

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01e s.m.i.

CUP: J41E91000000009

U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE

PROGETTO PRELIMINARE

LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA

LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA

NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST

ESITI GEOFISICA

SCALA:

-

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

I N O F 2 0 R 6 9 I G G E 0 0 0 1 0 0 1 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione Definitiva			G. Riggi	09.2016	C. Mazzocchi	09.2016		
B	Emissione Definitiva			G. Riggi	06.2017	C. Mazzocchi	06.2017		

ITALFERR S.p.A.
 Dott. Geologo Francesco MARCHESE
 UO GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE
 Ordine Geologi n. 179 ES

File: cartiglio lotto 3

n. Elab.:

INDICE

1 PREMESSA

2 METODOLOGIE DI INDAGINE

3 INDAGINE ELETTROMAGNETICA VLF

3.1 Risultati indagine elettromagnetica

4 INDAGINE DOWN HOLE

4.1 Elaborazioni

4.2 Risultati indagine Down Hole

5 TOMOGRAFIA ELETTRICA

5.1 Strumentazione utilizzata

5.2 Caratteristiche geometriche degli stendimenti

5.3 Risultati indagine elettrica

6 SISMICA A RIFRAZIONE

6.1 Strumentazione utilizzata

6.2 Metodologie operative

6.3 Caratterizzazione elasto-dinamica

6.4 Risultati indagine sismica a rifrazione

ALLEGATI

Allegato 1 Indagine elettromagnetica

Allegato 2 Indagine Down Hole

Allegato 3 Indagine geoelettrica

Allegato 4 Indagine sismica a rifrazione

Allegato 5 Ubicazione indagini

1. PREMESSA

La scrivente, su incarico di Italferr S.p.A., ha eseguito una campagna di misure geofisiche in Comune di Verona, in corrispondenza di 5 punti, ubicati rispettivamente in via Basso Acquar, via Luciano Ligabò, via Campo Marzo, via Contrada Polese e nella nuova palazzina Ferservizi nella stazione di Verona Porta Nuova.

2. METODOLOGIE DI INDAGINE

La campagna di misure Geofisiche condotta, è consistita in indagini di tipo Elettromagnetico con la tecnica VLF, indagini sismiche con misure Down-Hole e sismica a rifrazione, ed indagini geoelettriche. Di seguito si riporta una breve descrizione dei principi base delle diverse tecniche d'indagine ed i relativi risultati.

3. INDAGINE ELETTROMAGNETICA VLF

Il principio del metodo consiste nel misurare il campo magnetico secondario generato da corpi conduttivi sotterranei: il campo VLF è approssimabile ad un campo piano (in condizioni di "far field"); di conseguenza le zone di anomalia sono dovute alla generazione di un campo magnetico secondario, del quale viene misurata la componente verticale H_z . La fig. 1 mostra il principio di funzionamento del metodo.

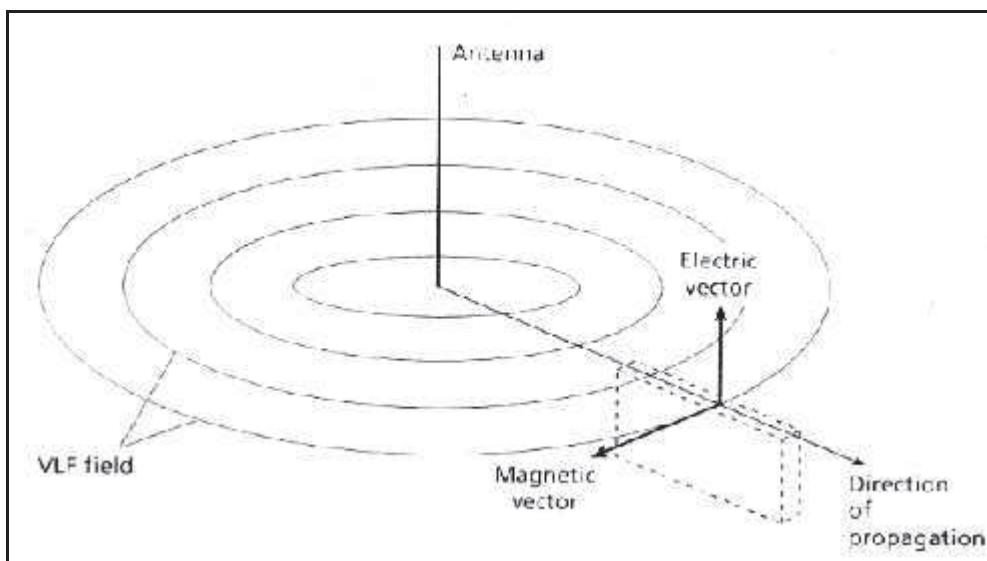


Fig. 1: principio di funzionamento del metodo VLF

La profondità di penetrazione, come per tutti i metodi elettromagnetici, è funzione della conducibilità del mezzo (terreno) e della frequenza utilizzata. Di seguito si riporta la nota formula per il calcolo della “profondità di pelle” (skin depth), oltre la quale l’ampiezza del segnale è diminuita esponenzialmente di un ordine di grandezza (e^{-1}) rispetto al segnale iniziale:

$$\text{Prof. (m)} = 503 (\rho [\Omega\text{m}]/f[\text{Hz}])^{1/2}$$

La figura che segue, a titolo del tutto indicativo, riporta il nomogramma per il calcolo della profondità d’indagine, date la conducibilità del terreno e la frequenza utilizzata.

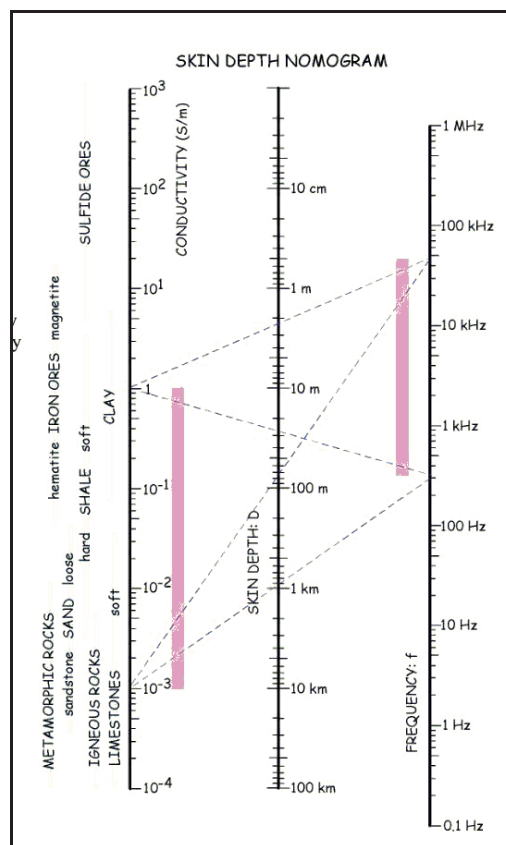


Fig. 2: Nomogramma per il calcolo della profondità d’indagine

Le misure elettromagnetiche sono state effettuate con uno strumento elettromagnetico VLF (Very Low Frequency), mod. EMFAD UG12 DS, in grado di lavorare su più frequenze

simultaneamente. Il range di frequenze varia da 1 kHz a 160 kHz. Il metodo sfrutta il campo elettromagnetico generato da trasmettitori radio. Nel caso non vi siano segnali misurabili, è possibile utilizzare un apposito generatore che è in grado di fornire frequenze comprese tra 19 e 124 kHz.

Ciò che fisicamente viene misurato dallo strumento è la componente verticale del campo magnetico secondario, H_z (A/m), che risulta proporzionale alla conducibilità del terreno indagato: tanto più pronunciata è una eventuale anomalia ad elevata conducibilità, tanto maggiore risulta la componente verticale del campo secondario (si veda la fig. 3).

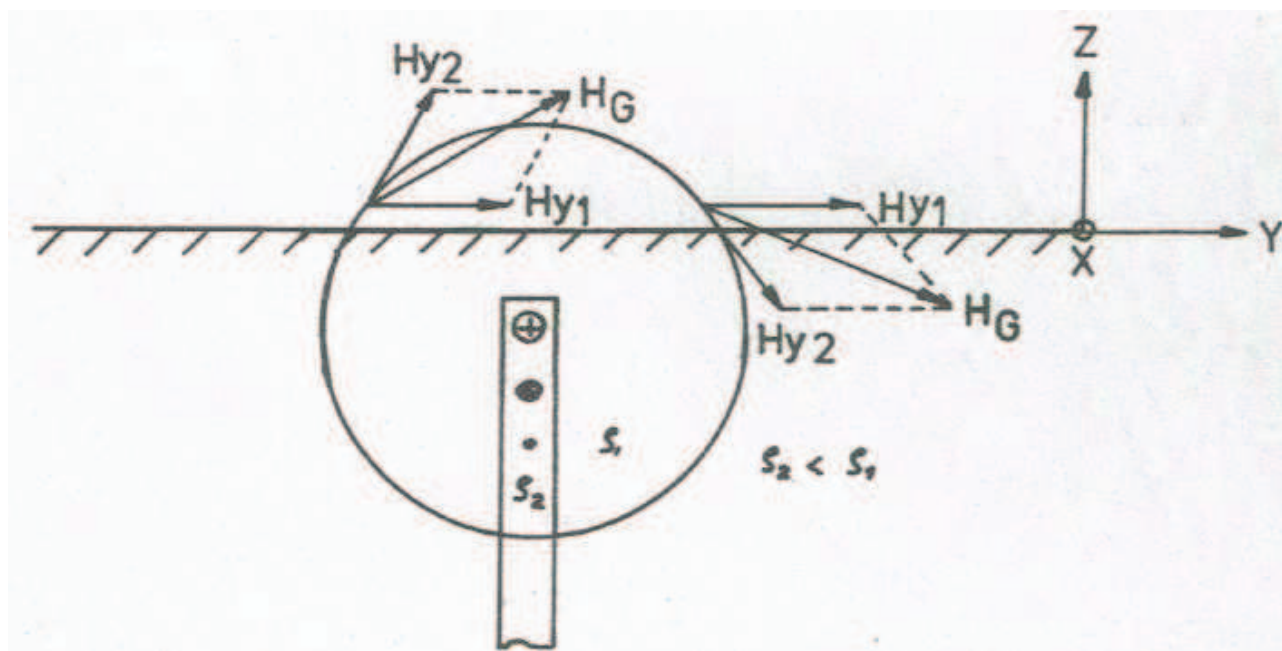


Fig. 3: Formazione della componente verticale del campo magnetico secondario determinato da una piastra conduttiva nel sottosuolo omogeneo

3.1. Risultati indagine elettromagnetica

Di seguito una breve descrizione di quanto rilevato nei siti indagati. Per i dettagli e la mappa delle anomalie si rimanda all'allegato 1.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

Sito n.1 (Via Basso Acquar). Viene riscontrata una zona di anomalia nelle vicinanze del ponte; si consiglia pertanto di allontanarsi da esso di circa 8m. Il punto in cui effettuare il sondaggio è stato segnato sul posto con la vernice rossa.

Sito n.2 (Via Ligabò). Non si riscontra nulla di anomalo. Le variazioni di scala sono basse e i sottoservizi rilevati sul posto sono stati segnalati a terra. Anche qui è stato indicato sul luogo il punto in cui effettuare il sondaggio.

Sito n.3 (Via Campo Marzo). Nell'area risultano presenti numerosi sottoservizi su entrambe i lati della strada ed anche nella parte centrale, segnalati anche sul posto; bisogna quindi prestare particolare attenzione in questa zona. E' stato segnalato anche qui il punto più libero in cui effettuare il sondaggio.

Sito n.4 (Via Contrada Polese). Prestare particolare attenzione in questa zona poichè è presente una linea del metano ben visibile che attraversa il sottopasso (per via aerea) e poi si interra. La linea dovrebbe passare nella zona sud dell'area indagata, delimitata dalla strada privata di accesso. Vengono segnalate due aree di anomalia ai lati dell'area esaminata, quindi si consiglia di effettuare il sondaggio in una posizione "centrale" rispetto al rettangolo indagato. (punto segnato in luogo).

Sito n.5 (Stazione Verona Porta nuova). Nell'area sono stati rilevati numerosi sottoservizi segnalati nell'area. Da evitare la parte meridionale dell'area indagata che corrisponde a quella più prossima alla ferrovia.

E' stato segnalato il punto in cui effettuare il sondaggio.

4. INDAGINE DOWN-HOLE (DH)

In via Basso Acquar è stata effettuata un'indagine sismica di tipo Down-Hole in corrispondenza di un foro di sondaggio attrezzato con tubo in PVC profondo 50 m da p.c.

In particolare, in corrispondenza della verticale di misura, sono state effettuate registrazioni sia per le onde P che per le onde S a intervalli di 1 m, sino alla profondità massima raggiungibile.

Il metodo utilizzato consiste nella misura del tempo necessario per le onde P e S di spostarsi tra una sorgente sismica, posta in superficie in prossimità della bocca foro, e i ricevitori, posti all'interno del foro di sondaggio (fig. 4)

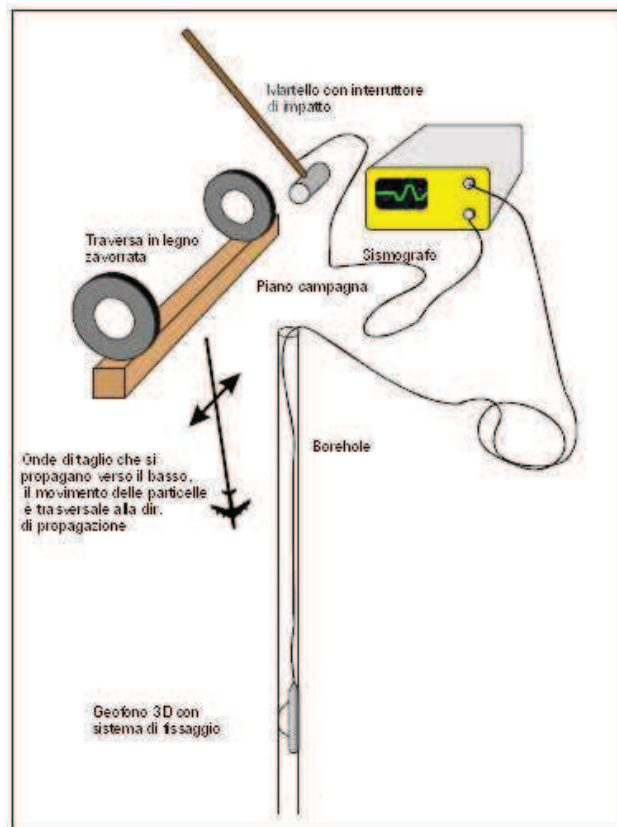


Fig. 4: configurazione utilizzata per le misure effettuate relativamente alle onde di taglio.

Le componenti indispensabili per una misura DH accurata consistono in:

- una sorgente meccanica (massa battente) in grado di generare onde elastiche ricche di energia e direzionali;

- un geofono tridimensionale (o a più componenti), con appropriata risposta in frequenza, dotato di un sistema di ancoraggio alle pareti del tubo-foro;
- un sistema di controllo dell'orientazione dei geofoni in foro (bussola elettronica) ovvero l'utilizzo di un geofono da foro con diversi sensori posti orizzontalmente (nella fattispecie si è utilizzato un geofono con 4 componenti orizzontali e 1 verticale);
- un sismografo multicanale, in grado di registrare le forme d'onda in modo digitale su memoria di massa;
- un trasduttore (trigger) alloggiato nella sorgente necessario per l'identificazione dell'istante di partenza della sollecitazione dinamica mediante massa battente.

Per le misure in questione è stato utilizzato un sismografo a 48 canali mod. ABEM Terraloc Pro a 24 bits con scarico dei dati direttamente su memoria interna. Di seguito si riportano le tabelle con il dettaglio dell'hardware e del software utilizzato:

n°	Strumentazione per le prove Down-Hole
1	Sismografo ABEM "Terraloc Pro" 48 ch - 24 bit - ABEM Instrument - Sweden
1	Cavo di collegamento per il geofono a 5 componenti
1	Geofono 5D da foro GEOTOMOGRAPHIE MOD. bgk5, a frequenza propria di 10 Hz, munito di ancoraggio pneumatico alla parete del foro
1	Mazza di battuta
1	Hammer switch per dispositivo time-break + geofoni verticali
	Cavi e prolunghe per collegamenti vari

Software per interpretazione dati sismici		
Seis TW	ABEM - Sweden	Sistema di gestione del sismografo Terraloc Pro, acquisizione e registrazione dei dati sismici
Geogiga Front-End	Geogiga Corp. - Canada	Editing dati sismici
GeoTomographie Sort & CO	Geotomographie - Germania	Sismica in foro
Software per editing		
Word 2007	Microsoft	Editor di testi
Excel 2007	Microsoft	Foglio di calcolo

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

In corrispondenza della verticale indagata sono state effettuate separatamente energizzazioni e registrazioni per onde P e per onde S con spaziatura di 1,0 m tra misure successive.

La sorgente è sempre stata posta a 2 m di distanza dalla bocca foro.

In particolare, per la generazione delle onde S è stata utilizzata la configurazione riportata anche in fig. 4 secondo il metodo del “plus-minus”, che consiste nella energizzazione a polarità inversa degli impulsi generati con le battute sul trave in legno per la generazione di onde SH, in modo tale da mettere in evidenza le onde S rispetto alle P (che al contrario restano polarizzate nello stesso modo), sovrapponendo le registrazioni ottenute (All. 2). In pratica, per ogni acquisizione delle onde S sono state operate 2 battute agli estremi opposti di un trave in legno, opportunamente zavorrato, mediante massa battente da 10 kg.

In corrispondenza di ogni livello di misura si è provveduto a bloccare il geofono 5D alle pareti del foro, accertandosi che non vi fossero slittamenti.

I dati acquisiti in campagna sono stati quindi elaborati e di ogni foro vengono fornite due elaborazioni distinte: le curve tempi/profondità e le velocità di ogni intervallo.



Fig. 5: sistema di ancoraggio alle pareti del foro

4.1 Elaborazioni

In fase di acquisizione sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- pretrigger 10 ms
- segnale di trigger registrato in corrispondenza di ogni punto di energizzazione a mezzo di geofono trigger (fig. 6)
- finestra di registrazione 163,8 (escluso pretrigger) ms
- tempo (frequenza) di campionamento 0.02 ms (50000 Hz).

Per poter interpretare le misure in modo adeguato, occorre prima di tutto correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde, dal momento che il punto di battuta non coincide con il ricevitore. Se d è la distanza della sorgente dall'asse, r la distanza tra la sorgente e il geofono 3D, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula: $t_{\text{corr}} = z / r \times t$

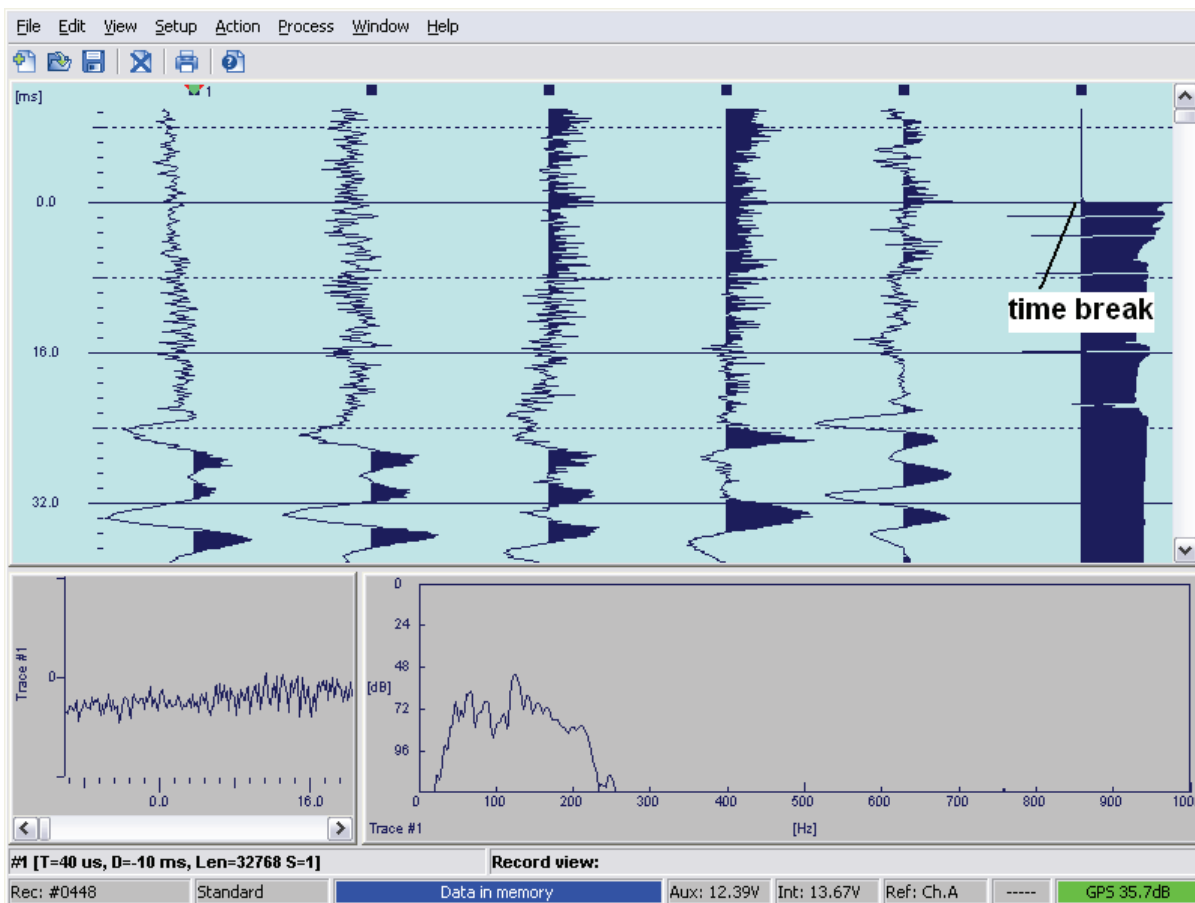


Fig. 6: Screenshot durante le acquisizioni con evidenziato il timebreak registrato su un apposito canale (traccia n. 6); è evidente il pretrigger impostato di 10 ms

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico tempi vs profondità in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è

rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali (vedere grafici allegati).

Il metodo delle velocità di intervallo consente di calcolare le velocità sismiche in corrispondenza di ogni intervallo di misura e quindi, nel presente caso, per ogni metro di profondità. Questo metodo consente di visualizzare puntualmente l'andamento delle velocità e quindi la presenza di livelli particolarmente "veloci" o "lenti".

Le velocità di intervallo vengono calcolate con l'espressione:

$$V_{p,s} = (r_2 - r_1) / (t_{2corr} - t_{1corr})$$

Unico svantaggio di questo metodo è che non tiene conto dei casi in cui $t_2 < t_1$, inoltre nell'interpretazione si assume che i percorsi tra il punto di energizzazione e il punto di acquisizione siano rettilinei e non subiscano rifrazioni: questo porta talvolta a errori nella stima dei valori del coefficiente di Poisson (così come di altri parametri elastici e delle velocità stesse).

Per ogni livello sono poi stati calcolati i seguenti parametri:

Peso di Volume $\gamma_{din} = 0.51 \times V_p^{0.19}$ (V_p in m/s e γ_{din} t/mc)

Coefficiente di Poisson $\nu = [0.5 \times (V_p/V_s)^2 - 1] / [(V_p/V_s)^2 - 1]$

Modulo di taglio $G = \rho V_s^2$

Modulo di Young $E = 2G(1 + \nu)$

Costante di Lamè $\lambda = (\nu \times E) / [(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)]$

Modulo di Volume (Bulk) $K = \lambda \times (2/3G)$.

In particolare, il coefficiente di Poisson dinamico è stato calcolato a partire dalla velocità delle onde longitudinali V_p e di taglio V_s , poiché tra i moduli elastodinamici è l'unico che non richiede la conoscenza della densità per la sua determinazione.

In teoria è considerato stress indipendente e pertanto, nei vari campi di sforzo-deformazioni può assumere valori diversi (il campo di deformazioni oggetto di indagine geofisica è di circa 10^{-6}).

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

In questo campo di deformazione il limite minimo non è rappresentato dal valore di 0.25 tipico di corpi perfettamente elastici, ma può assumere anche valori negativi, come nel caso di sedimenti incoerenti, saturi in aria in cui la disposizione dei granuli è a porosità maggiore di quella esagonale. In generale i valori di questo coefficiente varia tra 0.25 e 0.33, ma nei mezzi porosi il campo di variazione è molto più ampio (anche fino a 0.5).

I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati, in alcuni sedimenti incoerenti e saturi.

In sostanza la procedura seguita in fase di elaborazione è la seguente:

- 1) suddivisione e ordinamento dei segnali registrati ad ogni livello per ogni canale in senso decrescente di profondità onde fornire il dato in forma aggregata, mediante software "Sort" (Geotomographie);
- 2) selezione dei segnali migliori relativamente alle onde SH: per ogni livello misurato si hanno a disposizione 4 registrazioni provenienti da geofoni orizzontali, delle quali è stata scelta sempre quella con ampiezza maggiore (meglio orientata rispetto al punto di energizzazione);
- 3) aggregazione dei segnali così selezionati in un unico file (operazione eseguita sia per le onde S con polarizzazione positiva che negativa, sia per le onde P) mediante software Geogiga FrontEnd;
- 4) analisi dei dati, filtraggio (per tutte le registrazioni è stato utilizzato un filtro taglia alto da 800 Hz) e picking, previo plottaggio sovrapposto delle onde S a diversa polarità (vedere allegato) mediante software "CO" (Cross Over) della Geotomographie;
- 5) calcolo delle velocità registrate, previa correzione per l'offset del punto di energizzazione, e dei principali moduli dinamici.

4.2 Risultati indagine Down-Hole

La colonna indagata è di 50 m. In allegato 2 sono riportati i tracciati relativi a onde P e onde S, la tabella dei parametri sismici, il grafico con le curve tempi-profondità e quello degli intervalli di velocità per ciascun livello indagato.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

Dal punto di vista sismostratigrafico, il grafico tempi-profondità indica che il terreno può essere sostanzialmente suddiviso in 4 layers principali.

Il primo layer, confinato nei primi 10 m da p.c., è contraddistinto da velocità medie V_p e V_s rispettivamente di 1030 e 229 m/s (si vedano i grafici delle curve tempi/profondità).

Il secondo layer, confinato tra 10 a 15m, presenta velocità mediamente più elevate: $V_p= 1500\text{m/s}$ e $V_s= 500\text{m/s}$.

Il terzo layer, tra 15m e 28m da p.c., presenta valori di $V_p= 1585\text{m/s}$ e $V_s= 319\text{m/s}$.

Questo livello in particolare fa registrare una inversione di velocità delle onde di taglio, in accordo a quanto rilevato nel log stratigrafico, dove si ha un livello meno addensato tra -15 e -21 m da p.c.; le onde P non mostrano variazioni in quanto tale strato si trova sotto quota falda (come noto le onde compressionali si propagano nell'acqua a velocità prossima a 1400 m/s). Anche il grafico degli intervalli di velocità mostra la presenza di livelli molto lenti.

Infine il quarto livello posizionato dai 28m fino a fine sondaggio con valori di V_p e V_s rispettivamente di 1764m/s e 729m/s.

Le velocità medie rilevate confermano quanto trovato dal sondaggio geognostico, ovvero un'alternanza di ghiaie e sabbie per tutta la lunghezza del sondaggio con valori di velocità che aumentano uniformemente negli starti più profondi, ad eccezione del livello di cui sopra.

5. TOMOGRAFIA ELETTRICA

Nei pressi di Via Luciano Ligabò e di Via Campo Marzo sono stati realizzati due profili di tomografia elettrica.

METODO DELLA RESISTIVITA'

La resistività elettrica rappresenta una delle proprietà fisiche più utilizzate per l'esplorazione geofisica del sottosuolo, grazie soprattutto all'ampio spettro di valori che essa può assumere al variare della natura dei corpi investigati.

Questa metodologia rappresenta uno dei sistemi d'indagine più conosciuti e affidabili, le cui principali applicazioni consentono di ricostruire la stratigrafia di massima dei terreni, rilevare la presenza di strutture sepolte, effettuare ricerche idriche o di acquiferi a diverso grado salino, monitorare movimenti degli acquiferi stessi o di fluidi in generale, mappare siti contaminati. Tale sistema d'indagine consente di ottenere la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, elettricamente disomogeneo, immettendo una corrente continua mediante due elettrodi conficcati nel terreno, detti convenzionalmente AB, e misurando contemporaneamente la differenza di potenziale (d.d.p.) associata al campo elettrico generato tra due elettrodi distinti dai primi, detti convenzionalmente MN (fig.7).

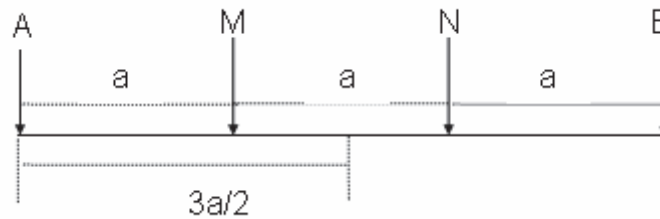


Fig. 7. Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo WENNER, comunemente utilizzato per l'acquisizione di dati di resistività elettrica. AB: elettrodi di corrente; MN: elettrodi di potenziale.

Variando la distanza tra gli elettrodi A e B, o tra M e N, o tra AB e MN, e misurando ogni volta la corrente immessa agli AB e la differenza di potenziale "d.d.p." risultante agli MN, si ottiene la resistività detta apparente, secondo la formula:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \text{ dove } k = \pi \frac{AM * AN}{MN} \quad (\Omega m)$$

in cui k è la costante geometrica del dispositivo quadripolare e dipende soltanto dalle distanze interelettrode.

Il valore di resistività apparente varia in funzione: a) della posizione reciproca degli elettrodi A, B, M e N (quadripolo elettrico), in quanto parti diverse del corpo vengono investigate dal passaggio della corrente; b) dalla misura della risposta in termini di d.d.p..

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

A causa della loro maggiore convenienza in termini di tempi di esecuzione delle misure, la pratica geofisica ha privilegiato alcune combinazioni dei 4 elettrodi A, B, M e N, come ad esempio quella di fig 1, detta quadripolo "**Wenner**", dove gli elettrodi sono equidistanziati e sullo stesso asse.

A passo costante (distanza interelettrodica) corrisponde una profondità di investigazione all'interno del terreno all'incirca costante, mentre per ottenere un'informazione a diverse profondità occorre allargare progressivamente il passo del quadripolo.

Nel presente lavoro è stato utilizzato un altro tipo di dispositivo che ha rivelato una maggior efficacia nelle indagini in terreni come quello in oggetto. Questa geometria quadripolare corrisponde al cosiddetto "**gradiente multiplo**" (Multiple Gradient Array), che presuppone la disponibilità di uno strumento multicanale in grado di effettuare sino a 4 misure di resistività contemporaneamente. In questo caso si mantiene fissa la posizione degli elettrodi di corrente, traslando quelli di potenziale e misurando di volta in volta la d.d.p.

La schematizzazione del dispositivo tipo "Gradient Array" è riportata in fig.8, con C_1 C_2 elettrodi di corrente e p_1 p_2 elettrodi di potenziale.

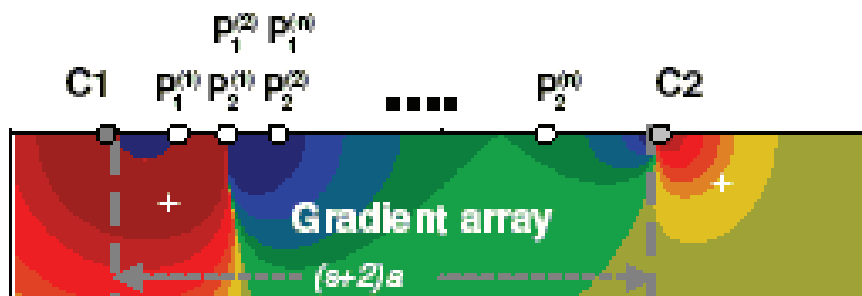


Fig. 8. Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo "Gradient array", utilizzato per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica

La maggior efficacia di queste misure sta nel fatto che esse risultano avere una grande capacità risolutiva sia in senso verticale che laterale. Essendo però composte da un numero di punti di misura molto elevato rispetto ai dispositivi elettrodici "tradizionali", non sono molto praticate, in quanto richiedono una strumentazione particolarmente sofisticata.

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.
	INOF	20	R69	IGGE0001001	B	15 di 23

La **tomografia elettrica** rappresenta la tecnica di indagine geoelettrica che permette di acquisire informazioni in simultanea dipendenza della profondità e della distanza orizzontale interelettrodica, e che quindi consente di ottenere informazioni reali sui valori di resistività sia in senso verticale che laterale (lungo cioè una sezione bidimensionale).

Questa metodologia di misura, che nella pratica geofisica costituisce l'evoluzione attuale della nota prospezione geoelettrica, è stata messa a punto alcuni anni fa sfruttando i progressi dell'elettronica, sia per un'acquisizione automatica sul campo che per un'interpretazione dei dati in termini bi- e tri-dimensionali.

Tale tecnica permette di disporre sul terreno da investigare un numero elevato di elettrodi (32, 64 o più), con distanza reciproca dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste; attraverso gli elettrodi viene alternativamente inviata corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza pre-programmata. Si ottiene così l'andamento sia verticale che laterale della resistività apparente, che è uso rappresentare in forma di pseudosezione, ossia come tabella di valori organizzati in un piano di riferimento dove sull'asse orizzontale si riporta un valore corrispondente alla distanza sul terreno tra gli elettrodi più esterni, e sull'asse verticale un'ordinata ricavata dalla complessiva larghezza del quadripolo.

Il risultato è quindi una figura bidimensionale nella quale tutti i punti di eguale resistività apparente vengono collegati da una curva detta isoresistiva. Questo quadro deve essere quindi opportunamente "interpretato" in modo da poter desumere dalle resistività apparenti i valori della resistività reale e la geometria della sua distribuzione.

5.1 Strumentazione utilizzata

Nelle indagini è stato utilizzato un georesistivimetro mod. ABEM Terrameter LS con compensazione automatica dei potenziali spontanei.

Il trasmettitore di corrente opera con correnti da 0.2 a 2500 mA, con un voltaggio massimo di ± 600 V ed un impulso t di corrente variabile da 0.1 a 4 sec. Il ricevitore, a quattro canali, ha un'impedenza min. di 10 M Ω . La precisione di $\Delta V/I$ risulta superiore allo 0.5%.

I dati sono stati elaborati e interpretati in termini di profilo di resistività mediante il software Resistivity Imager 2D[®] prodotto dalla Geotomographie.

5.2 Caratteristiche geometriche degli stendimenti

Come già anticipato sono stati realizzati in tutto 2 stendimenti lineari, con interdistanza tra gli elettrodi di 2 m.

La lunghezza totale di ogni stendimento è risultata la seguente:

n. profilo	n. elettrodi	lungh. totale (m)	Offset elettrodi
1	64	126	2
2	64	126	2

La profondità d'indagine raggiunta è di circa 25 m da p.c. per entrambe i profili.

Le coordinate degli stendimenti sono:

Prof. 1, Via Ligabò: 45.432905; 11.010363 / 45.433181; 11.011901

Prof. 2, Via Campo Marzo: 45.430947; 11.007093 / 45.431385; 11.008077.

5.3 Risultati indagine elettrica

Le sezioni di tomografia elettrica con i profili di resistività sono riportate in allegato 3; esse riproducono il modello di resistività reale del terreno ottenuto dall'inversione dei dati di campagna.

I valori rilevati nei 2 profili sono simili e presentano un range di resistività compreso tra 70 e 1450 ohm x m. La resistività nella parte sommitale risulta molto alta ed in entrambi i profili si nota un livello con valori elevati (colore rosso) più o meno costante che si spinge fino alla profondità di circa 10m. Tali valori sono dovuti alla presenza di materiale di riporto grossolano e

molto asciutto in superficie, e dalla presenza di ghiaia naturale. Al di sotto di tale livello i valori calano drasticamente andando a delineare un secondo layer a bassa resistività di colorazione blu. Questo livello coincide con la presenza della falda.

6. SISMICA A RIFRAZIONE

Nei pressi di Via Basso Acquar sono stati realizzati due profili di sismica a rifrazione in corrispondenza di due spalle del ponte che attraversa il fiume Adige. I due profili sono paralleli l'uno all'altro ed hanno ognuno una lunghezza di 250m.

Come è noto, la velocità di propagazione delle onde sismiche cambia al passaggio fra i terreni in funzione principalmente della loro densità e del modulo elastico. La velocità di propagazione delle onde sismiche può infatti variare in funzione del grado di compattazione / cementazione di uno stesso litotipo.

L'elaborazione e interpretazione dei dati acquisiti sono riassunti nell'allegato 4.

6.1 Strumentazione utilizzata

n°	Strumentazione per i profili sismici
1	Sismografo ABEM "Terraloc Pro" 48 ch - 24 bit ABEM Instrument - Sweden
24	Geofoni verticali con frequenza pari a 14 e orizzontali a 40 Hz
2	Cavi geofonici con 24 take-outs
1	Hammer switch per dispositivo time-break

Software per interpretazione dati sismici		
Abem SeisTW	Abem - Sweden	Sistema di gestione del sismografo Terraloc Pro, acquisizione e registrazione dei dati sismici
Geogiga DW Tomo	Geogiga Corp. - Canada	Tomografia sismica
Software per editing		
Word 2007	Microsoft	Editor di testi
Corel Draw	Corel	Impaginazione allegati

6.2 Metodologie operative

Gli stendimenti sismici sono stati eseguiti con array lineare: sono stati utilizzati 48 geofoni verticali e 48 orizzontali. Sono stati effettuati 9 shots per entrambi gli stendimenti dei quali 4 esterni al profilo e 5 interni. Le geometrie utilizzate sono riassunte nella tabella che segue.

Profilo sismico a rifrazione n°	Tipologia di acquisizione	Interdistanza Geofoni (m)	Geofoni n°	Lunghezza complessiva * (m)
1	onde P-S	5	48	250
2	onde P-S	5	48	250

Geometria stendimenti sismica a rifrazione inclusi shots esterni

Le coordinate degli stendimenti sono:

Prof. 1: 45.426641; 10.993956 / 45.428473; 10.994948

Prof. 2: 45.425719; 10.995622 / 45.427813; 10.996696

In definitiva, l'analisi ha conseguito i seguenti scopi:

- determinazione del numero di intervalli sismici;
- determinazione delle velocità sismiche di ogni intervallo;
- determinazione delle potenze di ogni intervallo.

Per le misure è stato utilizzato un sismografo a 48 canali mod. ABEM Terraloc Pro a 24 bits con scarico dei dati direttamente su memoria interna.

Il sismografo consente di amplificare e di filtrare il segnale stesso per una lettura più precisa dei primi arrivi. E' inoltre dotato del dispositivo "signal enhancement", la qual cosa facilita il riconoscimento dei primi arrivi nel caso che il segnale risultasse troppo debole.

L'inizio delle registrazioni è determinato da un interruttore (trigger) che chiude il circuito elettrico nell'istante dello shot. Questo consente di conoscere il momento di partenza del treno d'onde generato.

I dati acquisiti in campagna sono stati elaborati tramite il software DW Tomo della Geogiga Technology Corp.

La tomografia sismica è una tecnica cosiddetta di “Imaging” che consente di ricostruire una sezione bidimensionale di velocità sismica dei terreni, mediante l’analisi di una molteplicità di percorsi di onde sismiche fra stazioni trasmettenti, corrispondenti ai punti di energizzazione e i singoli geofoni dello stendimento.

L’elaborazione consiste essenzialmente nella risoluzione di un problema inverso a partire da una griglia bidimensionale di celle, a cui è possibile attribuire una velocità sismica iniziale. Modificando i valori di velocità di ciascuna cella, si cerca di ridurre in modo iterativo, la differenza esistente fra i dati calcolati e quelli realmente misurati sul terreno. Il risultato finale è costituito da un modello di velocità sismiche del terreno, che meglio risponde alle misure sperimentali.

In particolare, il programma utilizzato (DW Tomo della Geogiga Corp. – Canada), utilizza algoritmi genetici nel processo iterativo.

La figura che segue (fig. 9) visualizza i vari passaggi del processing: dal dato di campagna (sismogramma) si passa al riconoscimento dei primi arrivi (l’istante in cui arriva il treno d’onde generato) per la ricostruzione delle curve dromocrone (curve tempi-distanze), a seguito del quale si impostano i parametri di inversione del dato per arrivare alla sezione sismica tomografica.

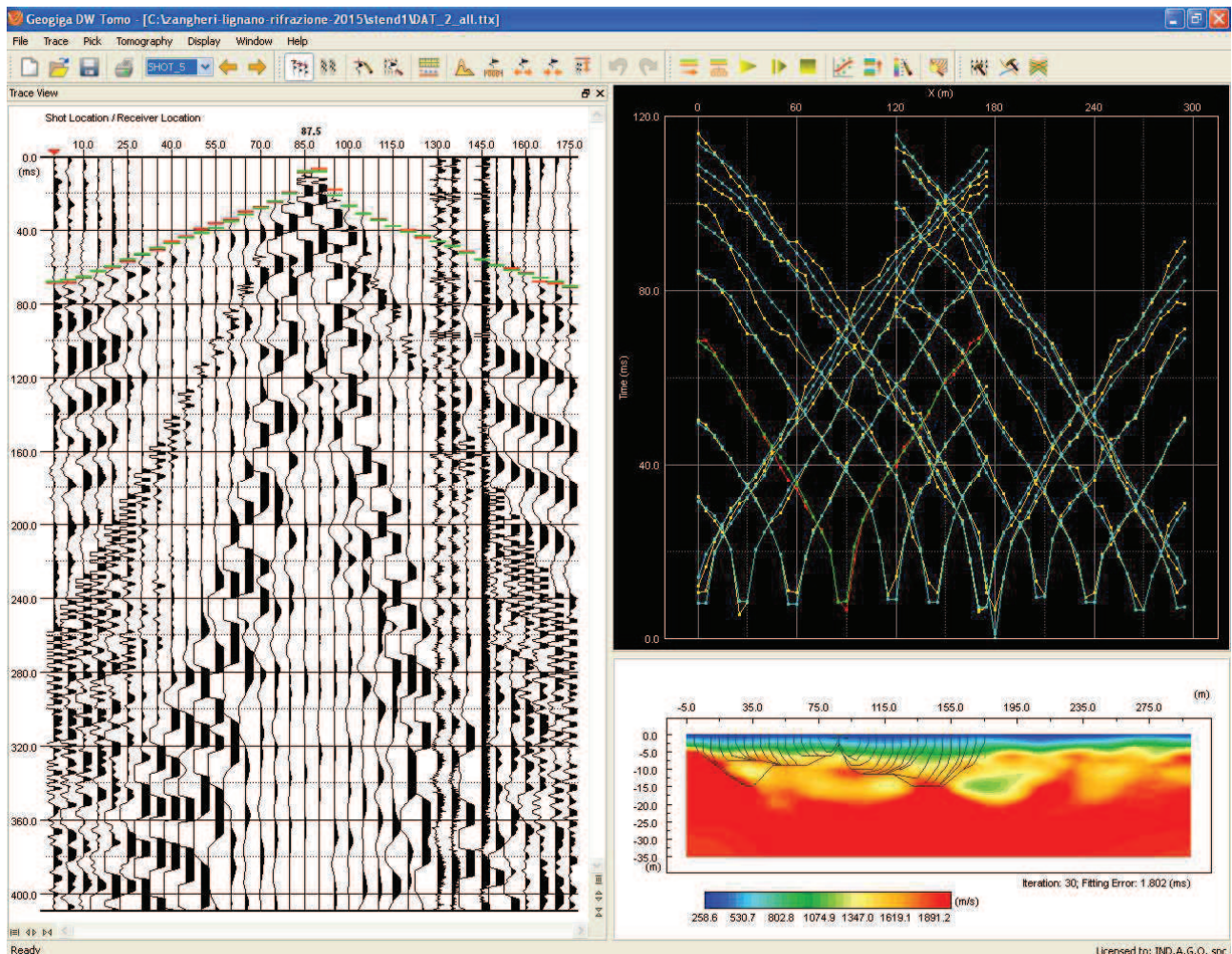


Fig. 9: Esempio di processing dei dati

6.3 Caratterizzazione elasto-dinamica

L'importanza di una corretta valutazione della velocità delle onde di compressione e di taglio, insieme con la densità del mezzo attraversato, è fondamentale per una giusta determinazione dei parametri elasto-dinamici del mezzo.

Determinare esattamente i valori dei moduli che caratterizzano il mezzo permette di ottenere utili informazioni circa la sua natura e il tipo di risposta alle sollecitazioni dinamiche. I principali parametri elastici dinamici, per la loro determinazione, hanno bisogno della misura sul campo sia della velocità di propagazione delle onde P che delle onde S.

Coefficiente di Poisson dinamico

Il coefficiente di Poisson dinamico può essere calcolato a partire dalla velocità delle onde longitudinali V_p e di taglio V_s , poiché tra i moduli elastodinamici è l'unico che non richiede la conoscenza della densità per la sua determinazione, ed è definito dalla seguente relazione:

$$\sigma = \frac{1}{2} * \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$$

In teoria è considerato stress indipendente e pertanto, nei vari campi di sforzo-deformazioni può assumere valori diversi (il campo di deformazioni oggetto di indagine geofisica è di circa 10^{-6}).

In questo campo di deformazione il limite minimo non è rappresentato dal valore di 0.25 tipico di corpi perfettamente elastici, ma può assumere anche valori negativi, come nel caso di sedimenti incoerenti, saturi in aria in cui la disposizione dei granuli è a porosità maggiore di quella esagonale. In generale i valori di questo coefficiente varia tra 0.25 e 0.33, ma nei mezzi porosi il campo di variazione è molto più ampio (anche fino a 0.5).

I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati; in alcuni sedimenti incoerenti e saturi i valori possono risultare uguali o superiori a 0.49, mentre nelle sospensioni assume il valore di 0.5. In generale riesce a discriminare rocce in posto, anche se estremamente alterate, dai depositi recenti quali colluvioni, accumuli di frana, etc..

Altri parametri elastici determinabili a partire dalle velocità V_p e V_s sono:

$$\gamma_{din} = \text{peso di volume} = 0.51 \cdot V_p^{0.19} \text{ m/sec} \quad (\gamma_{din} \text{ in T/m}^3)$$

G = modulo di taglio dinamico

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

	LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST					
	ESITI GEOFISICA	COMMESSA INOF	LOTTO 20	CODIFICA R69	DOCUMENTO IGGE0001001	REV. B

E = modulo elastico dinamico

Lame' = costante di Lame'

$$\mu = \frac{E \nu (2E G) \cdot (1 + \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

Bulk = modulo di compressibilità volumetrico

$$k = \mu + 2/3 \cdot G$$

6.4 Risultati indagine sismica a rifrazione

I due profili sono stati realizzati come citato, sui due argini del fiume Adige in corrispondenza delle spalle del ponte che lo attraversa.

Le due sezioni appaiono del tutto simili, con un range di velocità compreso tra circa 750 e 2000 m/s per le onde P e da 350 a 1000 m/s per le onde S.

Entrambi i profili sono in accordo con la prova down-hole realizzata: si ha infatti un primo layer più superficiale con velocità più basse (fino a circa 1200-1500 m/s) associabile a materiale prevalentemente grossolano.

Al di sotto le velocità aumentano rapidamente definendo un maggior grado di addensamento. Come noto, infatti, la sismica a rifrazione non consente di vedere le inversioni di velocità (particolarmente se a una certa profondità), per cui il risultato ottenuto necessariamente va integrato con i risultati della prova Down-Hole.



LINEA AV/AC MILANO - VENEZIA
LOTTO FUNZIONALE TRATTA AV/AC VERONA-PADOVA
NODO AV/AC DI VERONA: INGRESSO EST

ESITI GEOFISICA

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOF	20	R69	IGGE0001001	B	23 di 23

ALLEGATI

- Allegato 1** Indagine elettromagnetica
- Allegato 2** Indagine Down Hole
- Allegato 3** Indagine geoelettrica
- Allegato 4** Indagine sismica a rifrazione
- Allegato 5** Ubicazione indagini

ALLEGATO 1- MISURE VLF

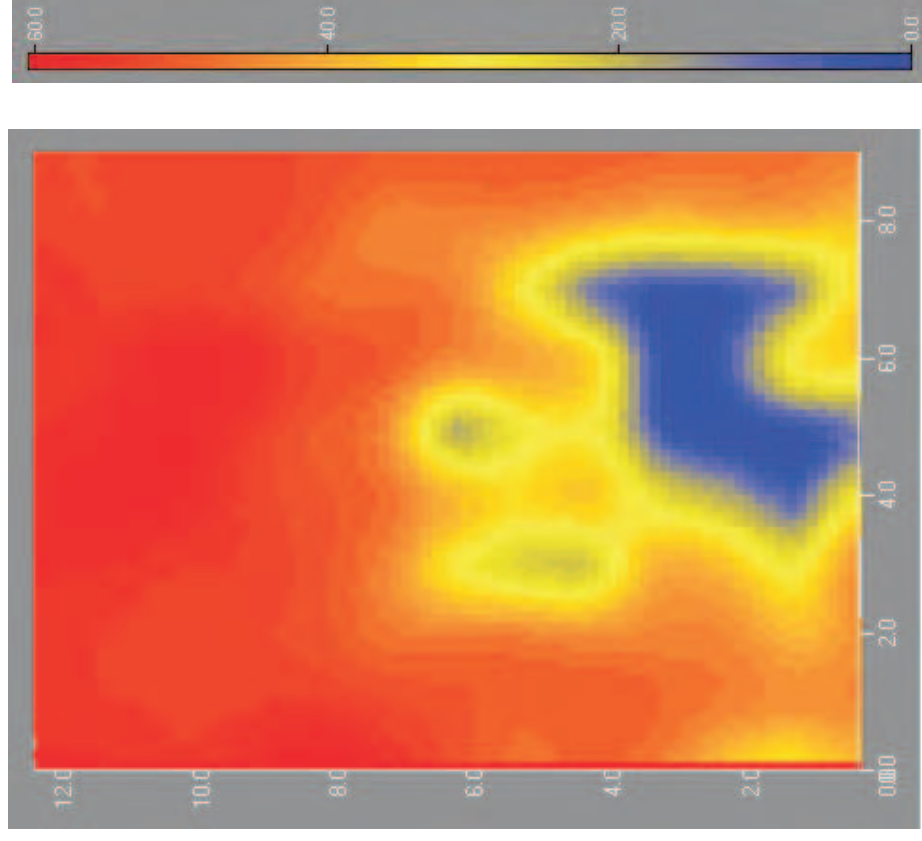
VERONA - VIA BASSO ACQUAR



Ortofoto con indicazione dell'area di indagine



Dettaglio dell'area indagata



Mappa delle anomalie

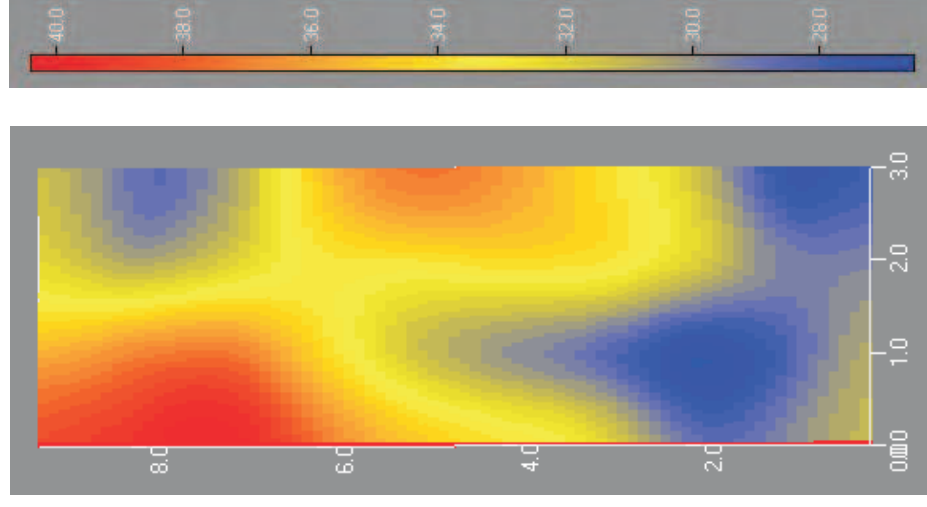
VERONA - VIA LIGABO'



Ortofotografia con indicazione dell'area di indagine



Dettaglio dell'area indagata



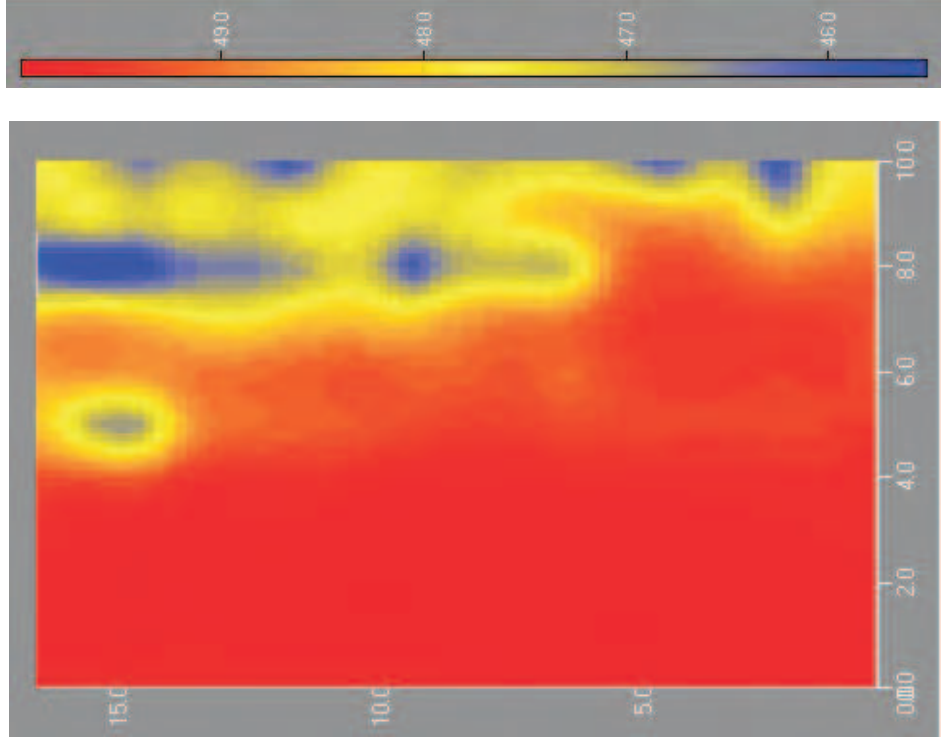
VERONA VIA CAMPO MARZO



Ortofoto con indicazione dell'area di indagine



Dettaglio dell'area indagata



Mappa delle anomalie

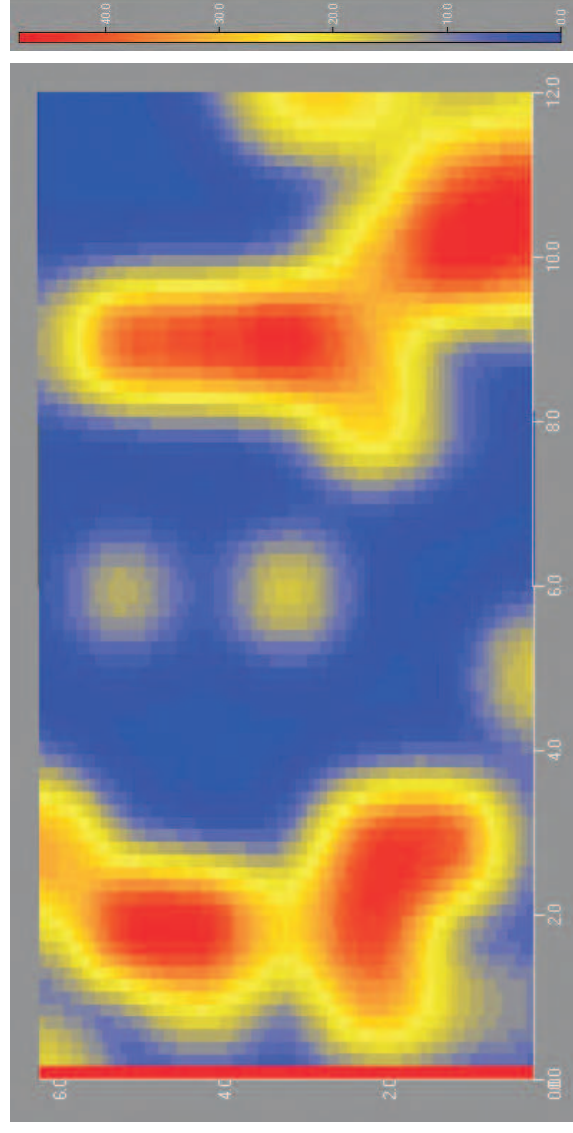
VERONA - VIA CONTRADA POLESE



Ortofoto con indicazione dell'area di indagine



Dettaglio dell'area indagata



Mappa delle anomalie

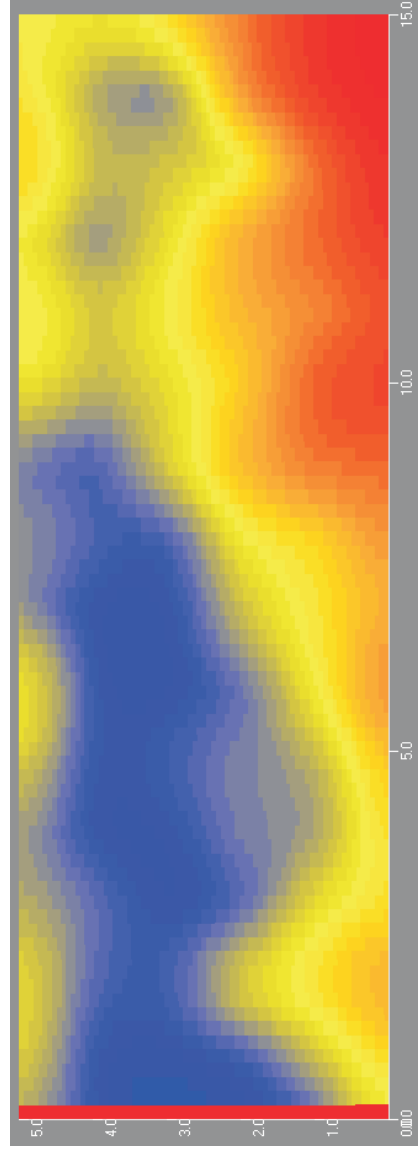
STAZIONE VERONA PORTANUOVA



Ortofoto con indicazione dell'area di indagine



Dettaglio dell'area indagata



Mappa delle anomalie

Allegato 2 Indagine Down Hole

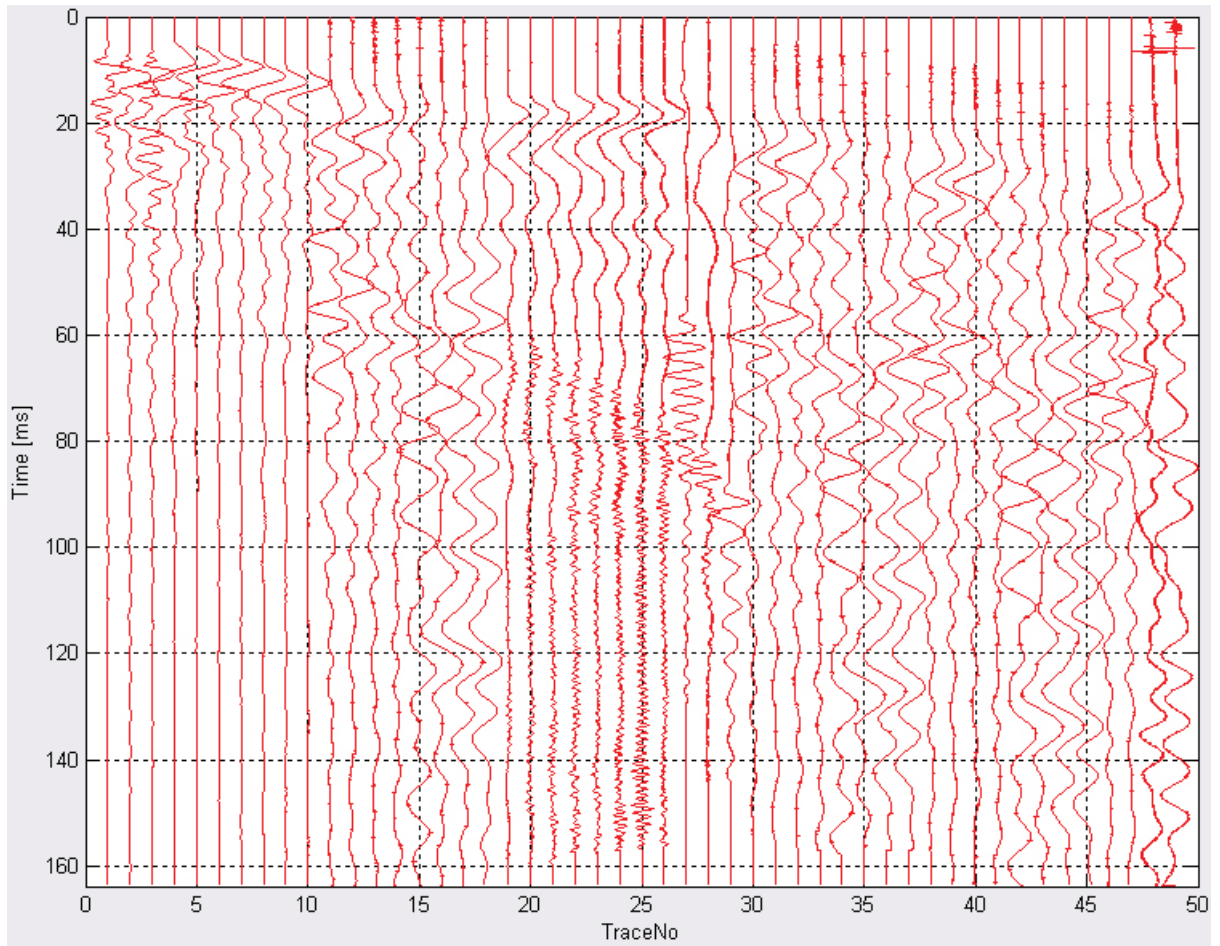
ALLEGATO 2

Indagine Down Hole



Fase di acquisizione dati

TRACCIATO ONDE P



TRACCIATO ONDE S (PLUS _ MINUS)

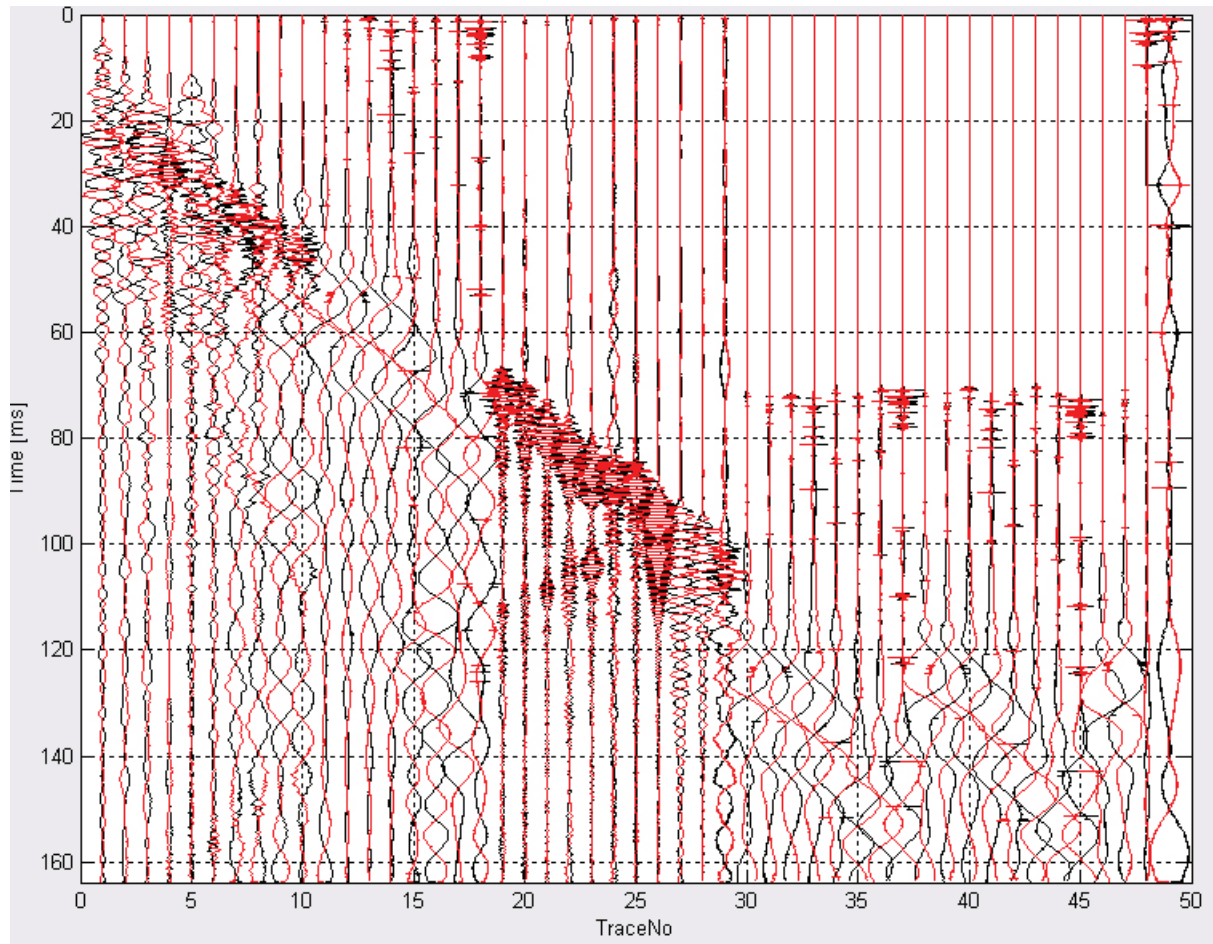


TABELLA PARAMETRI SISMICI

Prof. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Densità (t/mc)	Poisson	G (MPa)	E (MPa)	Lamè	Bulk
-1.00	1466	397	3.69	2.04	0.46	321	939	3738	3953
-2.00	431	126	3.42	1.61	0.45	26	75	249	266
-3.00	920	195	4.72	1.86	0.48	71	209	1435	1483
-4.00	1460	154	9.49	2.04	0.49	48	144	4241	4273
-5.00	1566	239	6.56	2.06	0.49	118	350	4826	4905
-6.00	816	233	3.50	1.82	0.46	99	289	1017	1083
-7.00	1029	191	5.40	1.91	0.48	69	205	1880	1926
-8.00	1393	270	5.15	2.02	0.48	148	437	3623	3722
-9.00	868	447	1.94	1.84	0.32	368	971	653	898
-10.00	1108	505	2.20	1.93	0.37	492	1348	1388	1716
-11.00	1344	320	4.20	2.00	0.47	205	604	3207	3344
-12.00	1237	612	2.02	1.97	0.34	738	1975	1546	2038
-13.00	2544	1007	2.52	2.26	0.41	2296	6462	10045	11576
-14.00	2386	778	3.07	2.24	0.44	1353	3898	10024	10926
-15.00	732	204	3.59	1.79	0.46	74	216	808	857
-16.00	3180	475	6.70	2.36	0.49	532	1583	22811	23166
-17.00	968	136	7.14	1.88	0.49	35	103	1697	1720
-18.00	2493	296	8.42	2.25	0.49	198	590	13617	13749
-19.00	1429	346	4.13	2.03	0.47	242	712	3657	3818
-20.00	1966	516	3.81	2.15	0.46	574	1680	7180	7563
-21.00	1238	875	1.41	1.97		1512	3025		1009
-22.00	1414	252	5.61	2.02	0.48	128	381	3792	3878
-23.00	1975	376	5.25	2.16	0.48	306	905	7800	8004
-24.00	1977	411	4.81	2.16	0.48	364	1076	7706	7948
-25.00	1980	323	6.12	2.16	0.49	226	671	8002	8152
-26.00	1981	324	6.12	2.16	0.49	226	672	8018	8169
-27.00	1655	264	6.27	2.09	0.49	145	432	5419	5516
-28.00	1244	451	2.76	1.98	0.42	402	1144	2252	2520
-29.00	1421	343	4.14	2.03	0.47	238	700	3614	3773
-30.00	1986	1399	1.42	2.16	0.01	4225	8516		2884
-31.00	1987	824	2.41	2.16	0.40	1466	4093	5595	6572
-32.00	2482	473	5.24	2.25	0.48	505	1495	12860	13196
-33.00	1989	452	4.40	2.16	0.47	441	1300	7660	7955
-34.00	1914	585	3.27	2.14	0.45	732	2122	6385	6873
-35.00	1133	452	2.50	1.94	0.41	397	1116	1698	1962
-36.00	1108	709	1.56	1.93	0.15	973	2243	428	1076
-37.00	1424	663	2.15	2.03	0.36	890	2424	2330	2923
-38.00	1992	524	3.80	2.16	0.46	593	1735	7383	7778
-39.00	2488	622	4.00	2.25	0.47	872	2557	12204	12785
-40.00	1425	828	1.72	2.03	0.24	1391	3462	1334	2261
-41.00	2489	903	2.76	2.25	0.42	1839	5239	10284	11510
-42.00	1425	829	1.72	2.03	0.24	1393	3466	1332	2260
-43.00	1662	1241	1.34	2.09		3212	5598		1484
-44.00	1426	1241	1.15	2.03		3123			
-45.00	1663	623	2.67	2.09	0.42	810	2297	4150	4690
-46.00	1995	905	2.20	2.16	0.37	1769	4849	5057	6236
-47.00	1995	1105	1.80	2.16	0.28	2639	6749	3319	5079
-48.00	2492	1440	1.73	2.25	0.25	4673	11678	4656	7771
-49.00	2432	522	4.66	2.24	0.48	612	1807	12046	12454
-50.00	2036	1106	1.84	2.17	0.29	2654	6850	3686	5455

CURVA TEMPI - PROFONDITA'
(blu = V_p ; rosso = V_s)

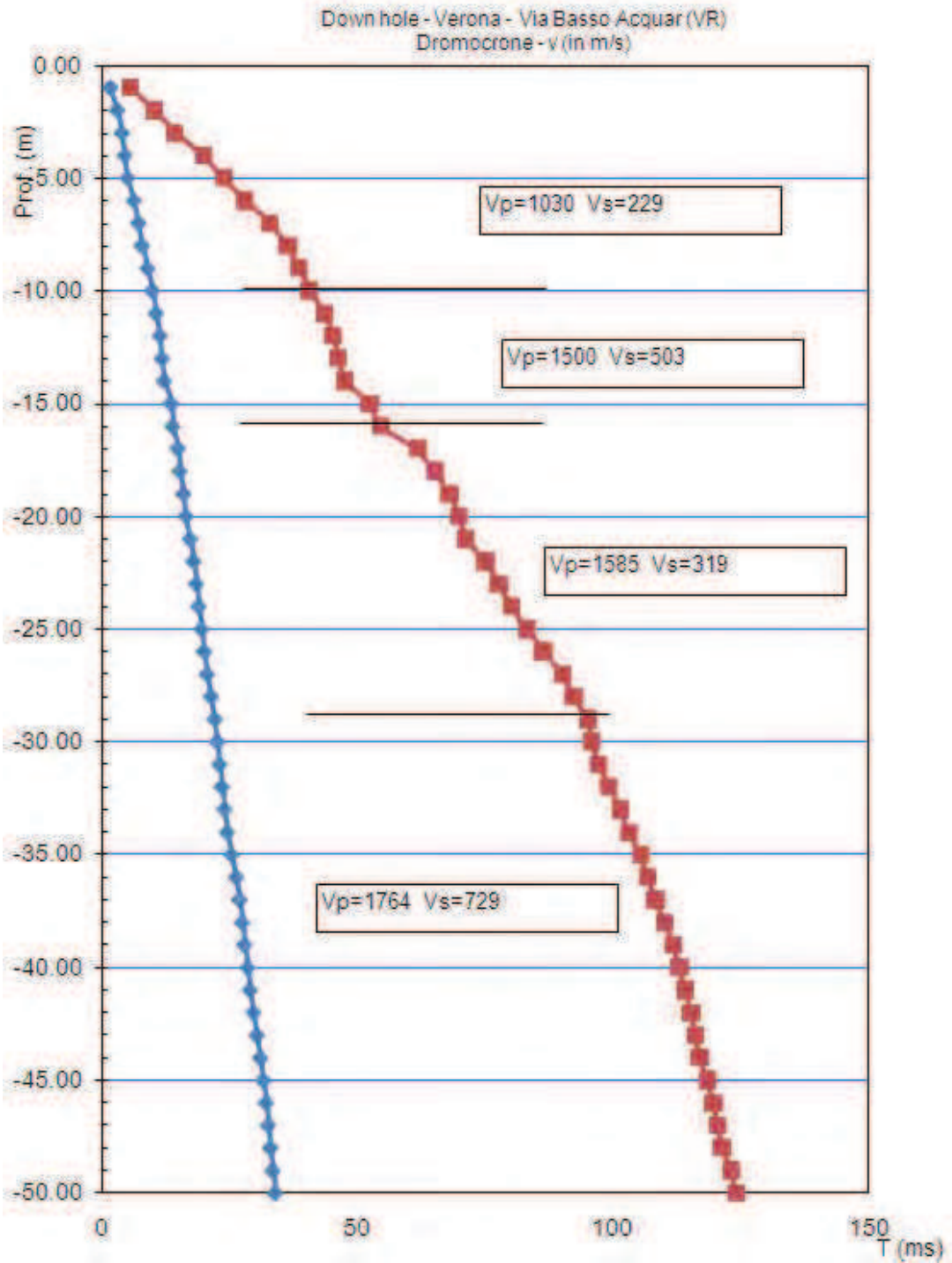
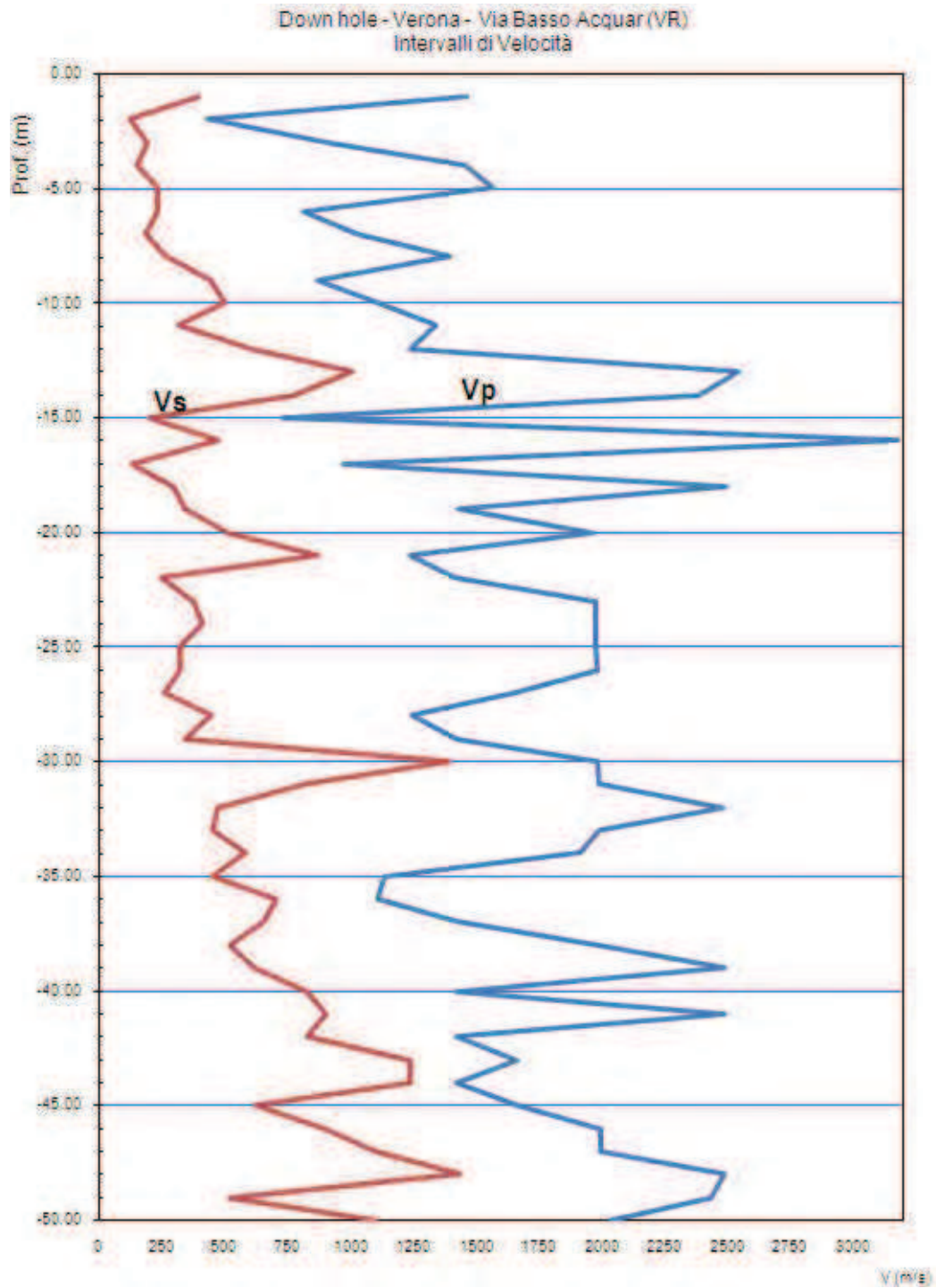
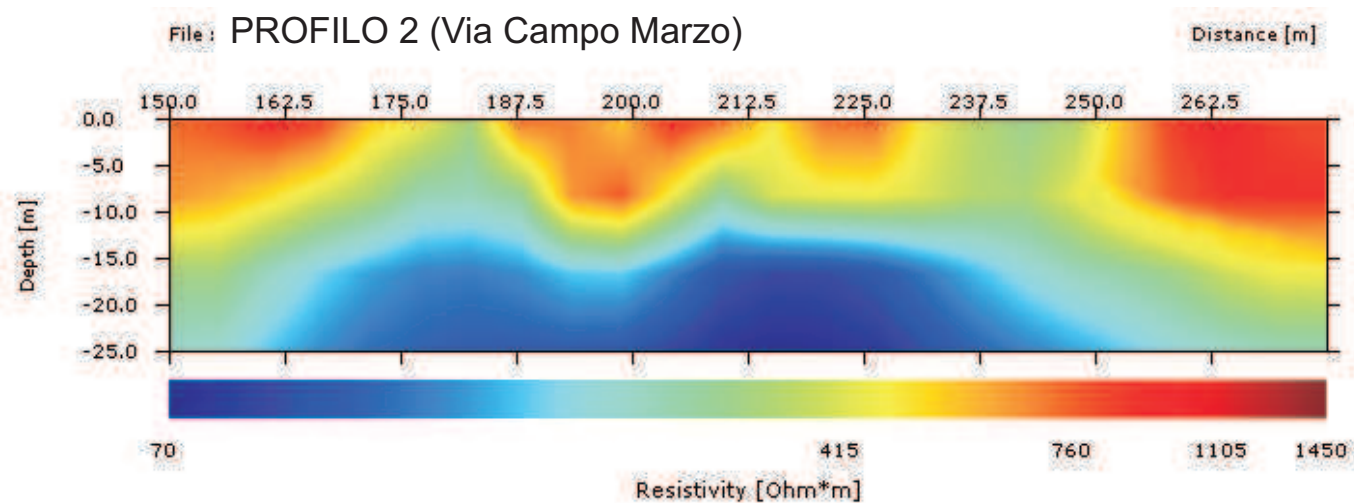
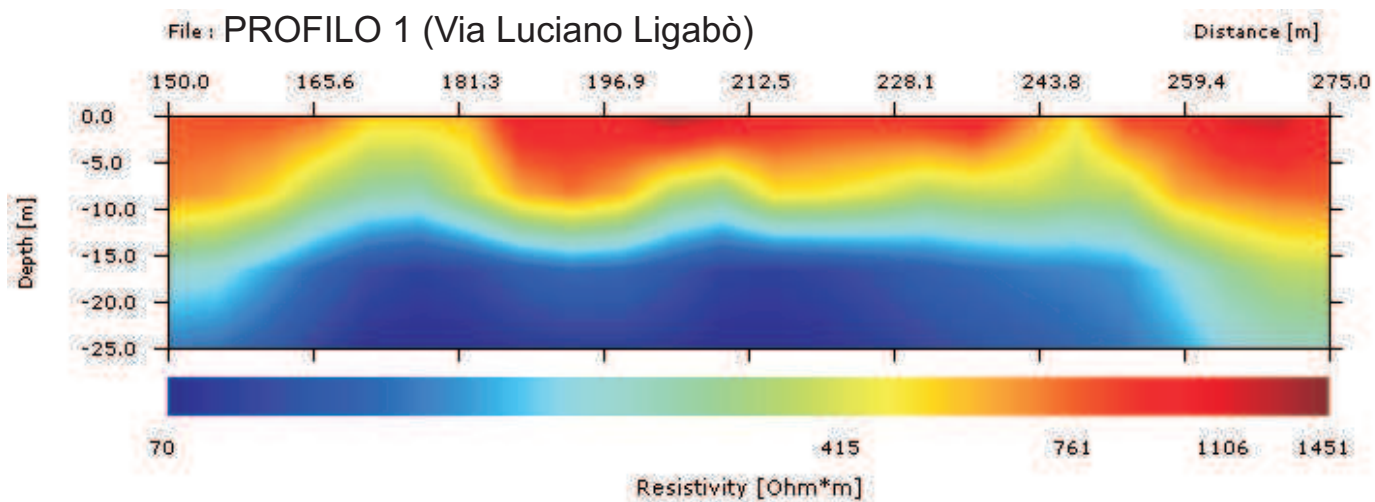


GRAFICO INTERVALLI DI VELOCITA'



Allegato 3 Indagine geoelettrica

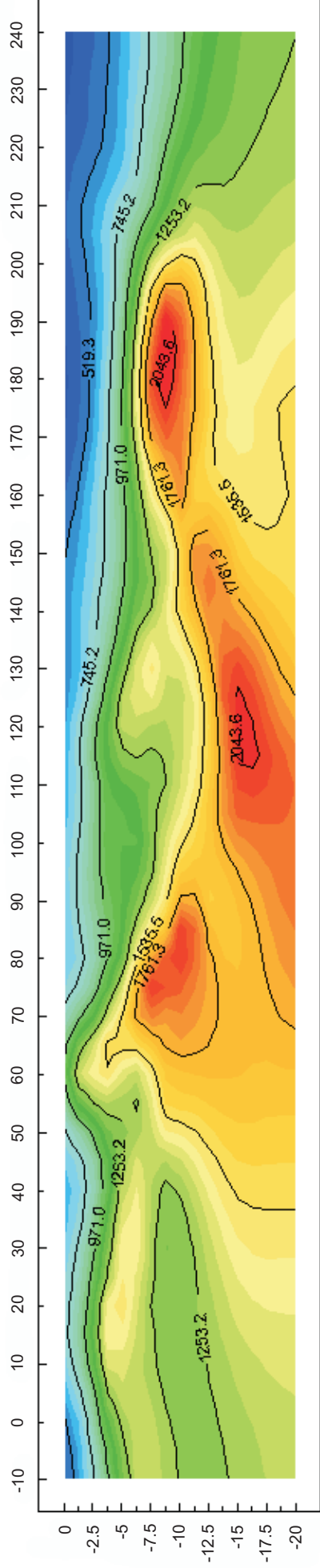
ALLEGATO 3 - SEZIONI TOMOGRAFIA ELETTRICA



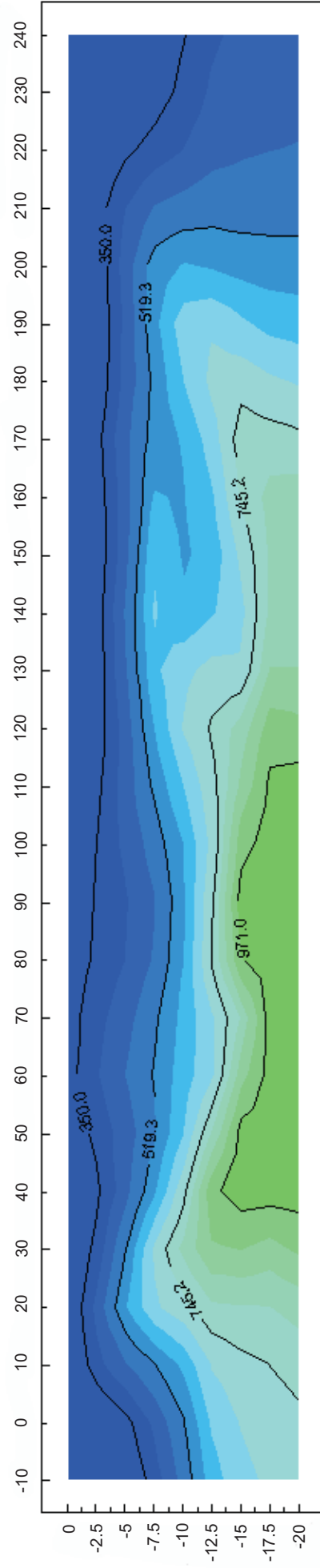
Allegato 4 Indagine sismica a rifrazione

ALLEGATO 4 - TOMOGRAFIA SISMICA

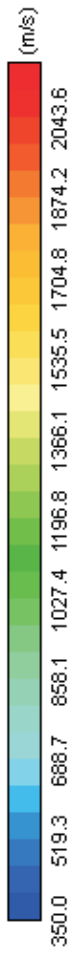
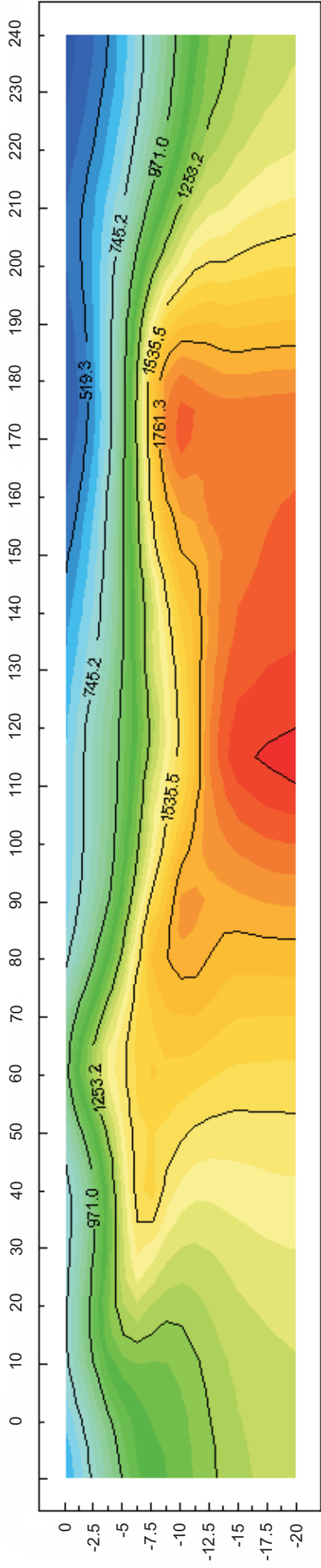
Profilo 1 - Onde P



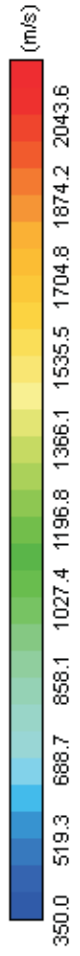
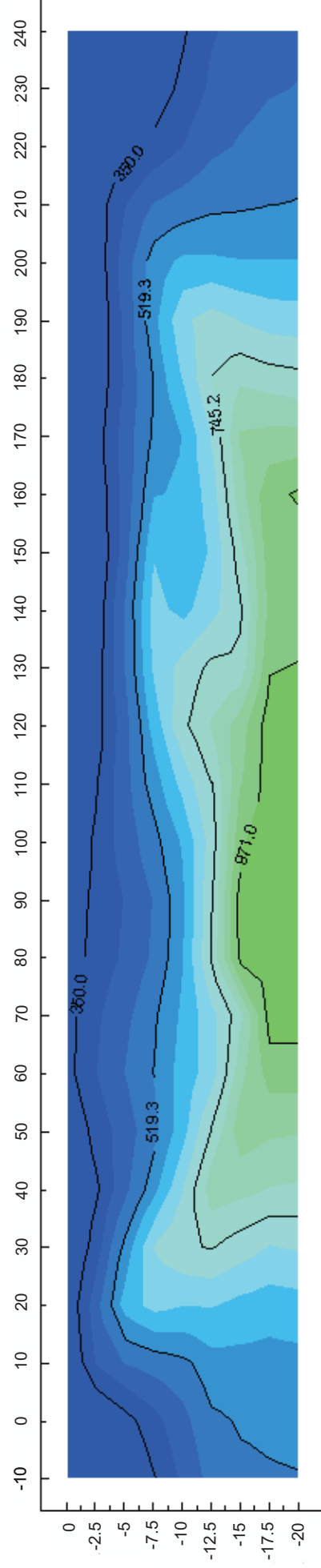
Profilo 1 - Onde S



Perfil 2 - Onde P

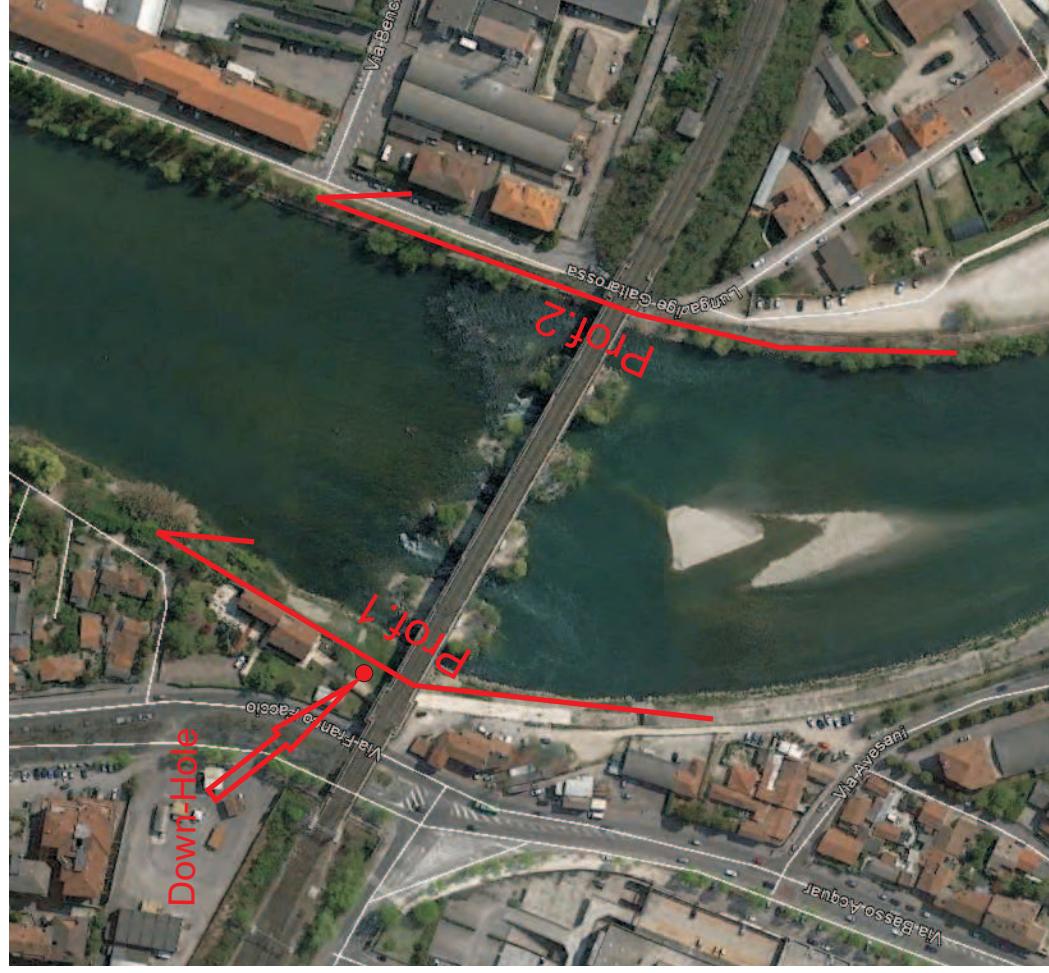


Perfil 2 - Onde S



Allegato 5 Ubicazione indagini

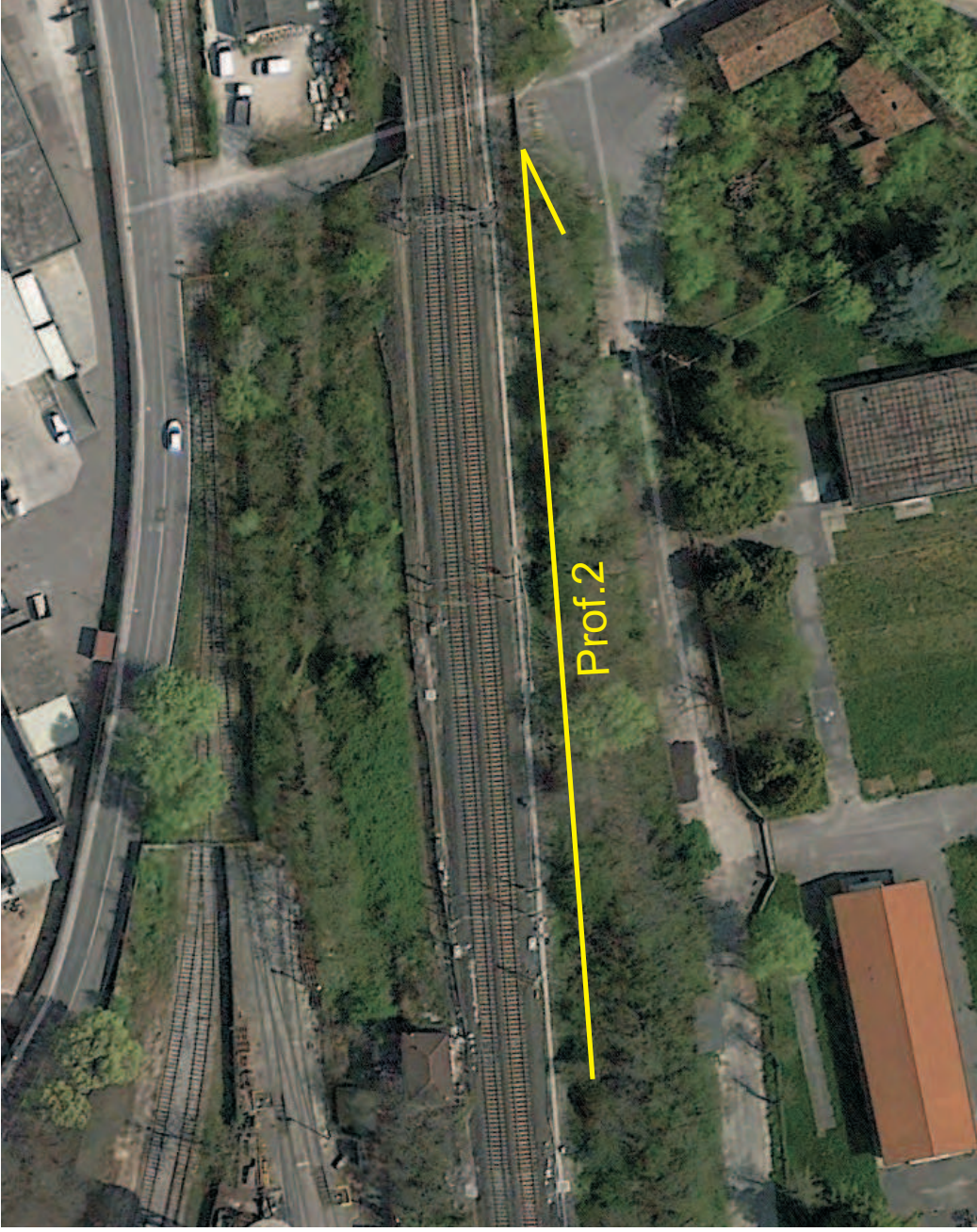
ALLEGATO5 UBICAZIONI INDAGINI SISMICHE E GEOELETTRICHE



Indagine sismica a rifrazione ed indagine Down-hole in Via Basso Acquar



Indagine geoelettrica in Via Luciano Ligabò



Indagine geoelettrica in Via Campo Marzo

3.2 Elaborazione e restituzione dei dati

Sui sismogrammi registrati sono stati “letti” i tempi di arrivo sia delle onde sismiche P che delle onde S, per ogni intervallo di profondità. Il calcolo delle velocità sismiche è stato realizzato attraverso la misura della differenza di tempi fra posizioni differenti dei geofoni ed il punto di energizzazione.

Nei grafici alleati sono visualizzati i sismogrammi acquisiti ricomposti lungo la verticale, l’andamento delle velocità sismiche d’intervallo.

Nella tabella di sintesi sono rappresentate le velocità delle onde P e S calcolate ad intervalli di 1 metro; sono inoltre riportati i valori dei principali parametri dinamici dei isotipi, ricavati dall’indagine sismica:

- Velocità Onde P= VP
- Velocità Onde S= VS
- Rapporto VP/VS
- Rapporto di Poisson σ
- Modulo di taglio G din
- Modulo di Young E din
- Modulo di compressione Ev

Per il calcolo dei moduli dinamici sono stati utilizzati i valori di γ = peso di volume valutati sulla base delle litologie presenti.

3.3 Analisi dei risultati

I risultati acquisiti e sintetizzati negli elaborati di seguito allegati possono essere riassunti in:

Down-Hole DH1

- Sino a 6.00 metri dal p.c. i valori di Vp risultano inferiori a 1500 m/sec: tra -6.00/-14.00 metri dal p.c. i valori di Vp sono dell’ordine di 1550/1660 m/sec seguono, sino a fondo foro, valori di Vp attorno 1800 m/sec;
- Vs assume valori medi attorno 700/800 m/sec salvo la porzione superficiale con valori inferiori a 600 m/sec

Down-Hole DH5

- Si registrano Vp inferiori a 1700 m/sec nella porzione superficiale, quindi valori attorno a 1400 m/sec sino a -12.00 dal p.c., seguono fino a fondo foro valori di 1500/1600 m/sec;
- Le velocità Vs si attestano prevalentemente attorno a valori di 800 m/sec, riduzioni significative fra 400/500 m/sec sono individuate nella porzione superficiale;

Le prove **DH** registrate non hanno evidenziato particolari disomogeneità nei terreni indagati.

Per ogni singola prova è stato calcolato il valore delle Vs₃₀ e quindi la relativa classe di suolo, il tutto riassunto nella seguente tabella

Prova	Vs ₃₀	Classe suolo
DH1	670	B
DH5	645	B

Documentazione Fotografica DH1



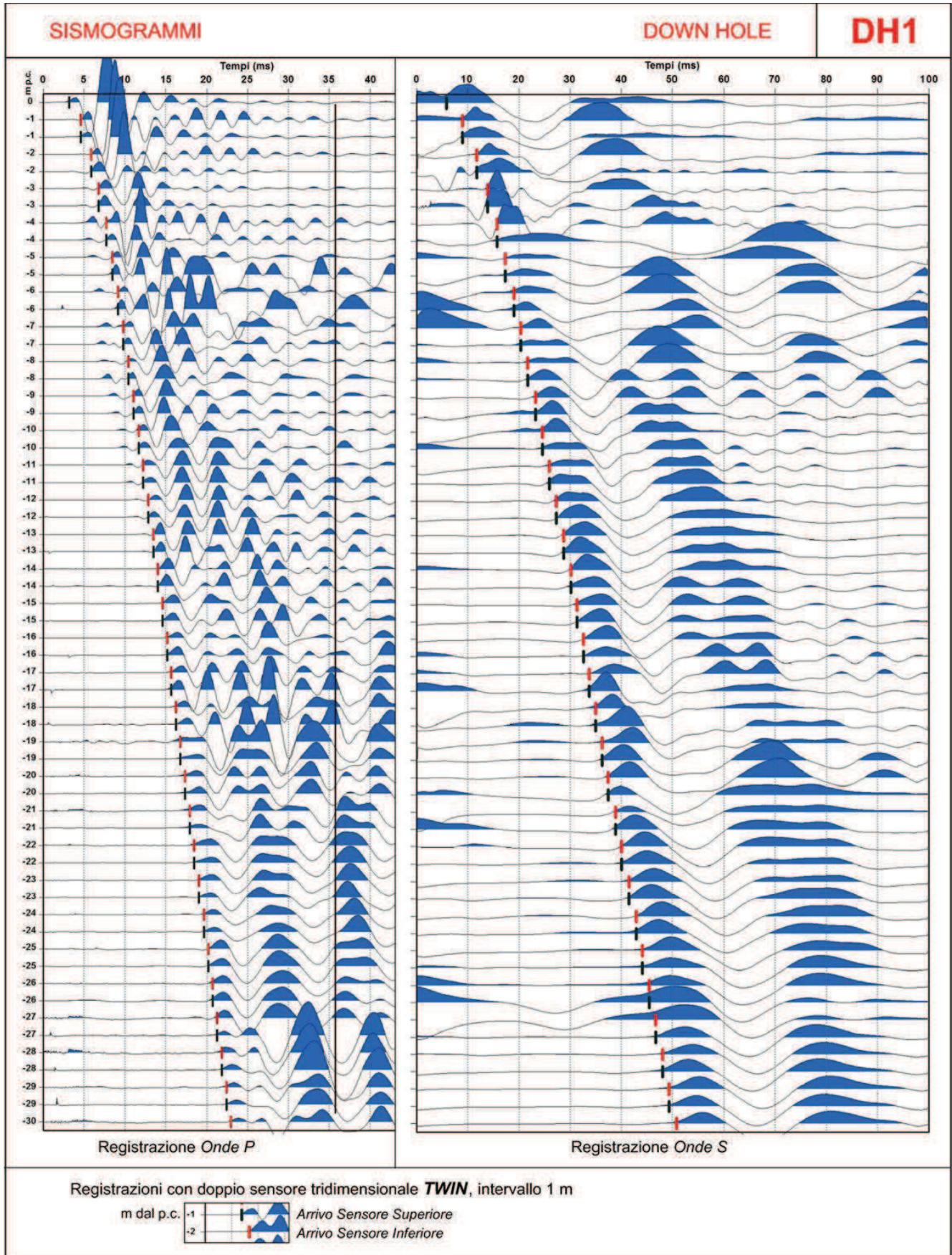
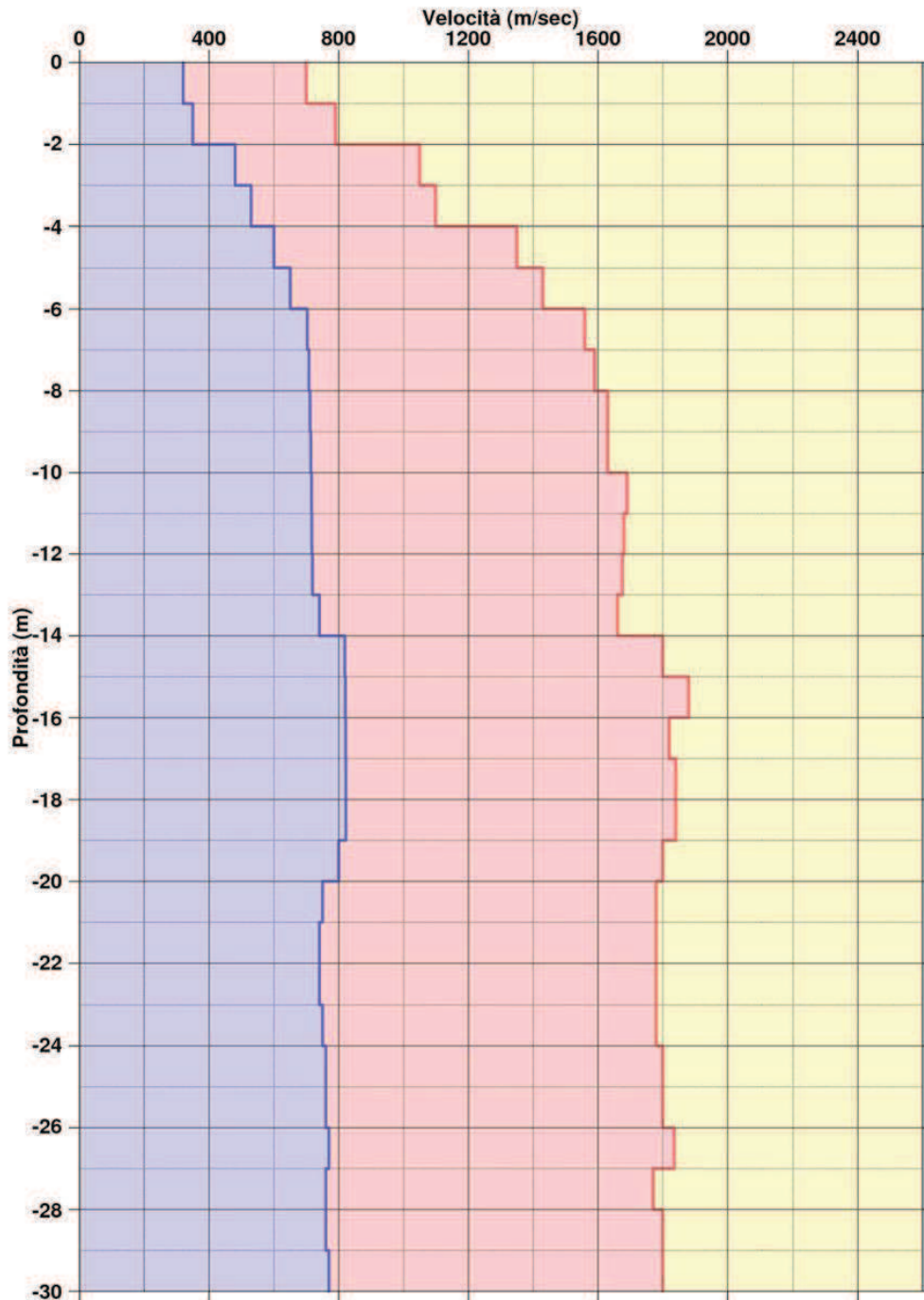


GRAFICO VELOCITÀ

DOWN HOLE

DH1



Velocità
Onde VSH



Velocità
Onde VP

Vs30 = 670 m/sec

Classificazione sismica del
suolo di fondazione:

Categoria B

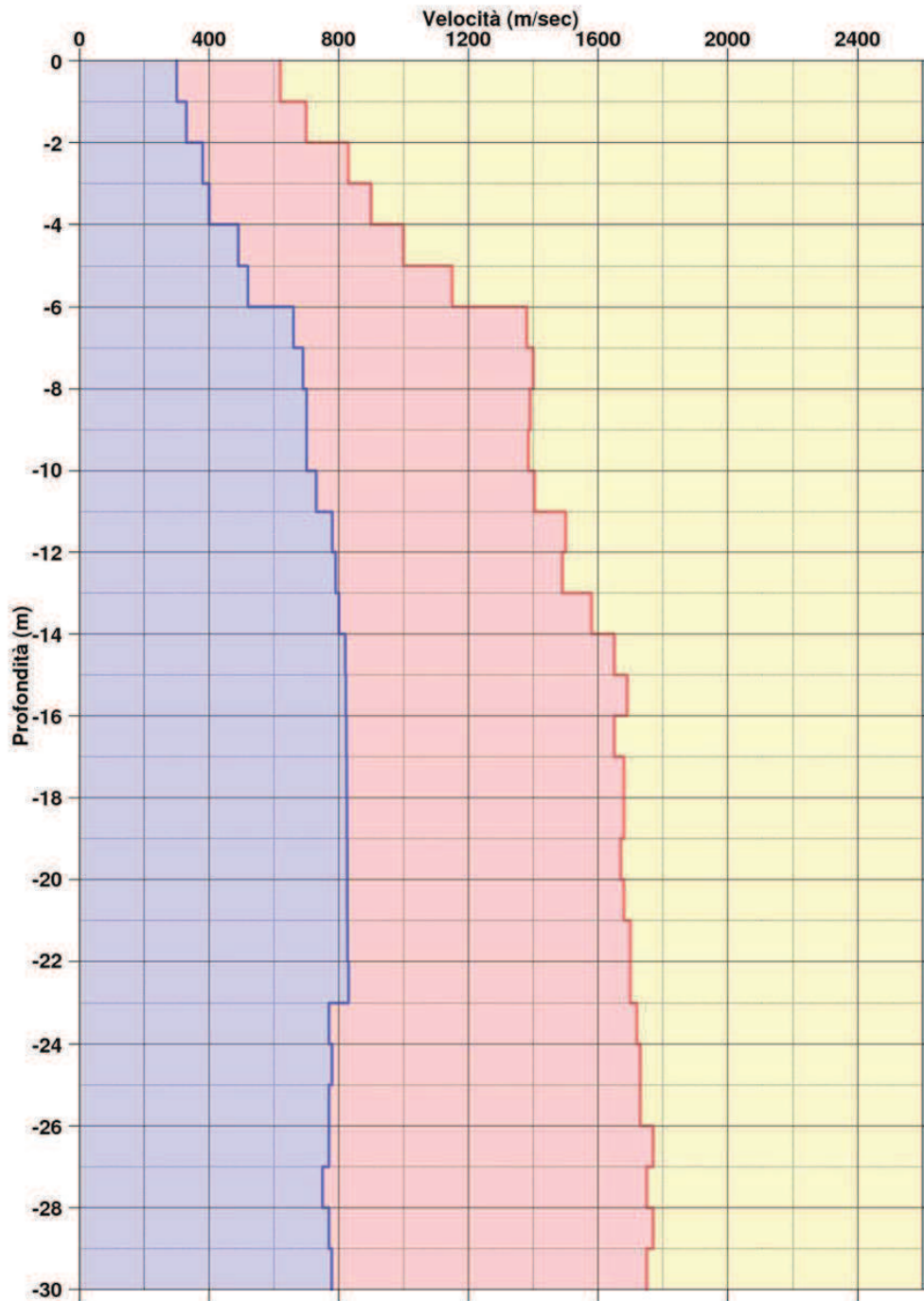
Documentazione Fotografica DH5



GRAFICO VELOCITÀ

DOWN HOLE

DH5



Velocità
Onde VSH



Velocità
Onde VP

Vs30 = 645 m/sec

Classificazione sismica del
suolo di fondazione:

Categoria B

4 RILIEVO TOMOGRAFICO ELETTRICO

Al fine di una ricostruzione stratigrafica continua su sezioni bidimensionali sono stati eseguiti quattro profili tomografici elettrici con elettrodi intervallati ogni 3 metri per le sezioni **L1, L3, L4** e 4 metri per il profilo **L2**.

L'ubicazione dei profili sono riportati nella planimetria generale ed è stata definita in accordo con la Committenza.

Sono parte integrante del rilievo le sezioni di resistività con relativa proposta interpretativa su unità geolitologiche.

4.1 Tomografia elettrica / Metodologia

Le metodologia "geoelettrica" rappresenta uno dei metodi geofisici storicamente più utilizzati per la ricostruzione delle strutture presenti nel sottosuolo con particolare riferimento alle tematiche legate alla caratterizzazione delle diverse formazioni geolitologiche.

I recenti sviluppi dell'elettronica e delle procedure di acquisizione dati gestite via software, hanno consentito di applicare questa metodologia, un tempo lenta e laboriosa, ai più disparati settori dello studio del sottosuolo con tempistiche e dettaglio un tempo impensabili.

4.2 Cenni teorici

Il parametro di base è la "resistività elettrica", proprietà fisica che esprime la "resistenza" che i materiali offrono al passaggio della corrente elettrica.

Le misure geoelettriche consentono, valutando le deformazioni del flusso di corrente indotte dalle proprietà fisiche dei materiali, di caratterizzare i materiali stessi e ricostruirne la distribuzione spaziale.

La resistività che caratterizza i materiali costituenti il sottosuolo, è determinata essenzialmente dai seguenti fattori:

- natura litologica (conducibilità intrinseca dei componenti di base)
- porosità e/o fatturazione e quindi forma, dimensione e continuità dei pori
- percentuale di presenza di fluidi interstiziali (essenzialmente presenza acqua)
- grado di salinità dell'acqua saturazione
- presenza di matrice fine

4.3 Modalità di misura

La misura del valore di resistività elettrica dei materiali si realizza creando un campo elettrico artificiale nel mezzo oggetto dell'indagine e studiandone la distribuzione nel sottosuolo.

Il dispositivo di misura è costituito quindi da due coppie di elettrodi metallici (quadripolo) infissi sul terreno con geometrie che si differenziano in funzione del tipo di rilievo da realizzare.

Generalmente i dispositivi utilizzati sono simmetrici rispetto ad un punto centra O al quale si riferisce il valore misurato. Per le ricostruzioni stratigrafico/strutturali, con particolare riferimento ad aree con topografia accidentata il dispositivo Schlumberger è ritenuto il più idoneo in termini di rapporto S/N e capacità risolutiva laterale.

A1_____A1_____M__O__N_____B1_____B2

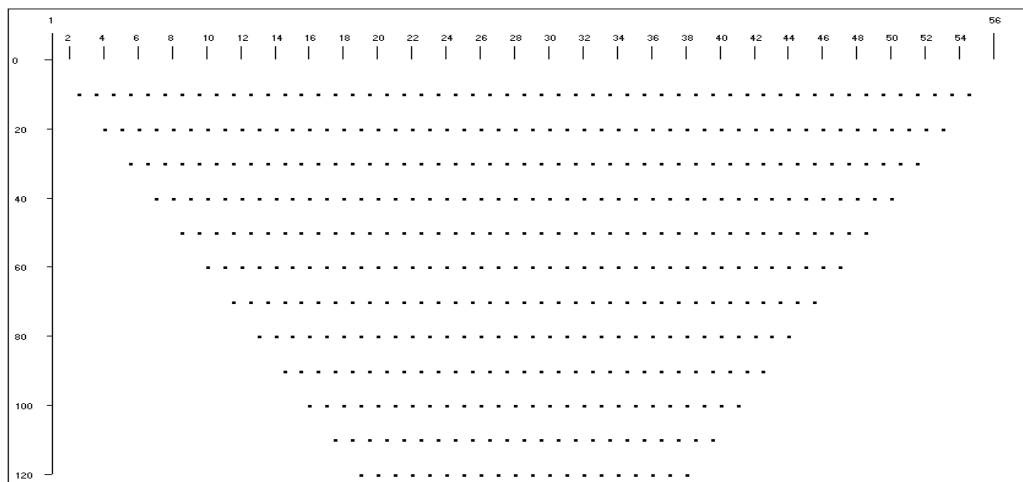
Dispositivo Schlumberger

La coppia elettrodo (A-B) costituisce il circuito con il quale s'immette corrente nel terreno misurandone l'intensità (I), la coppia elettrodo (M-N) rappresenta il circuito di misura della differenza di potenziale (DV) generata nel terreno stesso dal passaggio della corrente. Dal rapporto delle due grandezze si calcola la resistività apparente.

La profondità dell'esplorazione è direttamente proporzionale alla distanza tra i due elettrodi A e B e alle caratteristiche intrinseche del mezzo esplorato.

La scelta del dispositivo più opportuno è legata alle condizioni dell'area da indagare, sia in termini strutturali sia di rapporto segnale-rumore (S/N).

L'innovazione fondamentale introdotta nell'acquisizione tomografica è rappresentata dall'utilizzo di strumentazioni digitali "multicanale" in grado di gestire automaticamente un gran numero di elettrodi che riducono largamente i tempi di acquisizione e forniscono la misura della resistività in corrispondenza di un elevato numero di punti costituenti la sezione indagata.



Tomografia elettrica – Esempio di distribuzione delle misure

Grazie all'elevata densità dei punti si rende possibile, nella fase di elaborazione, l'applicazione di potenti algoritmi di "inversione" bidimensionale (2D) ricostruendo con estremo dettaglio, la sezione di resistività "vera", definendo in particolare gli effetti delle "variazioni laterali" e quindi restituendo una rappresentazione finale largamente corrispondente alla situazione reale.

4.4 Modalità d'intervento

La capacità della tomografia elettrica di discriminare con grande dettaglio le unità di copertura, le variazioni laterali, nonché le eventuali "inversioni di velocità" (che costituiscono un grande limite per altre metodologie) rappresenta una fondamentale caratteristica del metodo.

Gli elettrodi vengono disposti lungo stendimenti sulla superficie topografica, secondo lo schema rappresentato nella figura precedente.

In tal caso, la profondità di esplorazione è direttamente proporzionale alla lunghezza dello stendimenti, mentre il dettaglio è funzione della distanza elettrodo.

Entrambe queste dimensioni rappresentano quindi un aspetto fondamentale per la progettazione dell'intervento. In genere le indagini sono volte all'esplorazione secondo sezioni bidimensionali (2D) ma è possibile intervenire con modalità tridimensionale (3D) sia in acquisizione sia in elaborazione.

E' inoltre possibile l'elaborazione 3D sulla base di una geometria di acquisizione 2D.

I dati saranno acquisiti tramite un resistivimetro digitale del tipo A.G.I. SUPER STING R1/IP dotato di sistema automatico di commutazione degli elettrodi di misura (smart electrodes) secondo le diverse configurazioni elettroniche e pacchetto software dedicato per la gestione di tutte le fasi di rilievo.



Georesistivimetro digitale

La principale innovazione introdotta dalla strumentazione utilizzata è rappresentata dalla gestione totalmente automatizzata delle misure che si realizza grazie alla tecnologia dei cosiddetti "elettrodi intelligenti" (smart electrodes), che consente ad ogni elettrodo, dotato di elettronica interna, di essere utilizzato sia per l'invio della corrente sia per la misura del potenziale. E' quindi possibile l'acquisizione in tempi brevi di un elevato numero di punti (800/1000 punti/h).



Smart electrode

Lo strumento è in grado di gestire fino a 254 elettrodi contemporaneamente collegati, gestendo via software tutte le operazioni relative al controllo di qualità dei dati acquisiti attraverso le seguenti fasi:

- controllo del dispositivo di misura tramite verifica della resistenza di contatto degli elettrodi;
- azzeramento dei potenziali spontanei;
- iniezione di corrente in quantità, periodo e sequenza opportune;
- misura della differenza di potenziale e verifica della qualità del dato tramite il calcolo della “deviazione standard”;
- memorizzazione di tutti i dati relativi all’acquisizione

4.4.1 *Acquisizione dati*

L’acquisizione automatica dei dati garantisce, come accennato, un’elevata velocità di esecuzione. In tale situazione per la miglior qualità dei dati è di fondamentale importanza un “layout” ottimale della linea degli elettrodi. In particolare è necessario verificare la “resistenza di contatto” tra gli elettrodi ed il terreno ed eventualmente adottare le adeguate procedure di riduzione di tale parametro prima dell’inizio del processo di acquisizione.



Prima dell'avvio delle misure, tramite la stessa strumentazione, si procede quindi alla verifica dei valori di resistenza di contatto che vengono registrati per il successivo controllo di qualità.

Una volta verificato il layout e iniziata la serie di misure, che procede automaticamente, è possibile proseguire con il successivo layout di elettrodi lungo il profilo che consente di realizzare l'acquisizione in continuo secondo la procedura definita del "roll-along".

Ogni misura di resistività viene effettuata con una ripetizione del ciclo "+-+" di cui viene calcolato il valore della **deviazione standard**.

4.4.2 *Elaborazione dati*

L'elaborazione dei dati segue il seguente schema:

- editing per l'individuazione e rimozione dei valori caratterizzati da un errore elevato (deviazione standard > 2%);
- ricostruzione della sezione di pseudoresistività apparente misurata;
- definizione delle dimensioni della griglia da utilizzare per l'inversione 2D;
- inversione 2D e la ricostruzione della sezione di resistività tramite iterazioni successive condotte sulla base del confronto delle pseudosezioni di resistività misurata e calcolata.

I passi indicati sono sviluppati tramite l'utilizzo dei seguenti pacchetti software:

- RES2DINV 3.5

Programma che, dai dati di resistività apparente calcolata e utilizzando la tecnica di inversione smoothness-constrained least-squares, produce un modello bidimensionale di resistenza reale Vs profondità. Il programma è completamente automatico ed è stato ottimizzato per essere utilizzato con "data set" di grandi dimensioni acquisiti secondo le configurazioni Wenner, Schlumberger, polo-polo, polo-dipolo, ecc.

Tramite questo programma è inoltre possibile effettuare le adeguate correzioni topografiche. Unitamente al programma RES2DMOD costituisce un avanzato pacchetto di "inversione" e "modeling" bidimensionale. Il programma seleziona automaticamente i migliori parametri di inversione per ogni particolare set di dati e comunque i parametri che influenzano il processo di inversione possono essere modificati dall'utente.

Sono forniti tre differenti variazioni del metodo least-squares: uno molto veloce "quasi Newton", uno più lento ma più accurato "Gauss-Newton" e una tecnica ibrida mediamente veloce che include i vantaggi di entrambe i metodi precedenti.

- GOLDEN SOFTWARE – SURFER

Software utilizzato per la rappresentazione dei dati acquisiti tramite curve ad isovalori (contouring) di resistività apparente.

4.5 Analisi dei dati

Le procedure di lavoro descritte hanno consentito di acquisire dati di un elevato livello qualitativo e pertanto il successivo processo di inversione per l'elaborazione delle sezioni finali, ha raggiunto livelli minimi di scostamento tra dati acquisiti e modello teorico.

Le sezioni allegate, nelle quali, tramite le diverse gradazioni di colore, è stata rappresentata la distribuzione dei valori di resistività elettrica, mostrano il miglior modello bidimensionale possibile e consentono di evidenziare la presenza di differenti unità geofisiche ed i loro rapporto stratigrafici.

Facendo riferimento ai litotipi presenti nella zona, è possibile descrivere come segue tali unità geofisiche:

- a) **Unità a bassa resistività relativa** (colore giallo) caratterizzata da elementi litologici relativi a sabbie con valori di resistività inferiori a 500 ohm m
- b) **Unità medio resistiva** (colore arancio) definisce elementi ghiaiosi-sabbioso con valori compresi fra 500-800 ohm m;
- c) **Unità resistiva** (colore rosso) relativa a litotipi ghiaioso-ghiaioso-sabbiosi con resistività superiore a 800 ohm m.

Le sezioni interpretative mostrano i rapporti stratigrafici fra le unità sopra descritte, inoltre viene proposto, per ogni singola sezione, un'interpretazione litostratigrafica delle unità geofisiche.

Le aeree analizzate sono prevalentemente caratterizzate da elementi resistivi (*ghiaie*) con intercalazioni medio resistive (*ghiaiose sabbie*) e con una struttura basale sabbioso-ghiaioso probabilmente satura.

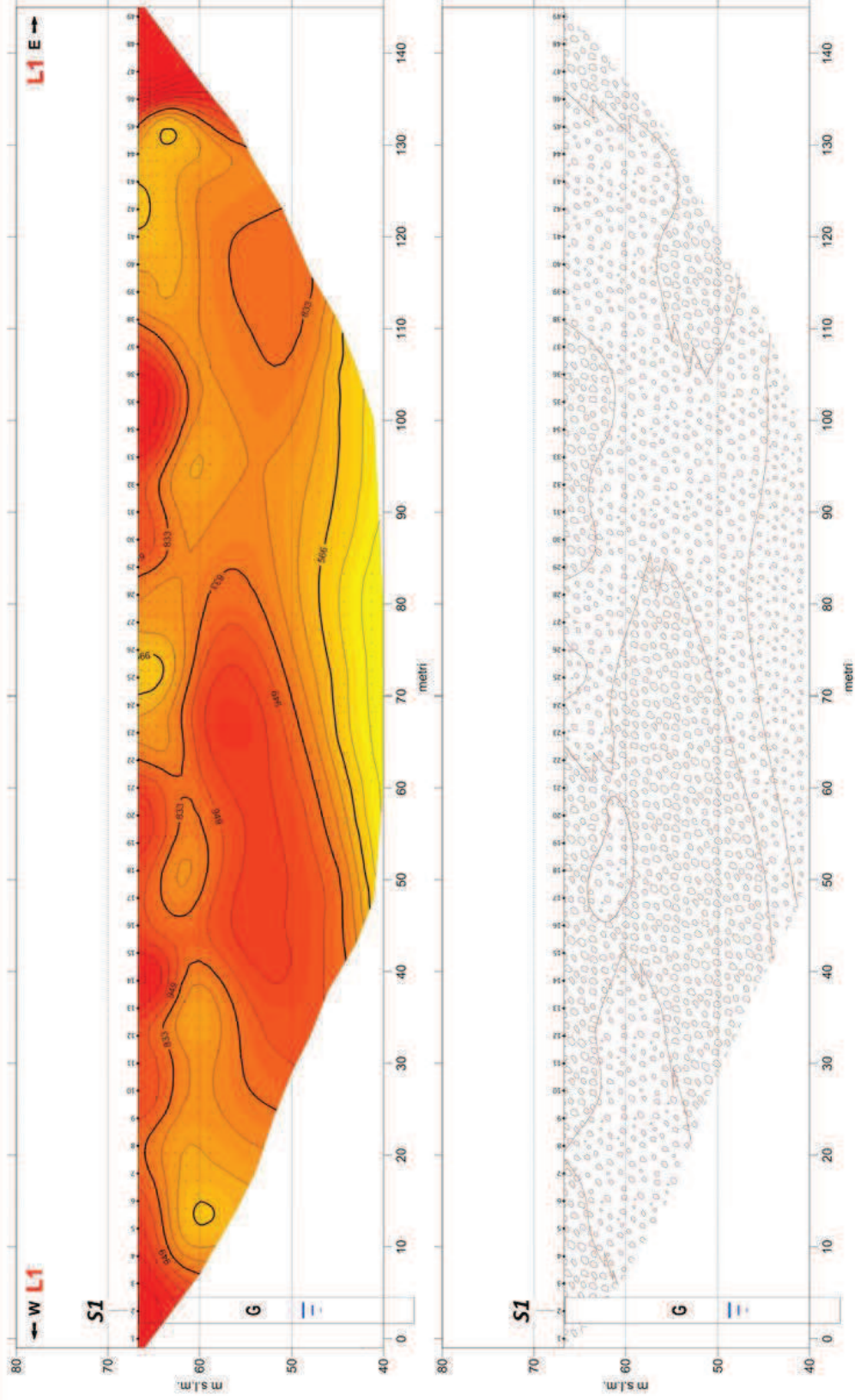
Nello specifico la sezione **L1** evidenzia una diffusa presenza di elementi ghiaiosi con intercalazioni di litotipi sabbioso e ghiaiosi; nella porzione basale si osserva un'unità bassa resistività passante ad elementi sabbiosi.

La sezione **L2** evidenzia la diffusa presenza di elementi ghiaiosi con elementi più sabbiosi nella porzione orientale.

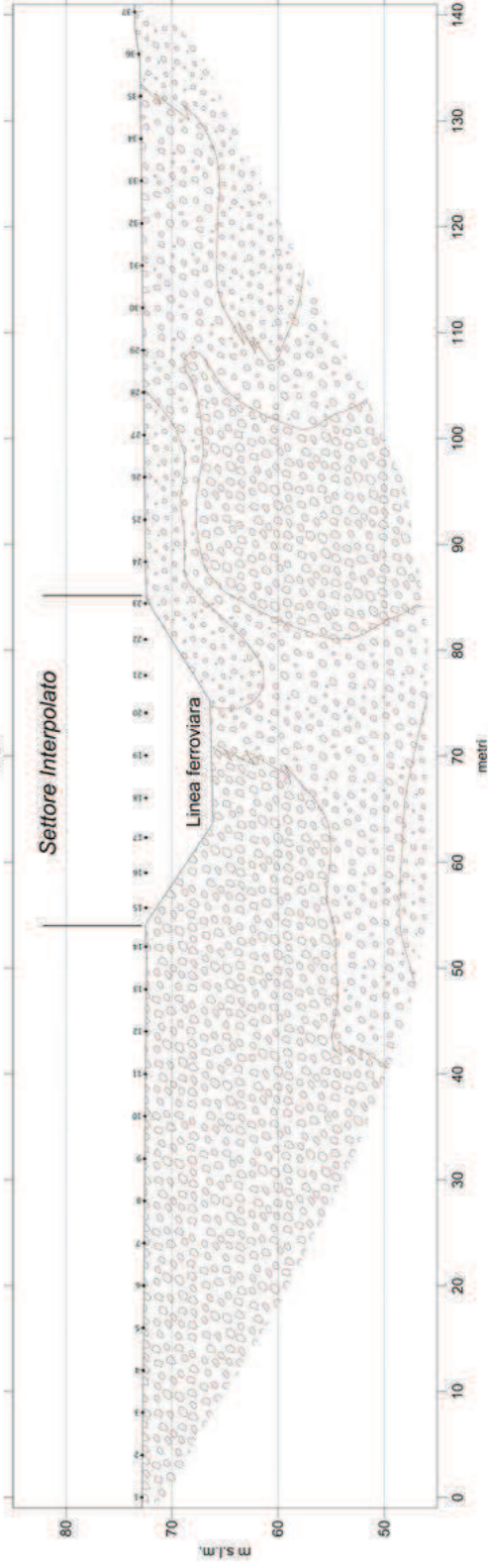
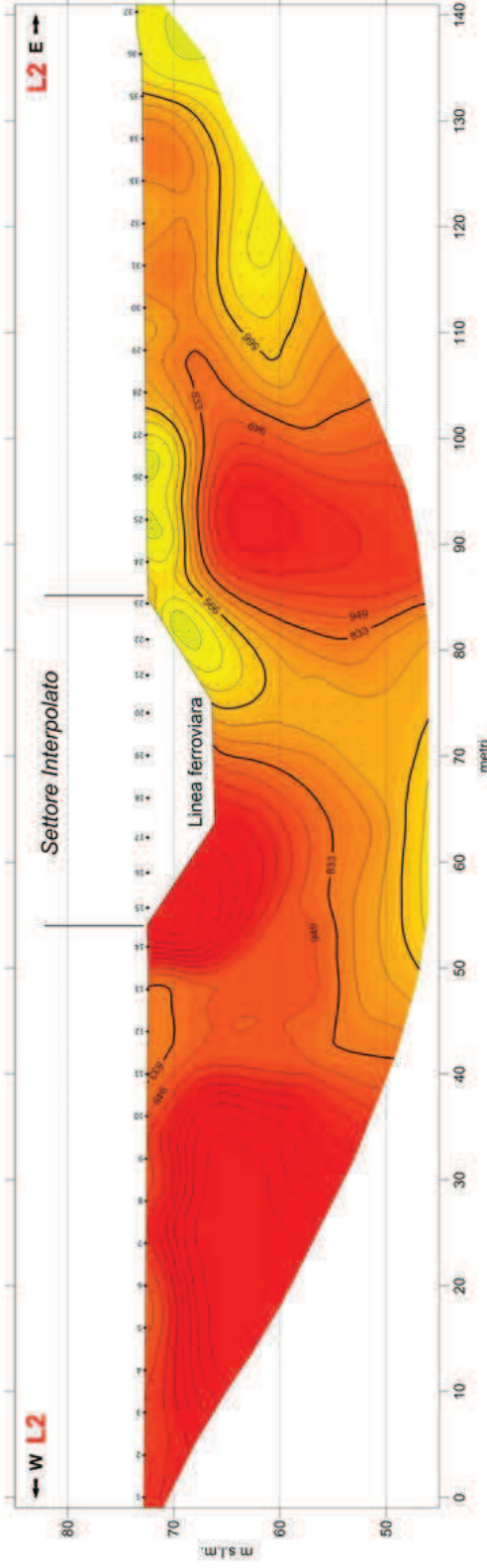
La sezione **L3** evidenzia due distinti settori litologici con elementi prevalentemente ghiaiosi ad occidente mentre si incrementano le componenti sabbioso-ghiaiose nella porzione orientale.

Sezione **L4**, assai omogenea nella sua componente ghiaiosa con debole copertura sabbiosa e evidenzia un'unità di fondo ove si incrementano gli elementi sabbiosi.

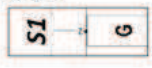
Sezione Elettrica L1



Sezione Elettrica L2



Schematizzazione
Sondaggio
Meccanico



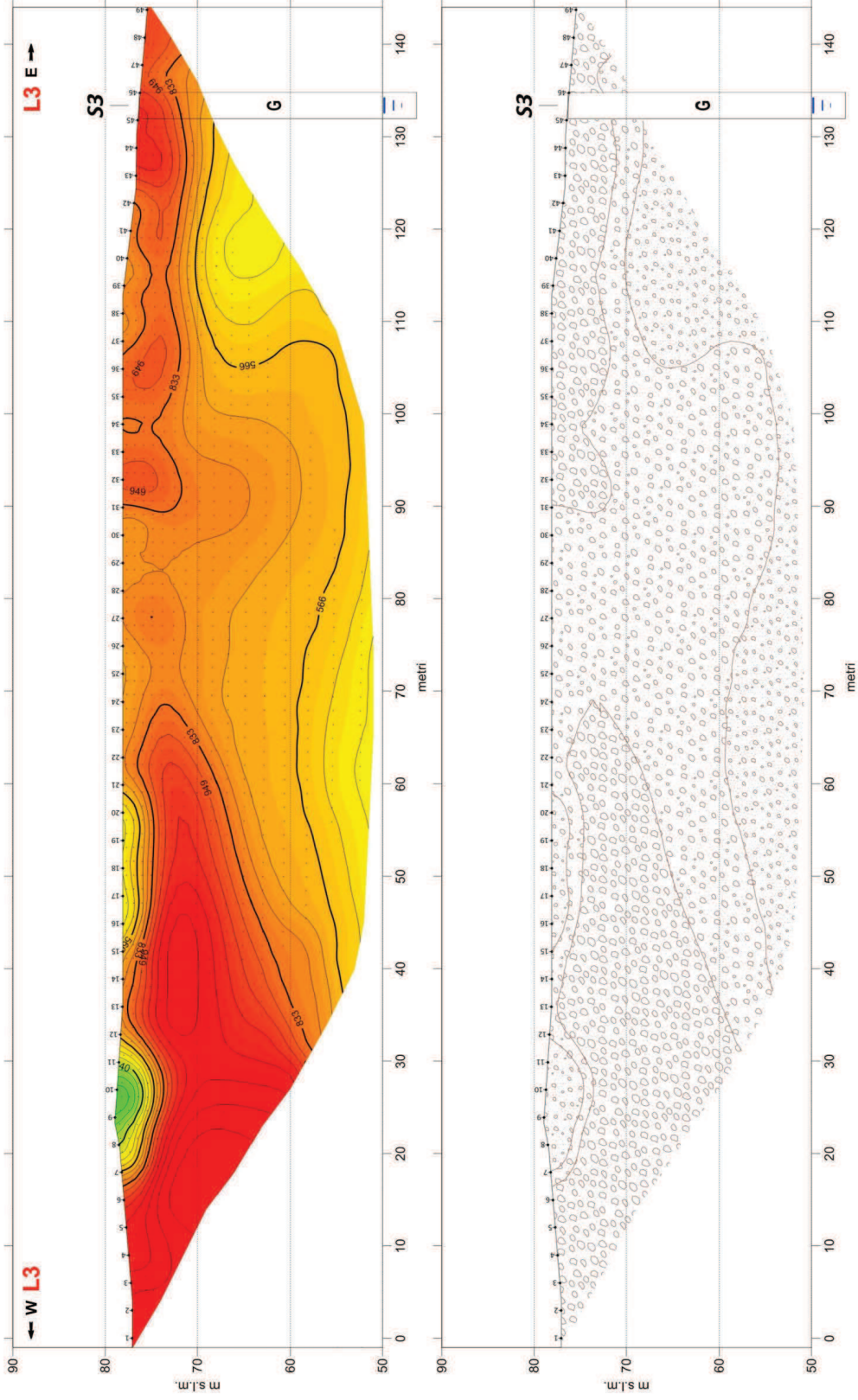
Elettrodi



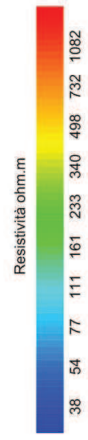
Resistività ohm.m



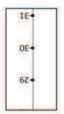
Sezione Elettrica L3



Schematizzazione
Sondaggio
Meccanico



Elettrodi





LOTTO FUNZIONALE TRATTA BRESCIA-VERONA

NODO AV/AC DI VERONA, INGRESSO OVEST

ESITI CAMPAGNA GEOFISICA

PROGETTO
1N9

LOTTO
10

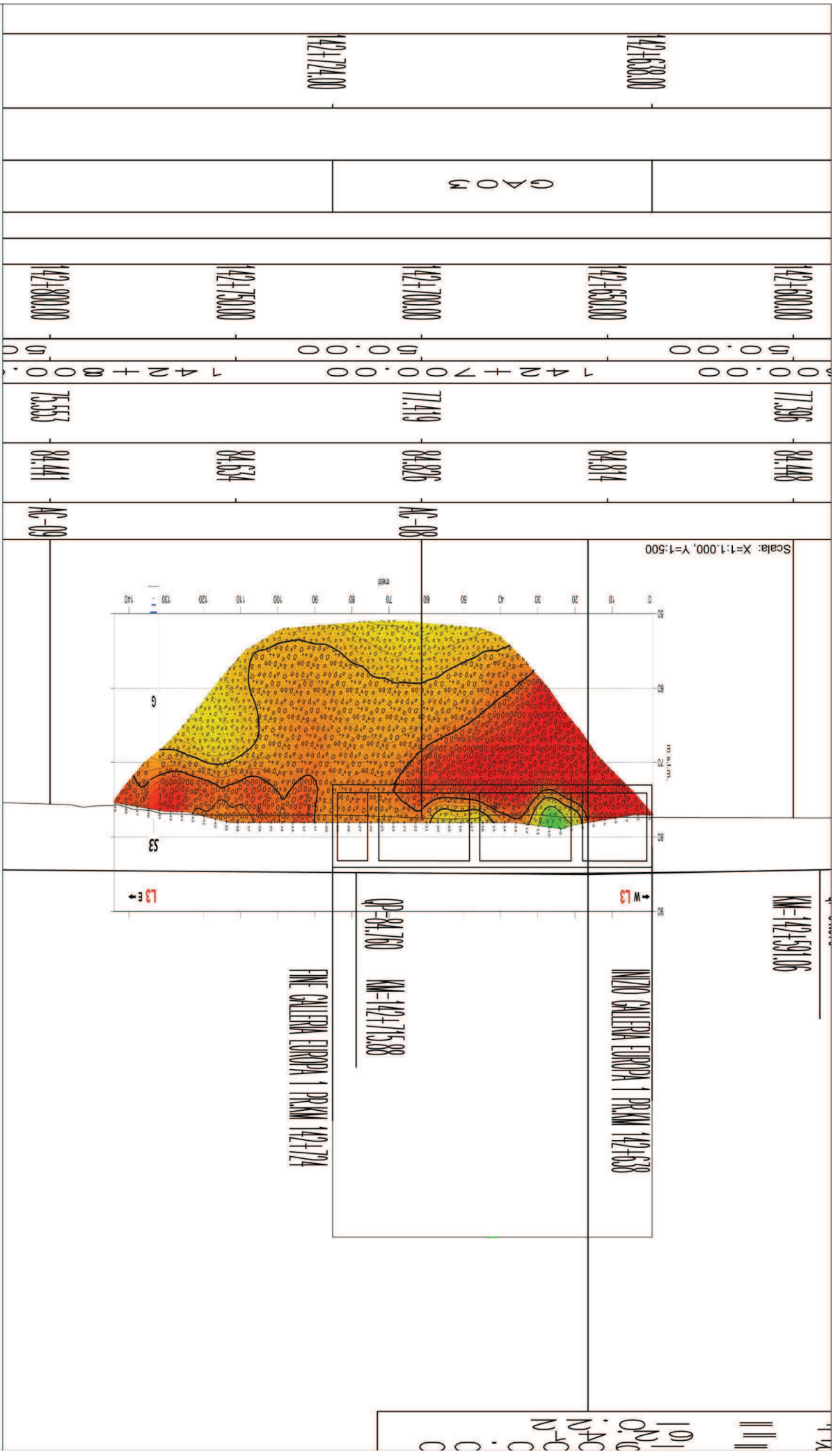
CODIFICA
R.09.RH

DOCUMENTO
GEOMIS.001

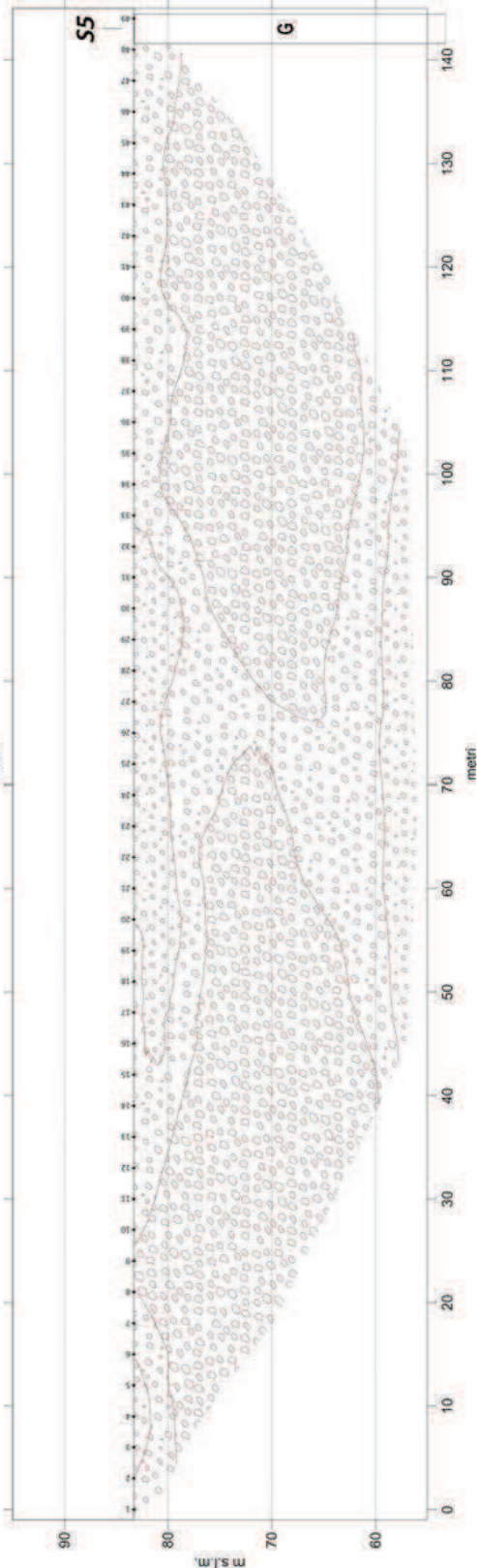
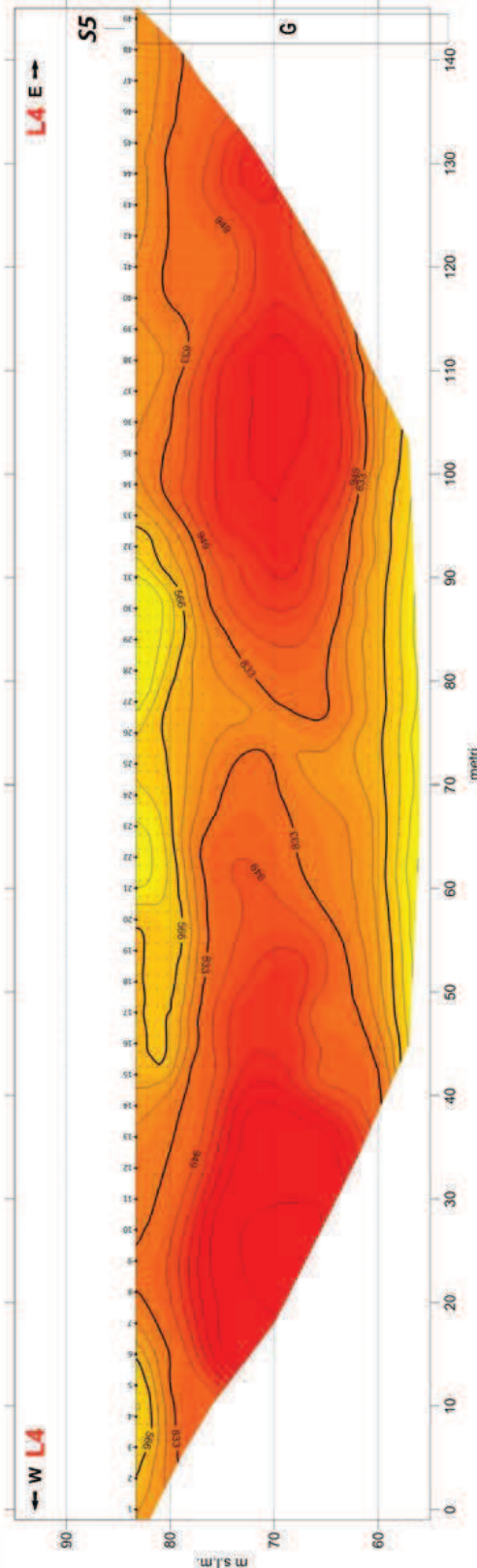
REV.
A

FOGLIO
41 di 43

Sovrapposizione su Profilo di Progetto della Sezione Elettrica L3



Sezione Elettrica L4



Schematizzazione
Sondaggio
Meccanico

