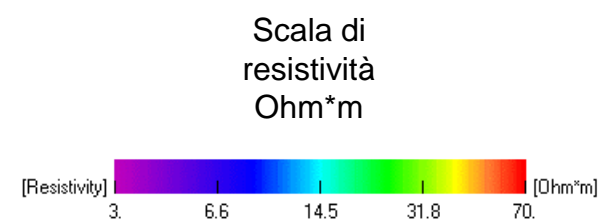
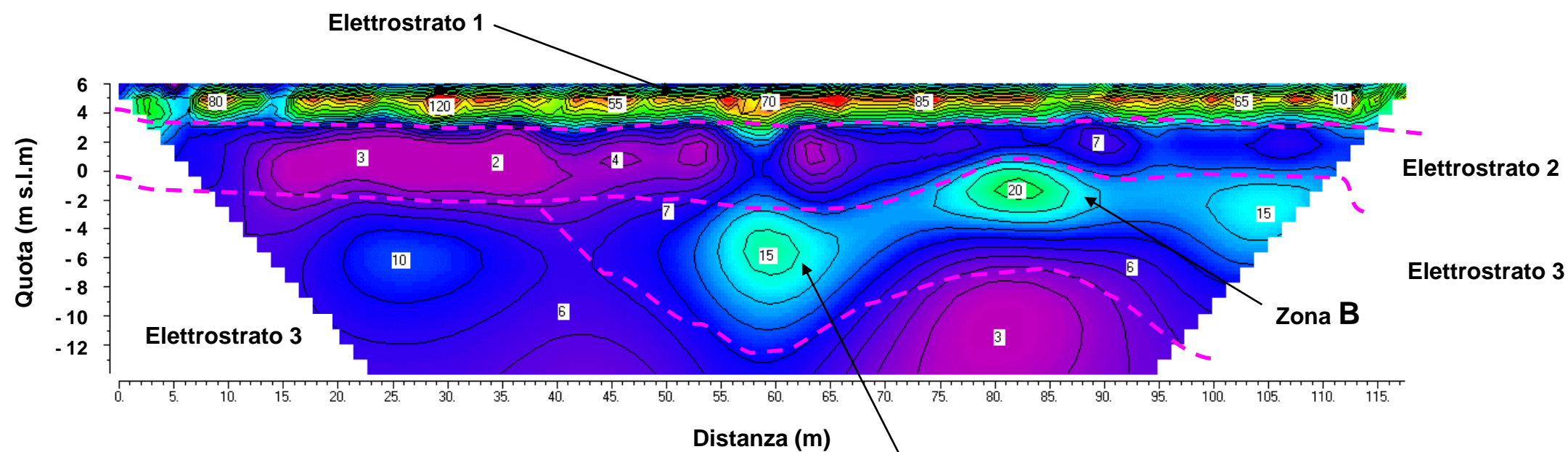
Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

ERT 2 Sezione



TAVOLA

3

OGGETTO

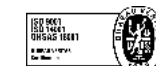
Indagini geofisiche
sismiche ed elettriche
tomografiche
RIFR + ERT 2

Progetto Definitivo

**Piano di Risanamento
Acustico Cascina**

Interfaccia tra
elettrostrati

Scala della sezione
1 cm = 5 m



**Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

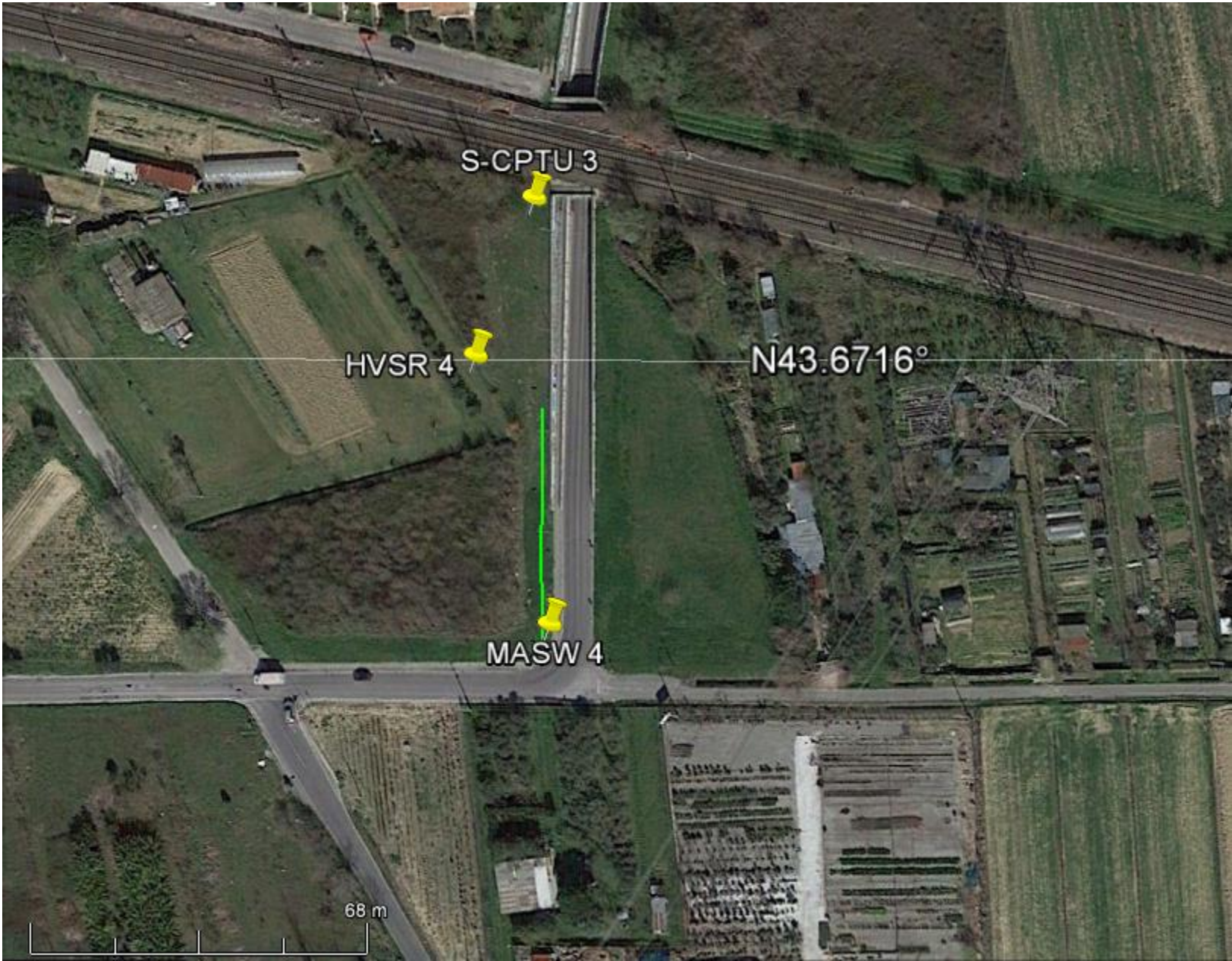
VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 40 di 66 |

6. ALLEGATO GRAFICO N.2 – INDAGINI MASW

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 4

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



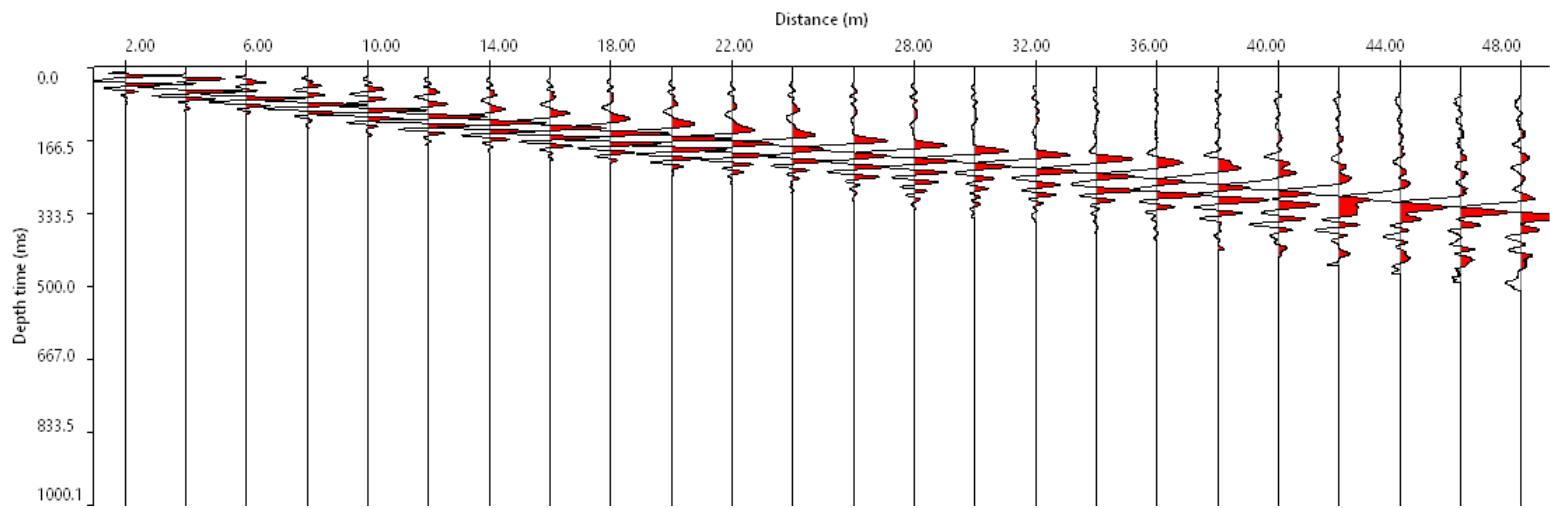
Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

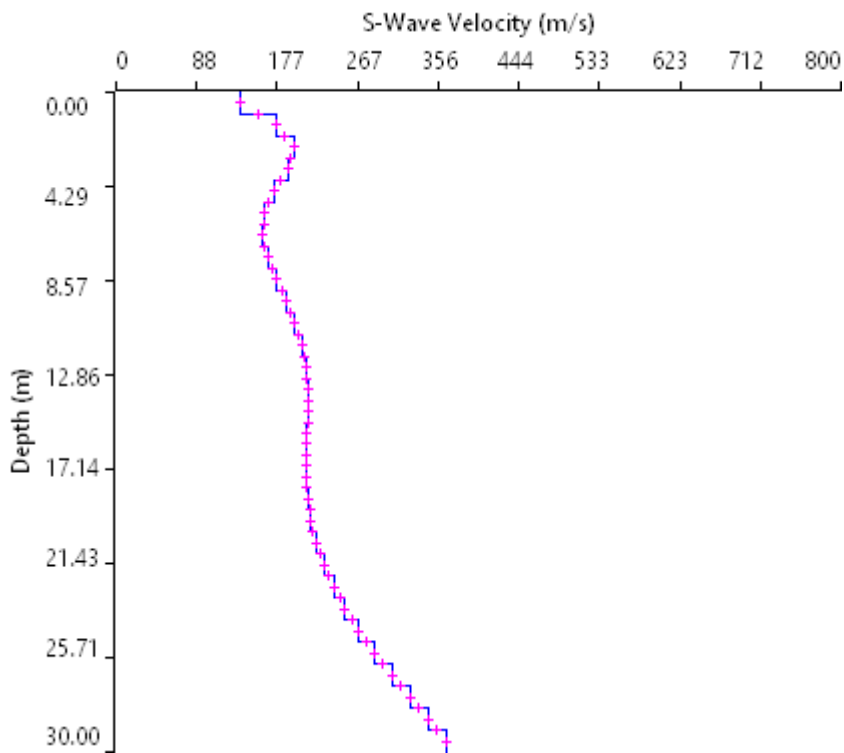
VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

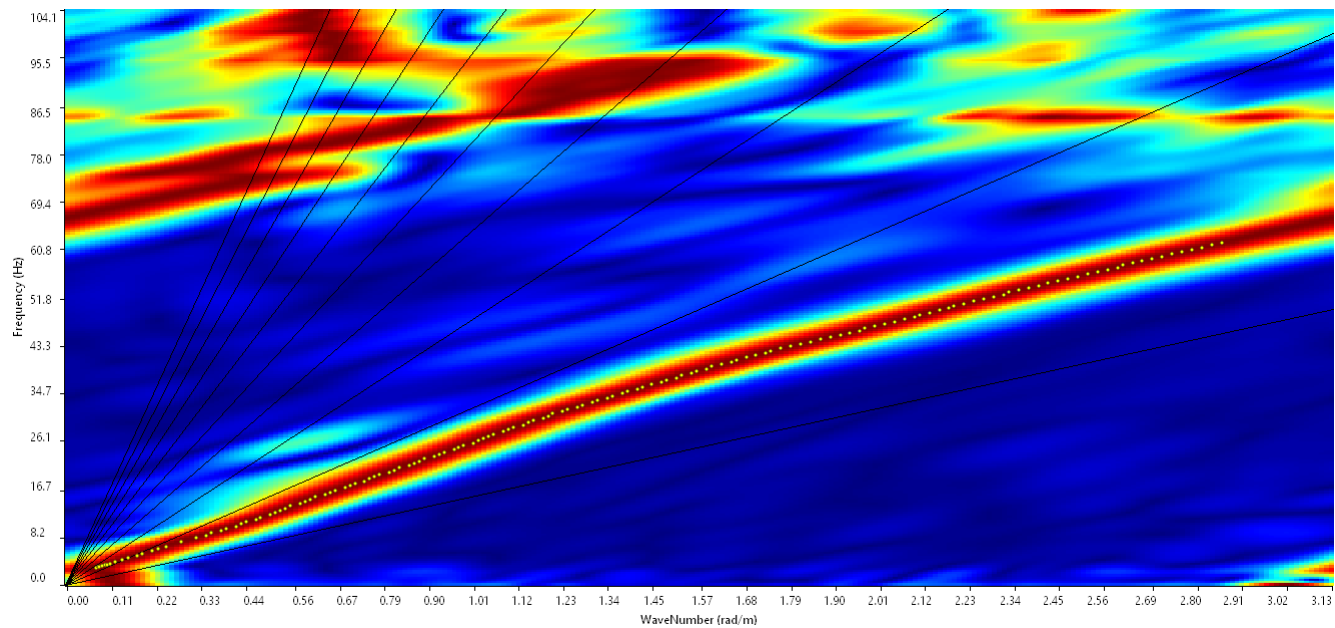
INDAGINE SISMICA MASW 4



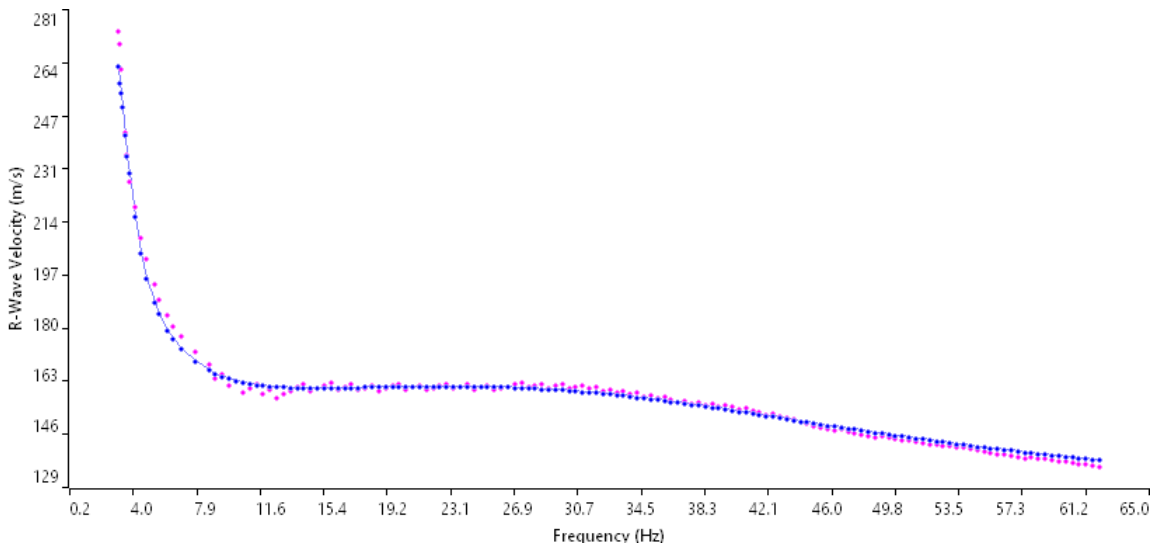
Sismogramma medio utilizzato



Profilo velocità onde S



Spettro F-K



Accoppiamento curve di dispersione

TAVOLA

2

OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 4

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



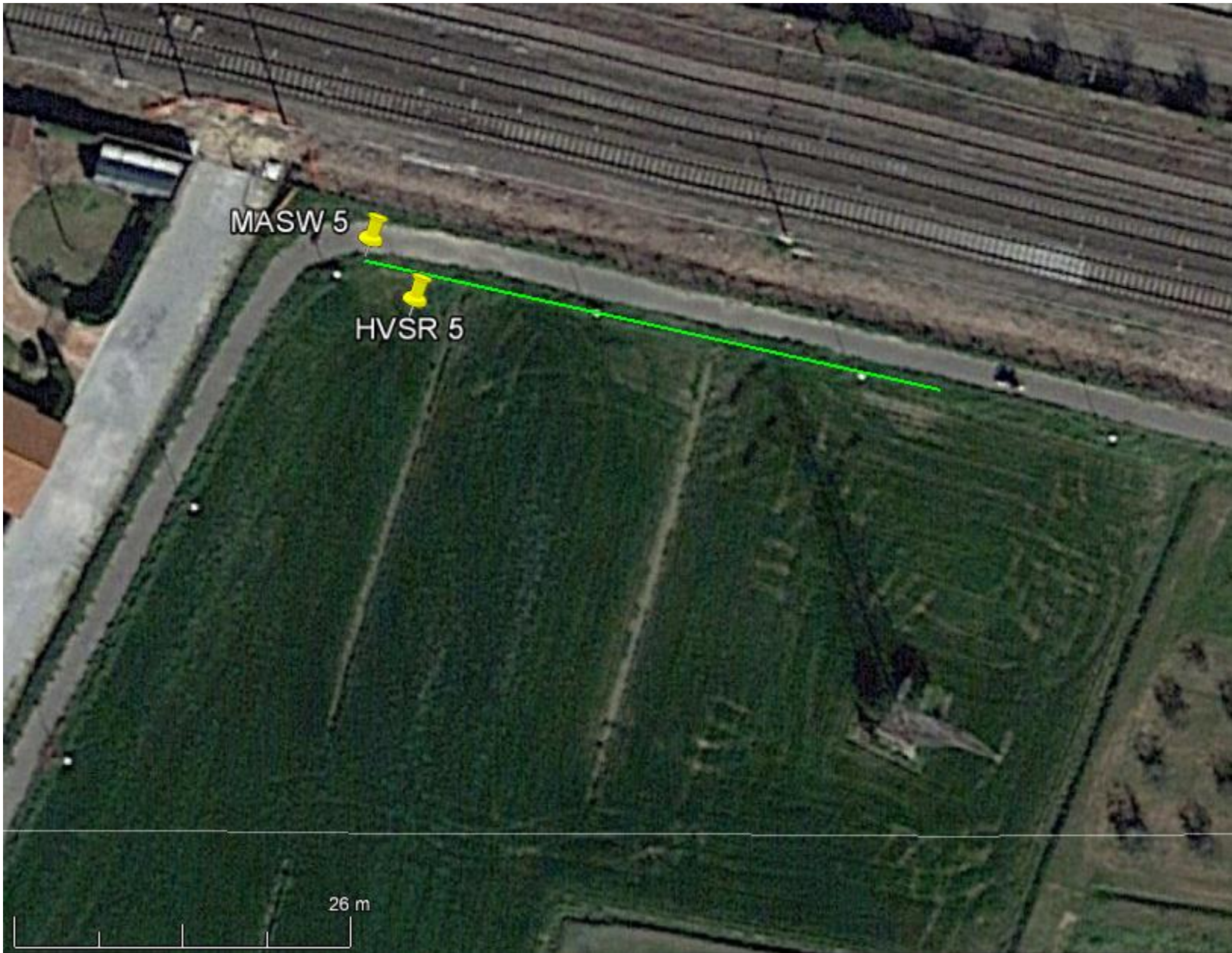
Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 5

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



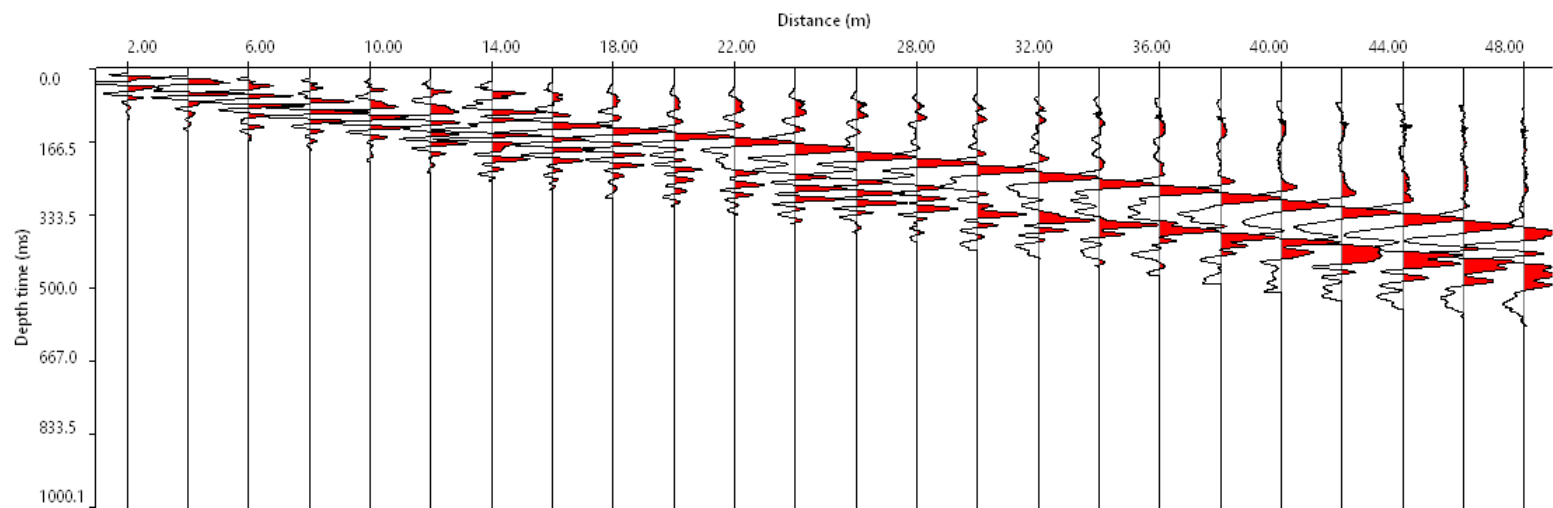
Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

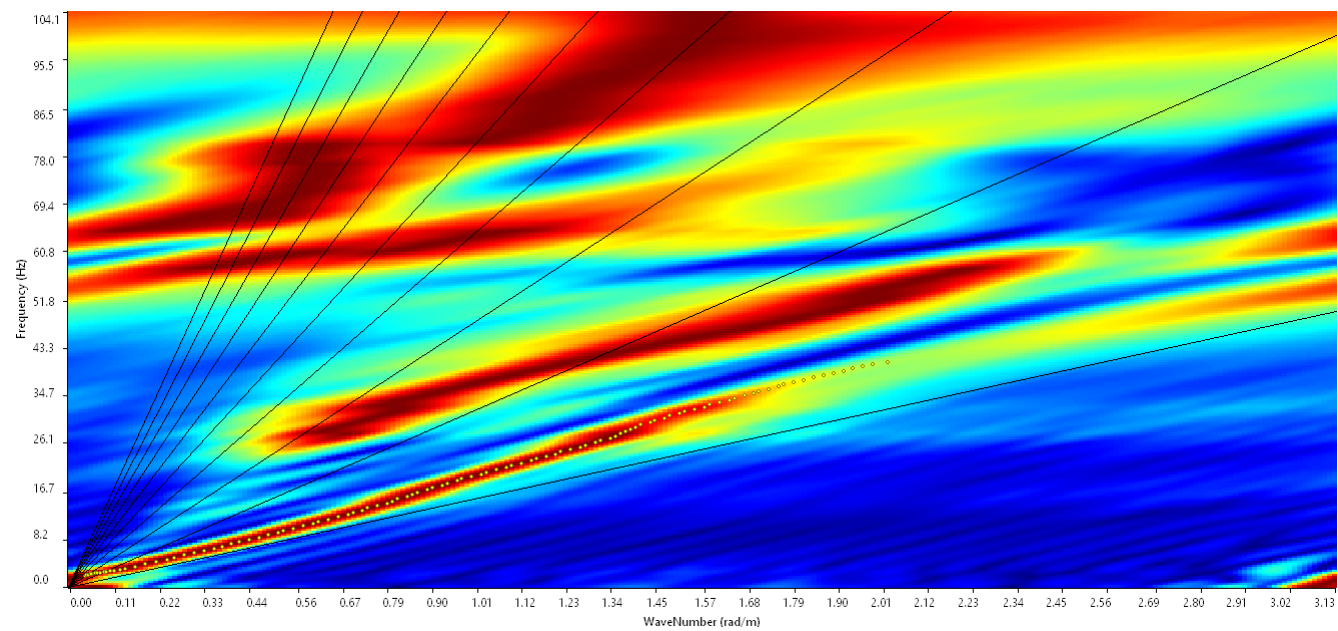
VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

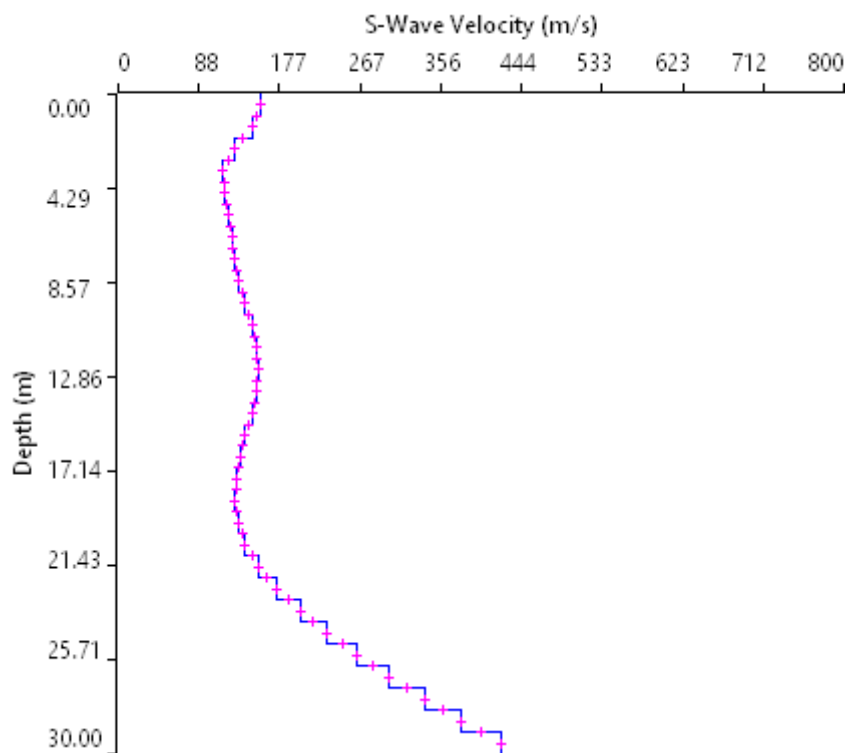
INDAGINE SISMICA MASW 5



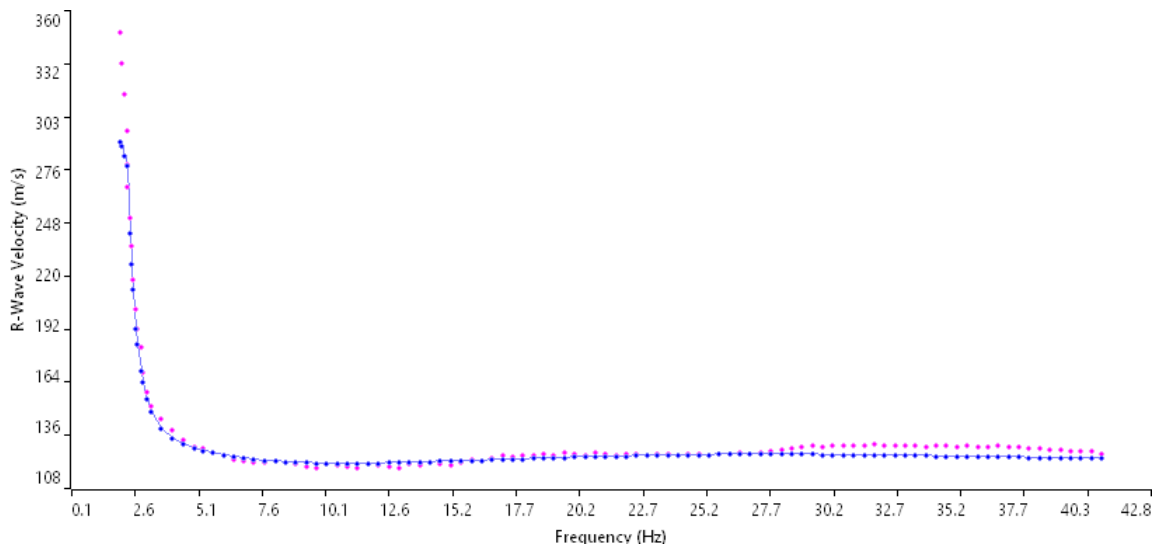
Sismogramma medio utilizzato



Spettro F-K



Profilo velocità onde S



Accoppiamento curve di dispersione

TAVOLA

4

OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 5

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 6

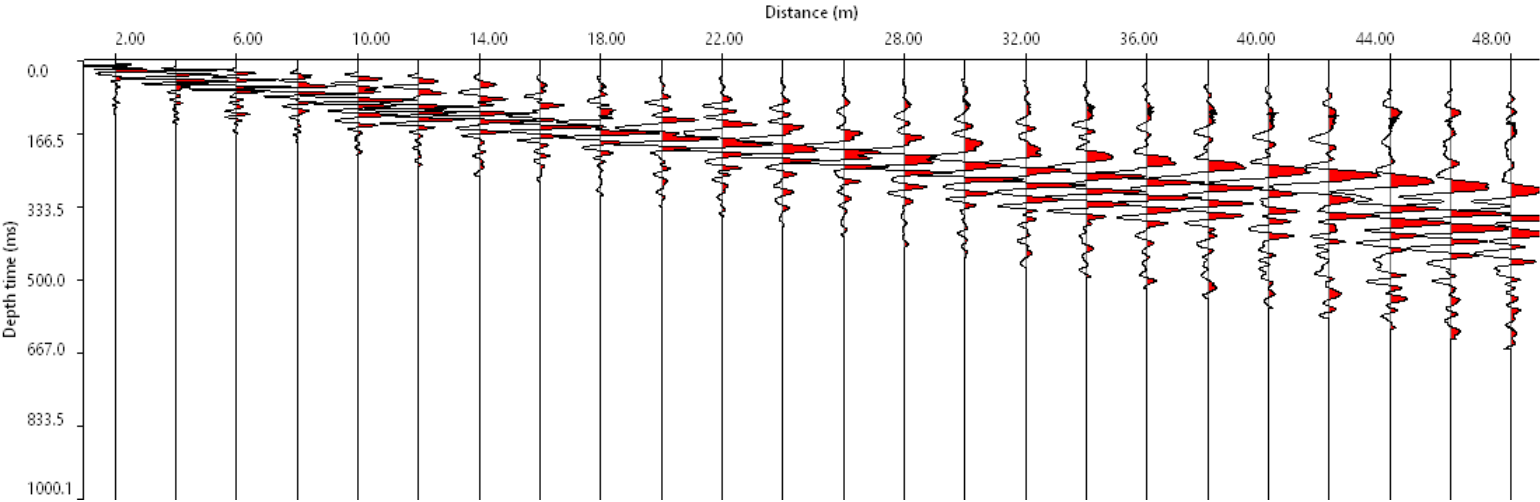
Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



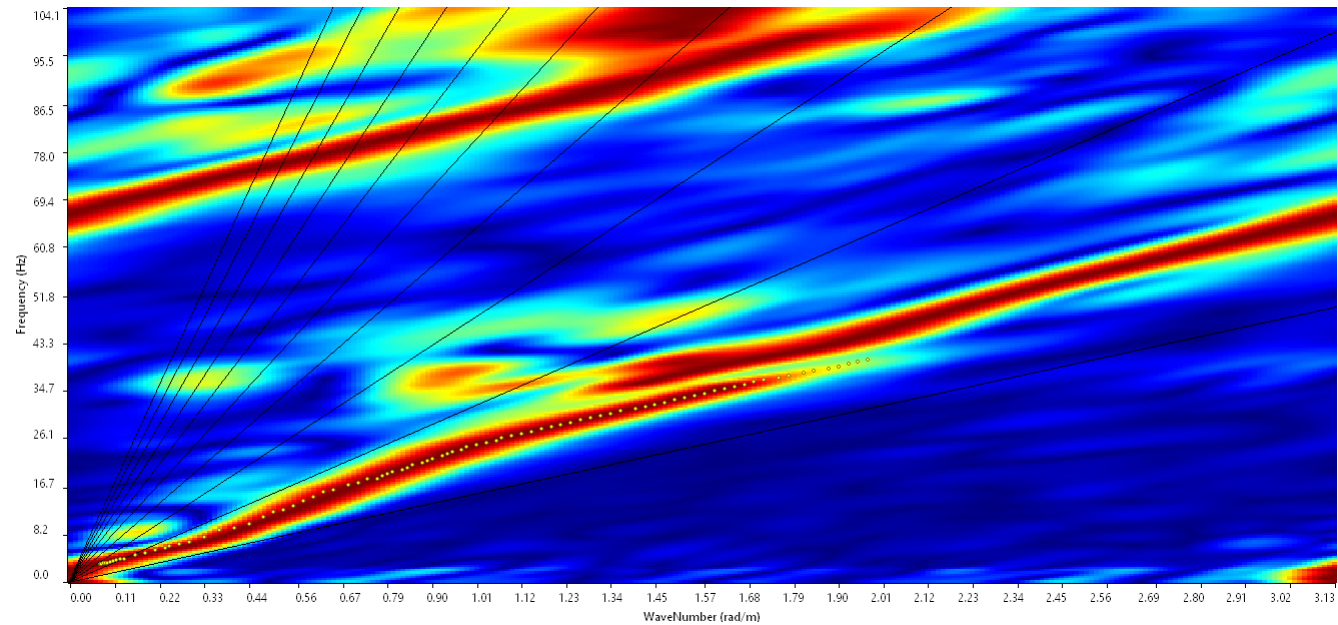
Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

| | |
|----------|------------|
| ELAB | G. Luciani |
| VERIFICA | A. Morelli |
| APPROV. | P. Chiara |

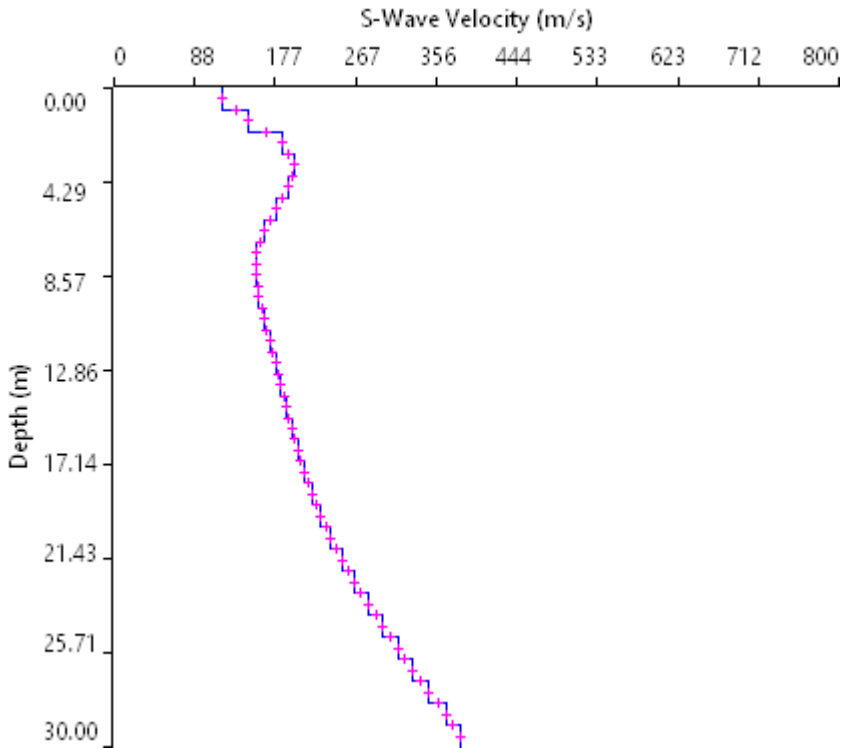
INDAGINE SISMICA MASW 6



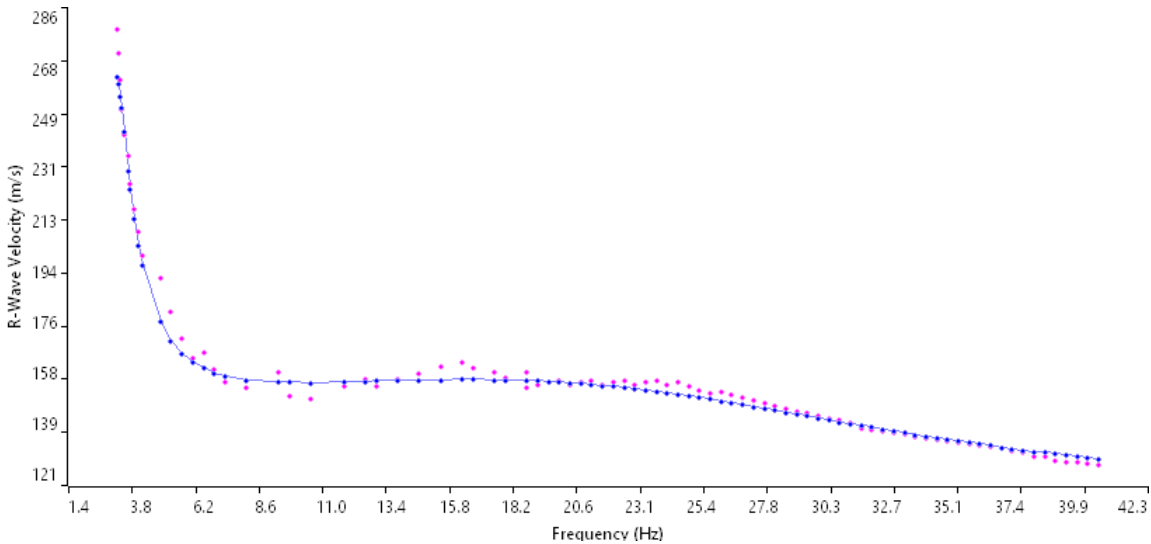
Sismogramma medio utilizzato



Spettro F-K



Profilo velocità onde S



Accoppiamento curve di dispersione

TAVOLA

6

OGGETTO:
Area Indagine sismica
MASW 6

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico Cascina



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000 | | | | | |
| | COMUNE DI LIVORNO CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031 | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 47 di 66 |

7. ALLEGATO GRAFICO N.3 – INDAGINI HVSR

Ubicazione Indagine



Immagini area indagine



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto **HVSR4**

PROGETTO:

Progetto definitivo
—
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la **SOING** Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

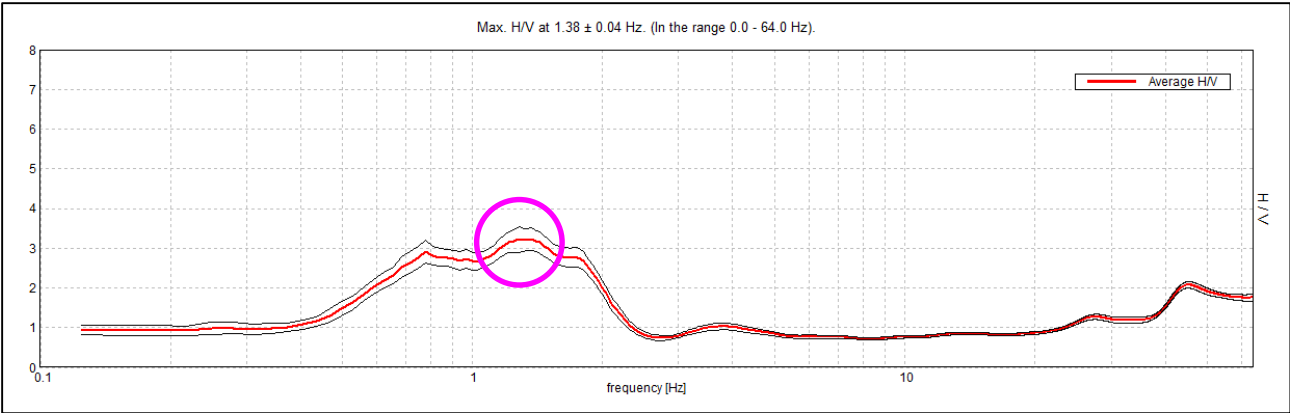
APPROVAZIONE P. Chiara

REV 00

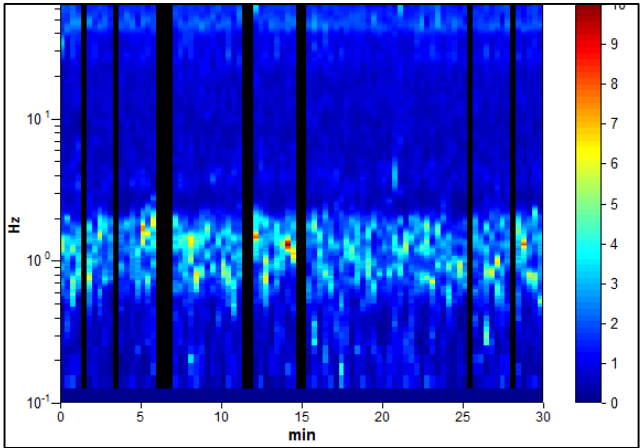
TAVOLA
1

INDAGINI SISMICHE HVSR4

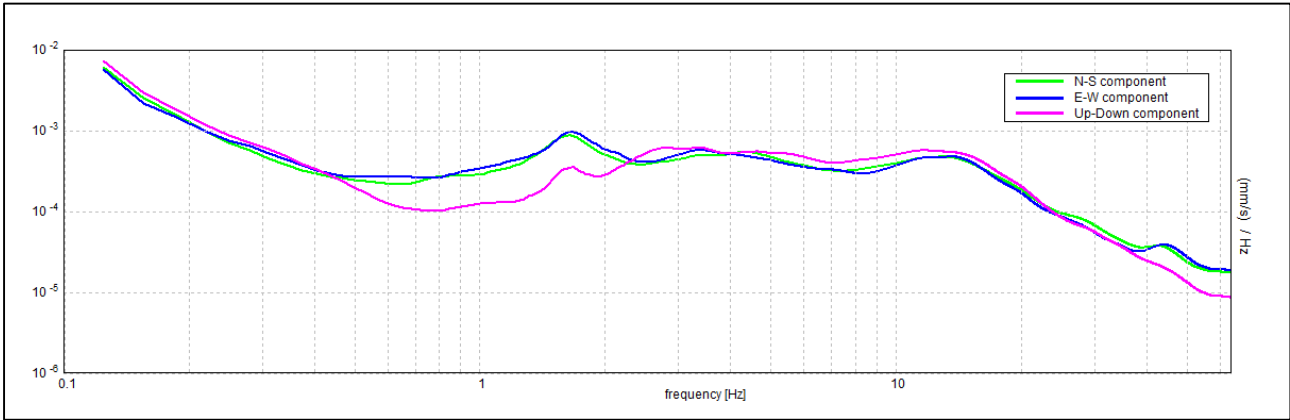
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA





ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR4

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 18/04/18 14:26:58 End recording: 18/04/18 14:56:59
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y + Y - ; X + X - ; Z + Z -
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 88% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 12%

| | | | | | |
|--|---|-----------|------------|------------|------------|
| Max. H/V at 1.38 ± 0.04 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz). | | | | | |
| | | | | | |
| Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled] | | | | | |
| $f_0 > 10 / L_w$ | 1.38 > 0.50 | OK | | | |
| $n_c(f_0) > 200$ | 2172.5 > 200 | OK | | | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 67 times | OK | | | |
| Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled] | | | | | |
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.5 Hz | OK | | | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 2.125 Hz | OK | | | |
| $A_0 > 2$ | 3.23 > 2 | OK | | | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.03015 < 0.05$ | OK | | | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | 0.04145 < 0.1375 | OK | | | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | 0.2796 < 1.78 | OK | | | |
| | | | | | |
| 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 | | | | |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency | | | | |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | | | | |
| 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 | | | | |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ | | | | |
| | | | | | |
| Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$ | | | | | |
| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | 0.25 f_0 | 0.2 f_0 | 0.15 f_0 | 0.10 f_0 | 0.05 f_0 |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto **HVSR4**

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la **SOING** Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti
VERIFICA A. Morelli
APPROVAZIONE P. Chiara

| | |
|--------|----------|
| REV 00 | TAVOLA |
| | 2 |

Ubicazione Indagine



Immagini area indagine



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto **HVSR5**

PROGETTO:

Progetto definitivo
—
Piano di
Risanamento
Acustico
Cascina -
Pontedera

Per la **SOING** Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti

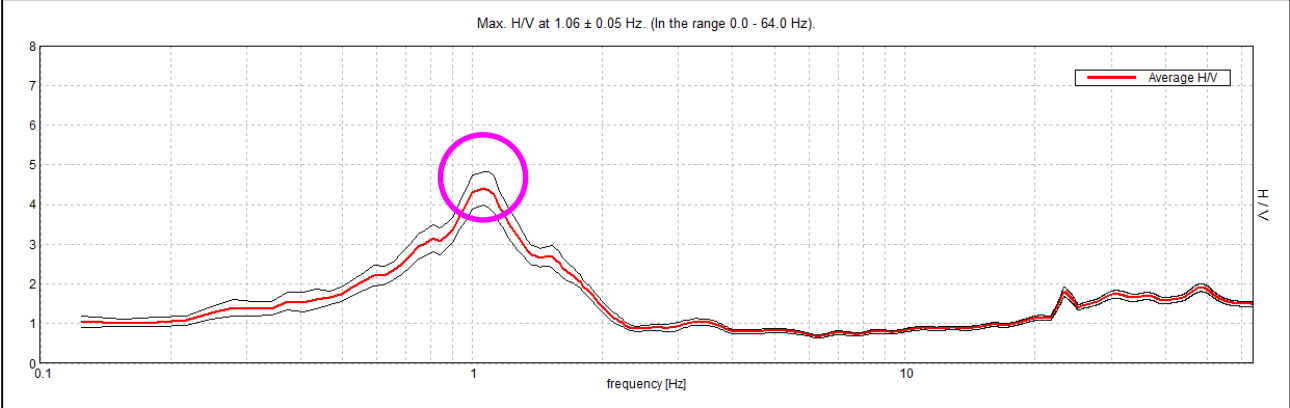
VERIFICA A. Morelli

APPROVAZIONE P. Chiara

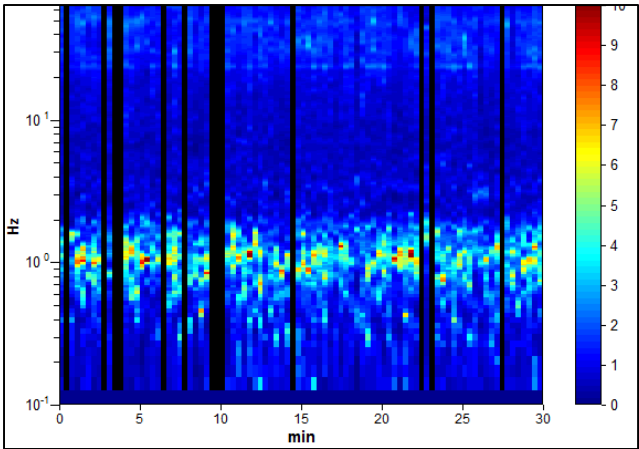
REV 00

TAVOLA
3

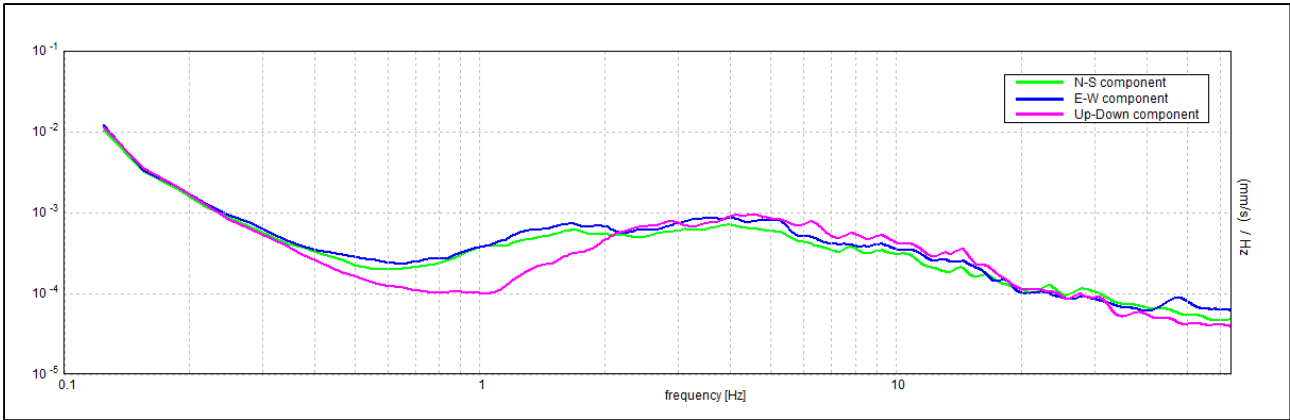
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR5

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 18/04/18 16:18:48 End recording: 18/04/18 16:48:48
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y+ Y- ; X+ X- ; Z+ Z-
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 86% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 7%

Max. H/V at 1.06 ± 0.05 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

| | | | |
|--|----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $1.06 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $1636.3 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 52 times | OK | |

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

| | | | |
|---|---------------------|----|--|
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.594 Hz | OK | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 1.719 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $4.41 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.04534 < 0.05$ | OK | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.04818 < 0.10625$ | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.427 < 1.78$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| 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 |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| 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 |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

| Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$ | | | | | |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto HVSR5

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la SOING Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

APPROVAZIONE P. Chiara



REV 00 TAVOLA
4

Ubicazione Indagine



Immagini area indagine





OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto **HVSR6**

PROGETTO:

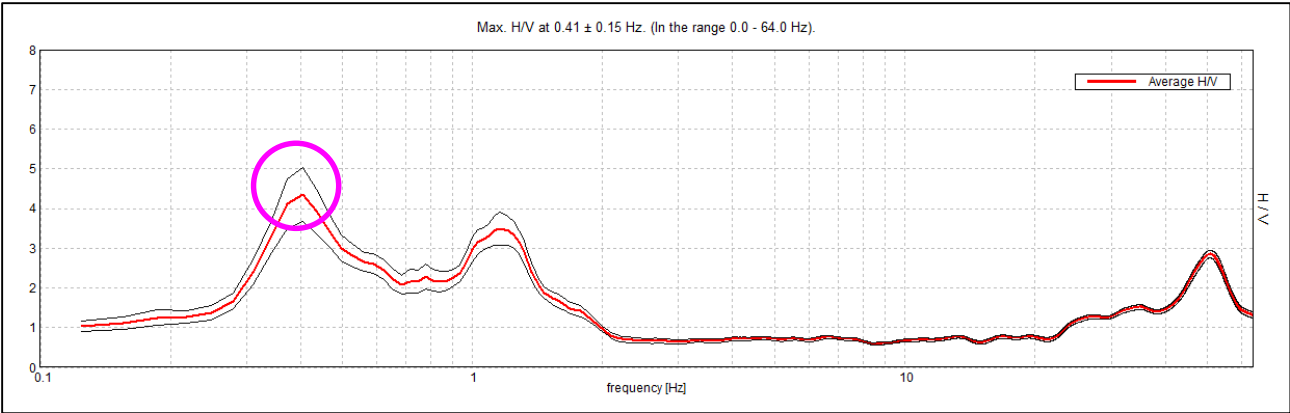
Progetto definitivo
—
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la **SOING** Strutture e
Ambiente

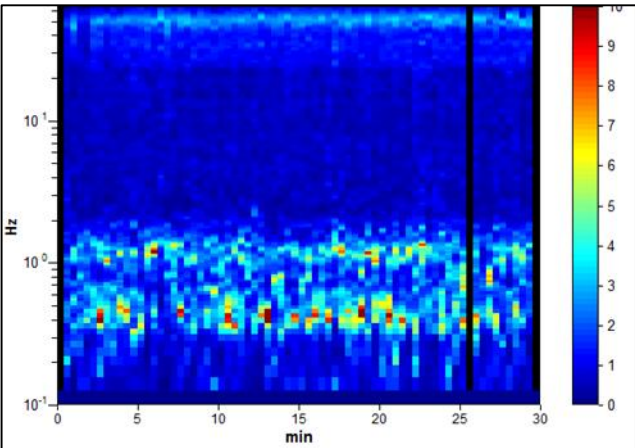
ELAB E. Benvenuti
VERIFICA A. Morelli
APPROVAZIONE P. Chiara

| | |
|--------|--------------------|
| REV 00 | TAVOLA 5 |
|--------|--------------------|

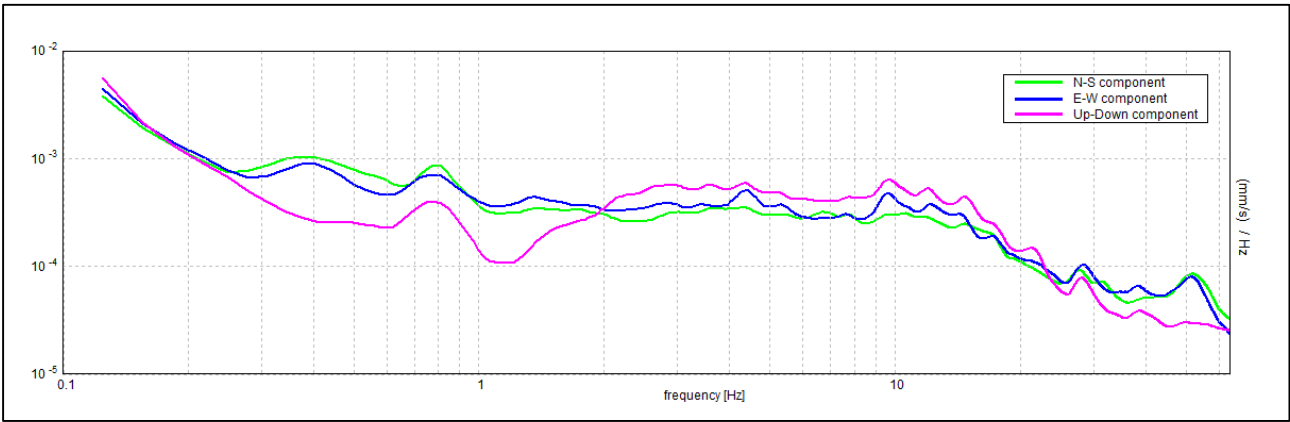
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR6

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 16/05/18 08:56:24 End recording: 16/05/18 09:26:24
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y+ Y- ; X+ X- ; Z+ Z-
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 96% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 25 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 7%

Max. H/V at 0.41 ± 0.15 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

| | | | |
|--|----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $0.41 > 0.40$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $700.8 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 20 times | OK | |

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

| | | | |
|---|---------------------|----|----|
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.281 Hz | OK | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 0.688 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $4.34 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.37877 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.15388 < 0.08125$ | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.6835 < 2.5$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| 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 |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| 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 |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

| Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$ | | | | | |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto HVSR6

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la SOING Strutture e
Ambiente

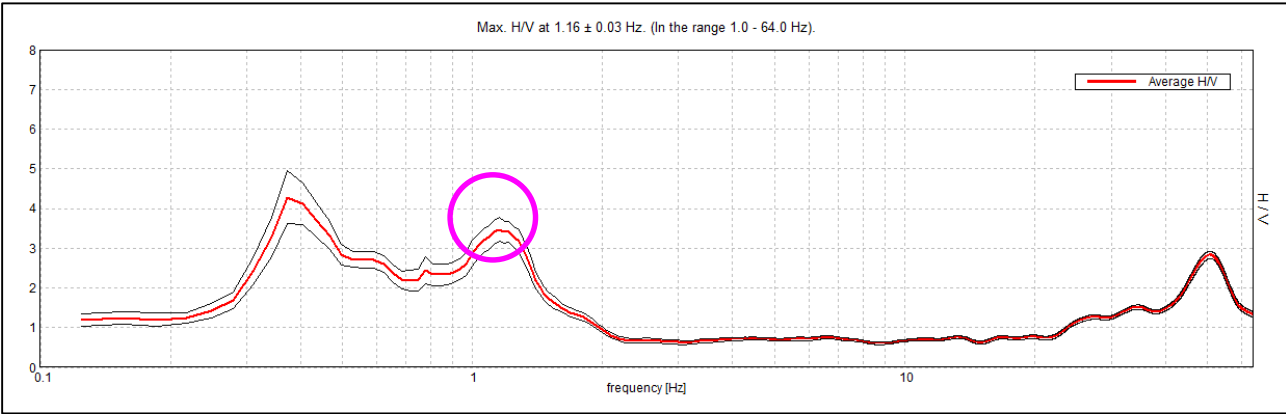
ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

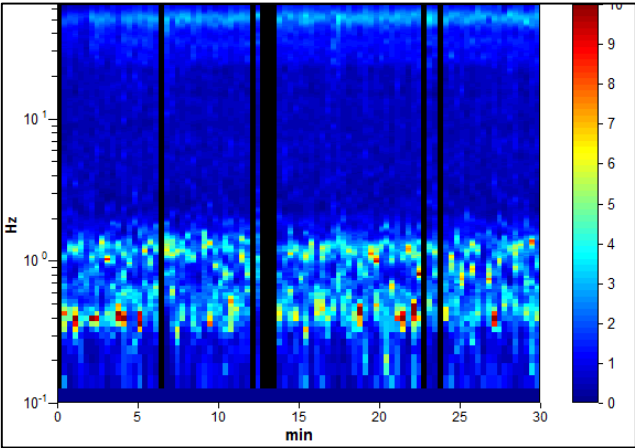
APPROVAZIONE P. Chiara

REV 00 TAVOLA
6

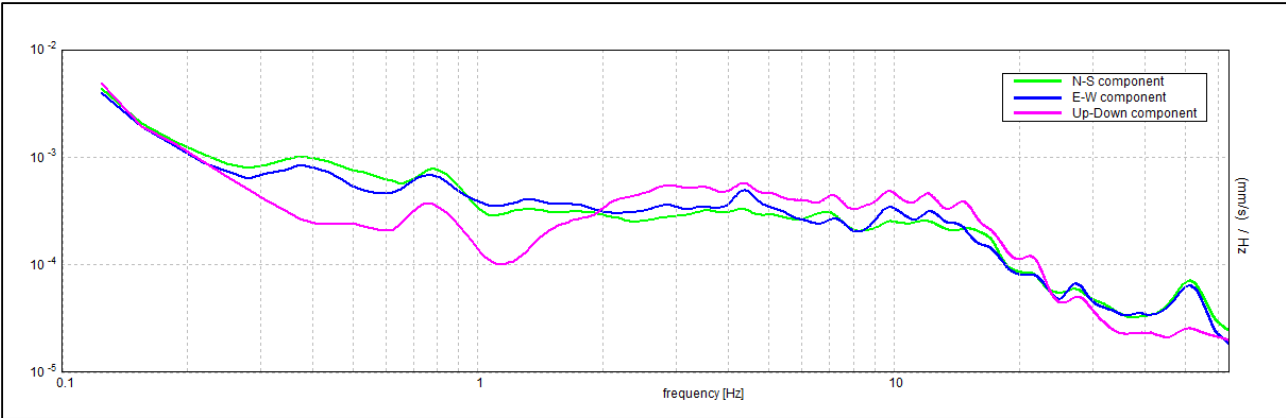
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR6

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 16/05/18 08:56:24 End recording: 16/05/18 09:26:24
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y+ Y- ; X+ X- ; Z+ Z-
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 91% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 8%

Max. H/V at 1.16 ± 0.03 Hz (in the range 1.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

| | | | |
|--|----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | $1.16 > 0.50$ | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | $1896.3 > 200$ | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 56 times | OK | |

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

| | | | |
|---|---------------------|----|--|
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.281 Hz | OK | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 1.5 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | $3.47 > 2$ | OK | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.0267 < 0.05$ | OK | |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.03087 < 0.11563$ | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.3017 < 1.78$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| 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 |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| 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 |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto HVSR6

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la SOING Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

APPROVAZIONE P. Chiara

REV 00 TAVOLA
7

Ubicazione Indagine



Immagini area indagine



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto **HVSR7**

PROGETTO:

Progetto definitivo
—
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la **SOING** Strutture e
Ambiente

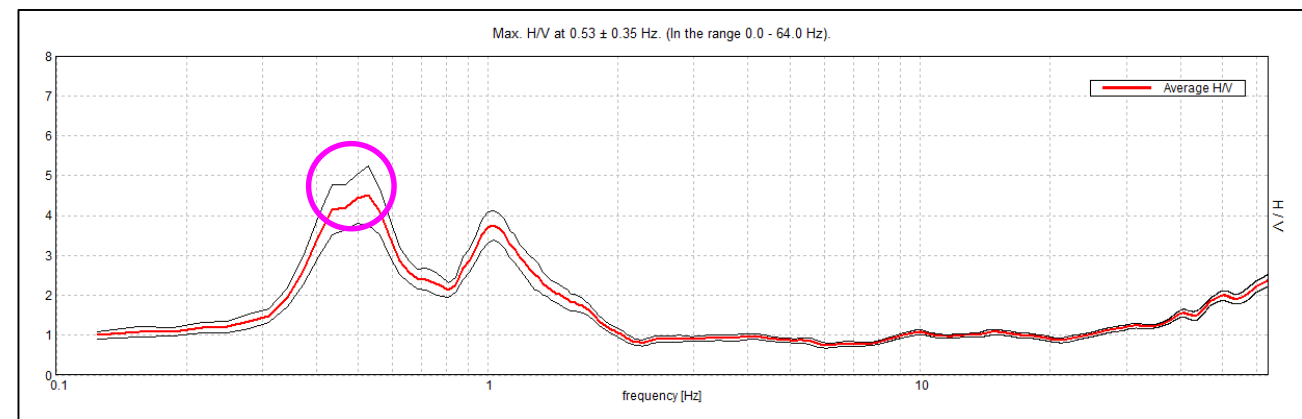
ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

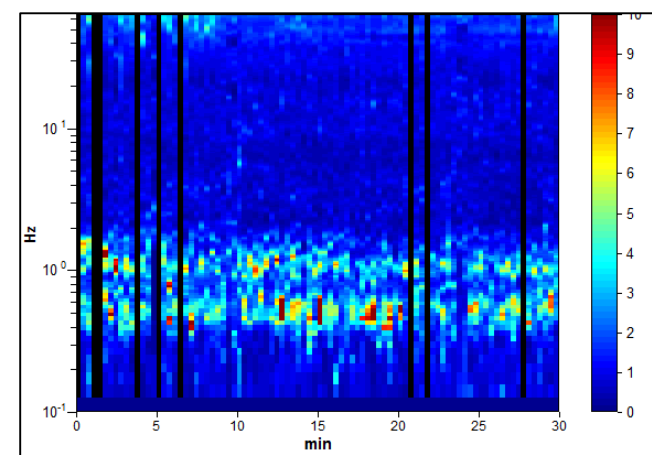
APPROVAZIONE P. Chiara

| | |
|--------|----------|
| REV 00 | TAVOLA |
| | 8 |

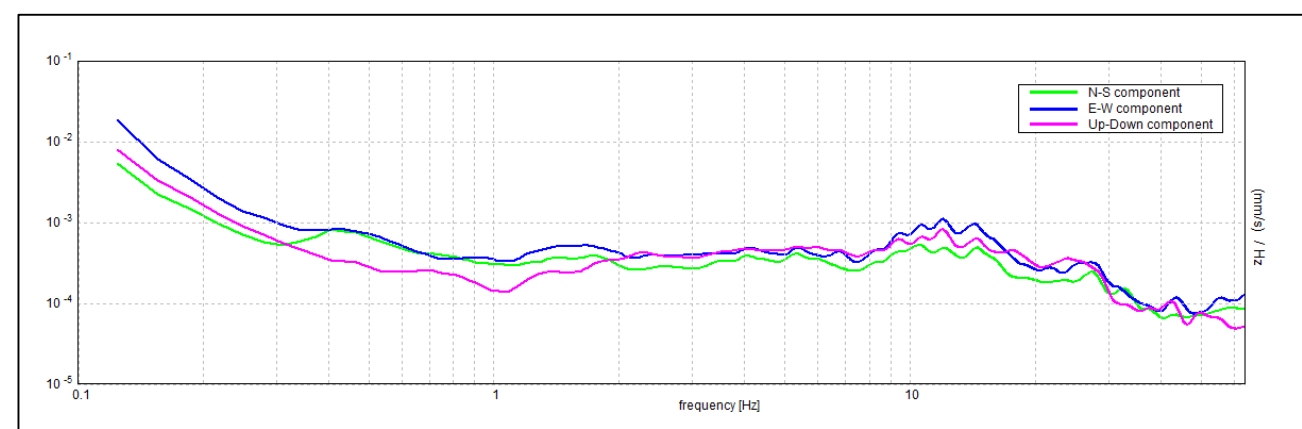
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR7

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 16/05/18 12:37:55 End recording: 16/05/18 13:07:55
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y+ Y- ; X+ X- ; Z+ Z-
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 90% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 7%

Max. H/V at 0.53 ± 0.35 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

| | | | |
|--|----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | 0.53 > 0.50 | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | 860.6 > 200 | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 26 times | OK | |

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

| | | | |
|---|-------------------|----|----|
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.344 Hz | OK | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 0.781 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | 4.50 > 2 | OK | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | 0.6549 < 0.05 | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | 0.34792 < 0.07969 | | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | 0.7376 < 2.0 | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| 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 |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| 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 |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | 0.25 f_0 | 0.2 f_0 | 0.15 f_0 | 0.10 f_0 | 0.05 f_0 |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto HVSR7

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la SOING Strutture e
Ambiente

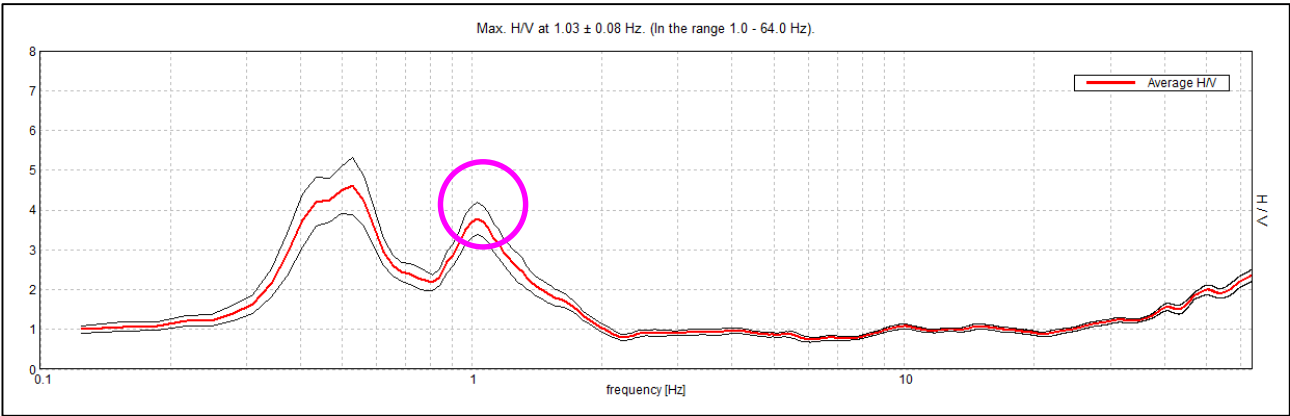
ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

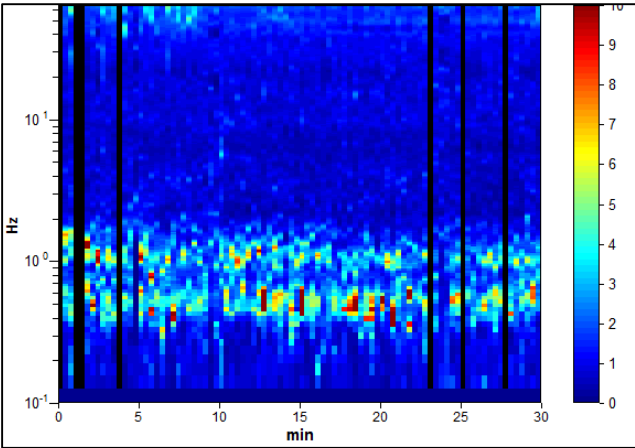
APPROVAZIONE P. Chiara

REV 00 TAVOLA
9

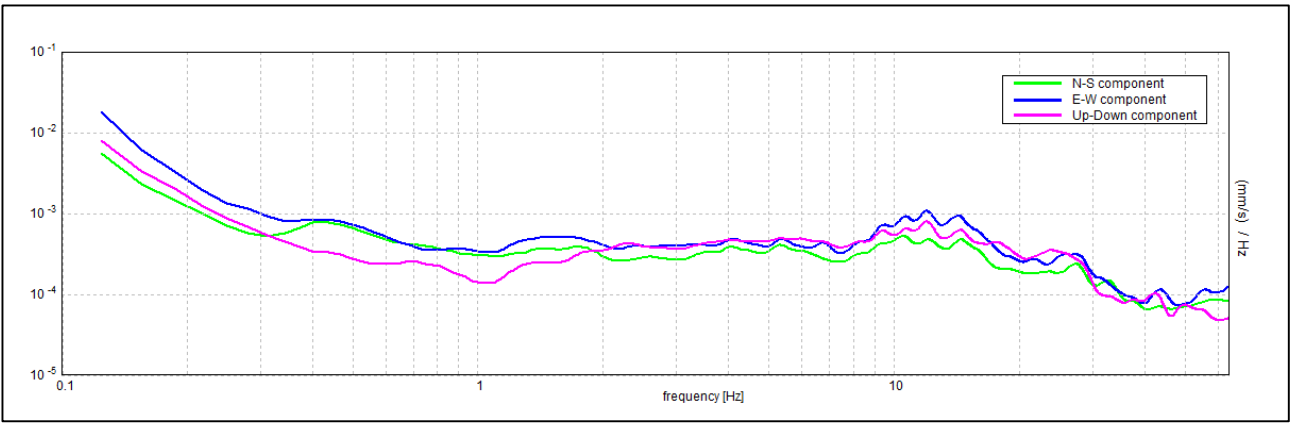
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



H/V TIME HISTORY



SINGLE COMPONENT SPECTRA



ITALFERR PONTEDERA CASCINA, PONTEDERA CASCINA HVSR7

Instrument: TEP-0155/01-11
Data format: 16 byte
Full scale [mV]: n.a.
Start recording: 16/05/18 12:37:55 End recording: 16/05/18 13:07:55
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; north south; east west ; up down ;
Y+ Y- ; X+ X- ; Z+ Z-
GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 92% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 7%

Max. H/V at 1.03 ± 0.08 Hz (in the range 1.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

| | | | |
|--|----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$ | 1.03 > 0.50 | OK | |
| $n_c(f_0) > 200$ | 1711.9 > 200 | OK | |
| $\sigma_A(f) < 2$ 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 50 times | OK | |

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

| | | | |
|---|---------------------|----|----|
| Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ | 0.313 Hz | OK | |
| Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ | 1.531 Hz | OK | |
| $A_0 > 2$ | 3.78 > 2 | OK | |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.08229 < 0.05$ | | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ | $0.08486 < 0.10313$ | OK | |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$ | $0.406 < 1.78$ | OK | |

| | |
|------------------------|---|
| 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 |
| σ_f | standard deviation of H/V peak frequency |
| $\varepsilon(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ |
| 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 |
| $\theta(f_0)$ | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz] | < 0.2 | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0 | 1.0 – 2.0 | > 2.0 |
|---|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz] | $0.25 f_0$ | $0.2 f_0$ | $0.15 f_0$ | $0.10 f_0$ | $0.05 f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$ | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.78 | 1.58 |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |



OGGETTO:
Indagini sismiche HVSR
Punto HVSR7

PROGETTO:

Progetto definitivo
–
Piano di
Risanamento
Acustico Cascina

Per la SOING Strutture e
Ambiente

ELAB E. Benvenuti

VERIFICA A. Morelli

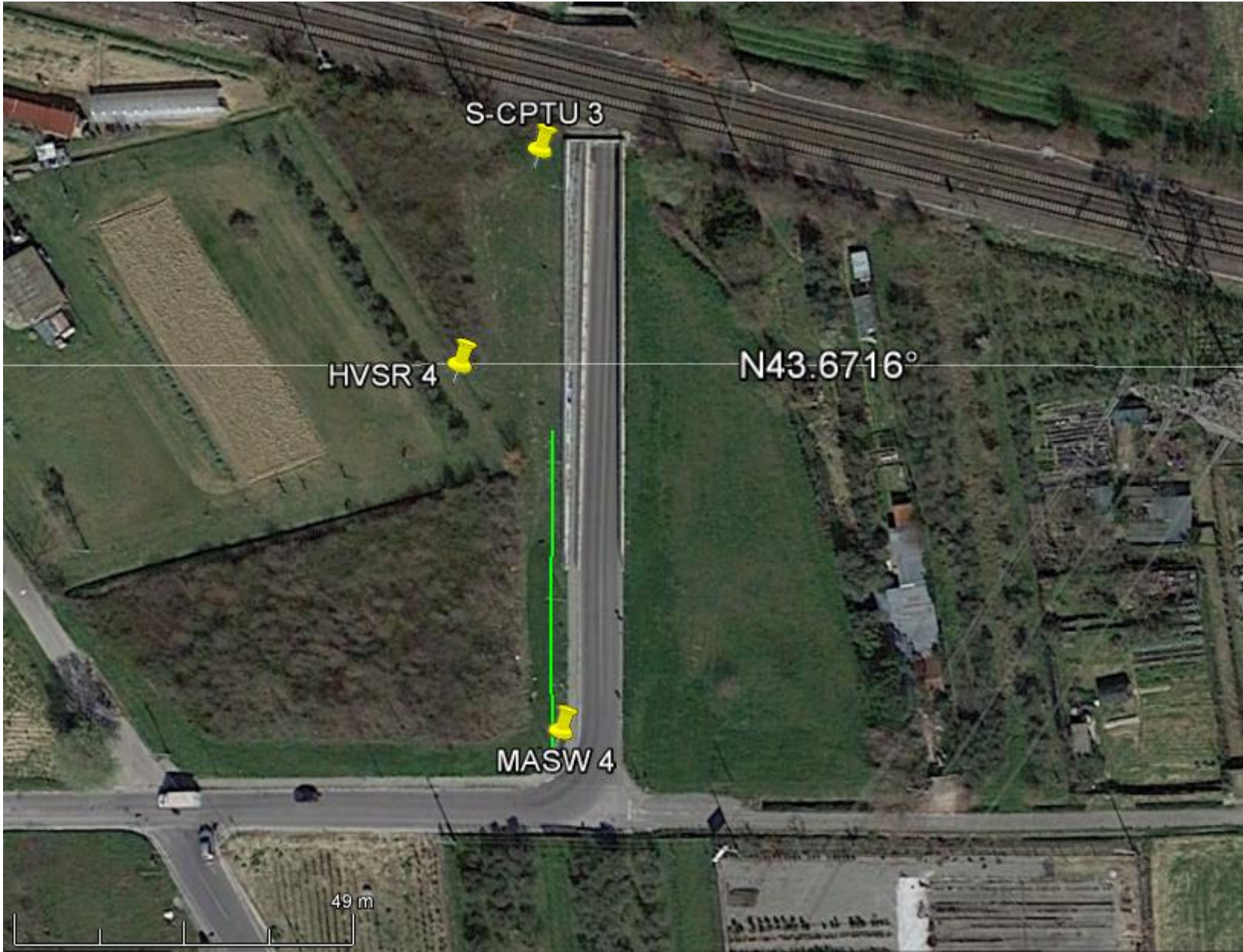
APPROVAZIONE P. Chiara

REV 00 TAVOLA
10

| | | | | | | |
|---|--|---------|----------|------------|------|----------|
|  | <p>OPERE DI RISANAMENTO ACUSTICO – 1° FASE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REDATTO AI SENSI DEL D.M. AMBIENTE 29/11/2000</p> <p>COMUNE DI LIVORNO</p> <p>CODICI INTERVENTO 050008015 – 050008016 – 050008024 - 050008031</p> | | | | | |
| INDAGINI GEOFISICHE | COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO | REV. | FOGLIO |
| | D14A | 02 D 69 | IG | GE0005 001 | A | 58 di 66 |

8. ALLEGATO GRAFICO N.4 – INDAGINI SCPTU

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



OGGETTO:

Area Indagine
S-CPTU3

Progetto definitivo

—
Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



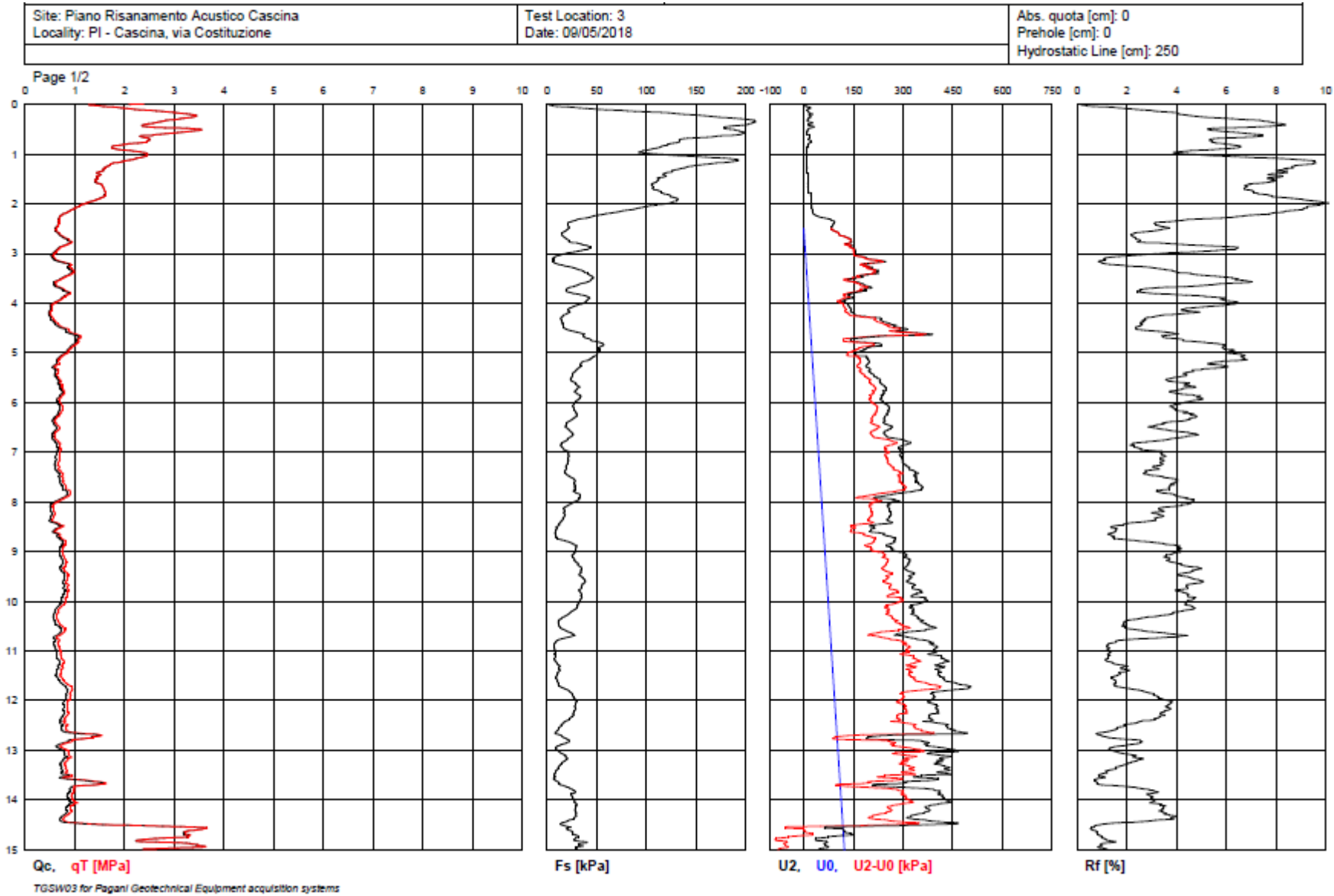
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

GRAFICI DI ACQUISIZIONE PROVA S-CPTU3



OGGETTO:

Area Indagine
S-CPTU3

Progetto definitivo

Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



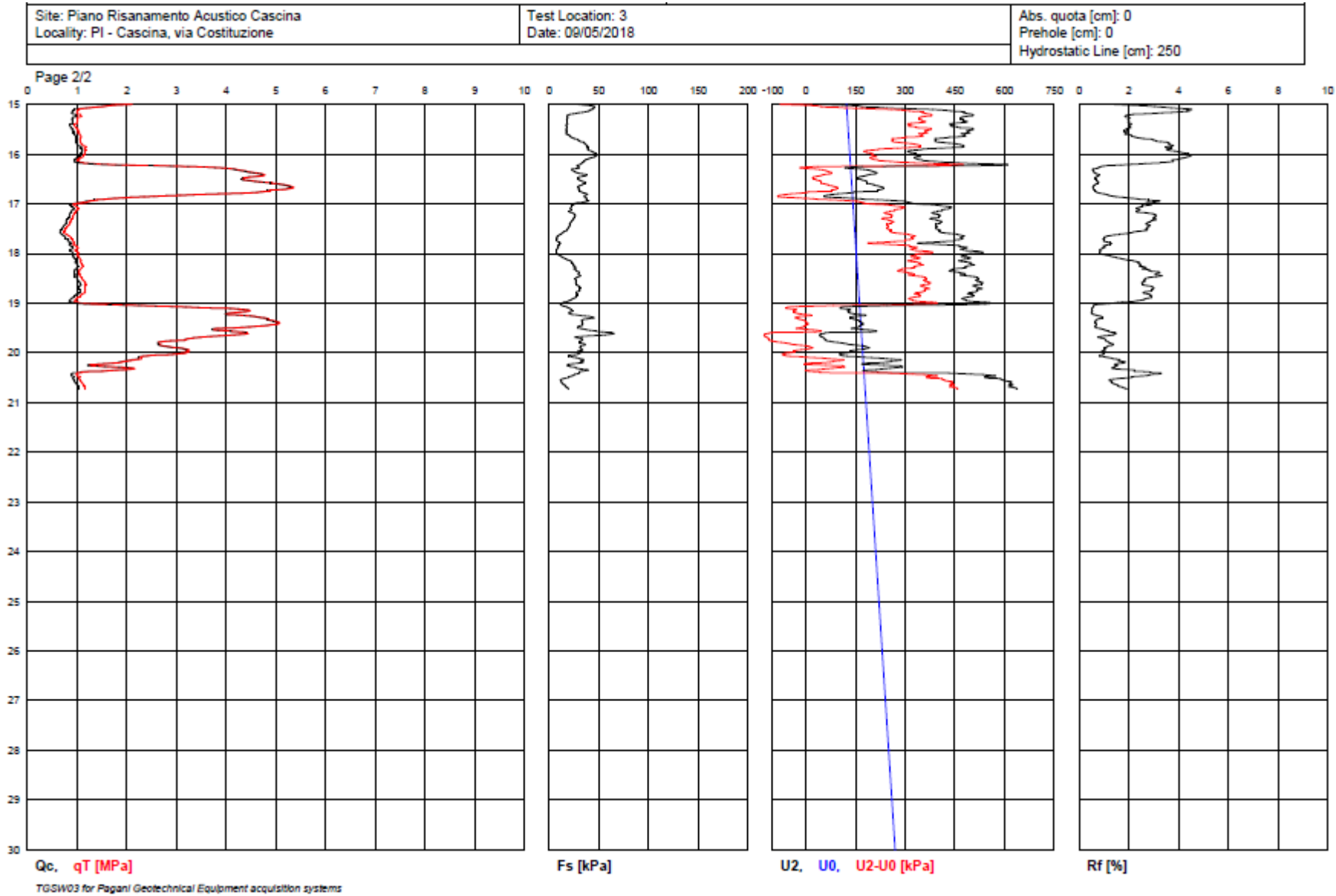
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

GRAFICI DI ACQUISIZIONE PROVA S-CPTU3



OGGETTO:

Area Indagine
S-CPTU3

Progetto definitivo

Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



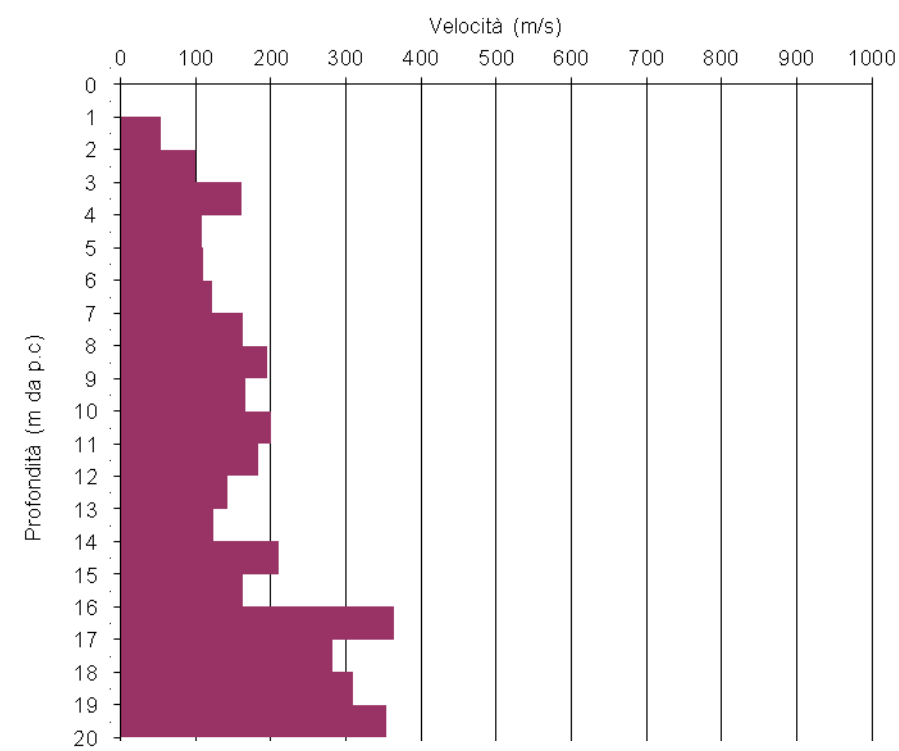
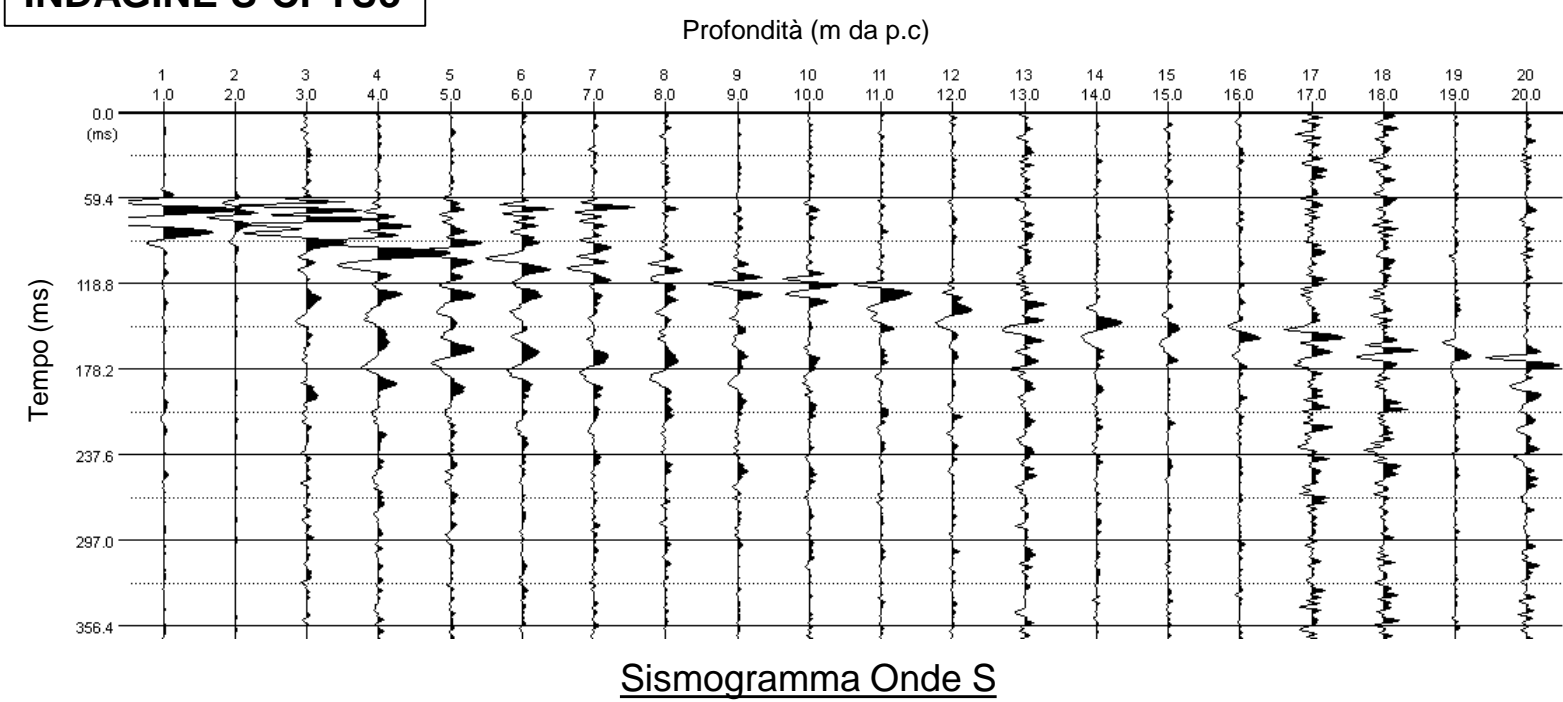
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

INDAGINE S-CPTU3



| Profondità (m) | Tempi oss (ms) | Tempi corr (ms) |
|----------------|----------------|-----------------|
| | S | S |
| 0 | 0 | |
| 1 | 66.22 | 40.37 |
| 2 | 70.11 | 58.78 |
| 3 | 74.98 | 68.80 |
| 4 | 78.88 | 75.01 |
| 5 | 87.00 | 84.20 |
| 6 | 95.43 | 93.27 |
| 7 | 103.22 | 101.48 |
| 8 | 109.06 | 107.65 |
| 9 | 113.93 | 112.76 |
| 10 | 119.77 | 118.77 |
| 11 | 124.64 | 123.78 |
| 12 | 130.00 | 129.24 |
| 13 | 137.00 | 136.32 |
| 14 | 145.00 | 144.38 |
| 15 | 149.70 | 149.14 |
| 16 | 155.80 | 155.29 |
| 17 | 158.50 | 158.04 |
| 18 | 162.00 | 161.58 |
| 19 | 165.20 | 164.81 |
| 20 | 168.00 | 167.65 |

Tabella dei tempi dei primi arrivi
delle onde di taglio osservati e corretti

| Profondità (m) | Profondità (m) | Velocità (m/s) |
|----------------|----------------|----------------|
| da | a | S |
| 0 | | |
| 1 | 2 | 54.31 |
| 2 | 3 | 99.86 |
| 3 | 4 | 160.91 |
| 4 | 5 | 108.84 |
| 5 | 6 | 110.31 |
| 6 | 7 | 121.67 |
| 7 | 8 | 162.20 |
| 8 | 9 | 195.66 |
| 9 | 10 | 166.28 |
| 10 | 11 | 199.72 |
| 11 | 12 | 183.08 |
| 12 | 13 | 141.32 |
| 13 | 14 | 124.09 |
| 14 | 15 | 209.99 |
| 15 | 16 | 162.59 |
| 16 | 17 | 363.99 |
| 17 | 18 | 282.44 |
| 18 | 19 | 309.07 |
| 19 | 20 | 353.16 |

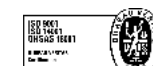
Tabella dei valori di velocità delle onde di taglio
al variare della profondità

TAVOLA

4

OGGETTO:
Area Indagine
S-CPTU3

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

Ubicazione dell'indagine



Fase di acquisizione dati



OGGETTO:
Area Indagine
S-CPTU4

Progetto definitivo
—

Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



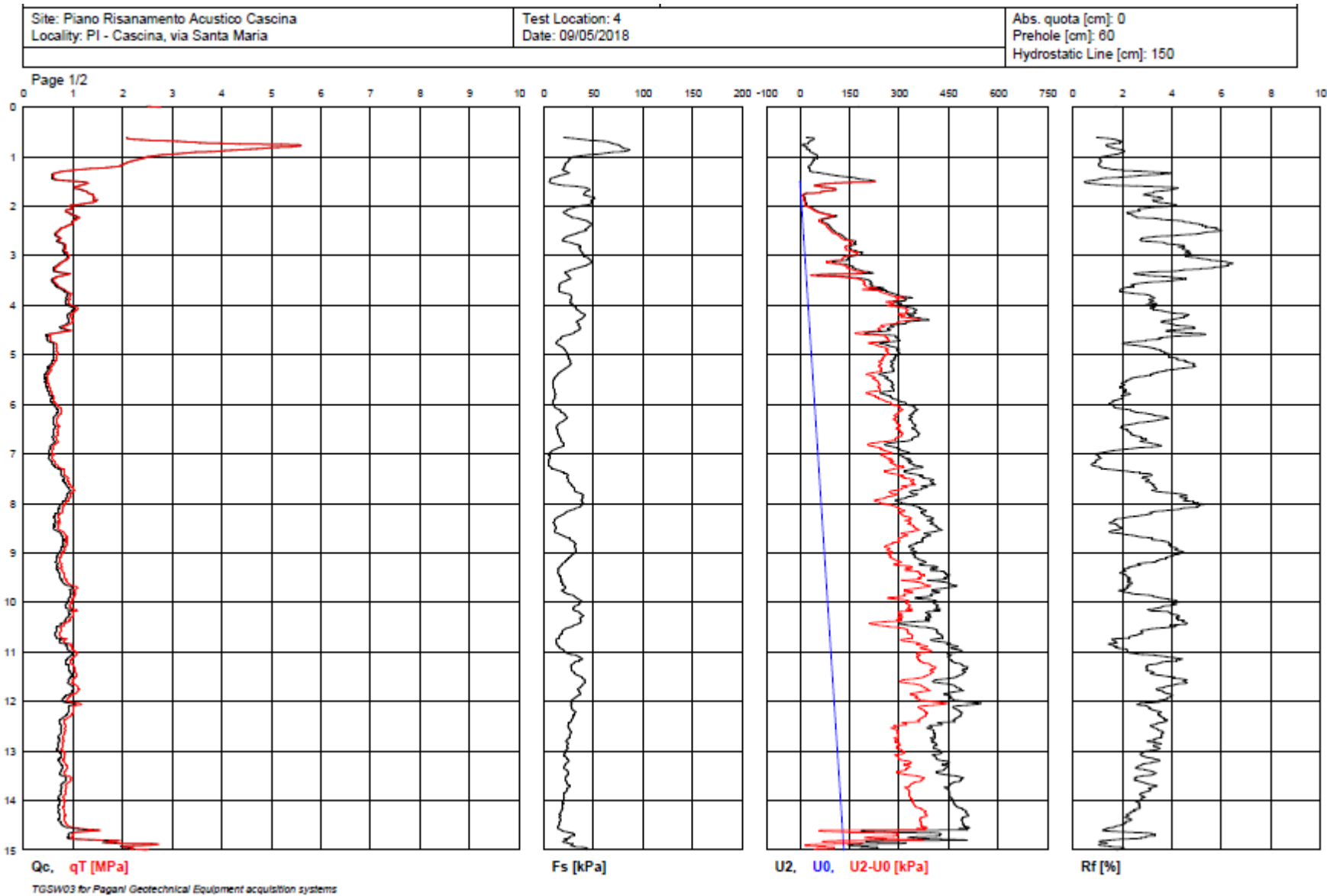
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

GRAFICI DI ACQUISIZIONE PROVA S-CPTU4



OGGETTO:

Area Indagine
S-CPTU4

Progetto definitivo

Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



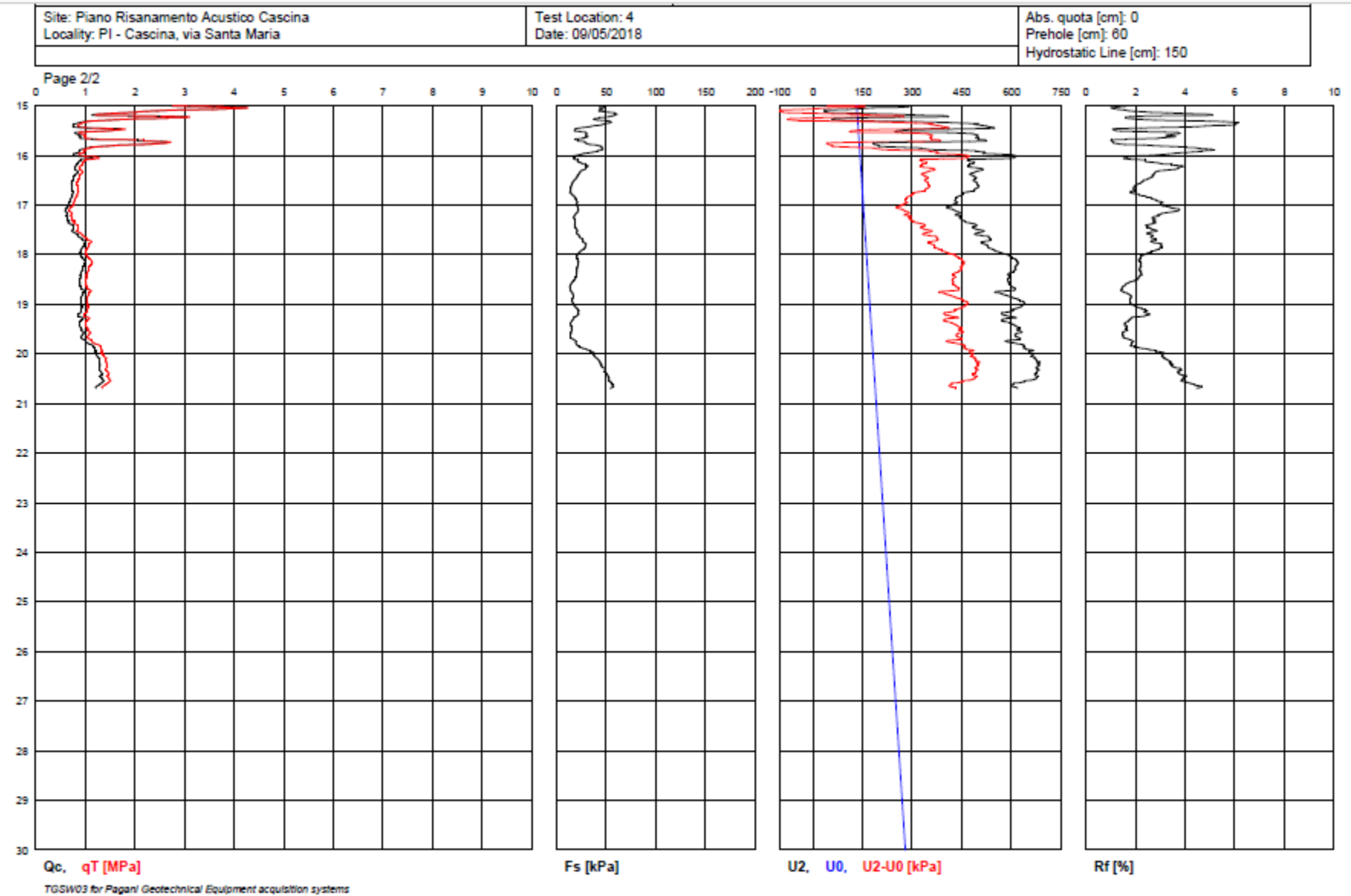
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

GRAFICI DI ACQUISIZIONE PROVA S-CPTU4



OGGETTO:

Area Indagine
S-CPTU4

Progetto definitivo

Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



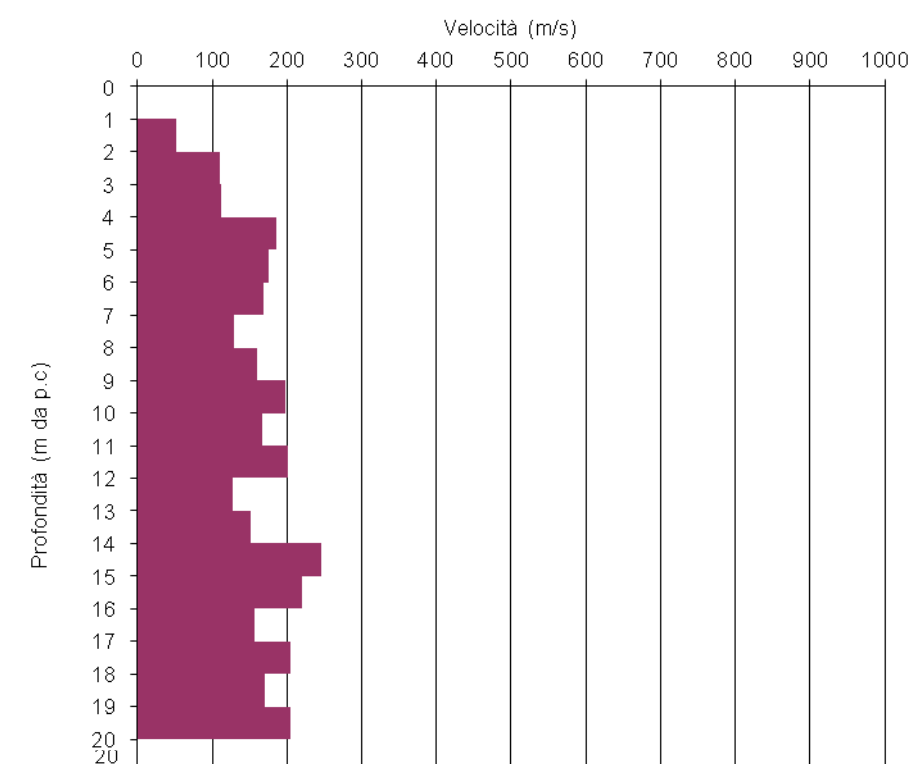
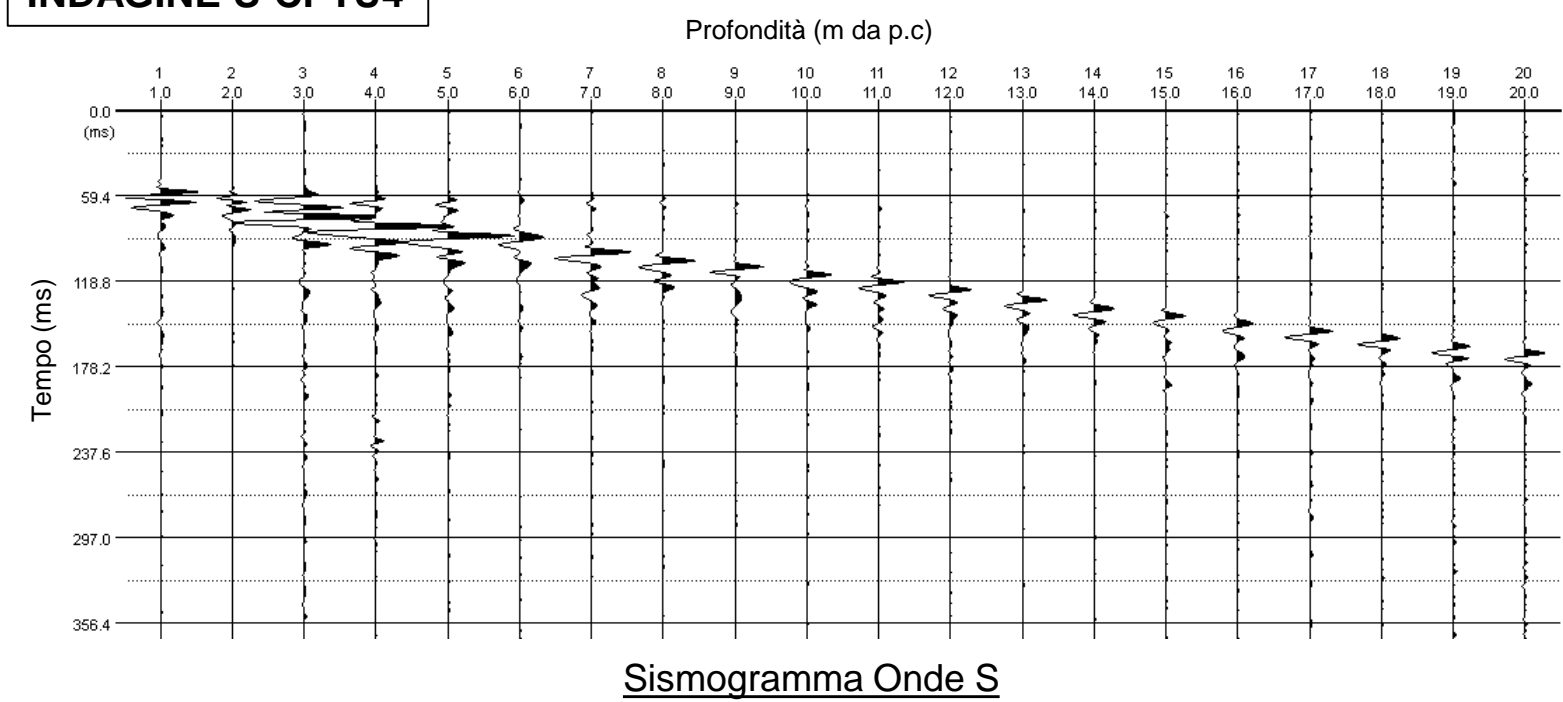
Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

INDAGINE S-CPTU4



| Profondità (m) | Tempi oss (ms) | Tempi corr (ms) |
|----------------|----------------|-----------------|
| | S | S |
| 0 | 0 | |
| 1 | 64.27 | 39.19 |
| 2 | 70.11 | 58.78 |
| 3 | 74.01 | 67.91 |
| 4 | 80.82 | 76.87 |
| 5 | 85.00 | 82.26 |
| 6 | 90.00 | 87.96 |
| 7 | 95.50 | 93.89 |
| 8 | 103.00 | 101.67 |
| 9 | 109.06 | 107.94 |
| 10 | 113.93 | 112.98 |
| 11 | 119.77 | 118.95 |
| 12 | 124.64 | 123.92 |
| 13 | 132.43 | 131.78 |
| 14 | 139.00 | 138.40 |
| 15 | 143.00 | 142.47 |
| 16 | 147.50 | 147.02 |
| 17 | 153.86 | 153.41 |
| 18 | 158.73 | 158.31 |
| 19 | 164.57 | 164.18 |
| 20 | 169.44 | 169.08 |

Tabella dei tempi dei primi arrivi
delle onde di taglio osservati e corretti

| Profondità (m) | Profondità (m) | Velocità (m/s) |
|----------------|----------------|----------------|
| da | a | S |
| 0 | | |
| 1 | 2 | 51.02 |
| 2 | 3 | 109.63 |
| 3 | 4 | 111.61 |
| 4 | 5 | 185.20 |
| 5 | 6 | 175.62 |
| 6 | 7 | 168.48 |
| 7 | 8 | 128.67 |
| 8 | 9 | 159.35 |
| 9 | 10 | 198.47 |
| 10 | 11 | 167.62 |
| 11 | 12 | 201.14 |
| 12 | 13 | 127.26 |
| 13 | 14 | 150.86 |
| 14 | 15 | 246.22 |
| 15 | 16 | 219.80 |
| 16 | 17 | 156.43 |
| 17 | 18 | 203.89 |
| 18 | 19 | 170.34 |
| 19 | 20 | 204.25 |

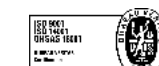
Tabella dei valori di velocità delle onde di taglio
al variare della profondità

TAVOLA

8

OGGETTO:
Area Indagine
S-CPTU4

Progetto definitivo
—
Piano di Risanamento
Acustico di Cascina



Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara