

**E78 GROSSETO - FANO**  
**Tratto Nodo di Arezzo – Selci – Lama (E45) –**  
**Palazzo del Pero – Completamento**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**FI 509**

**ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI**

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>IL GEOLOGO</b></p> <p><i>Dott. Geol. Marco Leonardi</i><br/>Ordine dei geologi<br/>della Regione Lazio n. 1541</p>  | <p><b>I PROGETTISTI SPECIALISTICI</b></p> <p><i>Ing. Ambrogio Signorelli</i><br/>Ordine Ingegneri<br/>Provincia di Roma n. A35111</p> <p><i>Ing. Moreno Panfili</i><br/>Ordine Ingegneri<br/>Provincia di Perugia n. A2657</p> <p><i>Ing. Matteo Bordugo</i><br/>Ordine Ingegneri<br/>Provincia di Pordenone al n. 790A</p> <p><i>Ing. Giuseppe Resta</i><br/>Ordine Ingegneri<br/>Provincia di Roma n. 20629</p> | <p><b>PROGETTAZIONE ATI:</b><br/>(Mandataria) <b>GP INGENGERIA</b><br/><i>GESTIONE PROGETTI INGENGERIA srl</i></p> <p>(Mandante)</p> <p>(Mandante)</p> <p>(Mandante)</p> <p><b>IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12) :</b></p> <p><i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i></p> |
| <p><b>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</b></p> <p><i>Arch. Santo Salvatore Vermiglio</i><br/>Ordine Architetti<br/>Provincia di Reggio Calabria n. 1270</p> |   |  |
| <p><b>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO</b></p> <p><i>Ing. Francesco Pisani</i></p>  |   |  |
| <p><b>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO</b></p> <p><i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p>  |   |  |

**STUDI ED INDAGINI**  
Indagini geognostiche  
Documentazione indagini geognostiche  
Campagna geofisica

|                        |             |                   |                  |          |                  |              |
|------------------------|-------------|-------------------|------------------|----------|------------------|--------------|
| <b>CODICE PROGETTO</b> |             |                   | <b>NOME FILE</b> |          | <b>REVISIONE</b> | <b>SCALA</b> |
| COMP.                  | PROGETTO    | LIV. ANNO N.PROG. | T00GE00GEORE10_A |          |                  |              |
| DP                     | LO702F      | D2001             | T00GE00GEORE10   |          | A                | -            |
| D                      |             |                   |                  |          |                  |              |
| C                      |             |                   |                  |          |                  |              |
| B                      |             |                   |                  |          |                  |              |
| A                      | Emissione   |                   | Gennaio '22      | Barletta | Leonardi         | Guiducci     |
| REV.                   | DESCRIZIONE |                   | DATA             | REDATTO  | VERIFICATO       | APPROVATO    |

## S.G.C. E78 GROSSETO - FANO

Tratto Nodo di Arezzo (S.Zeno) - Selci Lama (E45)

Adeguamento a 4 corsie del tratto San Zeno - Nodo di Arezzo (Lotto di completamento)

### PROGETTO DI MONITORAGGIO GEOMORFOLOGICO IN FASE ANTE OPERAM

**C.A.n.2  
FI509**

#### ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

**RUP ACCORDO QUADRO**  
**Ing. Angelo Dandini**

#### PROGETTAZIONE ATI

(Mandataria)



(Mandante)



(Mandante)



(Mandante)



(Mandante)



**RUP INTERVENTO**  
**Ing. Angelo Dandini**

**DIRETTORE ESECUZIONE CONTRATTO**  
**Dott. Simone Santoro**

#### STUDI E INDAGINI Piano di monitoraggio geotecnico e geomorfologico Indagini geognostiche

TITOLO REPORT INDAGINI FI509 - Indagini geofisiche Tratte  
A - C - D

Rev

Scala

Codice Elaborato CA02\_FI509\_PM\_RT02\_A

A

A

Emissione esecutiva 31-08-2021

AGOSTO 2021

G.Mainieri  
G.Ferraro

V.Federici

S.Possati

REV.

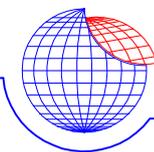
DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO



**GEOFISICA  
MISURE S.n.c.**

PROSPEZIONI E MONITORAGGI GEOFISICI SU TERRENI E MANUFATTI  
87075 Trebisacce (CS); Viale della Libertà, 132;  
tel./fax 0981 57110-489444 E-mail: info@geofisicamisure.it  
Par. IVA 02253910786; N. REA 0153033



**ANAS**  
GRUPPO FS ITALIANE

Direzione Progettazione e Realizzazione Lavori

S.G.C. E78 GROSSETO – FANO

Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) – Selci Lama (E45)  
Adeguamento a 4 corsie del Tratto San Zeno – Nodo  
di Arezzo (Lotto di completamento)

PROGETTO DEFINITIVO

**INDAGINI GEOFISICHE**

I tecnici responsabili

Dr. Giuseppe Mainieri    Dr. Giuseppe Ferraro

## PREMESSA

Nell'ambito del *Progetto definitivo S.G.C. E78 Grosseto-Fano – Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) – Selci Lama (E45) – Adeguamento a 4 corsie del Tratto San Zeno – Nodo di Arezzo (lotto di completamento)*, è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche. Le attività sono state svolte lungo i tracciati di tre direttici progettuali (*Tratto A, Tratto C e Tratto D*), dove sono state realizzate prospezioni sismiche con metodo “*a rifrazione*” ad onde di compressione e di taglio, con elaborazione tomografica; indagini mediante analisi della dispersione delle velocità di fase delle onde sismiche superficiali di tipo attivo (*MASW*), finalizzate alla ricostruzione di profili verticali di rigidità e alla definizione delle categorie sismiche di sottosuolo attraverso il calcolo della media equivalente dei valori delle velocità delle onde di taglio. Sempre con metodo sismico, ma in foro, sono state eseguite misure con tecnica *Down-Hole*, che hanno consentito, nei sondaggi *AS08* e *CS01, CS03, CS04, CS06* e *CS09* la misura di dettaglio del profilo di velocità delle onde di compressione e di taglio, con il calcolo dei moduli elastici dinamici del terreno fino a 35 m di profondità. Ulteriori indagini, finalizzate alla misura della conduttività elettrica del terreno e all'individuazione di eventuali elementi metallici sepolti in corrispondenza dei siti dei previsti carotaggi e saggi di scavo, sono stati eseguiti preliminarmente all'esecuzione degli stessi, mediante metodo elettromagnetico nel dominio della frequenza (FDED).



**Esecuzione indagine sismica Down-Hole SC06**

## PREMESSA

Nell'ambito del *Progetto definitivo S.G.C. E78 Grosseto-Fano – Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) – Selci Lama (E45) – Adeguamento a 4 corsie del Tratto San Zeno – Nodo di Arezzo (lotto di completamento)*, è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche. Le attività sono state svolte lungo i tracciati di tre direttici progettuali (*Tratto A, Tratto C e Tratto D*), dove sono state realizzate prospezioni sismiche con metodo “*a rifrazione*” ad onde di compressione e di taglio, con elaborazione tomografica; indagini mediante analisi della dispersione delle velocità di fase delle onde sismiche superficiali di tipo attivo (*MASW*), finalizzate alla ricostruzione di profili verticali di rigidità e alla definizione delle categorie sismiche di sottosuolo attraverso il calcolo della media equivalente dei valori delle velocità delle onde di taglio. Sempre con metodo sismico, ma in foro, sono state eseguite misure con tecnica *Down-Hole*, che hanno consentito, nei sondaggi *AS08* e *CS01, CS03, CS04, CS06* e *CS09* la misura di dettaglio del profilo di velocità delle onde di compressione e di taglio, con il calcolo dei moduli elastici dinamici del terreno fino a 35 m di profondità. Ulteriori indagini, finalizzate alla misura della conduttività elettrica del terreno e all'individuazione di eventuali elementi metallici sepolti in corrispondenza dei siti dei previsti carotaggi e saggi di scavo, eseguiti preliminarmente all'esecuzione degli stessi, mediante metodo elettromagnetico nel dominio della frequenza (FDED).



**Esecuzione indagine sismica Down-Hole SC06**

## CONTESTO DI INDAGINE

I tre tratti di tracciato investigato, denominati *Tratto A*, *Tratto C* e *Tratto D*, si sviluppano nelle due aree pianeggianti costituite dalla *Piana di Arezzo* (a Est), dove ricade la parte terminale del *Tratto A*, e della *Val di Chiana* (verso Ovest), in cui sono impostati i tratti C e D. Le due aree sono separate da una dorsale collinare ad andamento NW-SE, attraversata in una stretta incisione dal *Tratto A*.

Nelle aree pianeggianti, la cui genesi è prettamente strutturale, legata a fenomeni distensivi che interessano l'area tirrenica della Catena Appenninica a partire dal Pliocene Superiore, le litologie sono caratterizzate da depositi alluvionali recenti, tendenti a riempire le depressioni tettoniche, costituite da depositi fluviali nella porzione inferiore, e fluvio palustri (argille sabbiose) nella porzione superiore. Il tratto di dorsale tra le due piane, in cui rilievo assume un aspetto collinare, è costituito dal punto di vista litologico dalla Formazione delle *Arenarie del Cervarola*, caratterizzate da torbiditi quarzoso-feldspatiche con calcite e fillosilicati, alternate ad argilliti più o meno siltose.

Le sequenze stratigrafiche nei tratti di interesse saranno quindi di tipo alluvionale, in prevalenza pelitiche, in spessori importanti, tranne che nell'area più prossima alla citata dorsale, lambita dalla porzione centrale del *Tratto C*, dove affiorano termini litoidi (alterati e fratturati in superficie), e a breve profondità, al di sotto delle alluvioni di fondovalle, nella zona di incisione attraversata nel *Tratto A*.



**Indagine sismica MASW A1**



## **INDAGINI ELETTROMAGNETICHE (FDEM)**

Sui siti delle previste indagini con perforazioni a carotaggio e mediante saggi di scavo, da realizzare lungo il tracciato di progetto della *S.G.C. E78 Grosseto-Fano, Nodo di Arezzo (San Zeno) – Selci Lama (E45)*, sono state realizzate delle indagini elettromagnetiche nel dominio delle frequenze (FDEM). Le misure sono state finalizzate all'individuazione di eventuali corpi sepolti presenti nelle varie postazioni di indagine, onde evitare interferenze; l'elaborazione delle stesse ha inoltre permesso di ottenere la conduttività indicativa del terreno al variare delle frequenze di lavoro e quindi, indirettamente, con la profondità di indagine.

Le misure sono state realizzate su linee di acquisizione tra esse parallele, spaziate di 1.0 m su geometrie quadrate con 10 m di lato, con il sito di indagine diretta (carotaggio o saggio) possibilmente, in assenza di ostacoli, centrato nell'area di rilievo.



**Esecuzione della griglia di rilievo con GPS Rtk per le misure elettromagnetiche con GEM2**

Sia i punti dei previsti carotaggi e centro degli assi di scavo, sono stati materializzati sul campo con l'uso di un GPS con correzione Rtk, di precisione centimetrica. Quindi sono state realizzate le griglie per l'esecuzione delle misure ad interesse di 1.0 m, rilevando anche i vertici delle superfici di rilievo, al fine di una successiva georeferenziazione dei dati acquisiti.

Il contesto litologico che caratterizza il tratto di tracciato investigato, è in gran parte costituito da depositi alluvionali recenti; in prevalenza si tratta di argille più o meno limose e sabbiose sul lato più

occidentale (San Zeno), passanti a depositi più grossolani nell'area più orientali, nei pressi dell'abitato di Arezzo (alluvioni terrazzate).

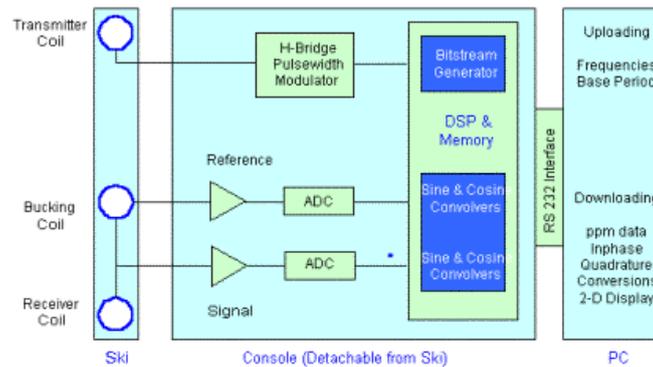
**Metodo di indagine.** Il metodo di indagine elettromagnetico si basa sul *principio di Maxwell* secondo il quale un campo elettromagnetico variabile nel tempo induce, in un mezzo conduttivo, una forza elettromotrice, che produce quindi correnti indotte (correnti di Foucault) i cui caratteri dipenderanno dall'intensità e frequenza nel campo inducente (detto primario), ma anche dai caratteri di conducibilità del corpo in cui si creano. A loro volta, queste correnti indotte, produrranno un campo elettrico secondario che è l'oggetto di misura di un elettromagnetometro. L'indagine consiste nel generare, mediante una spira attraversata da una corrente a frequenza variabile e contenuta in un apposito supporto, un campo elettromagnetico noto (campo primario) che va a generare nel terreno e nei corpi conduttivi ad essa vicini, delle correnti indotte che a loro volta generano il campo oggetto di misurazione, che avviene mediante un'altra spira contenuta nello stesso supporto. Ovviamente il segnale elettromagnetico che lo strumento raccoglie, è la somma vettoriale del campo variabile primario e di quello secondario, quest'ultimo di intensità molto minore rispetto al primo. Allo scopo di discernere il campo secondario, rispetto a quello primario, viene utilizzata una ulteriore spira che va a sopprimere il campo energizzante. In tal modo la misurazione effettuata nella spira di ricezione potrà essere assimilata a quella dovuta al solo campo indotto nel terreno, in maniera tale da poter valutare le sue caratteristiche elettriche e in particolare i suoi caratteri di conduttività. L'uso di più frequenze contemporaneamente permette di avere indicazioni sulle variazioni di conduttività del terreno con la profondità, sia pure in maniera qualitativa. In particolare si osserva che la profondità di indagine diminuisce all'aumentare della frequenza (effetto pelle), essa è inversamente proporzionale alla radice quadrata della frequenza, della permeabilità magnetica e della conduttività. Quindi, utilizzando più frequenze sarà possibile avere indicazioni, sul variare della conduttività del terreno con la profondità.

**Caratteristiche strumentali.** La strumentazione utilizzata per l'indagine elettromagnetica è un elettromagnetometro di costruzione *Geophex*, modello *GEM2*, avente le seguenti caratteristiche:

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| <i>Frequency band</i>               | <i>330 Hz to 48 kHz</i>                        |
| <i>Multiple-frequency operation</i> | <i>up to 15 frequencies (recommend 3 to 6)</i> |
| <i>Power line monitoring</i>        | <i>user-specified frequency (50 or 60 Hz)</i>  |
| <i>Coil configurations</i>          | <i>horizontal or vertical coplanar</i>         |

Battery  
 Battery life  
 Weight  
 Basic output  
 PC software  
 Positioning

standard 12-volt notebook computer battery pack (B905S)  
 ~8 hours between charges under normal use  
 9 pounds (4 kg)  
 inphase and quadrature response in parts per million (ppm)  
 WinGEM for PC  
 Dead reckoning or external GPS data input



Schema apparato di misura dell'elettromagnetometro GEM2

Tale strumentazione è costituita da un supporto contenente le due spire, di energizzazione e di misura, distanziate di 1.66 m. Le misure vengono eseguite su varie frequenze (fino a 15). Inoltre, queste sono acquisite sia nella componente in fase rispetto al campo primario, che in quadratura di fase. Queste misure consentono di risalire alla conducibilità apparente del terreno, definendone quindi la natura, e di individuare corpi sepolti con conduttività differente rispetto al terreno inglobante. Nel caso particolare di indagine, è stata trattata con particolare riguardo anche la componente in fase del campo indotto rispetto a quello primario, più efficace per mettere in rilievo eventuali oggetti con caratteri di conduttori metallici.



Esecuzione delle misure elettromagnetiche con GEM2 (tratto C)

Le misure sono state eseguite lungo linee di scansione tra loro parallele equidistanziate di 1.0 m, evidenziate in sito previa costruzione di griglie di misura a geometria rettangolare in modo da coprire tutta l'area di indagine, con mappatura bidimensionale della risposta elettromagnetica del terreno. I

dati sono stati acquisiti in continuo con 2 letture al secondo e “spalmati” lungo le linee di acquisizione conoscendone la lunghezza. Le letture sono state realizzate su sei frequenze, comprese tra 1025 e 20025 Hz. La successiva analisi del dato ha permesso di avere indicazioni sulle frequenze, tra quelle registrate, più stabili e quindi maggiormente affidabili per l’individuazione delle anomalie, risultate a 2525 Hz (di maggiore profondità di investigazione) e 10025 Hz, di minore profondità ma maggiore risoluzione spaziale. Nell’uso delle frequenze si è tenuto conto anche della necessità di raggiungere un’adeguata profondità di investigazione. Come noto, la profondità (D) di penetrazione di una corrente alternata in un corpo conduttivo, dipende anche dalla frequenza, e tende a diminuire con l’aumentare di questa (effetto pelle) secondo la relazione:

$$D = (2/\sigma\mu\omega)^{1/2}$$

Dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica,  $\mu$  la permeabilità magnetica e  $\omega$  la frequenza angolare.

Dalle frequenze considerate, considerato un valore medio di conducibilità di 0.1 S/m, si ottengono profondità teoriche massime di investigazione intorno ai 8-12 m. La possibilità di individuare un bersaglio metallico in questo intervallo di profondità, sarà legata alla sua massa e alle capacità risolutive del circuito strumentale ricevente. Si può stimare che, adottando l’insieme delle frequenze disponibili, per un oggetto metallico delle dimensioni di un fusto, la profondità massima di individuazione sia di circa 3.0-4.0 m; per un gruppo di 3-5 fusti si può stimare una profondità massima di circa 6-8 m.

**Elaborazioni.** Le misure elettromagnetiche sono state eseguite nei giorni 16, 17 e 18 febbraio 2021, lungo linee di scansione tra loro parallele equidistanziate di 2.0 m, evidenziate in sito previa la definizione di griglie di misura a geometria regolare, i cui vertici sono stati rilevati mediante GPS-RTK con precisione centimetrica. Come già accennato, delle sei frequenze acquisite, quelle più stabili e significative in termini di risposta elettromagnetica, sono risultate a 2525 Hz, 10025 Hz, per le quali sono stati mappati i valori di conducibilità elettrica apparente, della risposta in fase e di quella in quadratura di fase. I valori sono stati visualizzati mediante modelli in scala cromatica, sovrapposti in leggera trasparenza su un ortofotopiano derivante da immagini aeree risalenti al 2012, disponibile online con protocollo *WMS*, sul sito del *Portale Cartografico Italiano*. Qualora all’interno delle aree investigate siano risultate anomalie importanti, riconducibili ad elementi antropici sepolti, esse sono state evidenziate e, ove possibile, consigliata una nuova posizione del carotaggio/scavo da realizzare, non interessato dalla presenza di esse.





























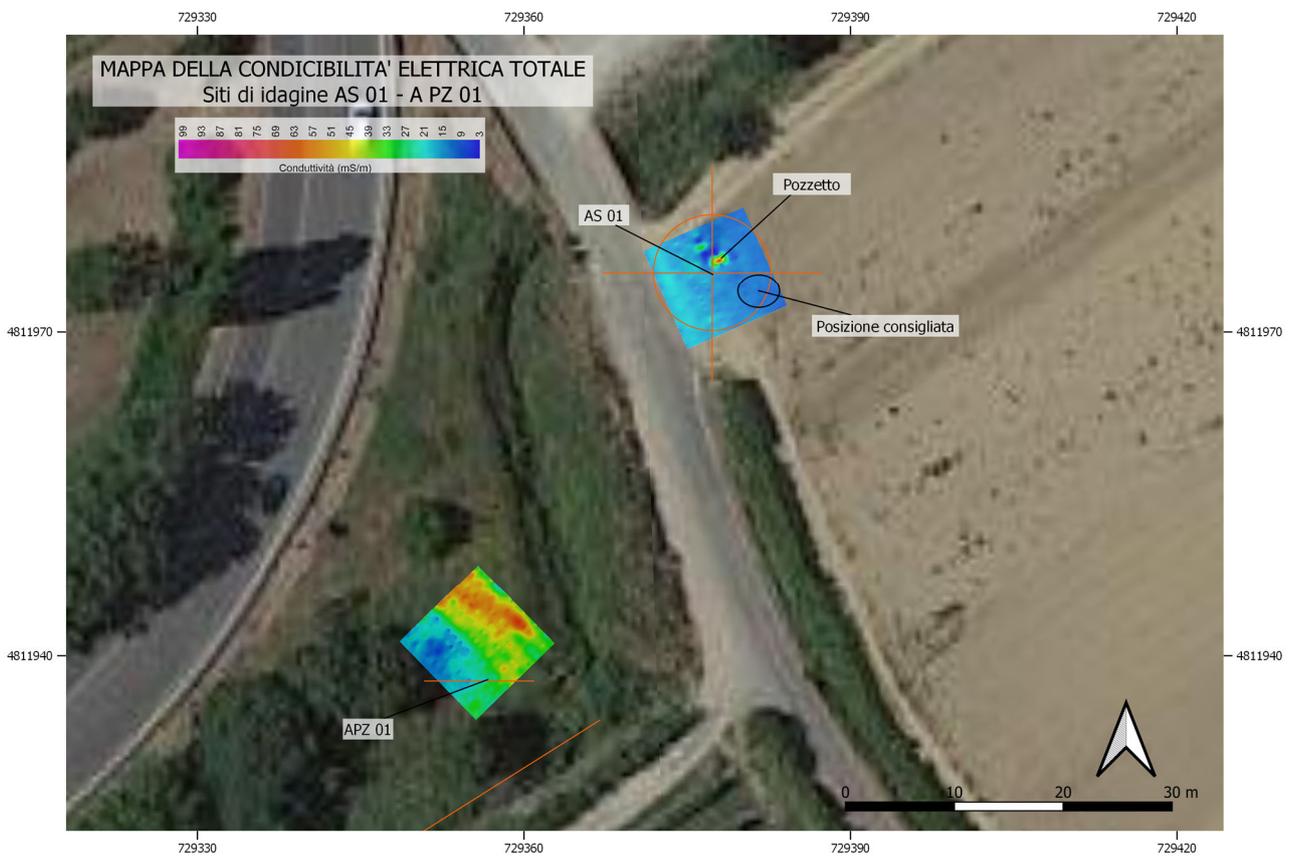


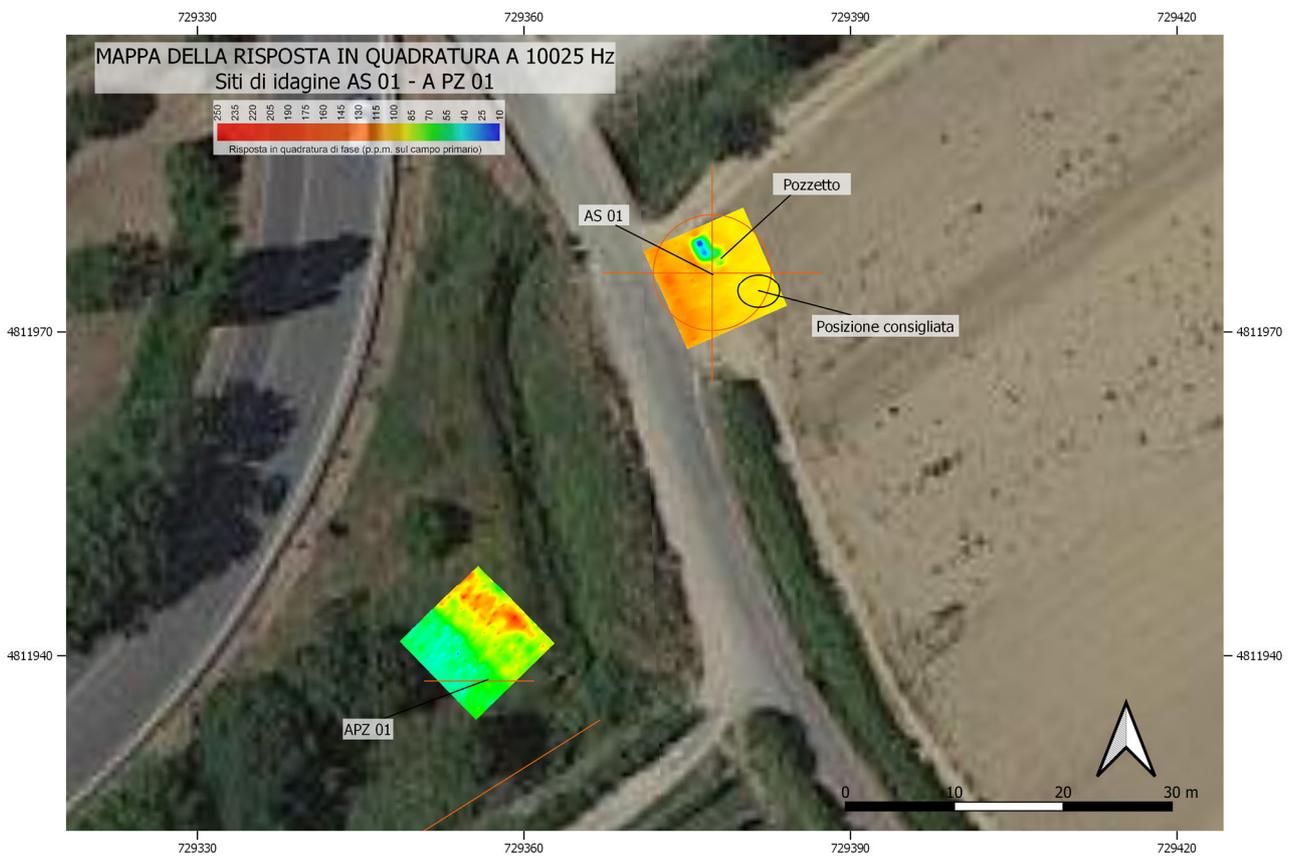


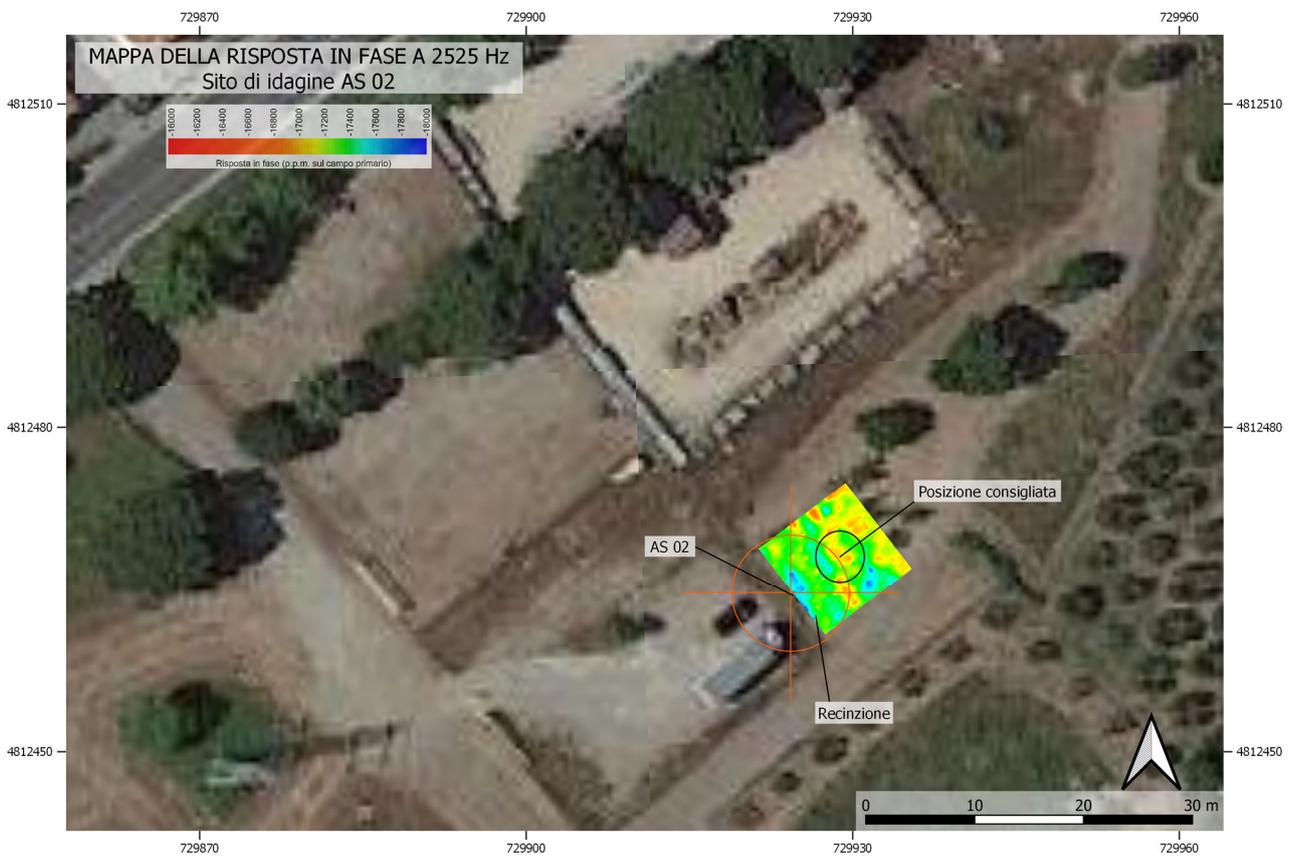




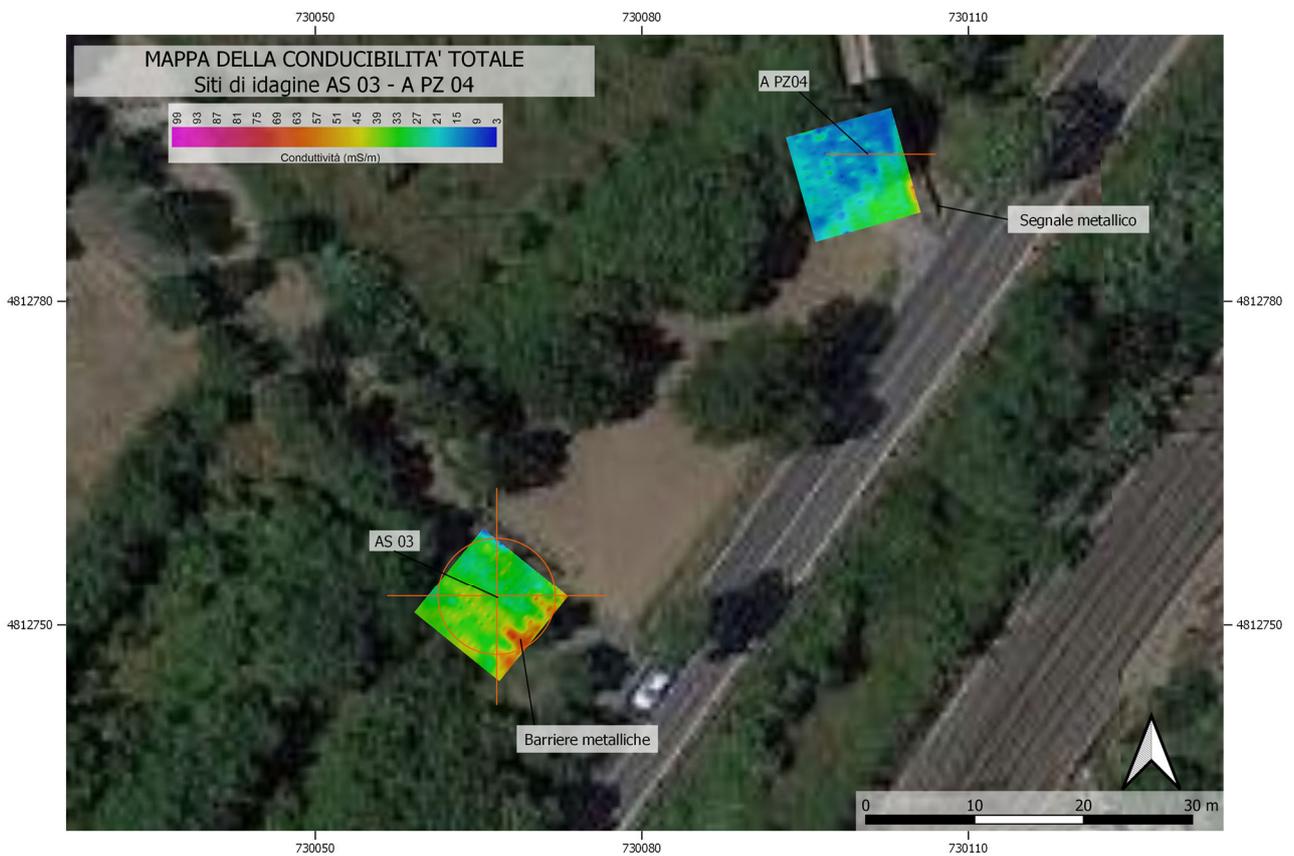








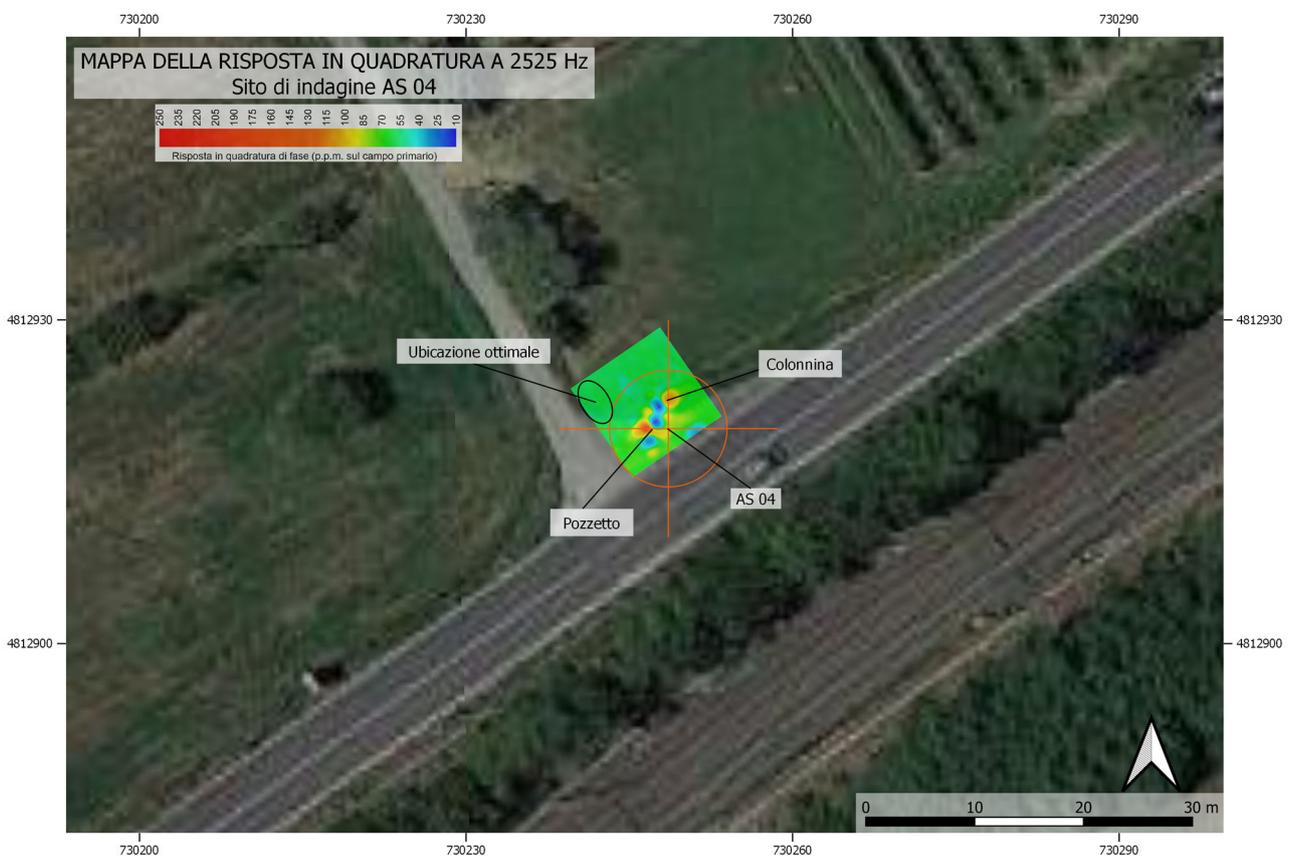












































## INDAGINI SISMICHE

Come citato in premessa, in vari tratti dei tracciati di progetto, sono state eseguite sia indagini con metodo sismico di superficie “a rifrazione” ad onde P ed S e MASW, che con misure in foro mediante tecnica Down-Hole. Le misure hanno consentito di definire i caratteri sismo-stratigrafici dei tratti investigati e, con le opportune correlazioni, valutare gli spessori delle varie litologie, stimandone anche lo stato di addesamento/consistenza delle compagini presenti lungo i tratti di investigazione.

### Caratteristiche delle apparecchiature

I segnali sismici sono stati digitalizzati mediante un Sismografo modulare Geometrics Geode a 24 x 2 = 48 canali, con conversione analogico-digitale a 24 bit, ad elevata dinamica, avente le seguenti caratteristiche principali:

- *Range dinamico: 144 dB di sistema.*
- *Distorsione: 0.0005 % @ 2.0 ms.*
- *Banda di acquisizione: 1.75-20.000 Hz.*
- *Accuratezza trigger: 1/32 del passo di campionamento.*
- *Impedenza: 20 Kohm.*
- *Filtri in acquisizione: LowCut: 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz 24/48 dB/Octave, Butterworth. Notch: 50, 60, 180 Hz. HighCut: 32, 64, 125, 250, 500, 1000 Hz 24/48 dB/Octave.*
- *Intervallo di campionamento: 0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 msec.*
- *Lunghezza di registrazione: 16.384 campioni.*
- *Pre-trigger: fino a tutta la lunghezza di registrazione.*
- *Delay: da 0 a 9999 ms in passi di una lunghezza di intervallo.*



Per il rilievo della velocità del moto del suolo sono stati utilizzati geofoni *Geospace*, con frequenza di oscillazione di 10 Hz verticali ed orizzontali (a rifrazione in Onde P ed S) e di 4.5 Hz (MASW).

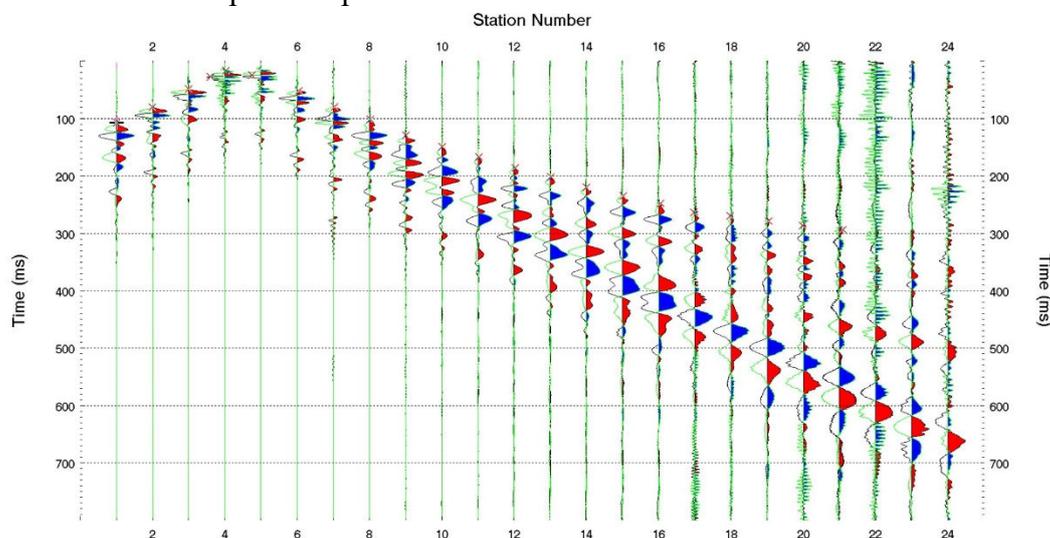
Nelle indagini in foro (Down-Hole) sono stati utilizzati due sensori tridimensionali da foro tra loro intervallati di 2.0 m, di produzione *Geotomographie Gmb.*

L'energizzazione è stata realizzata mediante una mazza battente del peso di 6.0 kg, battente su un piattello metallico per la produzione delle onde di compressione; mentre per la genesi prevalente delle onde SH utilizzate nelle misure in foro e di superficie, le battute sono state eseguite ai lati di una traversina in legno.

## PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE AD ONDE P e S

### Tecnica di rilevamento

Gli stendimenti sismici “a rifrazione” sono stati realizzati utilizzando una spaziatura geofonica pari a 5.0 m, con un numero di canali tali da raggiungere le lunghezze previste. Per ognuna delle basi sismiche sono stati utilizzati geofoni ad oscillazione verticale per la registrazione delle onde P prodotte nei punti di energizzazione (eseguiti ogni 4 posizioni geofoniche all'interno degli stendimenti e uno per lato, all'esterno degli stessi). Ove siano state previste indagini a rifrazione anche in onde S, i geofoni verticali sono stati sostituiti, nelle stesse basi sismiche, con geofoni ad oscillazione orizzontale, operando l'energizzazione per ogni punto di energizzazione con due eventi con fase opposta, al fine di sovrapporre poi a software i due sismogrammi, per una più facile percezione dell'arrivo dei primi impulsi relativi alle onde S.



Simogrammi sovrapposti con inversione di fase per determinazione del primo arrivo delle onde S (C\_Sism01)

## Elaborazione delle indagini sismiche “a rifrazione” ad onde P e S

I dati acquisiti dall’elaborazione dei sismogrammi costituiscono i primi tempi d’arrivo degli impulsi sismici longitudinali e trasversali (onde di compressione e di taglio) ai vari geofoni dello stendimento. Il metodo d’interpretazione utilizzato è stato del tipo tomografico, che ha consentito di evidenziare, in maniera migliore, eventuali variazioni laterali di velocità. Per l’elaborazione dei dati di campagna è stato utilizzato il software *RAYFRACT*, adatto per il *processing* di dati di profili sismici a rifrazione con *elevate* coperture, che consente di gestire reali contesti geologici. È stata utilizzata la tecnica d’inversione tomografica *WET* (Wavepath Eikonal Traveltime), che permette il calcolo delle traiettorie dell’onda (wavepath) attraverso le soluzioni alle differenze finite dell’*eikonal equation*, che esprime la propagazione dell’onda in un mezzo isotropo. Quindi, poiché utilizza le soluzioni di detta equazione, è considerata una tecnica ad alta frequenza, rapida ed efficiente. Per la rappresentazione della propagazione dell’onda la *WET* utilizza il concetto di “*volume di Fresnel*”, definito come l’insieme delle onde che hanno tempi di percorso differenti per al più mezzo periodo. Attraverso calcoli iterativi viene aggiornato il modello di velocità e vengono ripetuti gli *step* definiti, fino al raggiungimento della convergenza.

Il software determina, tramite l’algoritmo per l’inversione tomografica *WET*, quella che è la soluzione ottimale. La bontà del modello dipende dalla geometria dello stendimento, dalle distribuzioni di velocità nel sottosuolo, dal numero e dalla posizione dei punti d’energizzazione (shots).

I risultati dell’elaborazione sono presentati in forma grafica nei seguenti elaborati:

- **Modello di velocità:** rappresenta il risultato ottimale ottenuto; le velocità sono rappresentate in scale cromatiche comprese tra il minimo ed il massimo valore determinato.
- **Modello del gradiente di velocità:** viene presentato mediante vettori, i cui moduli sono proporzionali alla loro lunghezza e in scala cromatica. Consente di verificare le variazioni di velocità, e quindi dei caratteri elastici del terreno, all’interno del modello; le superfici di separazione tra differenti orizzonti sismici tendono a collocarsi dove questo valore aumenta.
- **Percorso dei raggi sismici:** consente di verificare il percorso dei raggi sismici e, conseguentemente, la copertura raggiunta. Anche in questo caso la rappresentazione è ottenuta utilizzando una scala cromatica.

## PROSPEZIONI SISMICHE MASW

Lungo il *Tratto A* sono state realizzate 4 prospezioni sismiche con metodologia MASW. La tecnica di analisi si basa sullo studio della dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di tipo Rayleigh (R), nota in letteratura come *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Uno dei sismogrammi acquisito nello stendimento è oggetto di filtraggio per l'eliminazione delle alte frequenze e "depurato" dalle onde di volume, al fine di ottenere dei picchi d'ampiezza nelle oscillazioni relative alle onde di superficie. Successivamente si passa alla rappresentazione delle tracce sismiche su un diagramma che mette in relazione le frequenze con le velocità di fase. Su di esso s'individuano, come zone di massima ampiezza, gli allineamenti attribuibili alle onde di Rayleigh, da cui si ottiene la variazione delle velocità di queste ultime con il variare della loro frequenza, o lunghezza d'onda. Essendo la profondità di propagazione di questo tipo di onde dipendente dalla frequenza, sarà possibile correlare le velocità alle varie frequenze con le profondità. Quest'ultimo passo, successivo alla definizione della curva di dispersione, si ottiene mediante un processo d'inversione, che porta al risultato finale, costituito da un profilo verticale delle velocità delle onde trasversali ( $V_s$ ), posto al centro della stesa di geofoni.

Le velocità di fase delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ), in un mezzo omogeneo, sono legate a quelle di volume dalla seguente relazione:

$$V_r^6 - 8V_s^2 V_r^4 + (24 - 16 V_s^2 / V_p^2) V_s^4 V_r^2 + (16 V_s^6 / V_p^6 - 1) V_s^6 = 0$$

In un mezzo non omogeneo le velocità delle onde di volume ( $V_p$  e  $V_s$ ) variano con la profondità. Le velocità di fase delle onde di Rayleigh mostrano velocità differenti per differenti valori di frequenza e sono fortemente legate ai valori delle velocità delle onde trasversali. Ciò consente di passare da modelli frequenza/velocità di fase delle onde di Rayleigh a modelli monodimensionali  $V_s$ /profondità.

Gli elaborati forniti contengono:

- *la curva di dispersione della velocità di fase delle onde R in relazione alla frequenza;*
- *il profilo delle  $V_s$  al centro dello stendimento fino alla massima profondità di indagine;*
- *la tabella dei valori di  $V_s$  per orizzonti omogenei di velocità;*
- *la velocità equivalente delle onde di taglio ( $V_{seq}$ ).*

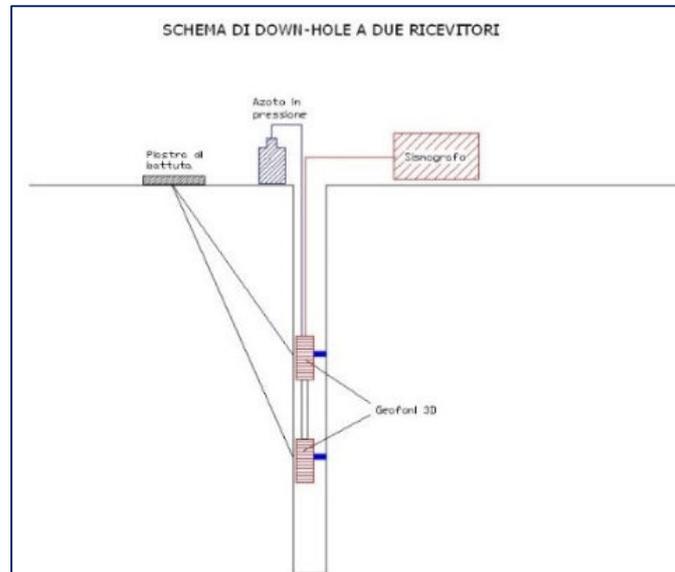
## PROSPEZIONI SISMICHE IN FORO DEL TIPO “DOWN-HOLE”

I fori di sondaggio in cui sono state realizzate le misure sismiche in foro con tecnica Down-Hole (**DH-AS8, DH-CS01, DH-CS03, DH-CS04, DH-CS06 e DH-CS09**), sono stati condizionati con tubo in PVC, opportunamente cementati, in modo da rendere solidale il tubo con il terreno circostante e quindi possibile il transito delle oscillazioni elastiche dal terreno ai sensori contrastati alla parete. L'energizzazione per la generazione delle onde di compressione (P) è stata realizzata con mazza di 6 Kg battente su piattello metallico. Per facilitare la generazione ed il rilievo delle onde trasversali con adeguata componente sul piano orizzontale (SH) si è utilizzato una traversina in legno, opportunamente ancorata, producendo impatti laterali. Sono state effettuate, quindi, per ogni stazionamento, due energizzazioni per le onde S (con inversione di fase), con piano di oscillazione prevalentemente orizzontale, e una verticale per la generazione prevalente delle onde P. Le energizzazioni sono state realizzate ad una distanza di 2.0 metri dai boccafori dei sondaggi.

La tecnica Down-Hole si basa sulla determinazione dei tempi d'arrivo delle onde di volume, rilevate dai sensori all'interno del foro, generate in superficie in prossimità del boccaforo. I tempi di arrivo sono stati calcolati, per ogni intervallo di misura, come differenza dei tempi totali d'arrivo ai due sensori tra loro distanziati di due metri. Essendo le differenze calcolate relative ad un singolo evento di energizzazione, si sono annullati eventuali errori relativi alla partenza esatta della registrazione.

L'intervallo di avanzamento della sonda all'interno del tubo è stato fissato a 1 metro, in maniera tale da avere una misura ogni metro. Nelle tabelle allegate sono riportati i valori dei tempi d'arrivo relativi alle onde P e S, i tempi corretti sulla verticale ( $T'_p$  e  $T'_s$ ), per tenere conto della distanza del punto di energizzazione dal foro di sondaggio, i valori delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  relativi all'intervallo corrispondente ed infine i principali moduli elastici dinamici: il coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), il modulo elastico (E), il modulo di taglio (G) e il modulo di incompressibilità o di Bulk (K). I valori dei pesi di volume ( $\gamma$ ) sono indicativi. Alcuni di questi dati sono presentati anche in forma grafica: nel primo grafico sono riportate le velocità delle onde longitudinali (P) e trasversali (S) d'intervallo (istogrammi), mentre nel secondo grafico sono riportati i valori dei coefficienti di Poisson alle varie profondità. Nel terzo diagramma sono stati individuati, sulle dromocrone, i tratti che mostrano caratteri omogenei di velocità (pendenze) e, di conseguenza, sono stati determinati i valori medi

rappresentativi dei singoli sismostrati. Nell'ultimo grafico sono riportati i valori dei moduli elastici per ciascun sismostrato omogeneo.



**Inserimento della doppia terna di sensori nel foro C\_S6**

## TRATTO A

Il *Tratto A* riguarda un tracciato che si sviluppa inizialmente nei termini alluvionali, prevalentemente pelitici, con intercalazioni granulari della *Val di Chiana*; quindi interessa il tratto di fondovalle dell'incisione della dorsale, caratterizzato da un substrato litoide appartenente alla Formazione flisioide delle Arenarie del Cervarola, interessato da coperture alluvionali ed eluvio-colluviali con spessori variabili. Quindi nel settore più occidentale, il tratto si sviluppa nuovamente nei terreni recenti alluvionali, appartenenti alla *Piana di Arezzo*, sempre costituiti da peliti prevalenti, con intercalazioni di sabbie e sabbie con ghiaie.

**Prospezione A\_Masw1.** La base sismica, come previsto nel Piano delle Indagini, è impostata nella parte iniziale del *Tratto A*, ricade sui depositi alluvionali della *Val di Chiana*. Vi si riconoscono cinque orizzonti omogenei. Il primo, con velocità media delle onde di taglio pari a 208 m/sec è riferibile ad un deposito alluvionale a scarso addensamento/consistenza, ha uno spessore di 4.1 m. Al di sotto si osserva un aumento di rigidità, con  $V_s$  pari a 253 m/sec, indicante depositi a media consistenza/addensamento, fino a 6.2 m dal piano campagna. Al di sotto si rileva un graduale aumento del valore della velocità delle onde di taglio, indicativo di un graduale e lento aumento dello stato di addensamento della compagine sedimentaria, da considerarsi medio almeno fino a 27 m di profondità, dove il valore della  $V_s$  è in media pari a 324 m/sec. A tale profondità si osserva un brusco aumento del valore della velocità delle onde S, che passa a 524 m/sec, indicativo di un passaggio litologico o di un netto incremento dello stato di addensamento dei depositi alluvionali.

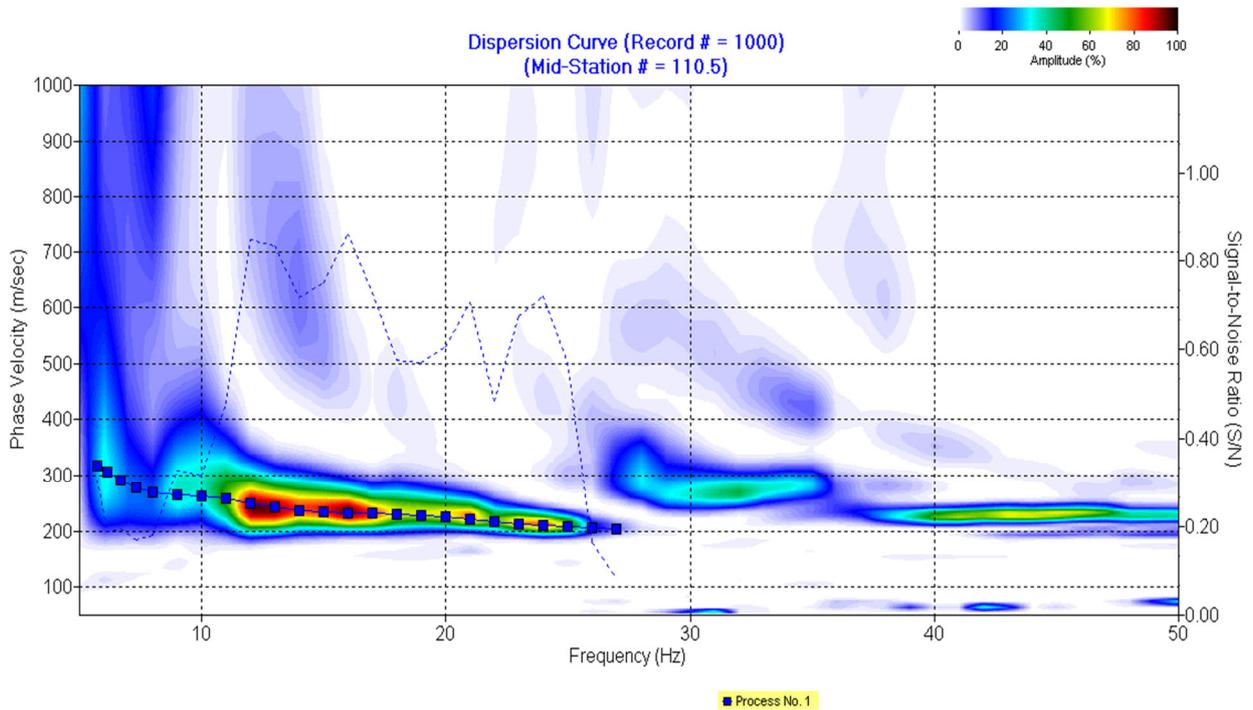
**Tabella dei moduli elastici dinamici medi indagine A Masw01**

|  | <i>Limi argillosi e sabbiosi sciolti</i> | <i>Limi argillosi e sabbie a medio addensamento/consistenza</i> | <i>Limi argillosi e sabbie addensate</i> | <i>Limi argillosi e sabbie addensate</i> | <i>Depositi molto addensati/consistenti</i> |
|--|--|---|--|--|---|
| Coefficiente di Poisson $\mu$                | 0.42                                     | 0.41  | 0.40                                     | 0.40                                     | 0.40  |
| Velocità onde longitudinali $V_p$ (m/sec)    | 560                                      | 648   | 701                                      | 794                                      | 1284  |
| Velocità onde trasversali $V_s$ (m/sec)      | 208                                      | 253   | 286                                      | 324                                      | 524   |
| Peso di volume $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.80                                     | 2.00  | 2.20                                     | 2.20                                     | 2.20  |
| Modulo di Young $E_{din}$ (Mpa)              | 225.4                                    | 368.0   | 513.6                                    | 659.2                                    | 1724.1                                      |
| Modulo di Rigidità $G$ (Mpa)                 | 79.4                                     | 130.5   | 183.4                                    | 235.4                                    | 615.8                                       |

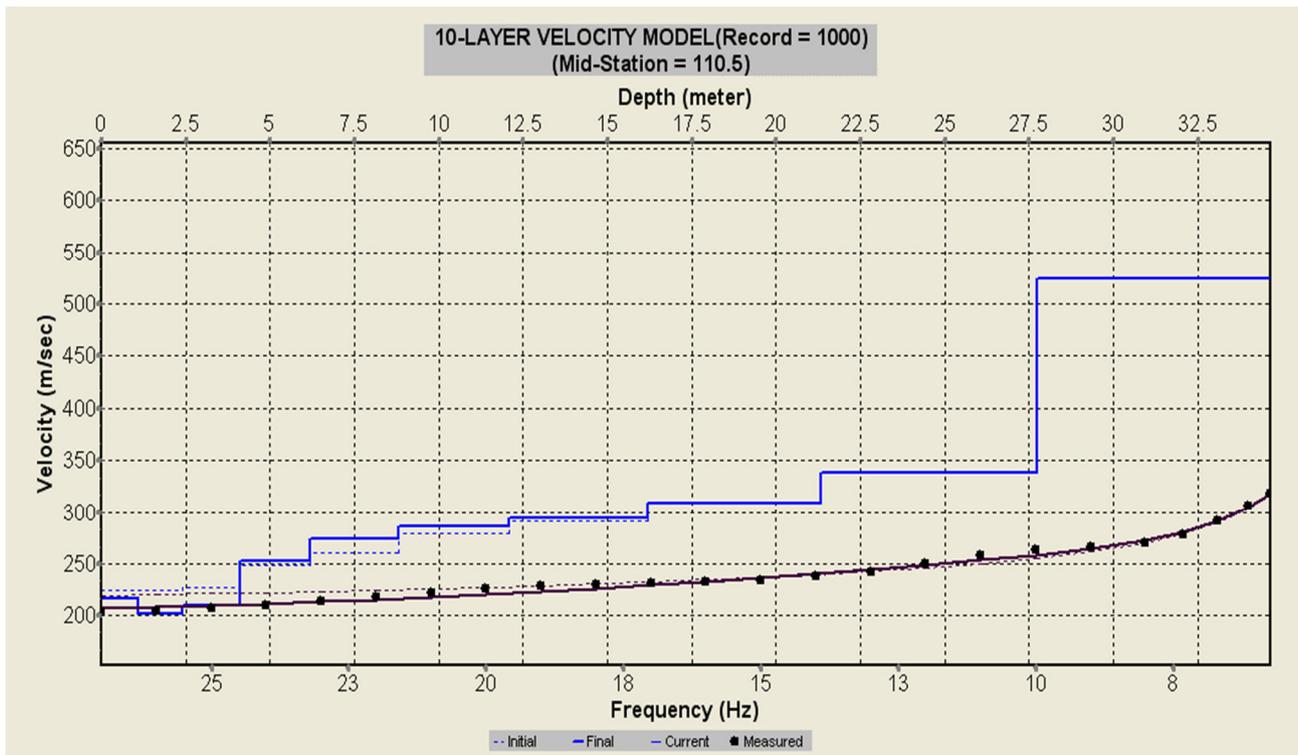


**Esecuzione A\_Masw1**

**Tratto A – MASW 01**



Curva di dispersione



Curve di inversione