

**IBT Prospezioni Srl**

Località Castiglioni 56      50068 Rufina (FI)

Tel. 055/8397382      Cel. 3485844183

C.F. - Part.IVA 06802820487

**Comune Vicchio (FI)**

**“Indagini geofisiche di superficie mediante sismica passiva a stazione multipla esac-masw, misura di rumore sismico a stazione singola hvsr e tomografia elettrica 2d”**

**Sondaggio a carotaggio continuo**

**VIA GIUSEPPE POGGIALI – VICCHIO (FI)**



**Committente:**

.....  
Comune di Vicchio

**GIUGNO 2021**

# COMUNE DI VICCHIO

---

## RELAZIONE TECNICA

---

**COMMITTENTE:  
COMUNE DI VICCHIO**



---

21- GIUGNO - 2021

INDICE

Pagina 2

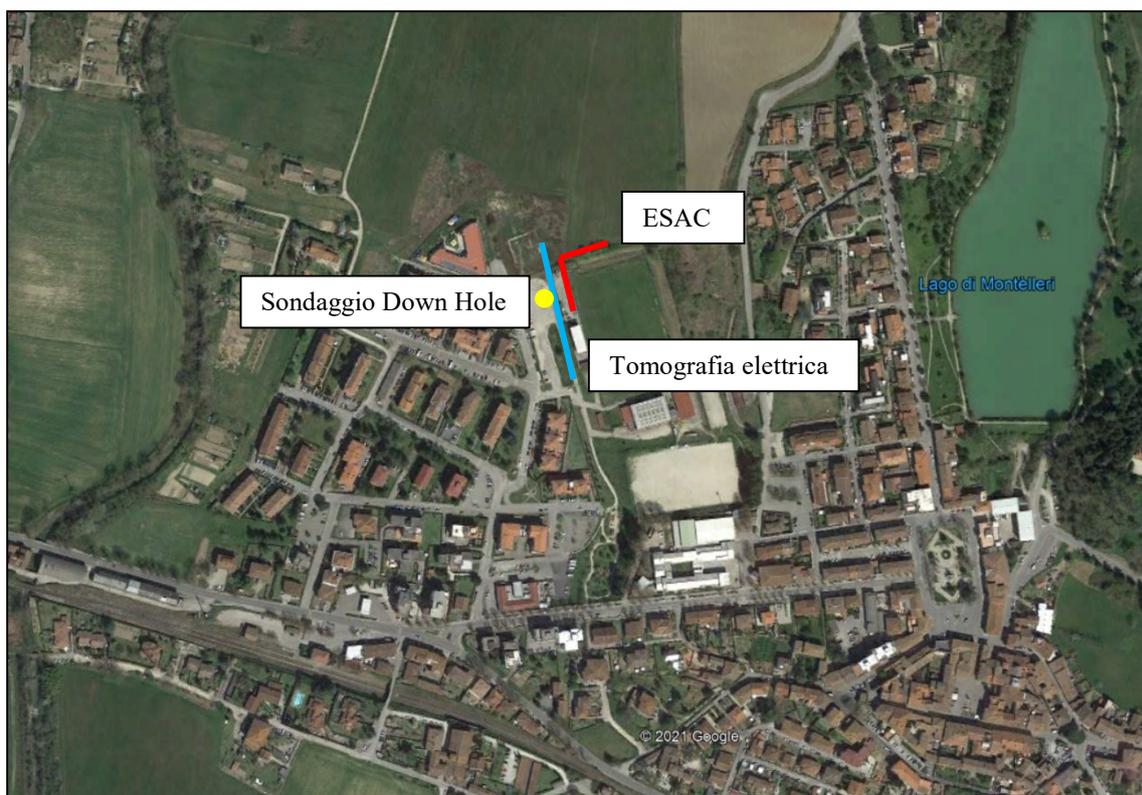
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>1.0 PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI GRAFICI</b>	<b>5</b>
<b><i>INDAGINE ESAC-MASW</i></b>	<b>5</b>
<b>2.0 METODOLOGIA D'INDAGINE E TRUMENTAZIONE IMPIEGATA</b>	<b>5</b>
<b>3.0 INDAGINE DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE MULTIPLA (ESAC)</b>	<b>6</b>
<b>4.0 SCHEMA OPERATIVO</b>	<b>8</b>
<b>5.0 ANALISI DEI RISULTATI DELL'INDAGINE ESAC-MASW</b>	<b>10</b>
<b><i>INDAGINE HVSR</i></b>	<b>13</b>
<b>6.0 CENNI TEORICI</b>	<b>13</b>
<b>7.0 METODOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA</b>	<b>15</b>
<b>8.0 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE</b>	<b>16</b>
<b>9.0 REPORT ED ANALISI DEI RISULTATI DELLE INDAGINI HVSR</b>	<b>18</b>
<b><i>TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D</i></b>	<b>20</b>
<b>10.0 SCHEMA OPERATIVO</b>	<b>20</b>
<b>11.0 METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE IMPIEGATA</b>	<b>20</b>
<b>12.0 ARRAY DI TIPO "SCHLUMBERGER"</b>	<b>22</b>
<b>13.0 "PROCESSING" DEI DATI</b>	<b>23</b>
<b>14.0 ANALISI DEI RISULTATI TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D</b>	<b>25</b>
<b>ALLEGATI</b>	<b>33</b>

## **INTRODUZIONE**

Su incarico del Comune di Vicchio è stata realizzata una campagna di indagini geognostiche dirette e indirette di tipo geofisico costituita da.

- Sondaggio a carotaggio continuo attrezzato per misura Down Hole della lunghezza di 35 m
- Indagine Down Hole
- Indagine Esac
- Tomografia elettrica
- Misura di rumore HVSR

Il presente lavoro riguarda i risultati dell'indagine svolta. Le indagini in questione sono state in Via Giuseppe Poggiali – Comune di Vicchio (FI) (**Fig.1**).



**Figura 1:** Ubicazione indagini – Via Giuseppe Poggiali – Vicchio (FI)

L'indagine **ESAC** è stata eseguita al fine di identificare i principali contrasti d'impedenza sismica potenzialmente responsabili di fenomeni di risonanza, le geometrie sepolte dei diversi corpi geologici presenti nell'area di studio e la loro caratterizzazione dinamica in termini di valori di velocità di propagazione delle onde di taglio (VS). Dopo una descrizione delle tecniche di analisi utilizzate, verranno descritti i risultati ottenuti dalle indagini di sismica passiva a stazione multipla (o array sismici) e dalle indagini di sismica attiva di tipo MASW, nonché i risultati

ottenuti in termini di profili di VS dalle inversioni congiunte delle curve di dispersione ottenute da questi due tipi di indagine.

L'indagine mediante **tomografia elettrica 2D** è tesa a verificare le caratteristiche litologiche dei materiali presenti, in funzione dell'andamento in profondità dei valori di resistività, ed individuare eventuali aree eterogenee.

Di seguito viene descritto, lo schema operativo e le operazioni di campagna, le strumentazioni e le modalità di analisi dei dati, congiuntamente all'interpretazione scaturita dai dati elaborati.

## **1.0 PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI GRAFICI**

La relazione tecnica è corredata dalle seguenti documentazioni che ne costituiscono parte integrante:

- **Tavola 01** con inquadramento corografico generale in scala 1.5.000 e coordinate WGS84 delle indagini effettuate.
- **Tavola 02** con inquadramento di dettaglio in scala 1:1.000 su foto aerea.
- **Tavola 03** con i risultati ottenuti dall'indagine EASC-MASW.
- **Tavola 04** con i risultati ottenuti dall'interpretazione della tomografia elettrica 2D in due diverse scale.

## **INDAGINE ESAC-MASW**

### **2.0 METODOLOGIA D'INDAGINE E TRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da sismometri (geofoni o accelerometri), amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali.

Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo Geometrics GEODE a 24 ch, strumentazione che presenta le seguenti caratteristiche: A/D Conversion: 24 bit; Dynamic Range: 144 dB; Distortion: 0.0005% 2 ms, 1.75 to 208 Hz; Bandwidth: 1.75 Hz to 20 kHz; Common Mode

Rejection: > -100 dB at  $\leq 100$  Hz, 36 dB; Crosstalk: -125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms; Noise Floor: 0.2 $\mu$ V, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz; Stacking Trigger Accuracy: 1/32 of sample interval; Maximum Input Signal: 2.8 VPP; Input Impedance: 20 kOhm, 0.02  $\mu$ f; Preamplifier Gains; Anti-alias Filters: -3 dB at 83% of Nyquist frequency; Sample Interval: 0.02 to 16.0 ms; Record Length: 16,000 samples; Acquisition and Display Filters: *LowCut*, *Notch*, *HighCut*; Data Formats: SEG-2 standard with SGOS.

Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati geofoni “PASI” verticali, del tipo elettromagnetico a bobina mobile e nel caso dei geofoni orizzontali dotati di bolla livellante, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz, 70 % di smorzamento. Il cavo di connessione tra geofoni e sismografo è uno standard NK-27-21C.

### **3.0 INDAGINE DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE MULTIPLA (ESAC)**

Il termine array sismico (o antenna sismica) si riferisce all’acquisizione del campo di vibrazioni ambientali attraverso configurazioni a stazione multipla, ovvero con l’utilizzo di più sensori sincronizzati tra di loro. Per questo studio è stata utilizzata una configurazione costituita da 24 geofoni verticali con frequenza propria pari a 4.5 Hz, disposti regolarmente con spaziatura di 6 e 3 m seguendo una geometria ad L. La lunghezza del ramo minore è stata 36 m, mentre quella del ramo maggiore 55 m. La durata di ciascuna acquisizione è stata di 33 minuti con frequenza di campionamento di 250 Hz. Con lo scopo di ricavare la curva di dispersione delle velocità delle onde di Rayleigh ( $V_R$ ), le acquisizioni sono state analizzate tramite la tecnica ESAC.

Il metodo ESAC, ovvero “Extended Spectral AutoCorrelation method” (Otori *et al.*, 2002; Okada, 2003), è frutto di una idea sviluppata inizialmente da Aki (1957). Secondo Aki (1957), il campo d’onda delle vibrazioni ambientali può essere rappresentato come la combinazione lineare di onde piane di diverse frequenze e con fase ed ampiezza casuale che si muovono sul piano orizzontale e che provengono da direzioni differenti. Aki (1957) dimostrò che, sebbene ogni serie temporale dedotta dalla registrazione di questo campo d’onde in un punto abbia un carattere stocastico, due registrazioni effettuate in punti diversi mostrino delle “somiglianze” (in senso statistico) e che da queste sia possibile dedurre informazioni sulle velocità di fase delle diverse onde misurate nelle due posizioni. Considerando il *j*-mo e l’*n*-mo sensore di un array, queste

“somiglianze” sono rivelate dall’andamento del coefficiente di correlazione spaziale (o coefficiente di autocorrelazione)  $\rho_{jn}(\omega)$  definito dalla relazione:

$$\rho_{jn}(\omega) = \frac{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \text{Re}(mS_{jn}(\omega))}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M mS_{jj}(\omega) \sum_{m=1}^M mS_{nn}(\omega)}}, \quad (1)$$

dove  $\omega$  è la frequenza,  $mS_{jn}$  è il cross-spettro per l’ $m$ -mo segmento temporale della registrazione tra il  $j$ -mo e l’  $n$ -mo sensore e  $\text{Re}$  indica la sua parte reale;  $mS_{jj}$  e  $mS_{nn}$  sono gli spettri di potenza (o autospettri) dell’ $m$ -mo segmento temporale ai sensori  $j$ -mo e  $n$ -mo rispettivamente.  $M$  è il numero totale di segmenti temporali utilizzati.

Aki (1957) dimostrò che sotto condizioni molto generali (in particolare che le onde siano tutte fra loro indipendenti e che le direzioni di provenienza siano distribuite con probabilità uniforme attorno ai due sensori) il coefficiente di autocorrelazione relativo alla componente verticale delle vibrazioni ambientali misurate in due posizioni dipende sola dalla loro distanza relativa  $r_{jn}$  e può essere espressa nella forma:

$$\rho_{jn}(r_{jn}, \omega_0) = J_0 \left[ \frac{\omega_0}{c(\omega_0)} r_{jn} \right], \quad (2)$$

dove  $c(\omega_0)$  è la velocità di fase delle onde di Rayleigh alla frequenza  $\omega_0$  e  $J_0$  rappresenta la funzione di Bessel di ordine zero. Dato che  $J_0$  ha forma nota, la relazione (2) può essere utilizzata per risalire dal coefficiente di autocorrelazione  $\rho_{jn}$  alle velocità di fase  $c$ , una volta nota la distanza  $r$  fra i sensori.

È opportuno far notare che la relazione (1) mette in evidenza che il coefficiente di autocorrelazione, in quanto espressione del cosiddetto cross-spettro (al numeratore della (1)) è proporzionale alle differenze di fase fra i segnali registrati nelle due posizioni. Quindi, l’informazione di base utilizzata per la stima della velocità di fase è (indirettamente tramite il coefficiente di autocorrelazione  $\rho_{jn}$ ) la misura dello sfasamento medio osservato fra le registrazioni nelle due posizioni  $j$ -ma e  $n$ -ma. La risoluzione del metodo in termini di precisione

nella determinazione della velocità  $c(\omega_0)$ , sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la sua capacità di risolvere le differenze di fase fra le registrazioni. Generalmente, per garantire una buona accuratezza delle misure per un certo intervallo di velocità, è necessario, a parità di modalità di campionamento, scegliere una opportuna distanza fra i sensori. Maggiore è la velocità attesa, maggiore sarà la distanza tra i sensori necessaria a determinarla.

Nel metodo ESAC, i sensori vengono distribuiti sul terreno a varie distanze gli uni dagli altri in configurazioni più o meno ordinate (p.es., Ogori *et al.*, 2002). Per una data frequenza, vengono calcolate le diverse funzioni di autocorrelazione per tutte le distanze relative alle diverse coppie di sensori. La velocità di fase, in questo caso, viene determinata utilizzando la (2) in modo da riprodurre al meglio l'andamento osservato del coefficiente di correlazione in funzione della distanza  $r$ . Il metodo ESAC richiede quindi la misura sincronizzata di un numero relativamente elevato di sensori (16 o più) che però devono essere dislocati sul terreno una sola volta.

L'esito finale di questo tipo di misura è una curva che rappresenta l'andamento delle velocità di fase  $c$  in funzione della frequenza di vibrazione  $\omega_0$ . Se si assume che il campo d'onde delle vibrazioni ambientali sia dominato dalle onde superficiali, la curva  $c(\omega_0)$  dedotta da misure della componente verticale del moto del suolo corrisponde alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh relative al modo fondamentale.

#### 4.0 SCHEMA OPERATIVO

Dopo una prima analisi dei test eseguiti in loco ed in considerazione dei risultati prefissati e degli spazi a disposizione è stata scelta una distanza intergeofonica di **5 m** per il primo ramo (55 m, da G1 a G 12) dove è stata eseguita anche un'indagine MASW e di **4 m** per il secondo ramo (48 m, da G 12 a G 24).

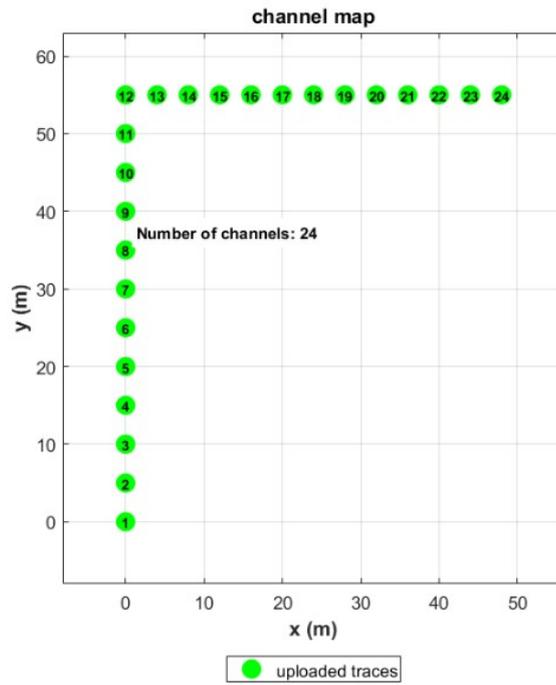


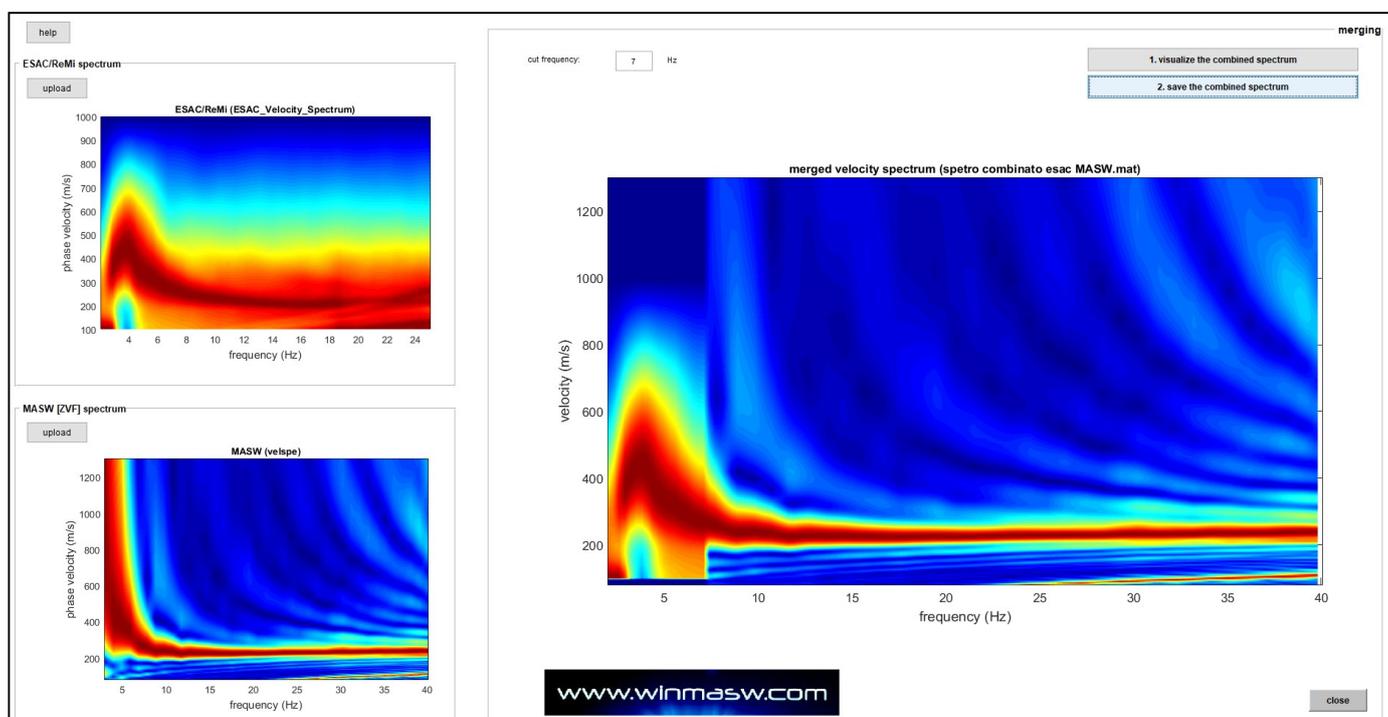
Figura 2: schema di acquisizione indagine ESAC.



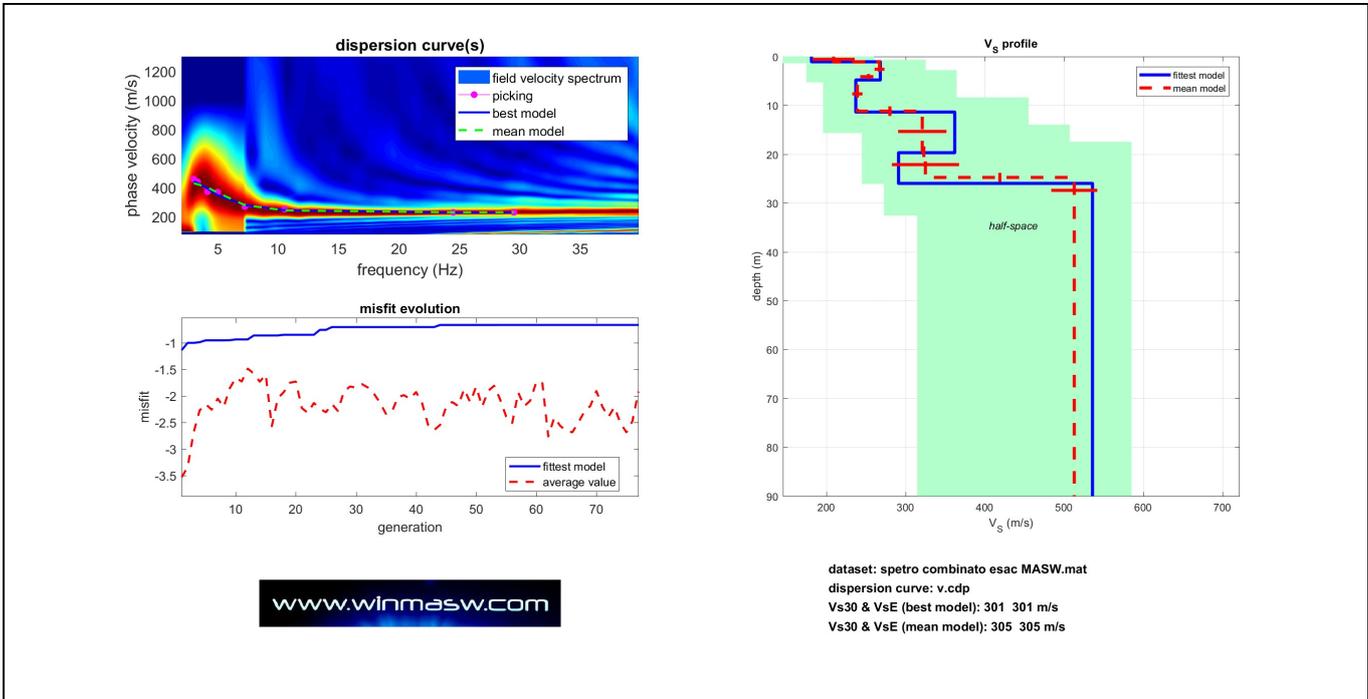
## 5.0 ANALISI DEI RISULTATI DELL'INDAGINE ESAC-MASW

Per ottenere informazioni sul profilo di  $V_s$  per il sito analizzato è stata presa in considerazione la curva di dispersione delle onde di Rayleigh ottenuta dagli array sismici integrata con quella ottenuta dall'indagine MASW realizzata nello stesso sito. La curva di dispersione risultante è stata poi invertita.

L'indagine MASW, è stata eseguita sullo stendimento lineare composto da 12 geofoni appartenenti al ramo lungo dell'array sismico (lunghezza complessiva 55 m). La Figura sotto mostra i due spettri ottenuti dall'analisi Esac e dall'analisi MASW ed il merge tra i due a 7 Hz:



Di seguito vengono riportati i risultati dell'elaborazione combinata:



**#1: data uploading & processing**

dataset: spetro combinato esac MASW.mat  
 sampling: 0.125ms [8000Hz] - 16000 samples  
 minimum offset: 2.5 m  
 geophone spacing: 5 m

normalized traces

resampling: 0.5, data selection: activate, filter: filter, AutoSpectra, other tools & setting: 1.9998 time to visualize (s)

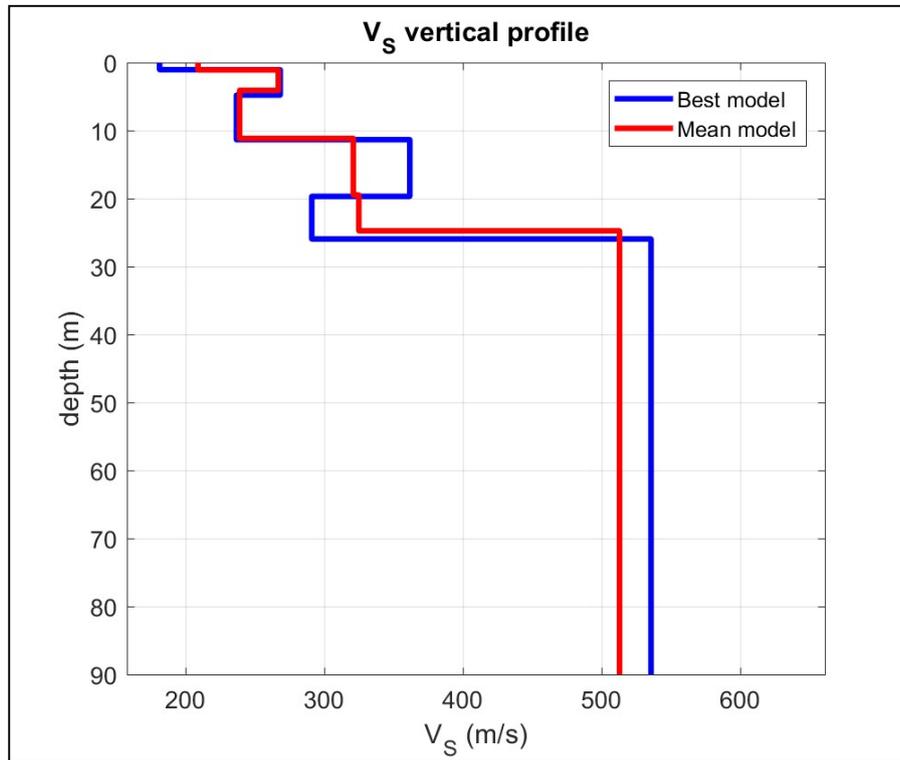
**#2: velocity spectrum, modelling & picking (MASW, MFA, ESAC & ReMi analyses)**

MASW compute velocity spectrum: phase velocity, group velocity, 250, draw velocity, linear-linear

velocity spectrum (spetro combinato esac MASW)  
 Vs30 & VsE: 329 329

modelling: general setting, Rayleigh, phase vel, HV (body waves), HV (surface waves)

Vs	Qs	Poisson	thickness
200	10	0.33	1
250	16	0.35	3
280	19	0.35	8
350	24	0.35	8
390	28	0.35	5
450	31	0.35	0
0	38	0.35	0
0	50	0.3	0
0	100	0.25	0
0	150	0.2	0
0	200	0.15	0
0	300	0.15	0



#### Best Model

layer	Vs (m/s)	thickness (m)	depth (m)
1	181	1.0563	1.0563
2	268	3.7282	4.7844
3	237	6.5621	11.3465
4	362	8.3358	19.6823
5	291	6.2784	25.9606
6	536	0	0

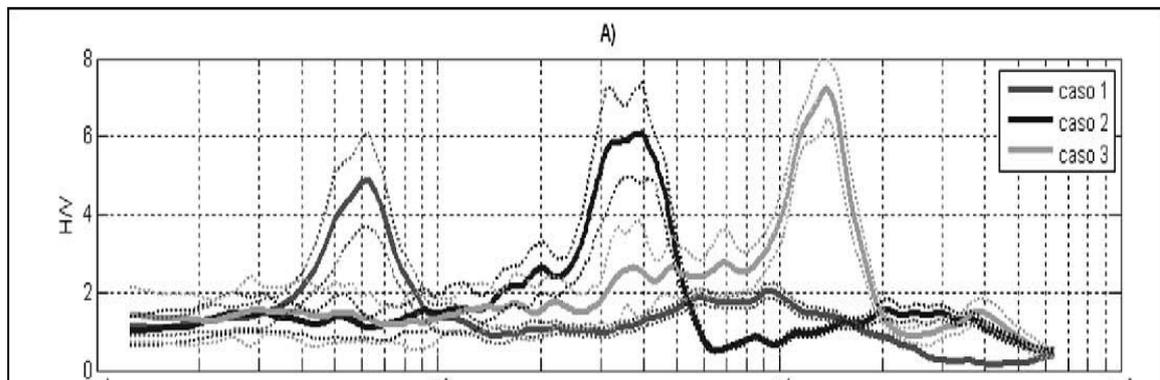
## **INDAGINE HVSR**

### **6.0 CENNI TEORICI**

La prova H/V o HVSR acronimo per *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* è una tecnica di indagine sismica passiva non invasiva, applicata e resa nota da Nakamura (1989).

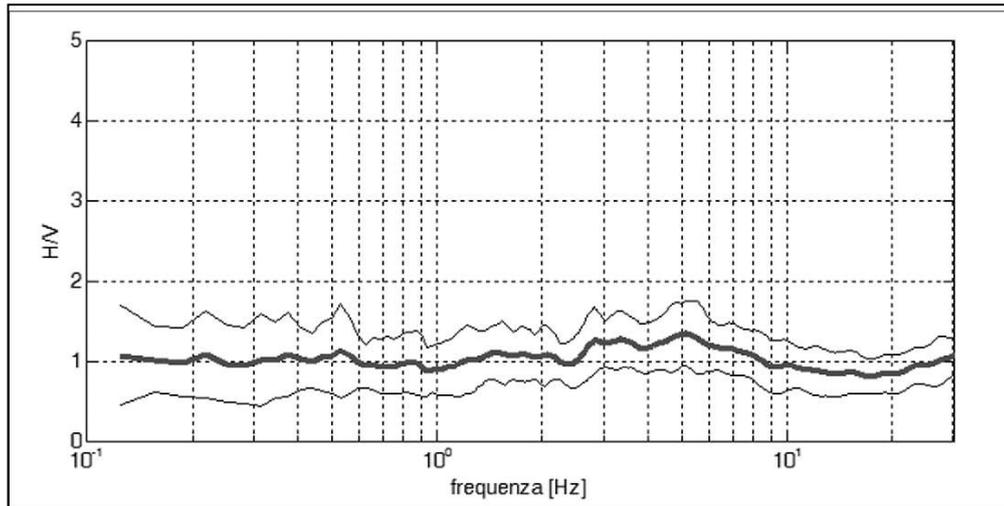
Si tratta di una valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e le componenti verticali (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno, misurati in un punto con apposito sismometro a tre componenti.

L'esito di questa prova è una curva sperimentale che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione (**Fig.3**). Le frequenze alla quali la curva H/V mostra dei massimi sono legate alle frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura (Albarello et al., 2010).



**Figura 3:** Esempio di bedrock sismico a diverse profondità che genera risonanze a diverse frequenze. Caso 1: bedrock a 300 m di profondità. Caso 2: bedrock a 20 m di profondità. Caso 3: bedrock a 4 m di profondità.

Quando la misura è effettuata su un basamento sismico affiorante (e quindi dove non sono attesi fenomeni di risonanza sismica) la curva non mostra massimi significativi e si assesta intorno ad ampiezza 1 (**Fig.4**).



**Figura 4:** Curva H/V di un sito su roccia non fratturata e morfologicamente piatta. Si noti l'assenza di amplificazione per risonanza in tutto il dominio delle frequenze.

Pertanto, questa prova ha lo scopo di mettere in luce la presenza di fenomeni di risonanza sismica e consentire una stima delle frequenze alle quali il moto del terreno può risultare amplificato a causa di questi fenomeni. Contestualmente fornisce indicazioni di tipo qualitativo sull'entità delle risonanze attese. In generale, la stima della frequenza di risonanza  $f$  sarà tanto più precisa quanto maggiore è il contrasto di impedenza sismica responsabile del fenomeno, ovvero dove sono maggiori gli effetti potenzialmente pericolosi.

Inoltre, se i risultati della prova sono invertiti mediante opportune procedure numeriche, soprattutto in associazione ad altre indicazioni sperimentali (per esempio le curva di dispersione delle onde superficiali, prove Down Hole, sismica a rifrazione) possono fornire vincoli importanti al profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo. In casi semplici (coperture soffici al disopra di un basamento sismico rigido), è possibile stabilire una relazione fra lo spessore dello strato soffice, la velocità media delle onde S all'interno di quest'ultimo ( $V_s$ ) e la frequenza di risonanza fondamentale  $f$  dello strato, nella forma:

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

## 7.0 METODOLOGIA D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Dal punto di vista pratico, nelle prove di sismica passiva si tratta di misurare vibrazioni del terreno caratterizzate da ampiezze molto piccole. Questo implica che la prova vada effettuata con cura, soprattutto per quanto riguarda l'accoppiamento dello strumento di misura con il terreno e la riduzione delle possibili fonti di disturbo nelle immediate vicinanze dei sensori (mantenersi ad un' adeguata distanza, posare lo strumento al riparo da spostamenti d'aria, evitare il contatto con elementi mobili ecc.). Lo strumento di misura va dunque posto a diretto contatto col terreno e reso solidale con questo, possibilmente senza interfacce intermedie.

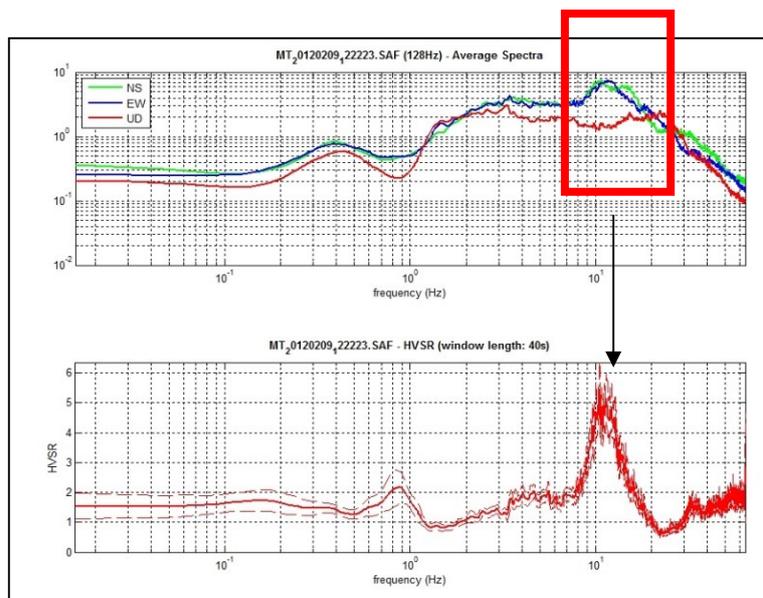
Quando questo non fosse possibile è necessario tener conto dei possibili effetti indotti dai terreni artificiali rigidi in questo tipo di misure. Bisogna inoltre evitare possibili movimenti dello strumento nel corso della misura (basculamenti, assestamenti del suolo ecc.) e curare la messa in bolla dei sensori, controllando al termine della misura che questa sia stata conservata. Infine, le eventuali parti mobili della strumentazione devono essere poste al riparo da spostamenti d'aria, va evitato il contatto con elementi mobili (fili d'erba, ecc.).

Poiché una misura di interesse ingegneristico ricade nell'intervallo 0.1-20 Hz, segue che un campionamento adeguato deve durare 15-40 minuti, in modo da poter analizzare il segnale su finestre di almeno 30 s di lunghezza e da avere almeno 20-30 finestre su cui effettuare una media, considerando che qualcuna potrà essere rimossa per la presenza di disturbi (transienti) che alterano lo spettro medio. Nel nostro caso la durata delle misure è stata pari a 1200 secondi (20 minuti). La Frequenza di campionamento adeguata per questo tipo di prove non deve essere inferiore a 50 Hz, in modo da permettere una ricostruzione spettrale sino ad almeno 20 Hz; Nel nostro caso è stata utilizzata una Frequenza di campionamento pari a 300 Hz ed in fase di elaborazione i dati sono stati ricampionati a 128 Hz.

La strumentazione utilizzata nel presente lavoro risulta essere:  
SISMOMETRO SR04S3 "GeoBox" della Sara electronic instruments, dotato di 3 velocimetri GS11D 4.5 Hz Geospace, Technology – Huston – Texas –USA con frequenza di ca. 4.5 Hz.

## 8.0 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE

Prima di qualsiasi interpretazione delle curve H/V sono indispensabili due accorgimenti. Il primo è che la curva H/V deve essere statisticamente significativa, ossia essere caratterizzata da una deviazione in ampiezza e in frequenza ridotta. Quando questa caratteristica non sia presente sin dall'inizio, essa va ricercata tramite una pulizia del tracciato; il secondo che la curva H/V non va mai osservata da sola ma sempre congiuntamente agli spettri delle singole componenti da cui essa deriva. Questo permette di discernere agevolmente i picchi di natura stratigrafica da quelli generati da fonti di disturbo di natura antropica (motori elettrici, ecc.). In condizioni normali le componenti spettrali NS, EW e Z (verticale) hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza si genera spesso un picco H/V legato ad un minimo locale della componente spettrale verticale che determina una forma "a occhio" o "a ogiva" come quella indicata dal rettangolo in **Fig. 5**; Questa forma è indicativa di risonanze stratigrafiche.



**Figura 5:** Forma ad "Ogiva" tipica di una risonanza.

Nel 2004 il progetto SESAME ha stabilito una serie di criteri per la valutazione della significatività dei picchi H/V. Si tratta essenzialmente di criteri di tipo statistico che hanno lo scopo di segnalare situazioni poco chiare per le quali sono necessarie ulteriori indagini (ripetizione della misura, variazione delle condizioni di accoppiamento con il terreno, ecc.).

La prima parte di questi criteri è dedicata alla valutazione dell'attendibilità statistica della curva H/V. In pratica, individuata la frequenza del picco di risonanza, i criteri aiutano a verificare

se la registrazione è stata effettuata per un periodo abbastanza lungo e analizzata per un numero sufficiente di intervalli di tempo adeguati.

La seconda parte è dedicata alla valutazione della chiarezza del picco H/V. In pratica viene analizzata la morfologia del picco e si valuta semplicemente se il picco ha una forma geometricamente ben definita. Naturalmente, i criteri SESAME (2004) risultano non soddisfatti nei siti che non presentano amplificazione e considerano significativi solo picchi con ampiezza H/V superiore a 2. Questo criterio ha carattere puramente empirico.

Sulla base delle frequenze di risonanza determinate sperimentalmente sarà poi possibile fornire una stima di massima degli spessori delle coperture soffici responsabili dei possibili fenomeni di risonanza osservati. Un abaco utile in questo senso, (Albarello et al., 2010), è fornito in **Tab.1**.

$F_0$ (Hz)	h (m)
<1	>100
1 -2	50-100
2 -3	30-50
3 -5	20-30
5 -8	10-20
8 -20	5-10
>20	<5

**Tab 1:** Abaco per la stima dello spessore delle coperture (H) a partire dai valori delle frequenze di risonanza determinate dalle misure HVSR.

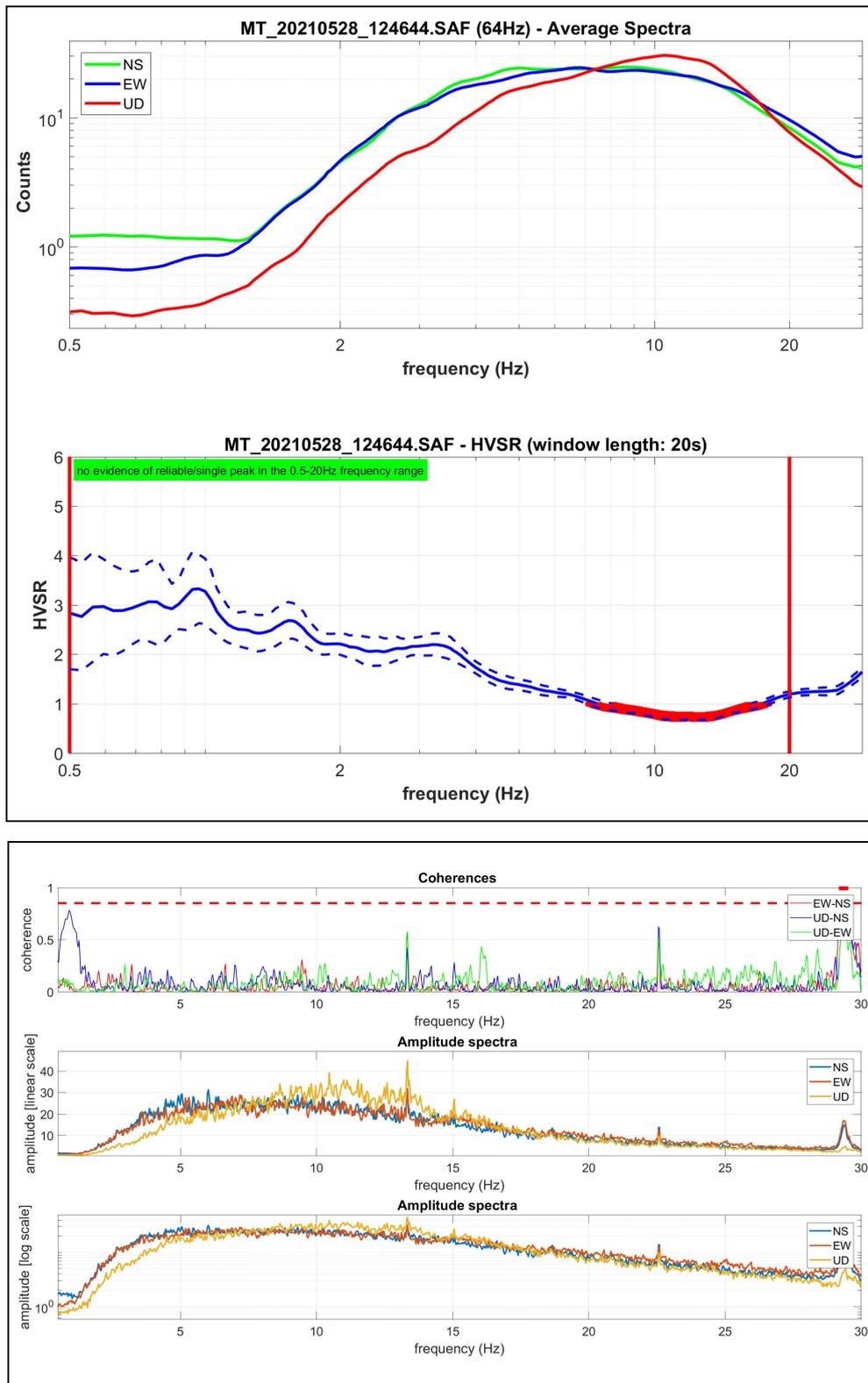
## 9.0 REPORT ED ANALISI DEI RISULTATI DELLE INDAGINI HVSR

Viene qui riportata la documentazione fotografica ed i risultati delle elaborazioni delle misure eseguite secondo la tecnica H/V mediante il software WINMASW 2018 Academy.

I dati registrati sono stati ripuliti dai transienti attribuibili a disturbi locali e puntuali. Sui dati ripuliti è stata quindi eseguita l'elaborazione.



Fase di acquisizione misura di rumore sismico HVSR.



La misura di rumore a stazione singola elaborata con tecnica HVSR non ha evidenziato la presenza di picchi stratigrafici significativi.

## TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D

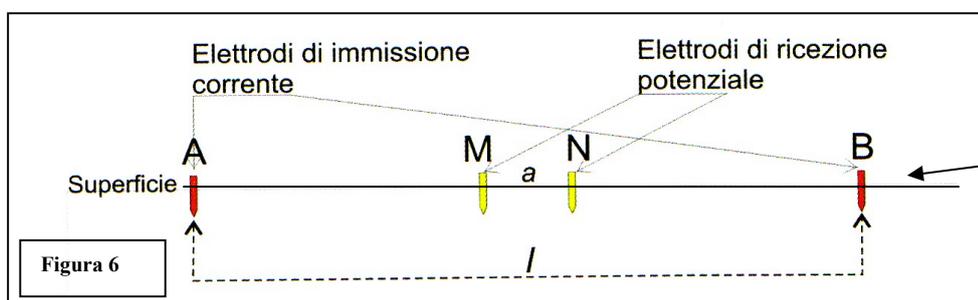
### 10.0 SCHEMA OPERATIVO

In considerazione dei risultati prefissati e degli spazi a disposizione è stata scelta una distanza inter-elettroica di **4 m** per la **sezione A-A'**, acquisendo complessivamente **124 ml** di rilievo con 32 elettrodi.

### 11.0 METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

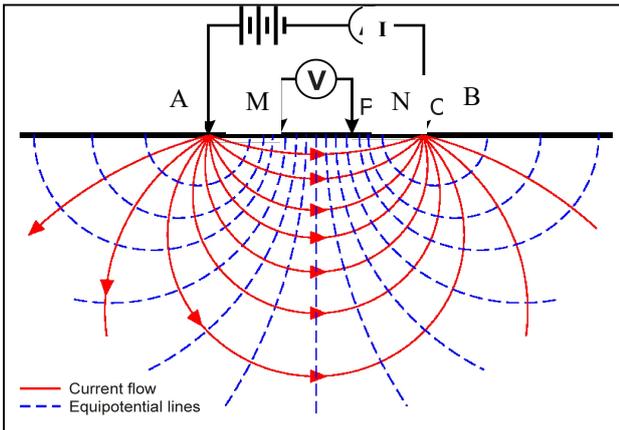
Il metodo geoelettrico nelle indagini geofisiche sfrutta le proprietà di rocce, sedimenti (terre) di condurre in modo diverso la corrente elettrica. Il parametro che viene misurato è la resistività elettrica che dipende dalla porosità, dalla permeabilità e dal contenuto ionico dei fluidi di ritenzione.

La tomografia elettrica rappresenta un'evoluzione recente dei sondaggi elettrici verticali (S.E.V.), ed è funzionale grazie ai notevoli progressi dell'elettronica digitale e della modellistica geofisica. A seconda della distanza reciproca tra gli elettrodi che immettono la corrente e gli altri che la misurano, si possono investigare profondità sempre maggiori di terreno. Vengono usati *array* diversi a seconda della problematica da indagare, in generale i più utilizzati sono: *Schlumberger*, *Wenner*, *dipolo-dipolo*. L'esecuzione di un profilo tomografico prevede l'installazione di una serie di picchetti metallici (elettrodi), in questo caso 32, che vengono utilizzati tanto come elettrodi di corrente che di potenziale (**Figura 6**).

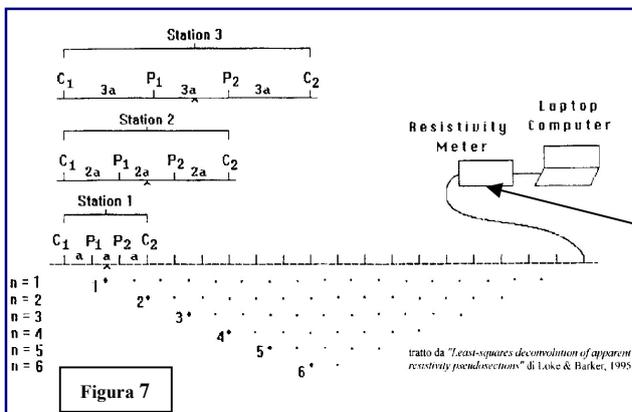


Tramite gli elettrodi **A - B** si immette nel terreno una corrente continua  $I_c$ , mentre tramite gli elettrodi **M-N** viene rilevata la differenza di potenziale  $V$  che si instaura. Conoscendo  $I_c$  e misurando  $V$  si calcola la resistività elettrica relativa alla configurazione elettrodica utilizzata, usando la formula:

$$\rho_a = \frac{\pi(l_{(A,B)} / 2)^2 - (a_{(M,N)} / 2)^2}{a_{(M,N)}} \cdot \frac{V}{I_c}$$



Spostando lateralmente il dispositivo elettronico (**M-N**) si rilevano le variazioni orizzontali della resistività e con il progressivo incremento della distanza che intercorre tra le due coppie di elettrodi (**A-B**) si esplorano strati via via più profondi, il risultato è una sezione bidimensionale in profondità (**Fig. 7**).



Dato che il caso di un sottosuolo omogeneo può ritenersi solo teorico, i valori di resistività rilevati sono valori di resistività “apparente” ( $\rho_a$ ), influenzati e mediati sull’intero spessore indagato. La resistività apparente si misura in  $\Omega \cdot m$  (Ohm per metro lineare) ed esprime il valore della resistività calcolato con una certa configurazione geometrica ed è dipendente dai valori di resistività dei singoli strati interessati dalla corrente immessa.

Per quanto riguarda la strumentazione utilizzata, nel caso specifico si è trattato di un georesistivimetro ARES (GF Instruments,s.r.o.®) con 64 elettrodi le cui caratteristiche tecniche vengono qui riportate (**Fig.8**).



<b>TRANSMITTER:</b>	
POWER	Up to 300 W
CURRENT	up to 2.0 A
VOLTAGE	10-550 V (1100 Vp-p)
PROTECTION	FULL ELECTRONIC PROTECTION
PRECISION	0,10%
<b>RECEIVER:</b>	
INPUT IMPEDANCE	20 M $\Omega$
INPUT VOLTAGE RANGE	-5 V
MAINS FREQUENCY FILTERING	50 or 60 Hz
PRECISION	0,10%

## 12.0 ARRAY DI TIPO “SCHLUMBERGER”

L’array di tipo “Schlumberger” prevede di lasciare i due elettrodi di potenziale M e N ad una distanza fissa ( $a$ ) sempre nel centro dello stendimento elettrodico.

Nella prima misura gli altri due elettrodi di corrente A e B vengono allineati rispettivamente alla stessa distanza  $a$ , agli estremi opposti.

Via via che l’indagine vuole esplorare sezioni di terreno a profondità maggiore si allarga la distanza degli elettrodi di corrente per multipli di  $a$  fino ad un valore compatibile con il numero degli elettrodi a disposizione (**Fig. 9**). In questo caso si introduce il fattore  $n$ , ovvero il rapporto tra A-M (o N-B) e M-N.

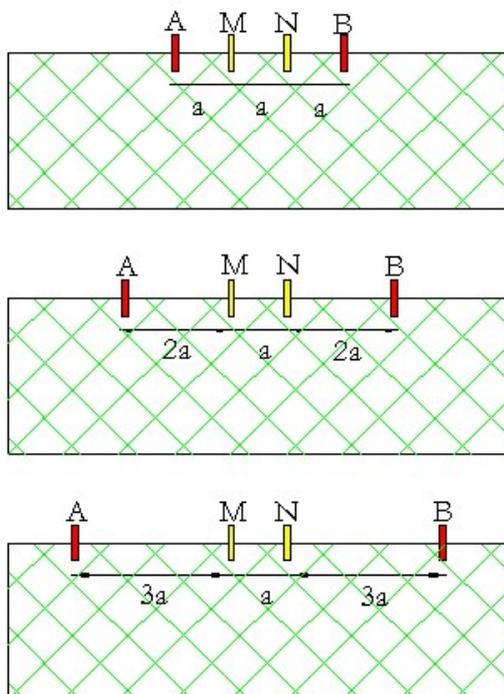
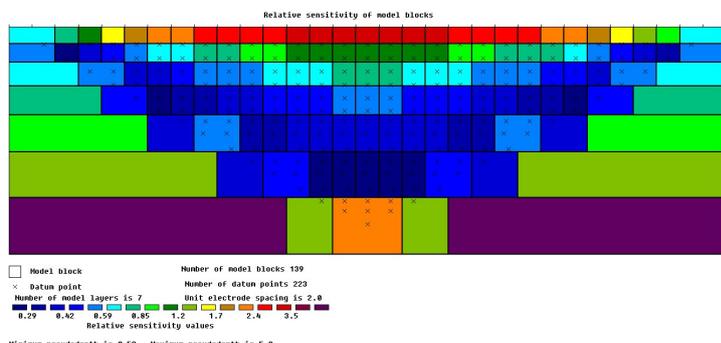


Fig. 9 – Geometria del metodo “Schlumberger”.

### 13.0 “PROCESSING” DEI DATI

Il software RES2DINV<sup>®</sup> (Geotomo Software<sup>®</sup>), utilizzato nel corso del presente lavoro, permette di ottenere un modello bidimensionale di resistività per i dati ottenuti dal rilievo elettrico e sfruttando il metodo dell’inversione permette partendo dai valori di resistività apparente di arrivare a quelli reali del terreno investigato.



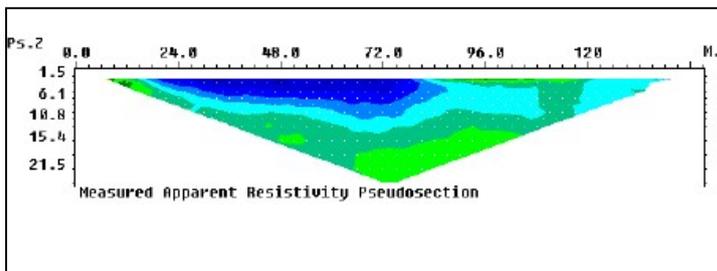
Il modello bidimensionale utilizzato nel programma di inversione consiste in un numero di blocchi rettangolari il cui arrangiamento dipende dalla posizione dei dati rilevati.

La distribuzione e posizione dei blocchi è automaticamente generata dal programma in modo tale che il numero dei blocchi non superi il numero dei dati acquisiti.

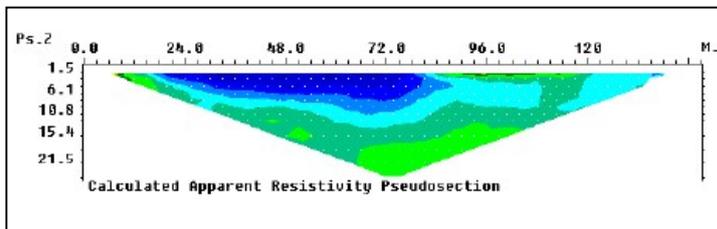
Una complessa routine di modellizzazione viene utilizzata per calcolare i valori di resistività apparente mentre per la routine di inversione viene impiegata una tecnica di ottimizzazione ai minimi quadrati non lineare.

Nelle sezioni estrapolate si individua nell'asse orizzontale la distanza progressiva dell'allineamento elettrodo sul terreno e nell'asse verticale la profondità rispetto al piano di campagna.

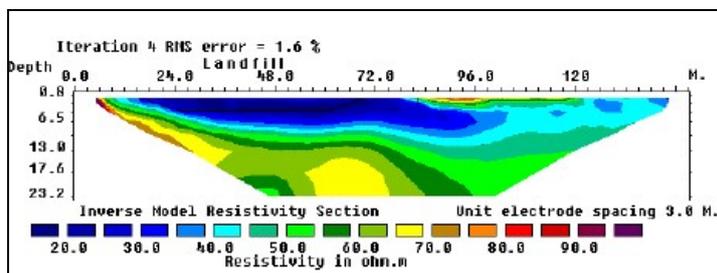
Il software RES2DINV® restituisce 3 profili tomografici che esprimono rispettivamente:



**La pseudosezione misurata**, che rappresenta una distribuzione laterale e verticale della resistività apparente in funzione di una profondità teorica.



**La pseudosezione calcolata**, che è stata ottenuta dal modello bidimensionale.



**La vera e propria sezione 2D**, dove è rappresentata la distribuzione verticale ed orizzontale della resistività reale del terreno oggetto d'indagine.

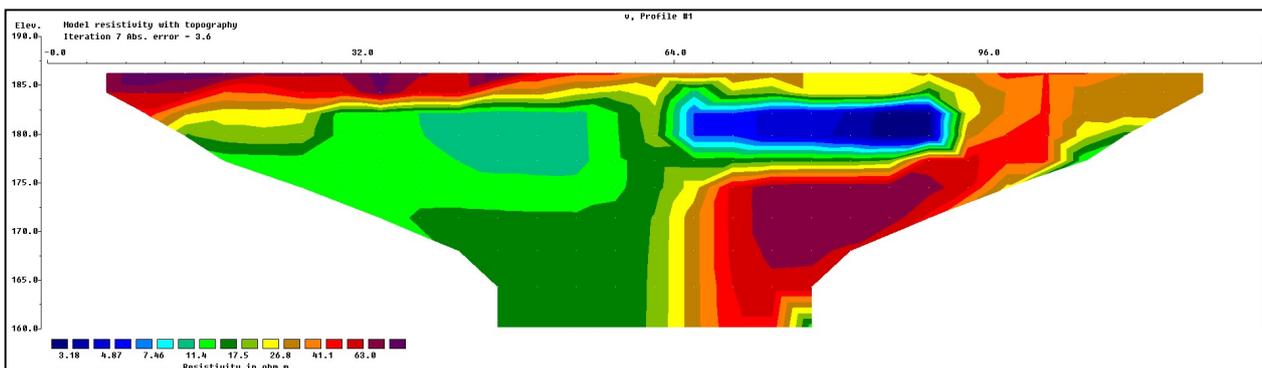
## 14.0 ANALISI DEI RISULTATI TOMOGRAFIA ELETTRICA 2D

Viene qui riportata la sezione **A-A'** elaborata con il software Res2Dinv tramite due diverse scale di visualizzazione (normale e ridotta), la relativa sezione interpretativa (vedi Tav. 04) e la documentazione fotografica:

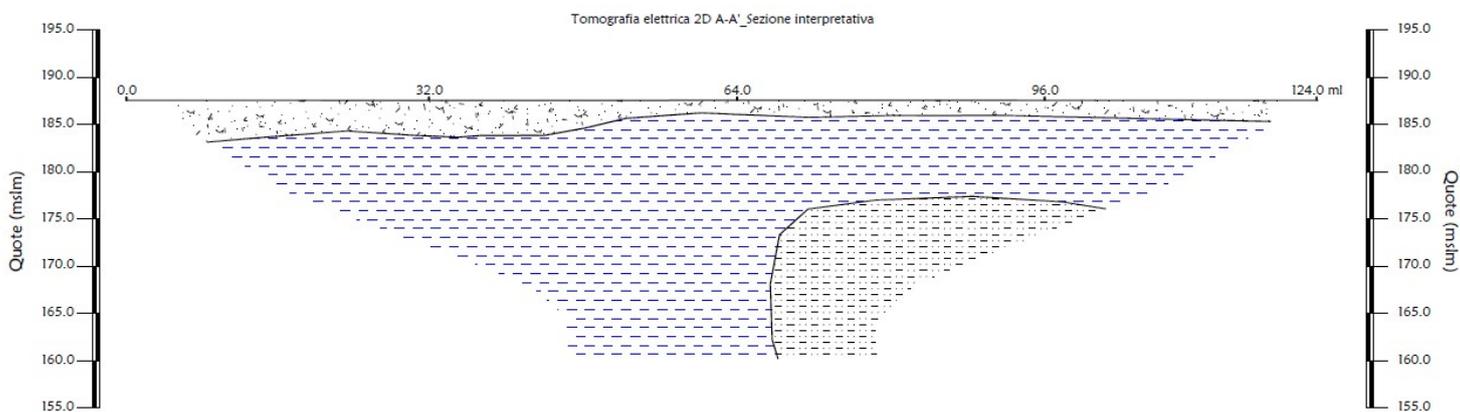
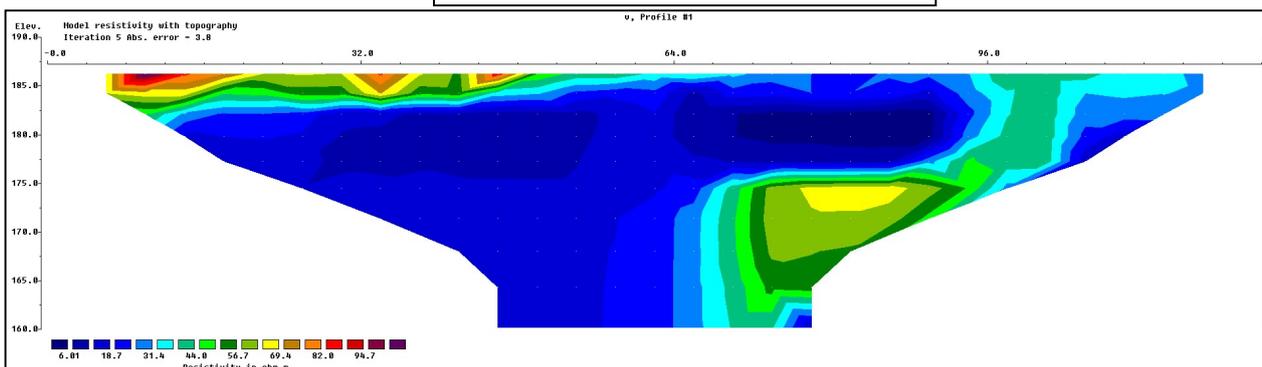


Fasi di acquisizione tomografia elettrica 2D.

### Tomografia elettrica 2D in scala ridotta



### Tomografia elettrica 2D in scala normale



La sezione di tomografia elettrica 2D **A-A'**, è stata rappresentata in due diverse scale per apprezzare meglio le differenze litologiche presenti all'interno dell'area d'indagine, elaborando una sezione interpretativa che risulta essere il sunto di entrambe le rappresentazioni.

Dall'analisi della sezione in scala ridotta è possibile evidenziare un primo livello, di maggior spessore nella porzione iniziale della sezione, caratterizzato da valori medio-alti di resistività **> 60 Ohm.m**, riconducibile al rilevato stradale ed ai materiali di copertura.

In profondità, analizzando la sezione rappresentata in scala normale, si apprezzano bassi valori di resistività (in blu) **< 15 Ohm.m** riconducibili a depositi-fluvio lacustri con un alto contenuto in argilla (Facies argilloso-limosa); all'interno di questo livello si evidenzia inoltre una porzione di materiali caratterizzati da valori medi di resistività compresi tra **40 e 60 Ohm. m**, probabilmente riconducibili ad una facies più sabbiosa dei depositi fluvio-lacustri.

### **SONDAGGIO A CAROTAGGIO**

15      Strumentazione utilizzata

Il sondaggio a carotaggio continuo è stato eseguito con sonda Beretta T41, carotiere semplice diametro 101 mm con avanzamento a secco. La Figura 1 riporta l'approntamento del cantiere per il sondaggio S1



Fig.1 - Approntamento cantiere sondaggio s1

### 3.2 Dati riassuntivi del sondaggio eseguito

La profondità raggiunta dal sondaggio è di 35 m dal p.c. attrezzato con tubo in PVC per misura Down Hole diametro 89 mm.

Sono stati prelevati due campioni indisturbati:

S1C1 tra 2.3 e 2.7 m da p.c.

S1C2 tra 11.2 e 11.7 m da p.c.

Inoltre sono state eseguite due prove SPT :

Spt 1 tra 4.3 e 4.75 m da p.c.                   – 3/8/10

Spt 2 tra 13.8 e 14.25 m da p.c.               – 7/17/15

### 3.3 5. Documentazione sondaggio

Si riporta di seguito:

-documentazione fotografica (figura da 2 a 8)

-stratigrafia del sondaggio (allegato)

### Documentazione Fotografica

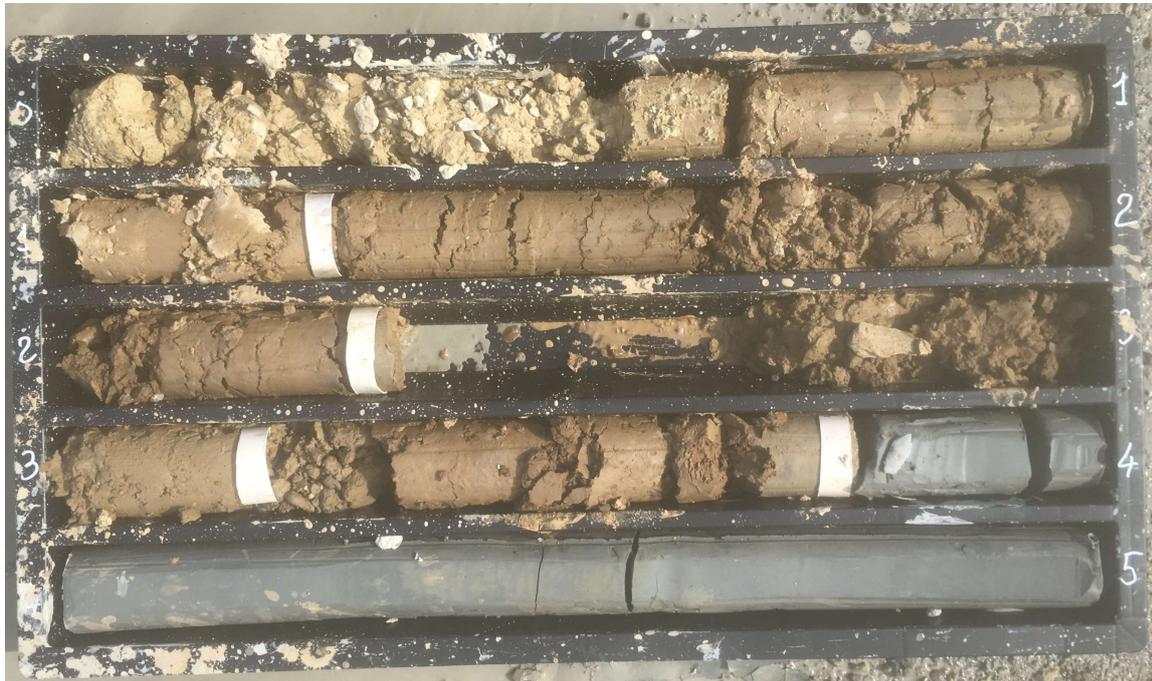


Fig 2 -Cassetta 1 – 0-5 m

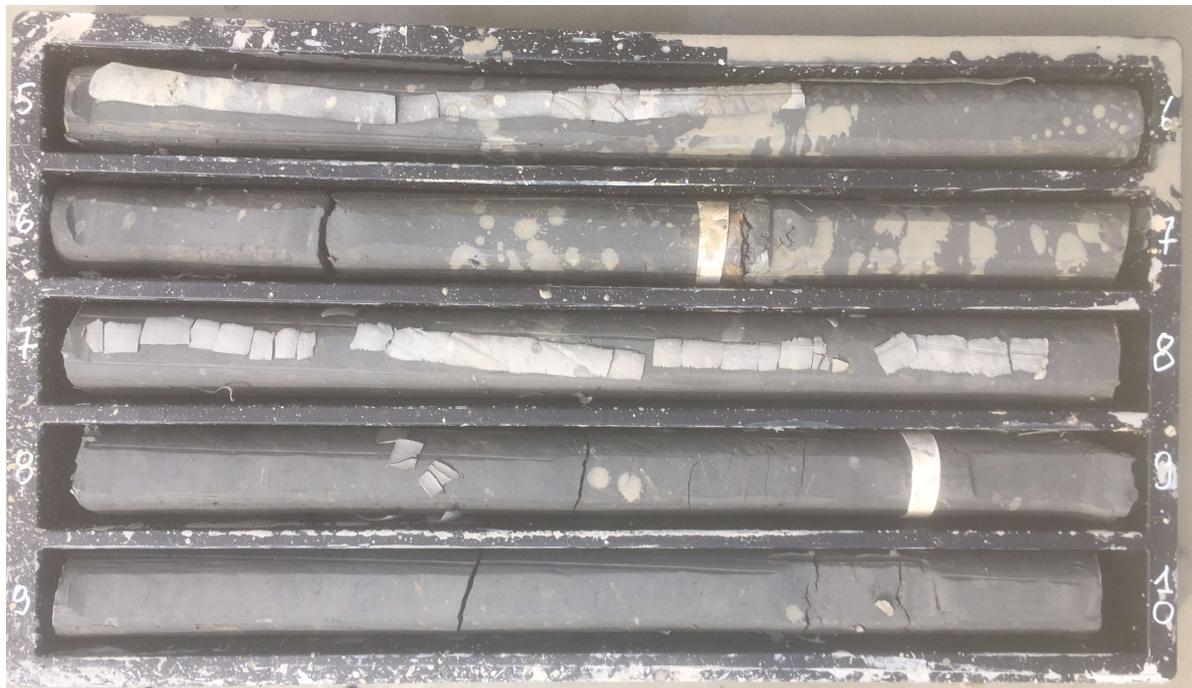


Fig 3 - Cassetta 2 – 5-10 m



Fig- 4 Cassetta 3 – 10-15 m



Fig- 5 Cassetta 4 – 15-20 m



Fig- 6 Cassetta 5 – 20-25 m



Fig- 7 Cassetta 6 – 25-30 m



Fig- 8 Cassetta 7 – 30-35 m

---

Rufina, li 22/07/2021

## ALLEGATI

