

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:
CONSORZIO:



SOCI:



PROGETTAZIONE:
MANDATARIA:



MANDANTI:



PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE


ITINERARIO NAPOLI - BARI RADDOPPIO TRATTA APICE - ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE - HIRPINIA

GEOLOGIA

INDAGINI GEOGNOSTICHE INTEGRATIVE - AMBITO DEPOSITI FRANA GALLERIA MELITO

ESITI INDAGINI

VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all'aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 - Risultato delle Indagini geofisiche di PED

APPALTATORE	DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE	PROGETTISTA
Consorzio HIRPINIA AV Il Direttore Tecnico Ing. Aristodemo Busillo 15/02/2023	Il Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche Ing. G. Cassani	 Dott. Geol. F. Pennino

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

I
F
2
8
0
1
V
Z
Z
I
G
G
E
0
2
0
5
2
8
1
A
-

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione per consegna	F. Pennino	15/02/2023	A. Zimbaldi	15/02/2023	M. Gatti	15/02/2023	Ing. G. Cassani

15/02/2023

File: IF2801VZZIGGE0205281A.docx

n. Elab.: -

APPALTATORE: <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA																	
PROGETTAZIONE: <u>Mandataria</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.	<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: left;">COMMESSA</td> <td style="width: 10%; text-align: left;">LOTTO</td> <td style="width: 15%; text-align: left;">CODIFICA</td> <td style="width: 20%; text-align: left;">DOCUMENTO</td> <td style="width: 10%; text-align: left;">REV.</td> <td style="width: 15%; text-align: left;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">IF28</td> <td style="text-align: left;">01</td> <td style="text-align: left;">V ZZ IG</td> <td style="text-align: left;">GE0205 281</td> <td style="text-align: left;">A</td> <td style="text-align: left;">2 di 4</td> </tr> </table>						COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	IF28	01	V ZZ IG	GE0205 281	A	2 di 4
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO													
IF28	01	V ZZ IG	GE0205 281	A	2 di 4													
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all'aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 - Risultato delle Indagini geofisiche di PED																		

Indice

1	PREMESSA	3
----------	-----------------------	----------

APPALTATORE: <u>Consorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA					
PROGETTAZIONE: <u>Mandatario</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.						
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all'aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 - Risultato delle Indagini geofisiche di PED	COMMESSA IF28	LOTTO 01	CODIFICA V ZZ IG	DOCUMENTO GE0205 281	REV. A	FOGLIO 3 di 4

1 PREMESSA

Nel presente documento si illustrano i risultati della campagna di indagini geofisiche effettuata, durante lo sviluppo del P.E.D., nel versante in sinistra idrografica del Fiume Ufita, dove si inseriscono le opere dell'imbocco lato Napoli della Galleria Melito, con relativi piazzali, viabilità e le opere di fondazione del Viadotto VI03 (spalla, Pile 1, 2 e 3).

La campagna di indagini geofisiche, finalizzata all'approfondimento del modello geologico e geotecnico del succitato versante, è stata eseguita le seguenti tipologie d'indagine da superficie:

- Indagini in sismica a rifrazione (onde di compressione Vp e onde si superficie Vs)
- Indagini in sismica a riflessione
- Indagine masw 2D
- Tomografia elettrica

Le indagini sono state eseguite nei giorni compresi tra l'8 febbraio e il 12 marzo 2022, con i seguenti obiettivi:

Metodo	Obiettivo	Parametri
Sismica a rifrazione	Modellazione sezioni 2D nel continuo	Vp-Vs
Sismica a riflessione	Identificazione orizzonti riflettenti (contrastati di impedenza sismica), zone di discontinuità o fenomeni di variazioni laterali	Vp
Masw 2D	Modellazione sezioni 2D nel continuo	Vs
Tomografia elettrica	Modellazione sezioni 2D nel continuo	Resistività elettrica

Il piano di indagine, concertato con la Direzione Tecnica di ITFha previsto l'esecuzione di n. 5 sezioni di rilievo con i quattro metodi geofisici da superficie sopra elencati. Il profilo L05 è stato acquisito con la sola tecnica sismica a rifrazione Vp come analisi di approfondimento su un'area di limitata estensione del corpo frana a valle della zona indagata.

Durante le fasi di acquisizione dati è stato effettuato il rilievo topografico tramite sistema GPS dei punti di stazione (geofoni, spari, elettrodi).

I risultati delle indagini sono illustrati nei seguenti allegati:

- ALLEGATO 1 - INDAGINI GEOFISICHE SU TRACCIATO DI PROGETTO – APICE VI03;
- ALLEGATO 2 - INDAGINI GEOFISICHE VI03 - LINEA L01
- ALLEGATO 3 - INDAGINI GEOFISICHE VI03 - LINEE L02-L05
- ALLEGATO 4 - INDAGINI GEOFISICHE VI03 - LINEA L03
- ALLEGATO 5 - INDAGINI GEOFISICHE VI03 - LINEA L04
- ALLEGATO 6 – SEZIONI INTERPRETATIVE - LINEE L01-L02-L03-L04-L05

APPALTATORE: <u>Conorzio</u> <u>Soci</u> HIRPINIA AV SALINI IMPREGILO S.P.A. ASTALDI S.P.A	ITINERARIO NAPOLI – BARI RADDOPPIO TRATTA APICE – ORSARA I LOTTO FUNZIONALE APICE – HIRPINIA																	
PROGETTAZIONE: <u>Mandataria</u> <u>Mandanti</u> ROCKSOIL S.P.A NET ENGINEERING S.P.A. ALPINA S.P.A.							<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">COMMESSA</td> <td style="text-align: center;">LOTTO</td> <td style="text-align: center;">CODIFICA</td> <td style="text-align: center;">DOCUMENTO</td> <td style="text-align: center;">REV.</td> <td style="text-align: center;">FOGLIO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">IF28</td> <td style="text-align: center;">01</td> <td style="text-align: center;">V ZZ IG</td> <td style="text-align: center;">GE0205 281</td> <td style="text-align: center;">A</td> <td style="text-align: center;">4 di 4</td> </tr> </table>						COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO													
IF28	01	V ZZ IG	GE0205 281	A	4 di 4													
PROGETTO ESECUTIVO DI VARIANTE VARIANTE 28 - Opere di mitigazione dei movimenti franosi - Tratta all'aperto Castel del Fiego - da pk 9+550 a pk 10+090 - Risultato delle Indagini geofisiche di PED																		

Nella relazione "ALLEGATO 1 – INDAGINI GEOFISICHE SU TRACCIATO DI PROGETTO – APICE VI03" sono riportate le seguenti informazioni:

- metodologie di indagine
- strumentazione utilizzata
- descrizione del rilievo
- risultati ottenuti

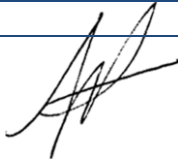


geophysics . engineering . monitoring

*Itinerario Napoli-Bari: Raddoppio tratta Apice-Orsara
I Lotto funzionale Apice Hirpinia*

Indagini geofisiche su tracciato di progetto Apice VI03



<i>Commessa</i>	<i>Committente</i>	<i>Documento</i>
22001	Hirpinia AV	22001_rel-VI03
<i>Redatto da</i>	<i>Revisione</i>	<i>Allegati</i>
Sgherza	00	sì
<i>Approvato da</i>	<i>Data</i>	<i>Firma</i>
Gianluca Ascari	01/04/2022	

Questo documento è di proprietà di Akron srl e non può essere riprodotto senza specifica autorizzazione scritta di Akron srl

Akron srl
C.F./P.I./Nr. Iscrizione Reg. Impr. 03145050963
Società uni personale
capitale sociale Euro 10.000 i.v.
REA Milano soc. n. 1647540

Sede Legale e operativa
Via Di Vittorio 26 - Bovisio Masciago – MB - Italy
tel. +39 +362 55 99 02 – fax +39 +362 59 26 34
info@akronservizi.it
www.akronservizi.it

Sommario

1	Premessa	3
2	Descrizione metodologica	4
2.1	Indagini sismiche	4
2.1.1	Inversione tomografica del dato sismico	6
2.1.2	Masw 2D	10
2.1.3	Sismica a riflessione	11
2.2	Tomografia elettrica	12
2.2.1	Resistività elettrica	12
2.2.2	Proprietà elettriche dei materiali	14
2.2.3	Tecniche tomografiche	15
3	Strumentazione utilizzata	17
3.1	Metodi sismici	17
3.1.1	Sistema di acquisizione dati	17
3.1.2	Sorgenti	17
3.1.3	Ricevitori	18
3.2	Metodo geoelettrico	18
3.3	Rilievo topografico	19
4	Descrizione del rilievo	21
4.1	Tomografia sismica a rifrazione e indagini di sismica a riflessione	21
4.2	Masw 2D	22
4.3	Tomografia elettrica	24
5	Elaborazione dati	25
5.1	Tomografia sismica a rifrazione Vp e Vs	25
5.2	Modalità di analisi dei gradienti di parametri geofisici modellizzati nel continuo	26
5.2.1	Gradient operator	26
5.2.2	Derivate direzionali	26
5.3	Indagini Masw 2D	28
5.4	Sismica a riflessione	30
5.5	Indagini geoelettriche	32
6	Risultati del rilievo	33
7	Documentazione fotografica	38

Allegati

Rif.	Descrizione
Tav.01	Indagini geofisiche – Linea L01
Tav.02	Indagini geofisiche – Linee L02 e L05
Tav.03	Indagini geofisiche – Linea L03
Tav.04	Indagini geofisiche – Linea L04
Tav.05	Sezioni interpretative

Lista di distribuzione

Riferimento	n. copie	
	cartacee	digitali
Hirpinia AV	0	1

1 PREMESSA

Nell'ambito del progetto di raddoppio tratta Apice-Orsara, I Lotto funzionale Apice Hirpinia (AV) è stata realizzata una campagna di indagini geofisiche con lo scopo di effettuare una modellizzazione 2D del sottosuolo caratterizzato da fenomeno di frana. La presente fase di indagine, finalizzata alla fase di progettazione dello scavo della galleria, è stata eseguita secondo le specifiche fornite dal Committente con le seguenti tipologie d'indagine:

- Indagini da superficie
 - Indagini in sismica a rifrazione (onde di compressione Vp e onde si superficie Vs)
 - Indagini in sismica a riflessione
 - Indagine masw 2D
 - tomografia elettrica

Le indagini sono state eseguite nei giorni compresi tra l'8 febbraio e il 12 marzo 2022, con i seguenti obiettivi:

Metodo	Obiettivo	Parametri
Sismica a rifrazione	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Vp-Vs
Sismica a riflessione	Identificazione orizzonti riflettenti (contrast di impedenza sismica), zone di discontinuità o fenomeni di variazioni laterali	Vp
Masw 2D	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Vs
Tomografia elettrica	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Resistività elettrica

Il piano di indagine, come definito da committente, ha previsto l'esecuzione di n. 5 sezioni di rilievo con i quattro metodi geofisici da superficie sopra elencati. Il profilo L05 è stato acquisito con la sola tecnica sismica a rifrazione Vp come analisi di approfondimento su un'area di limitata estensione del corpo frana a valle della zona indagata.

Durante le fasi di acquisizione dati è stato effettuato il rilievo topografico tramite sistema GPS dei punti di stazione (geofoni, spari, elettrodi).

Nella presente relazione sono riportati:

- metodologie di indagine
- strumentazione utilizzata
- descrizione del rilievo
- risultati ottenuti

I risultati delle indagini sono illustrati nei seguenti allegati:

- **Tav.01** Indagini geofisiche – Linea L01
- **Tav.02** Indagini geofisiche – Linee L02 e L05
- **Tav.03** Indagini geofisiche – Linea L03
- **Tav.04** Indagini geofisiche – Linea L04
- **Tav.05** Sezioni interpretative

2 DESCRIZIONE METODOLOGICA

Nel presente capitolo si descrivono le metodologie di prova utilizzate.

2.1 INDAGINI SISMICHE

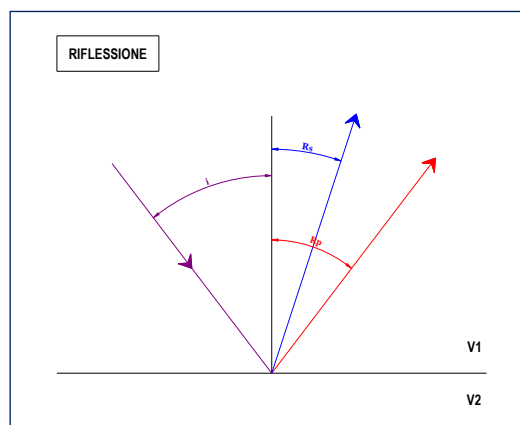
I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e le variazioni che esse ne subiscono permettono di ricostruire le caratteristiche meccaniche e geometriche del sottosuolo.

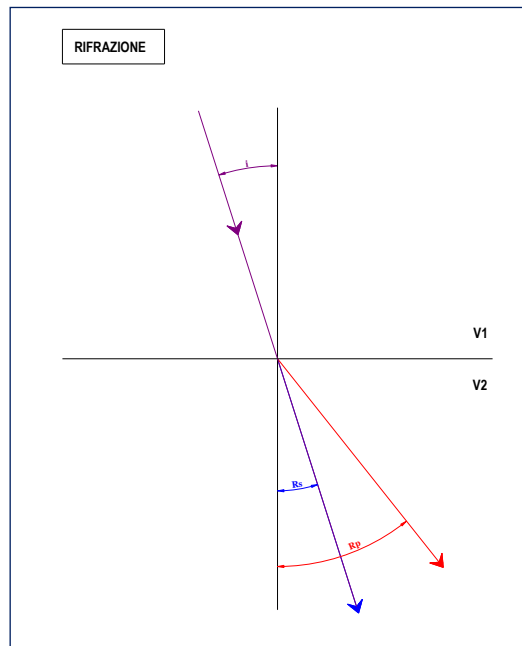
Un qualunque segnale sismico può essere descritto come la sovrapposizione di quattro differenti fasi (fase è il movimento che compie una particella nel mezzo investito dal fronte d'onda sismico):

- └ onde di volume
 - P: onde primarie o di compressione
 - S: onde secondarie o di taglio
- └ onde di superficie
 - L: onde di Love (caratterizzate da un movimento longitudinale e trasversale)
 - R: onde di Rayleigh (caratterizzate da un movimento ellittico retrogrado)

Le onde sismiche generate dalla sorgente attraversando il sottosuolo possono incontrare limiti tra materiali con differenti proprietà. Il fronte d'onda potrà essere riflesso, rifratto oppure convertito in una diversa tipologia. Le caratteristiche del mezzo e l'angolo di incidenza dei raggi sismici determineranno la traiettoria dell'onda sismica.

Quando un'onda longitudinale piana incide un'interfaccia tra due materiali con differenti proprietà elastiche, dove il mezzo a profondità maggiore ha una velocità superiore, è possibile applicare i principi dell'ottica e in particolare le leggi di Snell. Il fronte d'onda che incide obliquamente sull'interfaccia genera onde longitudinali e trasversali che si propagano in entrambi i mezzi. Le onde che si propagano nello stesso mezzo del fronte d'onda sono riflesse, mentre quelle che si propagano nel mezzo sottostante sono rifratte.





Riflessione: l'angolo di incidenza (i) è uguale all'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\sin(R_s) = \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(i)$$

Rifrazione: l'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_p)} = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$$

L'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_s)} = \frac{V_{p1}}{V_{s2}}$$

Quando $\sin(i) = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$ il valore di $\sin(R_p)$ risulta pari a 1 e l'angolo pari a 90° ; pertanto le onde

compressionali rifratte non attraversano il mezzo ma si propagano lungo l'interfaccia. In questo caso si parla di angolo critico e di riflessione totale.

La presenza di discontinuità o anisotropie nel mezzo modifica ampiezza e periodo delle onde sismiche. La velocità delle onde dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato, in particolare da: densità (γ), coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E = V_p^2 \cdot \gamma \frac{(1 + \rho) \cdot (1 - 2\rho)}{1 - \rho}$$

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

V_p = velocità delle onde P
 V_s = velocità delle onde S
 g = accelerazione di gravità

Nella tabella di seguito vengono indicati valori di riferimento della velocità P per i vari materiali:

MATERIALE	V_p (m/s)
Granito	5.000
Calcere	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500

2.1.1 INVERSIONE TOMOGRAFICA DEL DATO SISMICO

La tomografia è una tecnica di ricostruzione per immagini che permette di caratterizzare un'area non accessibile per mezzo di impulsi di energia che attraversano l'area oggetto di indagine. L'esempio più efficace di tecnica tomografica è la TAC (tomografia assiale computerizzata) di largo impiego nel settore medicale.

I metodi di inversione tomografica applicati a metodologie di prospezione sismica attiva trovano numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico:

- ricostruzione stratigrafica;
- caratterizzazione di contrasti di impedenza;
- caratterizzazione delle zone a gradiente di velocità o attenuazione;
- individuazione di faglie e fratture;
- localizzazione di oggetti sepolti, massi erratici.

Gli obiettivi elencati possono essere raggiunti poiché la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione e contenuto di argilla.

Misurando i tempi di arrivo o le ampiezze delle onde sismiche è possibile ottenere la distribuzione nel mezzo indagato di velocità sismica (modello di velocità) o attenuazione (modello cinematico); parametri che permettono di definire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Esistono differenti geometrie di acquisizione comunemente utilizzate per le elaborazioni tomografiche:

- sismica superficiale a riflessione o rifrazione;
- VSP (Vertical Seismic Profile);
- cross-hole;

→ sismica 3D.

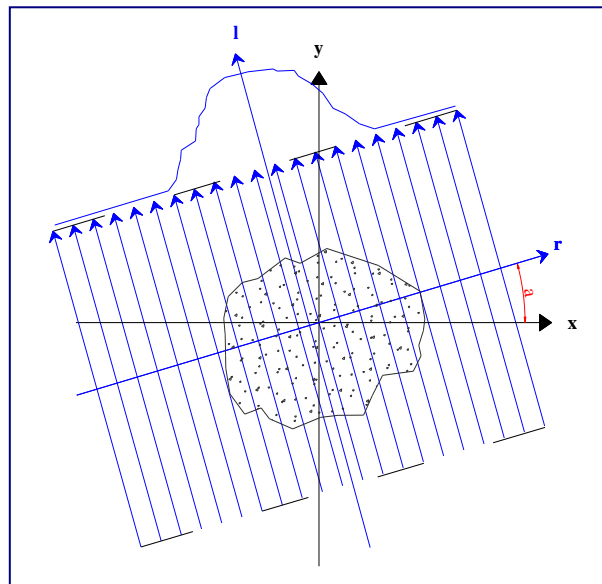
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

Le serie di proiezioni utilizzate in tomografia corrispondono a integrali lineari di alcune funzioni del mezzo. Nelle indagini sismiche i parametri misurati sono il tempo di arrivo e l'ampiezza delle onde sismiche, mentre la funzione può essere lo smorzamento (reciproco della velocità) o il fattore di attenuazione. Per un'analisi bidimensionale il problema tomografico è rappresentato dalla seguente equazione:

$$p(r, \alpha) = \int f(x, y) dl$$

(una serie completa di somme di raggi ad un determinato angolo è definita proiezione o profilo)

Dove x , y , r , l e α sono rappresentati nello schema di seguito:



Dal punto di vista teorico $f(x,y)$ è una funzione 2D continua e per essere ricostruita necessita di un numero infinito di proiezioni. Per ovvi motivi di discretizzazione $f(x,y)$ è calcolata per un numero finito di punti attraverso un numero finito di proiezioni.

Il mezzo da ricostruire viene quindi discretizzato in un grid a elementi rettangolari (celle) in ciascuno dei quali il valore di smorzamento si suppone costante. Il tempo di arrivo calcolato per un raggio (impulso sismico - perturbazione ondulatoria) che attraversa le celle del grid può essere espresso dalla formula:

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j$$

t_k^{calc} = tempo di arrivo calcolato per il raggio k esimo

d_{kj} = lunghezza del percorso del raggio k esimo nella cella j esima

s_j = smorzamento della cella j esima

N = numero di elementi del grid

I tempi di arrivo di tutti i raggi possono essere tradotti in forma matriciale:

$$T = D * S$$

T = vettore di lunghezza M (tempi di arrivo)

S = vettore di lunghezza N (celle)

D = vettore (MxN) con lunghezza dei raggi in ogni cella

Ricostruire una funzione attraverso il suo integrale comporta una soluzione non unica poiché un infinito numero di integrali possono essere misurati.

Il numero di soluzioni può essere ridotto introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di velocità, limiti di gradiente delle velocità (damping), conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.

Esistono differenti approcci alla risoluzione del problema:

- Back Projection (BP);
- matrice di inversione;
- ricostruzione analitica;
- ricostruzioni iterative (ART, SIRT).

I processi di tipo iterativo risultano più appropriati per l'ambito geologico poiché i dati geofisici possono essere distorti dal rumore di fondo, oppure essere campionati irregolarmente e discontinuamente.

I metodi iterativi si basano sulla definizione di un modello iniziale di velocità del sottosuolo (modello a priori) costruito attribuendo un valore di velocità a tutte le celle del grid. Attraverso il modello iniziale è possibile calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Successivamente è possibile calcolare i tempi residui, ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, e pertanto definire l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale/reale:

$$D_i = t_{obs_i} - t_{calc_i}$$

dove $i = 1, 2 \dots N$

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile.

La soluzione del sistema di equazioni, che risulta sovradeterminato poiché ha un numero di equazioni superiore al numero di incognite, definisce la variazione da applicare al modello iniziale (matrice di risoluzione). L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta compresa in un range di errore accettabile.

La risoluzione delle sezioni tomografiche è proporzionale al numero e alla dimensione delle celle del grid ed è limitata dalla media della lunghezza d'onda del segnale che determina la dimensione minima della cella. Una anomalia può essere individuata solamente se l'effetto prodotto sul tempo di arrivo è maggiore della precisione della lettura del tempo di arrivo stesso.

La dimensione minima (Δl) che un'anomalia dovrebbe avere per generare una variazione misurabile nei tempi di arrivo dei raggi che vi passano attraverso può essere calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot (v_a \cdot v_m)$$

v_a = velocità dell'anomalia

v_m = velocità media nel mezzo

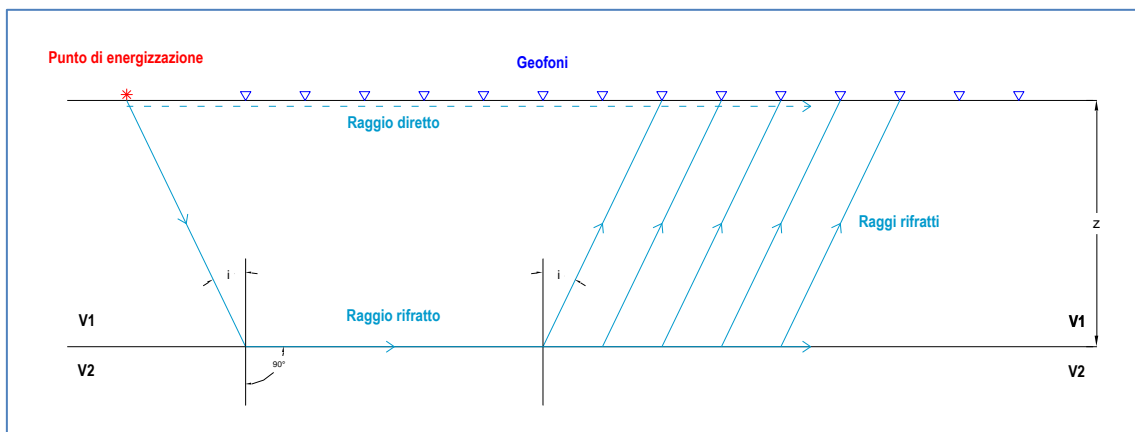
$$\Delta v = |v_a - v_m|$$

Δt = errore nella lettura dei primi arrivi

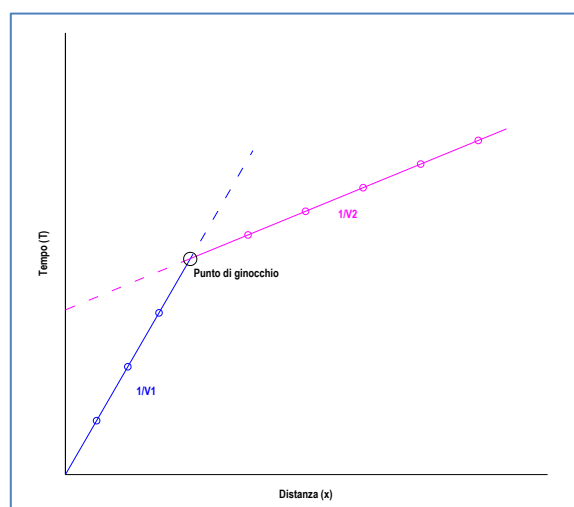
Al fine di evitare artefatti matematici senza corrispondenza fisica e geologica, le dimensioni della cella devono risultare inferiori alle dimensioni dell'anomalia, inoltre occorre tenere in considerazione il numero di raggi che attraversano le celle, i quali a loro volta dipendono dalla distanza sorgente-ricevitore, dal numero di sorgenti e ricevitori e dalla loro distribuzione.

2.1.1.1 TOMOGRAFIA SISMICA

Il metodo sismico impiegato utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo ad es. l'interfaccia tra due mezzi a diverse velocità (si ipotizza che la velocità aumenti con la profondità).



Misurando i tempi di primo arrivo (FBP First Break Point) degli impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi.



Le onde dirette viaggiano dalla sorgente al ricevitore con velocità V_1 (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a $1/V_1$) e raggiungono i ricevitori in un tempo:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Le onde rifratte viaggiano lungo l'interfaccia a una profondità z (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea retta con pendenza $1/V_2$ che intercetta l'asse dei tempi a $x=0$) e raggiungono i ricevitori in un tempo (tempo di intercetta):

$$T_i = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 * V_1}$$

Il punto di intersezione tra le due rette, definito come punto di ginocchio, permette di calcolare la profondità del rifratte.

2.1.2 MASW 2D

La tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) utilizza le onde sismiche di superficie generate con sorgente meccanica (tipicamente massa battente) al fine di determinare un modello del sottosuolo della velocità delle onde di taglio (S).

Questa tipologia d'indagine analizza la dispersione delle onde di superficie e si basa sul principio che le varie componenti (frequenze) del segnale sismico che si propaga, viaggiano ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del mezzo.

La dispersione è una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a frequenza maggiore, per un dato modo, e presentano normalmente velocità di fase più elevate.

Tradizionalmente le MASW sono effettuate tramite analisi delle onde di Rayleigh, che vengono registrate tramite geofoni a componente verticale e utilizzando una sorgente ad impatto verticale (massa battente).

Le onde di Rayleigh costituiscono un particolare tipo di onde di superficie che si trasmettono sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo e sono il risultato dell'interferenza tra onde di pressione (P) e di taglio verticali (S_v). In un mezzo stratificato queste onde sono di tipo guidato e dispersivo, e vengono definite pseudo-Rayleigh.

Quindi poiché la dispersione delle onde di superficie dipende dalle caratteristiche del sottosuolo e in particolare dalle sue variazioni verticali, dalla determinazione delle curve di dispersione è possibile ricavare le caratteristiche del mezzo:

- velocità delle onde di taglio
- spessore degli strati

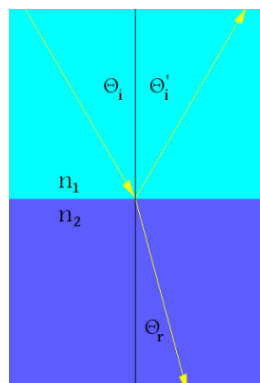
2.1.3 SISMICA A RIFLESSIONE

Le indagini a riflessione consentono di definire lungo un profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti e la loro geometria (spessori e superfici di contatto).

Il principio base su cui si fonda la tecnica sismica a riflessione consiste nell'idea che una volta generato un segnale, ad un istante noto, si possa misurare il tempo che impiegano le onde sismiche così prodotte ad attraversare il mezzo considerato, essere riflesse e raggiungere i ricevitori posti in superficie. Questo tempo è noto come "two-way travel time" (TWTT) e la sua valutazione rappresenta l'essenza della tecnica a riflessione.

La sismica a riflessione, così come accade per la sismica a rifrazione, si basa sulla validità delle leggi di Snell alle quali occorre accennare al fine di comprendere i fenomeni che determinano i percorsi, le geometrie, le velocità e le caratteristiche dei raggi sismici.

Consideriamo un piano di incidenza individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di discontinuità tra il mezzo 1 ed il mezzo 2 (aventi caratteristiche meccaniche differenti) ed ipotizziamo che un'onda colpisca la loro superficie di separazione. In questo caso una parte dell'onda incidente subirà un fenomeno di riflessione e continuerà a viaggiare nel mezzo 1 (raggio riflesso), mentre una parte proseguirà il suo percorso e raggiungerà il mezzo 2 (raggio rifratto).



Secondo la **Prima legge di Snell** il raggio incidente, il raggio rifratto, il raggio riflesso e la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi appartengono allo stesso piano, chiamato *piano di incidenza*.

La **Seconda legge di Snell** ci dà delle informazioni sulla relazione che lega l'angolo di riflessione e quello di incidenza sottolineando che:

$$\theta_i = \theta_i'$$

Il raggio rifratto, invece, viene trasmesso nel mezzo 2 e forma con la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi l'angolo di rifrazione θ_r .

Secondo la **Terza legge di Snell** il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione è uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

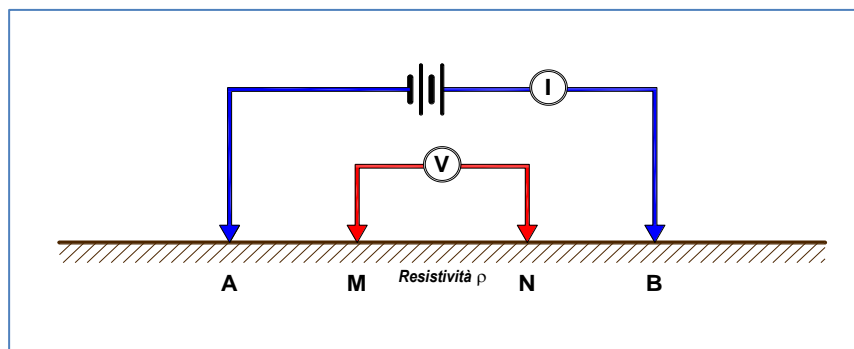
Sulla base di quanto detto consegue che se $v_2 > v_1$ il raggio rifratto si allontanerà dalla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi; se, invece, $v_2 < v_1$ allora il raggio rifratto si avvicinerà alla normale.

2.2 TOMOGRAFIA ELETTRICA

Le indagini geoelettriche costituiscono un metodo geofisico che permette di ricostruire la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo.

La grandezza che viene comunemente misurata è la resistività elettrica, ma possono essere misurati altri parametri quali il potenziale spontaneo e la polarizzazione indotta.

Il principio sul quale si basa questa metodologia è così schematizzabile: una corrente viene immessa nel mezzo attraverso una coppia di elettrodi AB (dipolo di immissione) e la differenza di potenziale risultante viene misurata attraverso un'altra coppia di elettrodi MN (dipolo di ricezione). Un voltmetro consente la misura della differenza di potenziale.



2.2.1 RESISTIVITÀ ELETTRICA

La corrente si propaga nel sottosuolo attraverso:

- conduzione elettronica: la corrente si propaga attraverso gli elettroni liberi, come nei metalli
- conduzione elettrolitica: la corrente si propaga attraverso il movimento degli ioni disciolti nell'acqua presente nel sottosuolo.

I metodi geoelettrici si basano sull'immissione di una corrente nel sottosuolo e sulla misura della differenza di potenziale prodotta per determinare la distribuzione della resistività. Queste grandezze sono legate tra loro dalla Legge di Ohm: il rapporto tra la differenza di potenziale ai capi di un conduttore e la corrente che lo attraversa è la resistenza:

$$\Delta V = RI$$

Dove :

ΔV = differenza di potenziale (volt)

I = intensità di corrente (ampere)

R = resistenza (ohm)

La resistenza dipende dalle caratteristiche fisiche e geometriche del conduttore e può essere così espressa:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

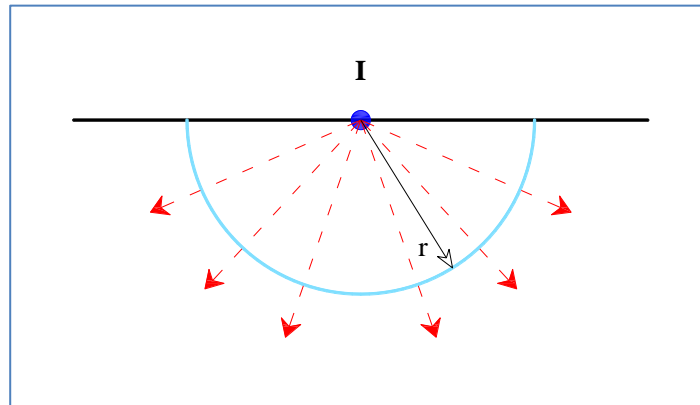
Dove :

ρ = resistività (ohm.m)

l = lunghezza del conduttore (m)

A = sezione del conduttore (m²)

Considerando un elettrodo che immette corrente in un mezzo omogeneo, in qualunque superficie semisferica, la corrente si propaga radialmente.



La densità di corrente J immessa da un elettrodo in un semispazio può essere così espressa:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

e la differenza di potenziale:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Considerando i quattro elettrodi utilizzati nelle indagini geoelettriche, è possibile esprimere la differenza di potenziale in questo modo:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

Dove :

r_1 = distanza tra M e A

r_2 = distanza tra M e B

r_3 = distanza tra N e A

r_4 = distanza tra N e B

La resistività potrà essere così espressa:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} k$$

Dove

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

k è il fattore geometrico specifico per ogni configurazione elettrodica.

La resistività calcolata sopra è definita per un mezzo omogeneo, ma il sottosuolo è anisotropo e disomogeneo, pertanto l'equazione definisce una **resistività apparente**, poiché varia in funzione della posizione e/o della direzione dello stendimento.

Non rappresenta né la resistività reale, né il valore medio della resistività reale, ma la resistività di un equivalente semispazio omogeneo e isotropo.

2.2.2 PROPRIETÀ ELETTRICHE DEI MATERIALI

La resistività elettrica dei terreni e delle rocce dipende da numerosi fattori quali il contenuto di fluidi e di minerali, la porosità e il grado di saturazione del mezzo.

Questa grandezza è funzione essenzialmente della conduzione elettrolitica nei fluidi presenti tra i contatti dei granuli o contenuti in pori, fratture e faglie. La conduzione elettrolitica dipende dai seguenti fattori:

1. **salinità**: sono gli ioni disciolti in acqua a condurre la corrente; ne consegue pertanto che le soluzioni caratterizzate da un elevato contenuto di sali disciolti (ioni) sono quelle maggiormente conduttive;
2. **porosità**: la resistività e la porosità delle rocce sedimentarie sono generalmente correlate attraverso la legge di Archie, che per rocce prive di argilla può essere così espressa:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m}$$

dove:

ρ_r = resistività della roccia

ρ_e = resistività della soluzione presente nei pori della roccia

ϕ =porosità

a = coefficiente di saturazione (compreso tra 0.6 e 1.0)

m = fattore di cementazione (compreso tra 1.4 e 2.2)

3. **presenza di materiali coesivi/argillosi**: le argille hanno una conduttività normalmente elevata poiché possiedono un doppio strato di scambio cationico. Questo strato ha una notevole capacità di assorbimento dei cationi che comporta un aumento della conduttività;
4. **grado di saturazione**: è il rapporto tra il volume dell'acqua presente nei pori e il volume totale dei pori. Maggiore è il grado di saturazione, minore è la resistività dei materiali.

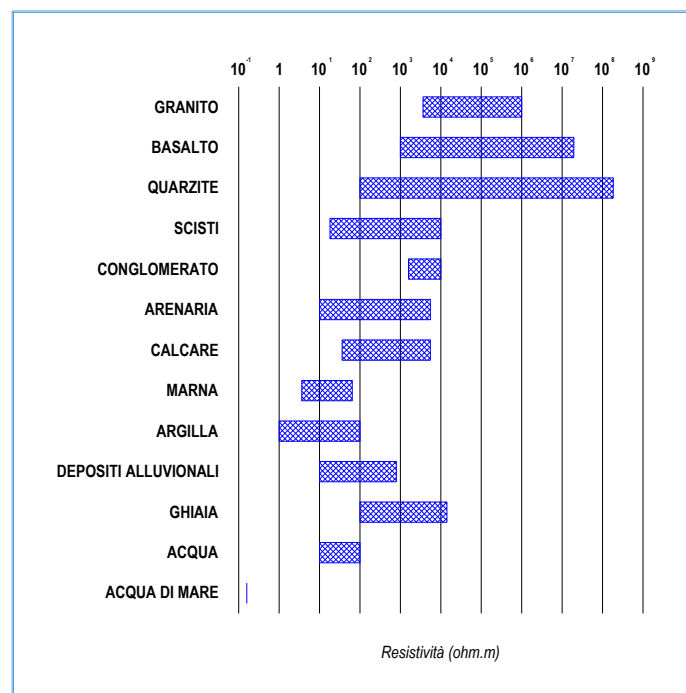
Poiché i fattori che possono influenzare la resistività sono numerosi, una stessa tipologia di materiale può essere caratterizzato da un range di resistività piuttosto ampio.

In generale è possibile affermare quanto segue:

- ✓ materiali naturali come le rocce ignee e metamorfiche sono caratterizzate da un comportamento fortemente resistivo che può raggiungere valori dell'ordine di grandezza pari a 10^7 ohm*m (in funzione della porosità e del contenuto di acqua);
- ✓ materiali naturali come le rocce sedimentarie presentano range di resistività variabili da qualche decina di ohm*m fino a 10^5 ohm*m (in funzione del grado di fratturazione);

- ✓ materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm*m;
- ✓ materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm*m;
- ✓ la resistività dell'acqua nel sottosuolo presenta valori di resistività che variano da 10 a 100 ohm*m (in funzione dei sali disciolti). La presenza di acqua diminuisce i valori di resistività propri del materiale.
- ✓ la presenza di vuoti (es. scavamenti) produce valori di resistività molto elevati avendo il vuoto caratteristiche elettriche di resistività infinita;

Nella tabella di seguito si riportano dei range di resistività tipici di alcuni materiali:



2.2.3 TECNICHE TOMOGRAFICHE

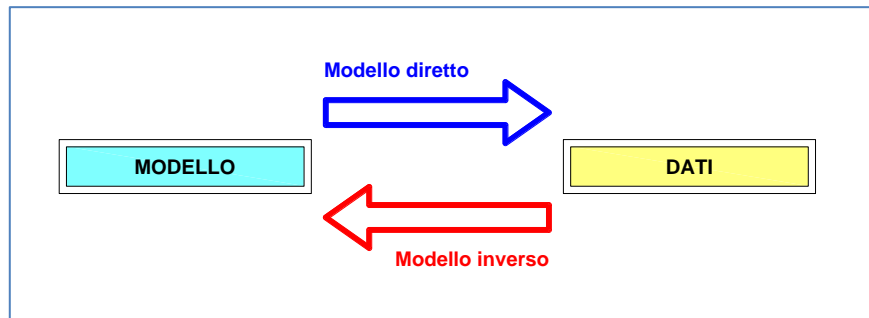
La tomografia elettrica nasce dall'unione dei tradizionali profili elettrici con i metodi di inversione tomografica. Questa metodologia permette di ricostruire attraverso immagini le variazioni di resistività elettrica del sottosuolo.

Come nei tradizionali profili elettrici la tomografia necessita di quattro elettrodi per la misura della resistività: due per l'immissione della corrente nel sottosuolo e due per la misura della differenza di potenziale.

La differenza fondamentale consiste nell'utilizzare decine di elettrodi disposti lungo un allineamento alternativamente come elettrodi di corrente e di misura. Il numero di misure che si possono ottenere è pari a $n(n-3)/2$ dove n è il numero degli elettrodi. Il maggiore vantaggio attribuibile alla tomografia elettrica rispetto alle tradizionali indagini 1D o 2D è quello di poter ricostruire non solo le variazioni verticali di resistività nello spazio, ma anche quelle orizzontali.

Obiettivo delle indagini è la ricostruzione della distribuzione nel sottosuolo della resistività. I valori di corrente, di differenza di potenziale, insieme alla disposizione degli elettrodi e al fattore geometrico

permettono di ottenere la resistività apparente del sottosuolo. Questi valori costituiscono i dati attraverso i quali è possibile ricostruire un'immagine del sottosuolo (modello 2D) mediante il processo di inversione tomografica.



La posizione degli elettrodi, la distribuzione della resistività apparente nel sottosuolo e la corrente immessa costituiscono i parametri del modello diretto attraverso i quali è possibile ricostruire un modello sintetico del potenziale elettrico.

Il modello diretto può essere ricostruito calcolando il potenziale V attraverso l'equazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -I$$

dove:

V = potenziale elettrico (incognita)

I = corrente immessa

σ = distribuzione della conducibilità (per sezioni 2D $\sigma(x,z)$)

β = parametro che definisce le condizioni al contorno (è uguale a zero in superficie)

con le seguenti condizioni al contorno:

$$\text{in superficie } \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \text{ e in qualunque altro punto del sottosuolo } \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{r} V = 0$$

L'inversione ha lo scopo di definire a partire dal modello diretto ottenuto, il modello che meglio si adatta ai valori misurati, cioè minimizza le differenze tra valori calcolati e misurati. Il modello calcolato deve corrispondere ai valori misurati entro una percentuale accettabile di errore (valutato come RMS o L2 norm).

Il modello di resistività iniziale utilizzato nel processo di inversione può essere:

1. pseudosezione (rappresentazione 2D dei valori di resistività apparente misurata ottenuta mediante interpolazione geometrica dei dati)
2. valore medio della resistività apparente
3. modello a-priori definito dall'operatore

Il processo è iterativo e termina quando soddisfa i criteri stabiliti dall'operatore, che possono essere:

- il numero delle inversioni
- la percentuale di riduzione dell'errore $\frac{|RMS_n - RMS_{n-1}|}{RMS_{n-1}} * 100\%$
- il valore di RMS $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{meas}}{d_i^{meas}} \right)^2}{N}} * 100\%$
- il valore di L2 normalizzata $\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i^{calc} - d_i^{meas}}{3\% * d_i^{meas}} \right)^2}{N}$

Poiché la soluzione del problema non è unica è possibile limitare il numero di soluzioni introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di resistività, conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.

3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le prove sono state effettuate con la strumentazione di seguito riportata.

3.1 METODI SISMICI

3.1.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI

I dati sono stati acquisiti con sismografi GEODE della Geometrics dotati di 24 canali. I moduli Geode sono dotati di dinamica a 24 bit, possibilità di stacking, filtri analogici e digitali.

Il dato è stato registrato a finestra aperta, vale a dire senza filtri in acquisizione che potrebbero precludere l'impiego del dato stesso su tutto lo spettro di frequenze acquisibili (ciò assicura che non venga intaccata in fase di acquisizione la completezza delle informazioni rilevabili).

Nella tabella si riportano le caratteristiche tecniche del sismografo.

<i>A/D Conversion</i>	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
<i>Dynamic Range</i>	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
<i>Sample Interval</i>	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
<i>Record Length</i>	16,000 samples
<i>Maximum Input Signal</i>	2.8 VPP
<i>Distortion</i>	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
<i>Bandwidth</i>	1.75 Hz to 20 kHz
<i>Common Mode Rejection</i>	>-100 dB at <=100 Hz, 36 dB
<i>Crosstalk</i>	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
<i>Noise Floor</i>	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
<i>Stacking Trigger Accuracy</i>	1/32 of sample interval
<i>Input Impedance</i>	20 kOhm, 0.02 uf
<i>Anti-alias Filters</i>	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
<i>Delay</i>	0 to 9999 ms in 1 ms steps
<i>Acquisition and DisplayFilters</i>	<ul style="list-style-type: none"> ⊖ LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth. ⊖ Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency. ⊖ HighCut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.
<i>Triggering</i>	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
<i>Power</i>	12V external battery

3.1.2 SORGENTI

In fase d'acquisizione è stata utilizzata come sorgente di energia una massa battente da 10kg. L'istante di trigger è fornito da un geofono posizionato in prossimità del punto di battuta.

Al fine di ottimizzare il segnale sismico in ricezione per ogni posizione di energizzazione è stata utilizzata la funzione di stacking; sono state infatti eseguite diverse ripetizioni dell'energizzazione per ogni punto sorgente con successiva somma dei segnali acquisiti (stacking). Le tecniche di stack riducono gli effetti di rumore (segnale incoerente) aumentando (stack – somma) il segnale coerente, migliorando quindi la qualità del segnale sismico di interesse nella prospezione. Per tal ragione al fine di ottenere l'ottimizzazione del

rapporto S/N (signal to noise) tutte le indagini sismiche sono state effettuate con una ripetizione delle energizzazioni, e conseguente somma del segnale in ricezione mediante stacking, compresa tra le 4 e le 6 volte.

Per la tomografia sismica a rifrazione l'energizzazione per la generazione delle onde di compressione P e delle onde di taglio S è stata rispettivamente eseguita effettuando un'energizzazione in senso verticale e trasversale rispetto al suolo.

3.1.3 RICEVITORI

Per le indagini di tomografia sismica Vp e Vs sono stati utilizzati geofoni con asse verticale e orizzontale con frequenza pari a 14 Hz.

Per le indagini Masw 2D è stata utilizzata una catena land-streamer con 24 geofoni spazati 2m. I geofoni ad asse verticale hanno frequenza propria pari a 4,5Hz e sono installati su piastre in teflon con sistema che garantisce orizzontalità e necessario accoppiamento al terreno.

I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

I cavi utilizzati per l'acquisizione sono cavi con guaina in polipropilene schermati con connettori tipo militare Bendix a 36 pin.

3.2 METODO GEOELETRICO

Per il rilievo in esame è stato utilizzato il sistema multielettrodico ABEM Terrameter LS con elettrodi passivi. Ogni elettrodo è collegato all'unità centrale e contiene l'elettronica di comando per la gestione dell'operazione di switching.

L'unità centrale esegue in batch la sequenza di misure secondo la tecnica walk-away: definite le combinazioni di elettrodi di misura e corrente si rilevano profili di resistività con diverse spaziature elettrodiche in corrispondenza di diverse posizioni fino a coprire l'intero stendimento.

L'automazione del processo di acquisizione mediante centralina di switch intelligente velocizza le operazioni di acquisizione dati.

Nella tabella di seguito si riporta le caratteristiche tecniche del sistema impiegato:

Receiver	
No. Of Channels	4,8 or 12 input (+2 for Tx monitoring)
Isolation	All channels are galvanically separated
Input voltage Range	+/- 600 V
Input Impedance	200 MOhm
Precision	0,1 %
Accuracy	0,2 %
Resolution	Theoretical 3 nV at 1 sec integration
Linearity	0.005%
Range	+/- 2.5 V, 200 MOhm +/- 15 V, 30 MOhm +/- 600 V, 20 MOhm
Flat Frequency Response	Better than 1% up to 300 Hz
Measuring	
Resistivity	YES
SP	YES

IP	YES
Full wave form	Sample and average to requested data. Possible to activate recording to file for post analysis
Dynamic veraging	24 bit A/D conversion
Data Sampling Rate	30 kHz
Cycle time	From 0.4 sec to 28,7 sec User selectable, resistivity
Pulse time	From 0.1 sec to 8,2 sec. User selectable
IP Windows	Arbitrary windows flexibility configured to powerline frequencies
Transmitter	
Output power	250 W
Current transmission	True Current Transmitter
Output Current Accuracy	Better than 0.4 %
Maximum Output Current	2500 mA
Maximum Output Voltage	+/- 600 V 1200 V peak to peak
Instant Polarity Changer	YES
Accuracy	0.4 %
Precision	0.1 %
Self Diagnostics	Temperature, Power dissipation, Monitoring
Safety	Emergency Interrupter easily accessible
Tx Monito	
Voltage	+/- 600 V
Current	+/- 2500 mA Full waveform monitored
Current Accuracy	0.2 %
Current Precision	0,1 %

3.3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Lungo tutte le sezioni è stato eseguito il rilievo dei punti di stazione elettrodica e sismica mediante sistema GPS previo inquadramento topografico.

È stato utilizzato il sistema GPS Stonex S8N Plus avente le seguenti caratteristiche:

➤ **Receiver**

- Channels: 120
- Satellite tracked: GPS - Simultaneous L1, L2, L2C, L5. GLONASS - Simultaneous L1, L2; GALILEO - E5a, E5b, Alt-BOC; BeiDou - B1, B2; SBAS - Simultaneous L1 C/A, L5; QZSS (Quasi - Zenith Satellite System); L-Band
- Position Rate: Up to 5Hz
- Signal Reacquisition: <1s
- RTK Signal Initialization <10s
- Hot start: <35s
- Initialization reliability >99.9%
- Internal memory: 256MB
- Micro SD Card: 4 GB Internal Memory (Over 60 days of raw static data storage with recording sample every 1s)

➤ **Positioning**

- Static
 - Horizontal: 5mm +0.5ppm RMS
 - Vertical: 10mm +0.5ppm RMS
- Static (Long time observations)
 - Horizontal: 3mm +0.1ppm RMS
 - Vertical: 3.5mm +0.4ppm RMS
- Code differential positioning
 - 3D: 0.25m RMS



- SBAS Positioning: 0.6m 3D RMS²

➤ **Comunication**

- Connectors I/O 7pins Lemo and 5-pins Lemo interfaces. Multicable with USB interface for connecting with PC
- Bluetiith Device: 2.4GHz class II - maximum range 50m
- Reference Outputs: CMR, CMR+, RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1
- Navigation Outputs Navigation output support for NMEA-0183 and detailed NovAtel ASCII and binary logs.

➤ **Integrated GNSS antenna**

- High accuracy four constellation microstrip antenna, zero-phase center, with internal multipath suppressive broad

➤ **Internal radio**

- Frequency range: 403-473MHz
- Channel Spacing: 12.5KHz / 25KHz
- Emitting Power: 0.5/1/2W
- Maximum Range: 3-4 Km (urban environment), 5-6 Km with optimal conditions
- Radio Protocol: Trasparent EOT/EOC/FST, SATEL, South, Stonex Type 1, TRIMTALK II/IIe, trimmark 3, TRIMTALK 450S.

4 DESCRIZIONE DEL RILIEVO

La presente campagna geofisica, finalizzata alla modellizzazione 2D del sottosuolo caratterizzato da fenomeno di frana, è stata eseguita con le seguenti tipologie d'indagine da superficie:

- Indagini in sismica a rifrazione (onde di compressione Vp e di superficie Vs)
- Indagini in sismica a riflessione
- Indagini Masw 2D
- tomografia elettrica

Di seguito si riporta la descrizione delle quantità di rilievo per ogni tipologia di indagine.

4.1 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE E INDAGINI DI SISMICA A RIFLESSIONE

L'indagine sismica ha previsto l'esecuzione di n. 5 profili di rilievo realizzati con tecnica sismica a rifrazione in modalità tomografica (basata sulla velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio) e sismica a riflessione (velocità onde di compressione).

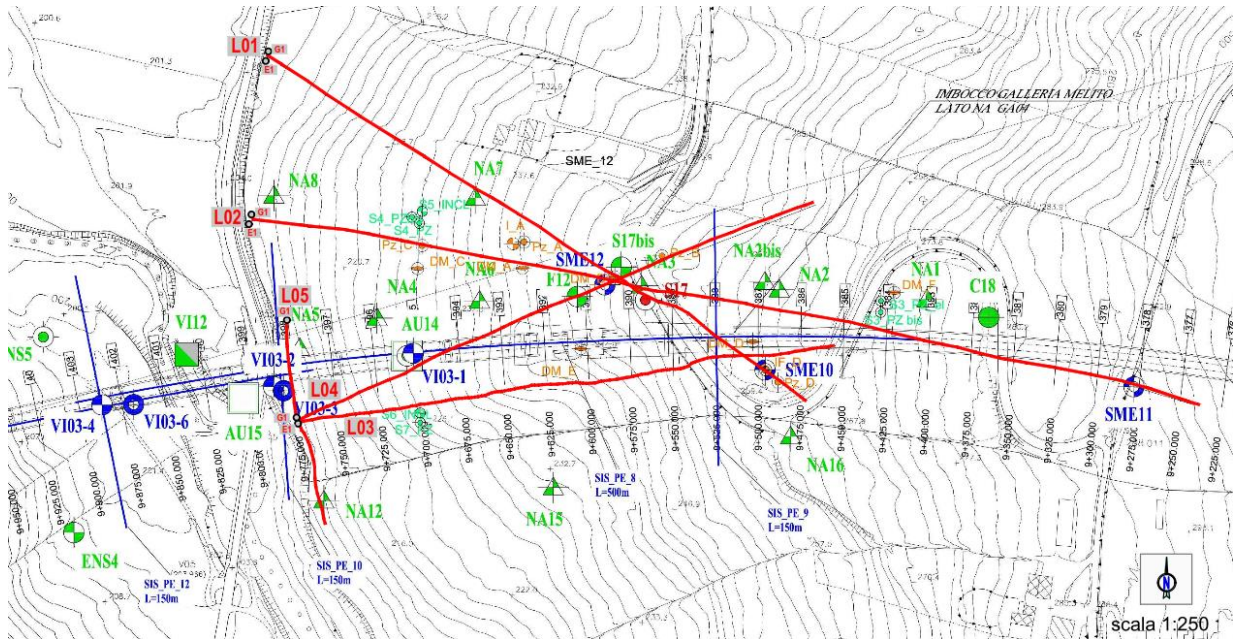
Il profilo L05 è stato acquisito con la sola tecnica sismica a rifrazione Vp come analisi di approfondimento su un'area di limitata estensione del corpo frana a valle della zona indagata.

Nella tabella seguente si riportano codifiche linea e lunghezza delle sezioni di rilievo.

ID	PUNTI DI RICEZIONE	INTERDISTANZA	SISMICA A RIFRAZIONE		SISMICA A RIFLESSIONE
			Onde P	Onde S	
1	192	2.0	382.0m	382.0m	382.0m
2	288	2.0	574.0m	574.0m	574.0m
3	165	2.0	328.0m	328.0m	328.0m
4	168	2.0	334.0m	334.0m	334.0m
5	24	5.0	115.0m		
TOTALE			1733.0m	1618.0m	1618.0m

Ogni tiro è stato ripetuto almeno una volta per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

Si riporta di seguito la planimetria con l'ubicazione delle n.5 sezioni di rilievo.



Planimetria ubicazione sezioni di rilievo indagini in tomografia sismica a rifrazione onde P e S e indagini di sismica a riflessione

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo ed i risultati ottenuti sono riportati in allegato **(Tav.01-4)**.

4.2 MASW 2D

Il rilievo sismico è stato eseguito con n.24 geofoni in modalità streamer con interdistanza pari ad 2m e con le posizioni di energizzazione ad una estremità con offset pari a 12m. L'array è stato spostato di 2m lungo il profilo da acquisire con ripetizione dell'array fino a fine tratta

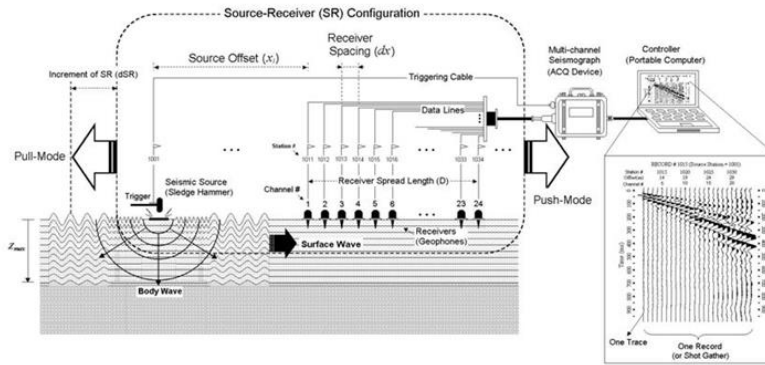
Ogni tiro è stato ripetuto almeno tre volte per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

Di seguito si riporta lo schema di esempio della geometria di acquisizione della Masw 2D.



Geometria di acquisizione Masw 2D con l'utilizzo dello streamer a 24 canali

Nella figura seguente viene rappresentato lo schema di acquisizione del dato sismico MASW 2D.

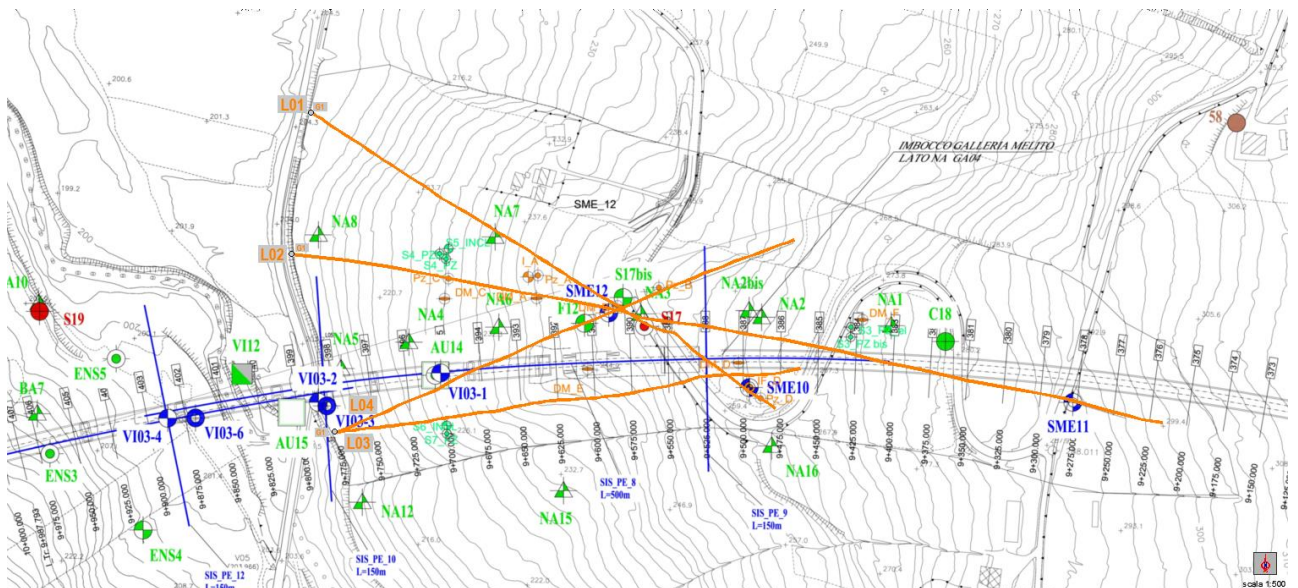


Schema di acquisizione Masw 2D (Park Seismic LLC)

Nella tabella seguente si riportano codifiche linea e lunghezza delle sezioni di rilievo.

ID	LUNGHEZZA (m)
1	373.0
2	609.0
3	317.5
4	336.0
TOTALE	1635.5m

Si riporta di seguito la planimetria con l'ubicazione delle n.4 sezioni di rilievo.



Planimetria ubicazione sezioni di rilievo indagini Masw 2D

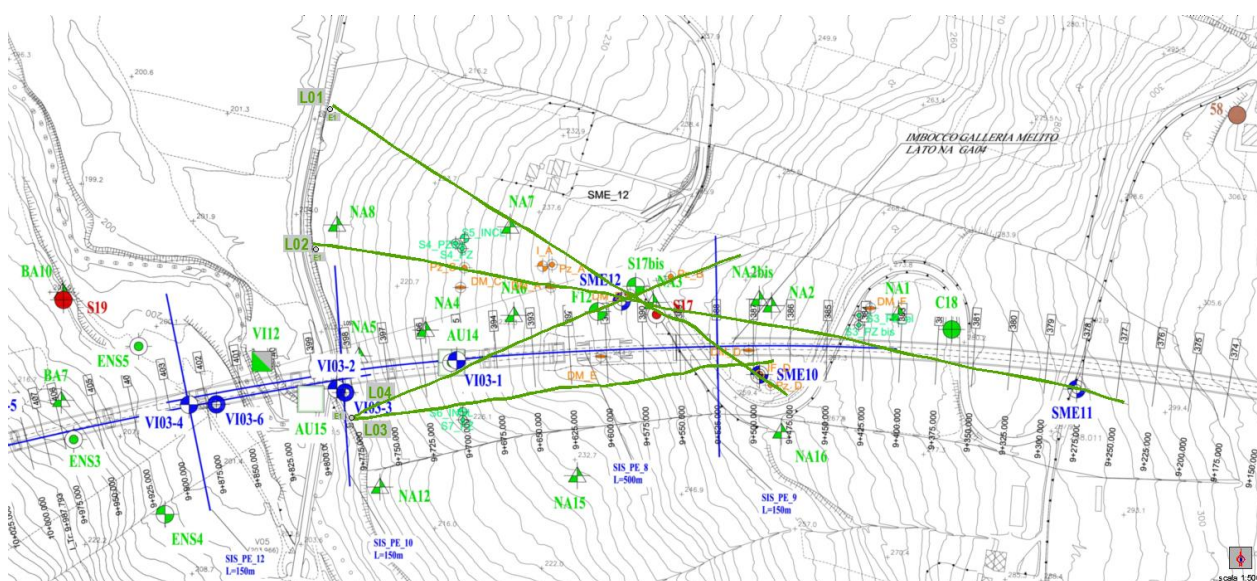
4.3 TOMOGRAFIA ELETTRICA

L'indagine ha previsto l'esecuzione di n. 4 profili di rilievo eseguiti con metodologia di acquisizione in tomografia elettrica.

Nella tabella si riporta codifica linea, il numero dei punti di ricezione, l'interdistanza elettrodica e la lunghezza dello stendimento:

ID	PUNTI DI RICEZIONE	INTERDISTANZA	TOMOGRAFIA ELETTRICA
1	188	2.0	374.0m
2	286	2.0	570.0m
3	151	2.0	300.0m
4	151	2.0	300.0m
TOTALE			1545.0m

Si riporta di seguito la planimetria con l'ubicazione delle n.4 sezioni di rilievo.



Planimetria ubicazione sezioni di rilievo indagini tomografia elettrica

Le posizioni delle linee di rilievo ed i risultati ottenuti sono riportati in allegato (**Tav.01-04**).

5 ELABORAZIONE DATI

Si descrivono nei capitoli seguenti le modalità di elaborazione dei dati acquisiti, per ogni tipologia di indagine.

5.1 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE VP E VS

Le sezioni sismiche sono state acquisite ed elaborate con tecnica tomografica. La fase di processing ha previsto i seguenti step:

Definizione dei tempi di arrivo

I dati acquisiti sono stati convertiti da formato SEG 2 a SU (Seismic Unix) con il software SeisOpt Picker. Utilizzando lo stesso software, sono stati analizzati i film sismici acquisiti e successivamente determinati per ogni traccia i tempi di primo arrivo delle onde di compressione (P) e di taglio (S).

Elaborazione tomografica

L'elaborazione tomografica è stata effettuata con il software Rayfract che utilizza il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Traveltime).

L'algoritmo di inversione utilizza l'approccio basato sulle zone di Fresnel che costituisce un'alternativa ai metodi di inversione basati sul ray tracing.

Gli assunti di base di tale modellizzazione sono:

- i raggi sismici sono considerati come fronti d'onda sferici;
- il range di frequenza dell'impulso sismico è considerato finito (condizione rappresentativa della realtà);
- la perturbazione sismica indotta si propaga in uno spazio finito 3D (zona di Fresnel) attorno al raggio sismico.

L'analisi dei tempi di arrivo permette di definire il modello iniziale di velocità (gradiente), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui (T_r), ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, viene definita l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale.

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui (T_r) e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta accettabile.

I risultati dell'inversione tomografica sono:

- matrici V_p e V_s ;
- dromocrone calcolate;
- valori di RMS dei tempi residui;
- matrice di copertura (coverage): copertura dei raggi sismici nello spazio indagato;

- matrice di risoluzione: scostamento del modello finale dal modello iniziale (variazione apportata dal processo tomografico al modello iniziale);
- matrice di inversione tomografica dei valori Vp e Vs per singola cella del modello

Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati delle matrici Vp e Vs sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer 13. L'algoritmo utilizzato per tale rappresentazione è il kriging con un valore di smoothing (filtro spaziale) basso. Questa funzione di interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza (in questo caso la velocità delle onde di compressione e di taglio), cioè l'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità. La sezione ottenuta è stata riportata su tavola costruita con il software AutoCAD 2017 (Autodesk).

5.2 MODALITÀ DI ANALISI DEI GRADIENTI DI PARAMETRI GEOFISICI MODELLIZZATI NEL CONTINUO

Nel presente paragrafo vengono descritte differenti modalità di analisi dei gradienti di modello per i parametri geofisici definiti dalle indagini descritte sopra.

Le analisi di seguito descritte concorreranno all'interpretazione delle variazioni di tipo meccanico (sismica) che caratterizzano il confinamento del corpo frana, ovvero la definizione della geometria della superficie di scivolamento.

5.2.1 GRADIENT OPERATOR

L'analisi per gradienti prevede l'impiego dell'operatore di calcolo differenziale e integrale (Gradient Operator), che genera una griglia delle pendenze più ripide (ovvero l'ampiezza del gradiente) in qualsiasi punto del modello. Questa operazione è simile all'operazione Pendenza terreno, ma l'operatore gradiente viene riportato come un numero (aumento della corsa) anziché in gradi e la direzione è opposta a quella del gradiente. L'operatore del gradiente è zero per una zona senza gradiente e tende all'infinito quando il gradiente è massimo.

La definizione del gradiente produce la seguente equazione:

$$\|\vec{g}\| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

5.2.2 DERIVATE DIREZIONALI

L'analisi della direzione del gradiente (verticale, orizzontale o inclinato che sia) è di fondamentale importanza per l'analisi dei modelli agli elementi finiti ottenuti per i metodi tomografici qui utilizzati o nei modelli che comunque forniscono la variazione del parametro obiettivo nel continuo.

Le derivate direzionali del calcolo forniscono informazioni sul gradiente, o tasso di variazione del gradiente, della superficie grigliata in una direzione specificata. Poiché questo tiene conto di una direzione specificata, questa pendenza, o tasso di variazione del gradiente, potrebbe non essere il gradiente più ripido in un dato punto.

Sia Z una funzione di X e Y in un dominio che include il punto P. Con quale velocità cambia Z se ci muoviamo dal punto P in una direzione specificata? Nella direzione dell'asse X, la velocità di variazione per Z è

$$\frac{\partial Z}{\partial X}$$

e la velocità di variazione nella direzione dell'asse Y per Z è

$$\frac{\partial Z}{\partial Y}$$

Definizione - La derivata direzionale (Schwartz, 1974)

$$\gamma(h) = C_0 + S \cdot h$$

Sia $f(x, y)$ per il dominio D. Sia P un punto di D, sia L una retta passante per P, sia Q un punto di L a distanza ΔS da P

$$\gamma(h) = C_0 + S \cdot h$$

tale che il segmento di retta PQ giace in D, e sia

$$\Delta f = f(x_Q, y_Q) - f(x_P, y_P)$$

Quindi

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta S} = \frac{df}{ds}$$

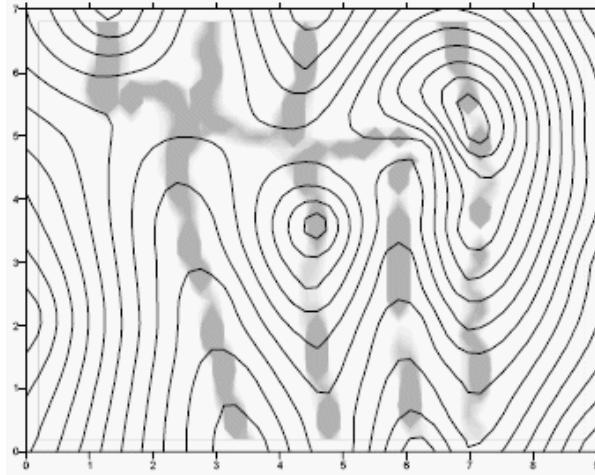
è la derivata direzionale di $f(x, y)$ in P nella direzione di L, cioè da P a Q.

Sono disponibili tre opzioni di derivate direzionali: derivata prima, derivata seconda e curvatura. È possibile per tali funzioni specificare quindi la direzione angolare per l'operazione finalizzando l'analisi allo studio del corpo in frana.

Di seguito viene analizzata l'opzione "**curvatura**" dato che in un corpo di frana non è certa né spesso non è univoca la modalità di sviluppo della superficie di scivolamento.

La derivata direzionale del calcolo, Curvatura, è una misura della velocità di variazione dell'angolo di inclinazione dei piani tangenziali su una linea di profilo definita dalla superficie lungo una direzione specificata. La curvatura è riportata come valore assoluto del tasso di variazione ed è, quindi, un numero positivo. La curvatura è simile alla seconda derivata.

La curvatura direzionale è il valore assoluto della velocità di variazione, in una determinata direzione, dell'angolo di inclinazione del piano tangente.



Es. la mappa di contouring del file di modello parametro originale è sovrapposta con la mappa di curvatura direzionale piena. La curvatura massima nella direzione X (come indicato dal grigio più scuro riempimento del contorno) si verifica in corrispondenza di valli e creste.

La formula matematica per la curvatura direzionale di una superficie $f(x, y)$ in una direzione definita da s è:

$$K_s = \frac{\left| \frac{d^2f}{ds^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{df}{ds} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

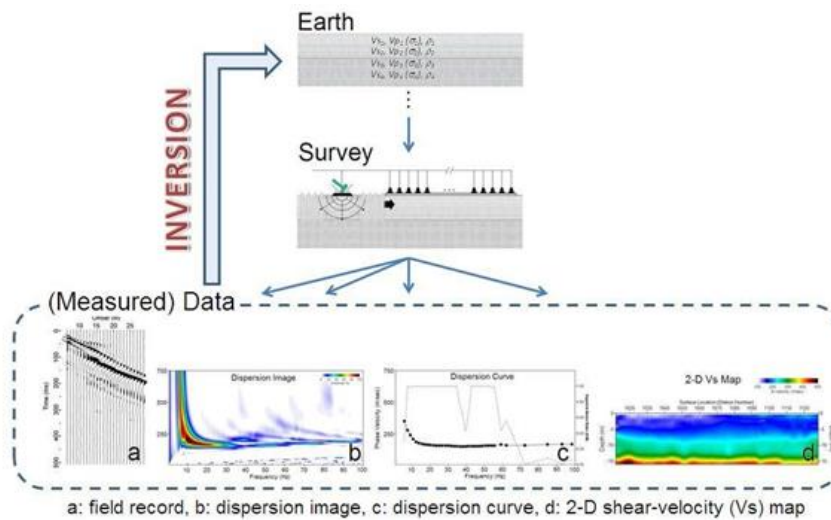
vedi Schwartz, 1974

$$K_\alpha = \frac{\left| \frac{d^2f}{dx^2} \cdot \cos^2(\alpha) + 2 \frac{d^2f}{dx dy} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha) + \frac{d^2f}{dy^2} \cdot \sin^2(\alpha) \right|}{\left[1 + \left(\frac{df}{dx} \cdot \cos(\alpha) + \frac{df}{dy} \cdot \sin(\alpha) \right)^2 \right]^{3/2}}$$

5.3 INDAGINI MASW 2D

La metodologia MASW 2D ha previsto tre step di elaborazione mediante l'utilizzo del software di elaborazione ParkSEIS della Park Seismic LLC.

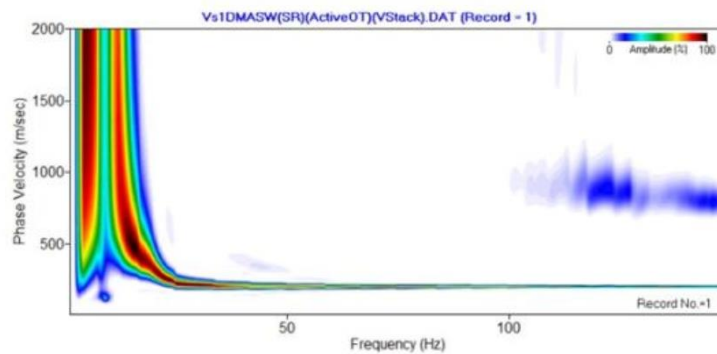
L'impiego di un modello di calcolo che utilizzi nel dominio continuo le curve di dispersione permette la costruzione di un modello 2D del valore di velocità V_s .



La restituzione dei risultati prevede la creazione di una sezione 2D in V_s su mappa continua in scala di colore.

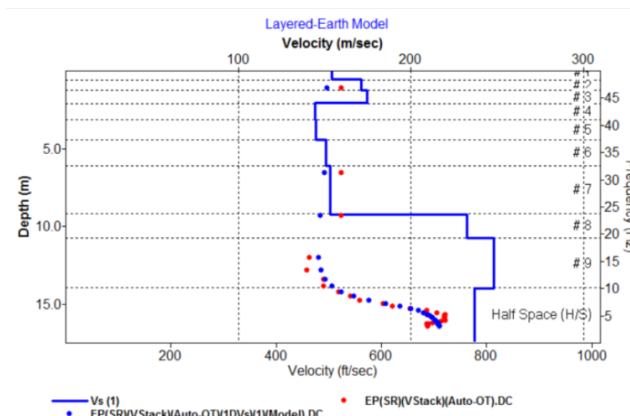
Di seguito si elencano gli step di elaborazione effettuati:

- elaborazione della curva di dispersione che rappresenta la velocità delle onde di superficie (V_s) delle diverse frequenze presenti nel record sismico acquisito (passaggio dal dominio tempo-spazio al dominio frequenza-numero d'onda).



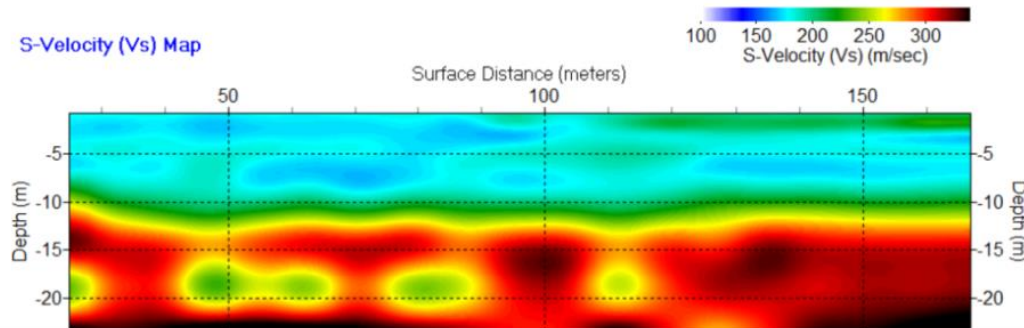
Esempio di curva di dispersione ($f-\lambda$) per singolo record sismico acquisito (Park Seismic LLC)

- per ogni record sismico acquisito si ricava tramite inversione la curva di dispersione, un profilo verticale di velocità delle onde S che fornisce informazioni sulla distribuzione in profondità delle proprietà meccaniche della zona indagata (1D).



Esempio di curva di dispersione 1D per singolo record sismico acquisito (Park Seismic LLC)

- dai modelli 1D ottenuti per tutti i record sismici, si ricava un modello 2D della distribuzione delle Vs lungo gli stendimenti. Il modello è il risultato delle informazioni (curve di dispersione e profili 1D) di tutta l'acquisizione effettuata sui singoli profili (L01-02-03-04), così da ottenere un modello in continuo della distribuzione delle Vs.



Esempio di MASW2D (Park Seismic LLC)

I dati delle matrici di Vs sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer 13. La sezione ottenuta è stata riportata su tavola costruita con il software AutoCAD 2017 (Autodesk).

5.4 SISMICA A RIFLESSIONE

Per l'analisi dei dati è stato utilizzato il software Visual SUNT Pro.

La sequenza di processing per dati sismici a riflessione si compone di una successione di operazioni applicate in cascata e organizzate in azioni pre-stack e post-stack.

Operazioni pre-stack

➤ Formattazione dei dati:

I dati ottenuti nel corso dell'indagine sono registrati in formato SEG-2; poiché la dimensione utilizzata nel processing sismico è la SEG-Y, la prima operazione da compiere è adeguare il formato SEG-2 a quello richiesto dal programma di elaborazione.

➤ Geometria:

Le coordinate geografiche e le quote di ogni stazione vengono trasferite nell'header dei record di campagna in modo da assegnare correttamente la collocazione spaziale dei punti di scoppio e delle tracce sismiche.

➤ Editing-Controllo della qualità:

La procedura di "trace editing" rappresenta la fase in cui si esegue l'eliminazione delle tracce mal funzionanti, morte o comunque particolarmente rumorose.

➤ Recupero delle ampiezze:

A causa della sua propagazione nel sottosuolo l'onda sismica subisce una progressiva perdita di energia legata alla divergenza sferica (spreading geometrico), all'attenuazione anelastica ed alla ripartizione dell'energia alle interfacce; in termini di traccia sismica ciò si traduce in una diminuzione delle ampiezze con il crescere del tempo di propagazione in profondità e distanza. Per recupero delle ampiezze si intende,

quindi, la compensazione del decadimento delle ampiezze che si rende necessaria nelle operazioni di processing per avere un'ottimizzazione dell'immagine.

➤ **Filtraggio:**

Nel processing sismico il filtraggio rappresenta un'operazione molto importante in quanto permette di ottenere un'attenuazione del rumore coerente ed incoerente e, di conseguenza, l'esaltazione del segnale di interesse.

Le modalità di filtraggio sono tre e la scelta della metodologia da adottare dipende dalle caratteristiche del segnale e del rumore:

- Nel dominio del tempo e delle distanze; si tratta dell'annullamento o del taglio delle ampiezze di porzioni di sezioni nel dominio tempo-spazio (t-x) che presentano del rumore. La tecnica più utilizzata in questo caso è il muting che manualmente o automaticamente permette di eliminare ad esempio il ground roll, l'onda d'aria o il rumore incoerente pre-primi arrivi.
- Nel dominio F-K; impiegato per l'eliminazione del rumore coerente contraddistinto da velocità caratteristiche quali il ground roll (250-330 m/s) o l'onda d'aria (340 m/s).
- Nel dominio delle frequenze; esso è effettuato sulla singola traccia tramite un'analisi di Fourier che permette di identificare le frequenze contenute nel segnale e quindi di applicare un filtro passa alto, passa basso o passa banda che consenta di esaltare le frequenze di interesse.

➤ **Sort:**

Prima di procedere con l'analisi di velocità e con le operazioni di stack i dati vengono riorganizzati dal dominio shot gather al dominio CDP-gather; per ciascun Common Depth Point-gather le tracce in esso contenute sono associate al medesimo punto medio superficiale.

➤ **Analisi di velocità:**

L'analisi di velocità mira alla determinazione delle funzioni di velocità che allineano i segnali riflessi nel dominio CDP-gather. Essa rappresenta il passaggio fondamentale che permette la conversione dal dominio del tempo (il sismogramma) al dominio della profondità (la sezione geologica finale).

L'analisi di velocità è essenzialmente una procedura di modellazione inversa in cui la ricerca dei valori di velocità di stack (Vstack) in funzione della profondità si ottiene per tentativi. Tra le metodologie che si possono adoperare in tale fase del processing ci sono:

- Constant Velocity Stack (CVS)
- Analisi degli spettri di velocità
- Pannelli di velocità costante (CVP)

➤ **Stack delle tracce:**

Una volta corrette per la velocità di NMO, sulle tracce appartenenti a ciascun CDP si esegue una somma in fase. In questo modo le riflessioni verranno rinforzate e contemporaneamente si avrà un'attenuazione del rumore grazie all'eliminazione statistica degli eventi non allineati. Tale fase del processing produrrà la cosiddetta sezione stack.

Operazioni post-stack:

➤ **Migrazione:**

La prima operazione post-stack da compiere nel processing sismico è la migrazione; essa mira al completo recupero della corretta ubicazione spaziale degli eventi contenuti nella sezione stack, ed opera riportando gli orizzonti nella loro posizione reale.

Il processo di migrazione ha lo scopo di far collassare le iperboli di diffrazione che si generano in corrispondenza delle discontinuità degli orizzonti e di riposizionare le superfici pendenti, ripristinando in questo modo le reali geometrie dei riflettori nella sezione tempo.

➤ **Correzioni statiche:**

Nella sismica a riflessione le tracce sono caratterizzate da una serie di sfasamenti temporali causati dalle variazioni topografiche e dalle variazioni di velocità e spessore dello strato più superficiale del terreno (è lo strato areato o *wethered zone*). Nel corso del processing sismico i ritardi e gli anticipi nei tempi di primo arrivo legati a tali fattori devono essere collocati in modo tale da poter applicare la giusta correzione a ciascuna traccia sismica; ciò fa sì che i dati vengano ridotti ad un piano di riferimento comune chiamato datum.

➤ **Conversione in profondità:**

La sezione stack restituisce un'immagine del sottosuolo con scale verticale espressa in tempi doppi (TWTT); essa rappresenta, infatti, il tempo totale impiegato dall'onda sismica per raggiungere una generica superficie di discontinuità posta in profondità e riemergere in superficie dopo la riflessione. La conversione della sezione-tempi in una sezione-profondità avviene attraverso l'applicazione delle velocità medie ottenute dalla precedente analisi di velocità.

5.5 INDAGINI GEOELETTRICHE

L'elaborazione è stata effettuata con il software Earth Imager (AGI) ed ha previsto i seguenti step:

1. **Pseudosezione misurata:** rappresentazione 2D dei valori di resistività apparente misurata ottenuta mediante interpolazione geometrica dei dati con *contouring*.
2. **Filtraggio dati:** la rappresentazione grafica dei dati misurati come sezione 2D attraverso la pseudosezione permette di eliminare eventuali dati anomali. Singoli valori di resistività, corrispondenti dunque ad un unico punto di misura, decisamente superiori o inferiori rispetto ai materiali circostanti sono infatti certamente legati ad un disturbo di sistema e non ad una reale anomalità con corrispondenza nel sottosuolo. Affinché un'anomalia abbia una corrispondenza concreta deve infatti presentare una densità di punti di misura significativa in relazione alla densità della matrice dei dati acquisita, per tale ragione i singoli punti anomali vengono eliminati tramite l'operazione di *filtraggio*.
3. **Modello diretto:** il modello è stato costituito con un massimo valore di errore pari al 5%. È stato scelto come metodo di elaborazione il metodo agli elementi finiti con equazione di risoluzione Cholewsky.
4. **Modello inverso:** il metodo di inversione scelto è quello dei minimi quadrati smorzati con massimo numero di iterazioni pari a 8. Come modello iniziale dell'inversione è stata scelta la pseudosezione.

I dati delle matrici di resistività sono rappresentati in *contouring* 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer 13. La sezione ottenuta è stata riportata su tavola costruita con il software AutoCAD 2017 (Autodesk).

6 RISULTATI DEL RILIEVO

Nell'ambito del progetto di raddoppio tratta Apice-Orsara, I Lotto funzionale Apice Hirpinia (AV) è stata realizzata una campagna di indagini geofisiche con lo scopo di effettuare una modellizzazione 2D del sottosuolo caratterizzato da fenomeno di frana. La presente fase di indagine è stata eseguita secondo le specifiche fornite dal Committente con le seguenti tipologie d'indagine:

- Indagini da superficie
 - Indagini in sismica a rifrazione (onde di compressione Vp e onde di taglio Vs)
 - Indagini in sismica a riflessione
 - Indagine masw 2D
 - tomografia elettrica

Le indagini sono state eseguite nei giorni compresi tra l'8 febbraio e il 12 marzo 2022, con i seguenti obiettivi:

Metodo	Obiettivo	Parametri
Sismica a rifrazione	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Vp-Vs
Sismica a riflessione	Identificazione orizzonti riflettenti (contrastati di impedenza sismica), zone di discontinuità o fenomeni di variazioni laterali	Vp
Masw 2D	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Vs
Tomografia elettrica	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Resistività elettrica

Il piano di indagine, come definito da committente, ha previsto l'esecuzione di n. 5 sezioni di rilievo con i quattro metodi geofisici da superficie sopra elencati. Il profilo L05 è stato acquisito con la sola tecnica sismica a rifrazione Vp come analisi di approfondimento su un'area di limitata estensione del corpo frana a valle della zona indagata.

Durante le fasi di acquisizione dati è stato effettuato il rilievo topografico tramite sistema GPS dei punti di stazione (geofoni, spari, elettrodi).

Per la descrizione completa delle quantità eseguite si rimanda al capitolo 4 (descrizione del rilievo).







Le planimetrie delle indagini e i risultati delle elaborazioni sono riportati negli allegati di seguito illustrati:

- **Tav.01** Indagini geofisiche – Linea L01
- **Tav.02** Indagini geofisiche – Linee L02 e L05
- **Tav.03** Indagini geofisiche – Linea L03
- **Tav.04** Indagini geofisiche – Linea L04
- **Tav.05** Sezioni interpretative

Nelle tavole sono riportate:

- ubicazione planimetrica delle linee di indagine (da rilievo GPS)
- sezioni geofisiche secondo metodo
 - sismica a riflessione
 - tomografia sismica a rifrazione Vp e Vs
 - indagine Masw 2D
 - tomografia elettrica
- sezione interpretativa derivante dall'analisi delle singole metodologie e dai dati stratigrafici forniti dal Committente

Di seguito si riporta una breve descrizione delle unità stratigrafiche definite in fase di analisi dal punto di vista delle informazioni geofisiche rilevate:

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm*m)	Descrizione
	< 7.5	prevalenza di materiali coesivi (limi e argille)
	>7.5	materiali con minore componente argillosa
UNITA'	Vp (m/s)	
1  A  B	< 1200	zona colluviale
	1200<Vp<2300	materiale sciolto
2 	> 2300	Materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche
		Lineamento di discontinuità definito da gradiente di velocità Vp
		Limite con materiale con diverse caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso)

Note: i valori limite delle velocità di propagaazione delle onde di compressione sono da intendersi come un range complessivo che nasce dall'unione dei limiti di riferimento di ciascuna delle sezioni sismiche acquisite.

Si ricorda che la velocità sismica è un parametro strettamente dipendente dalle caratteristiche meccaniche del materiale; ai fini dell'interpretazione del rilievo geofisico è opportuno rammentare alcune delle osservazioni riguardanti le proprietà dei materiali:

- considerando la stessa litologia, materiali sciolti presentano valori di velocità inferiori rispetto a materiali lapidei;
- le velocità di propagazione delle onde sismiche sono proporzionali in modo diretto allo stato di addensamento/fratturazione dei materiali.

Per quanto riguarda le indagini elettriche in generale è opportuno ricordare quanto segue:

- materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm.m;
- materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm.m.
- la presenza di acqua (in caso di materiale con pori comunicanti o fratturazione/permeabilità secondaria) diminuisce il valore di resistività

L'indagine geofisica eseguita con metodologia sismica a rifrazione Vp ha permesso di identificare i range di velocità di propagazione delle onde di compressione che identificano le diverse unità sismostratigrafiche presenti nell'area di interesse. Tali valori di velocità risultano essere compresi tra 500 – 3000 m/sec.

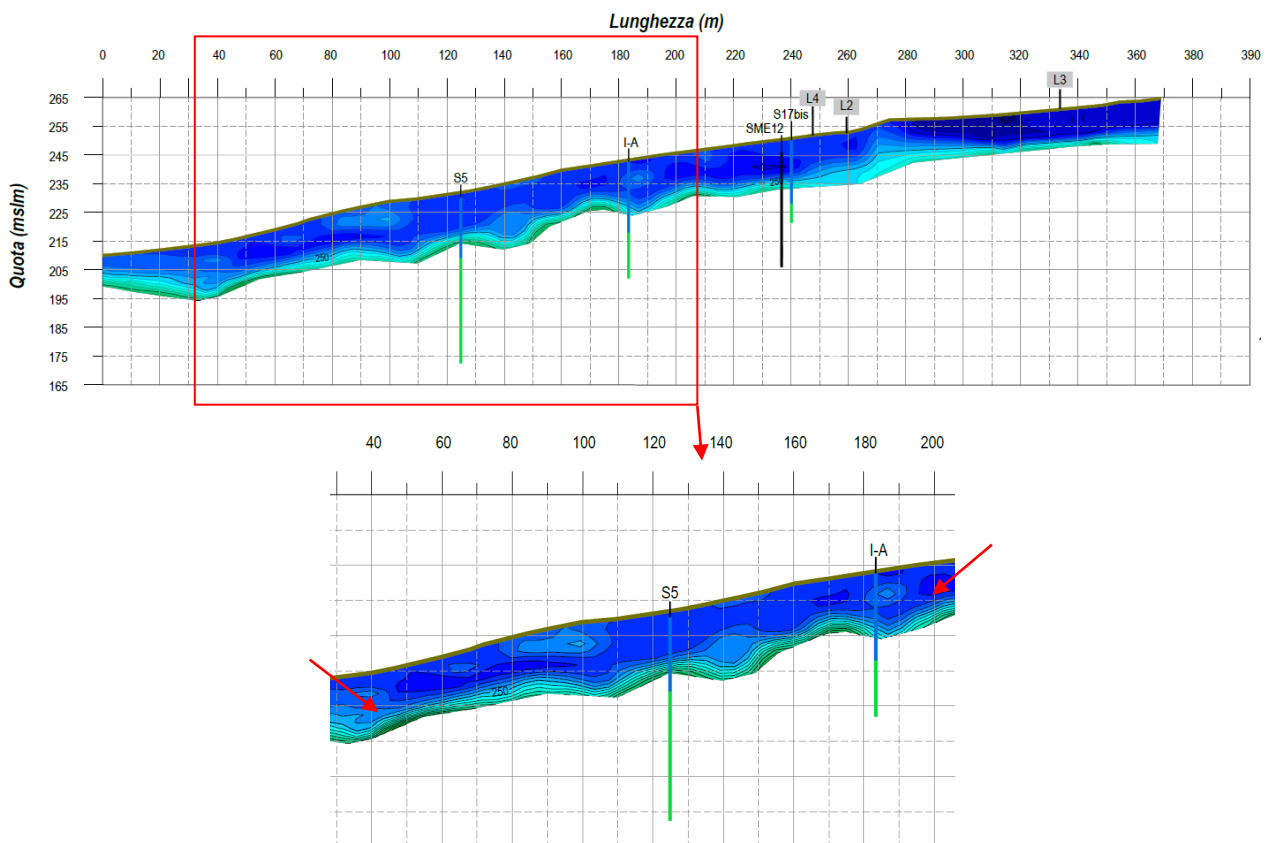
Nello specifico velocità di propagazione delle onde di compressione inferiori a 1.200m/sec sono riconducibili alla presenza di materiali colluviali dalle scarse caratteristiche geomeccaniche. Nelle sezioni interpretative tali materiali vengono definiti come **unità 1A**.

Valori di velocità sismica delle onde P compresi tra i 1.200 ed i 2.300 m/sec sono ascrivibili alla presenza di materiale sciolto coesivo a maggior grado di compattazione (limi ed argille); nelle sezioni interpretative tali materiali vengono definiti come **unità 1B**.

Velocità di propagazione delle onde di compressione superiori a 2.300 m/sec sono associate alla presenza di materiale sciolto (**unità 2**), ma con migliori caratteristiche geomeccaniche rispetto l'unità soprastante (**unità 1**).

Il limite tra le due sotto unità A e B è stato identificato dal dato sismico a rifrazione e dal dato fornito dalle indagini masw 2D. In particolare, è stato possibile delineare il limite tra le due unità oltre che per i valori di velocità, anche in funzione del cambio di gradiente che si osserva chiaramente nelle sezioni masw 2D.

Si riporta di seguito l'esempio della sezione masw 2D del profilo L01. Nel riquadro il dettaglio si evidenzia la zona caratterizzata da un aumento del gradiente dei valori di velocità delle onde di taglio, a cui si è associato il passaggio da materiale colluviale superficiale (velocità delle $V_p < 1200$ m/s e $V_s < 200$ m/s) a materiale sciolto con velocità $1200 < V_p < 2300$ m/s e $V_s > 200$ m/s.



Sezione masw 2D profilo L01

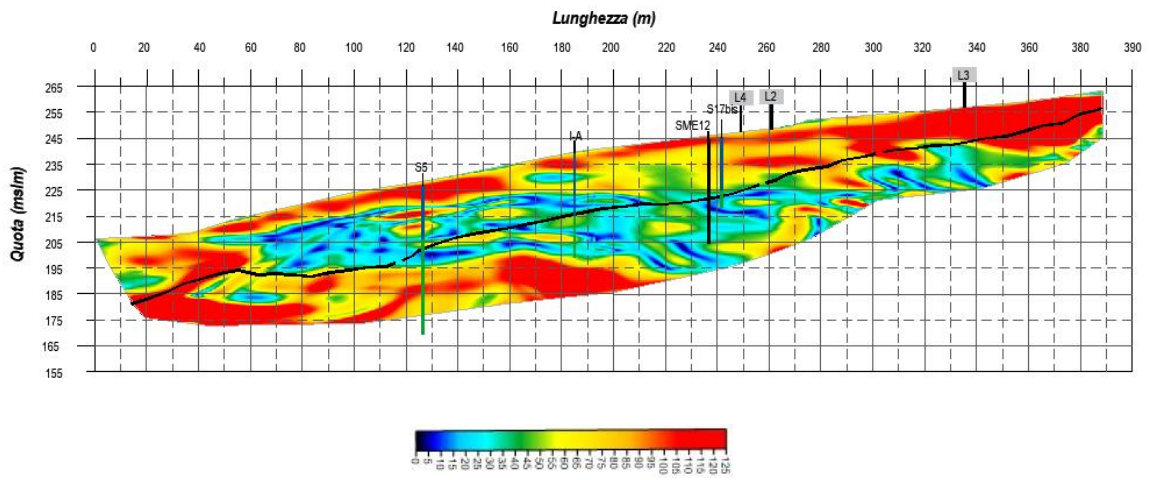
Il cambio netto del gradiente di velocità identifica quindi il passaggio ad una unità con diverse (migliori) caratteristiche geomeccaniche.

Il successivo calcolo matematico del gradiente della velocità delle onde di compressione V_p (calcolo differenziale vettoriale) ha permesso di ottenere la matrice dei valori calcolati della variazione della velocità lateralmente e con la profondità. Rappresentata con opportuna scala a colori (mediante il software Surfer 13) è stato possibile definire il lineamento di discontinuità (polilinea in rosso nelle sezioni interpretative).

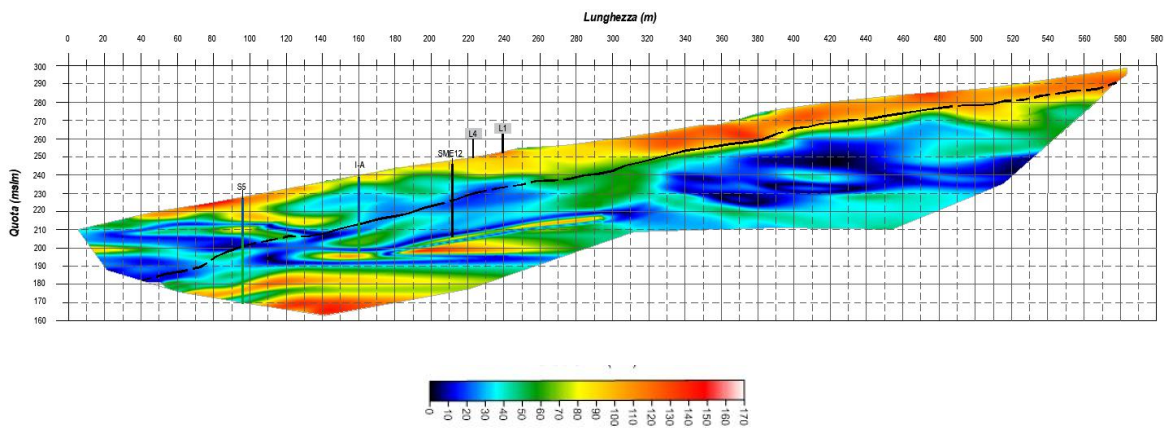
Il lineamento di discontinuità osservato nelle matrici del gradiente della velocità delle onde di compressione, evidenzia il passaggio tra materiali con diverse caratteristiche geomeccaniche, posto in evidenza proprio dal valore del gradiente e non dai valori assoluti delle velocità osservati nei risultati delle tomografie sismiche V_p .

Si riportano di seguito le matrici del gradiente Vp per le sezioni di rilievo L1-L2-L03 e L04 con il lineamento riportato di colore nero.

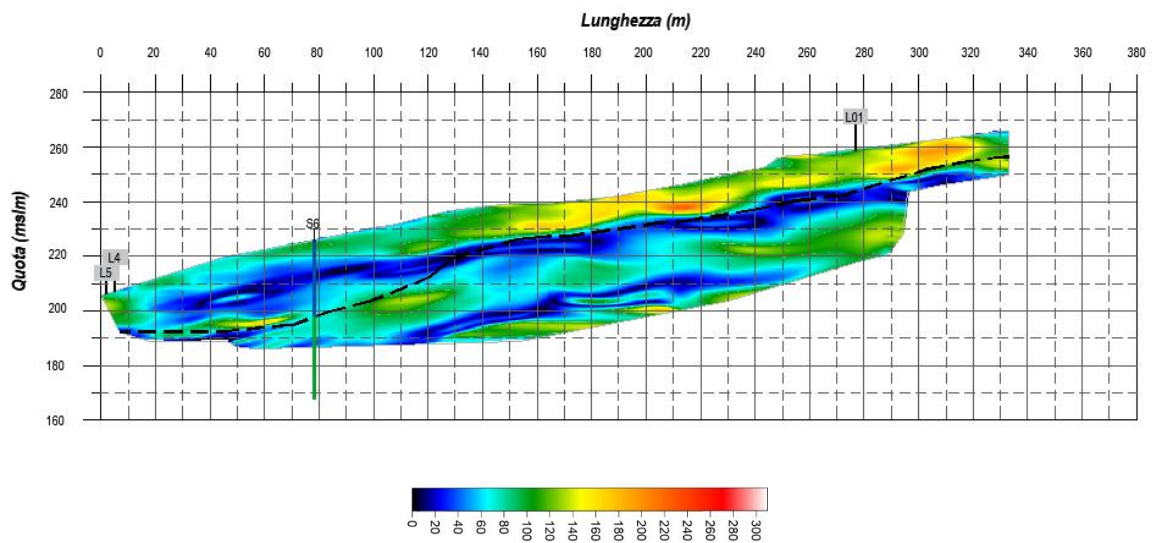
Profilo L01



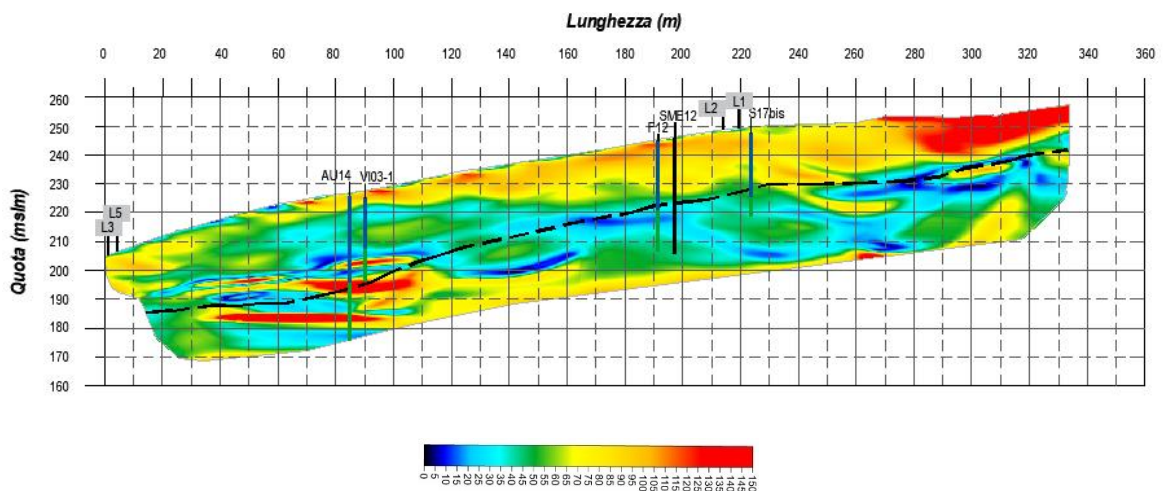
Profilo L02



Profilo L03



Profilo L04



Si specifica che il lineamento di discontinuità riportato nelle sezioni interpretative (polilinea di colore rosso nelle tavole 01-05), ricade all'interno della zona di passaggio osservata nelle stratigrafie fornite dal committente, tra le argille limose e le argille marnose. Le stratigrafie, utilizzate come taratura per le sezioni interpretative, mostrano livelli sabbiosi al passaggio tra le due litofacies, all'interno del quale si imposta il lineamento di discontinuità.

Si precisa, quindi, che il lineamento è stato tracciato dall'interpolazione di tutte le informazioni ottenute dalle indagini geofisiche e dalle tarature con il dato stratigrafico fornito dai sondaggi.

L'indagine geoelettrica ha fornito un modello 2D nel continuo del valore della resistività calcolata, la quale risulta variare per tutte le sezioni entro dei range molto bassi non superando i 50 Ohm*m, coerenti con le litologie prevalenti nella zona indagata, quali argille e argille marnose, a carattere fortemente conduttivo.

È stato possibile definire delle porzioni di sottosuolo, i cui limiti sono bene evidenti, caratterizzate da resistività inferiori a circa 7.5 Ohm*m associati a zone con una particolare prevalenza e concentrazione di materiali coesivi. Si osserva come tutte le aree individuate (retino di colore giallo nelle sezioni interpretative), ricadano quasi esclusivamente all'interno dell'unità sismostratigrafia 1.

Il dato sismico a riflessione ha verificato la presenza di un riflettore continuo, pur con ondulazioni, (polilinea di colore blu nelle tavole 01-04) che può essere determinato unicamente da un forte contrasto di impedenza tra due sismostrati, ipotizzando il passaggio a materiali con migliori caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso).

Per un maggior dettaglio circa i risultati delle indagini geofisiche eseguite si rimanda agli elaborati grafici annessi alla presente relazione (Tav.01,02,03,04,05).

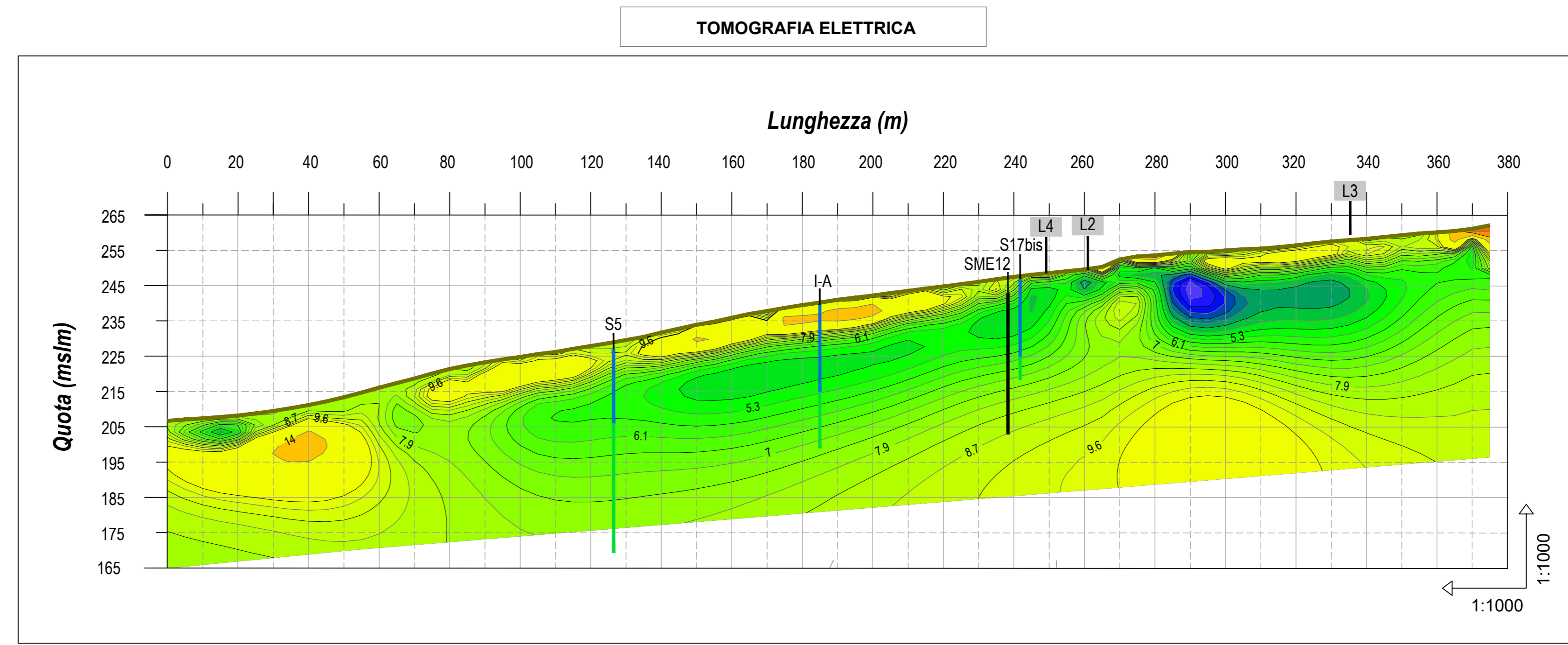
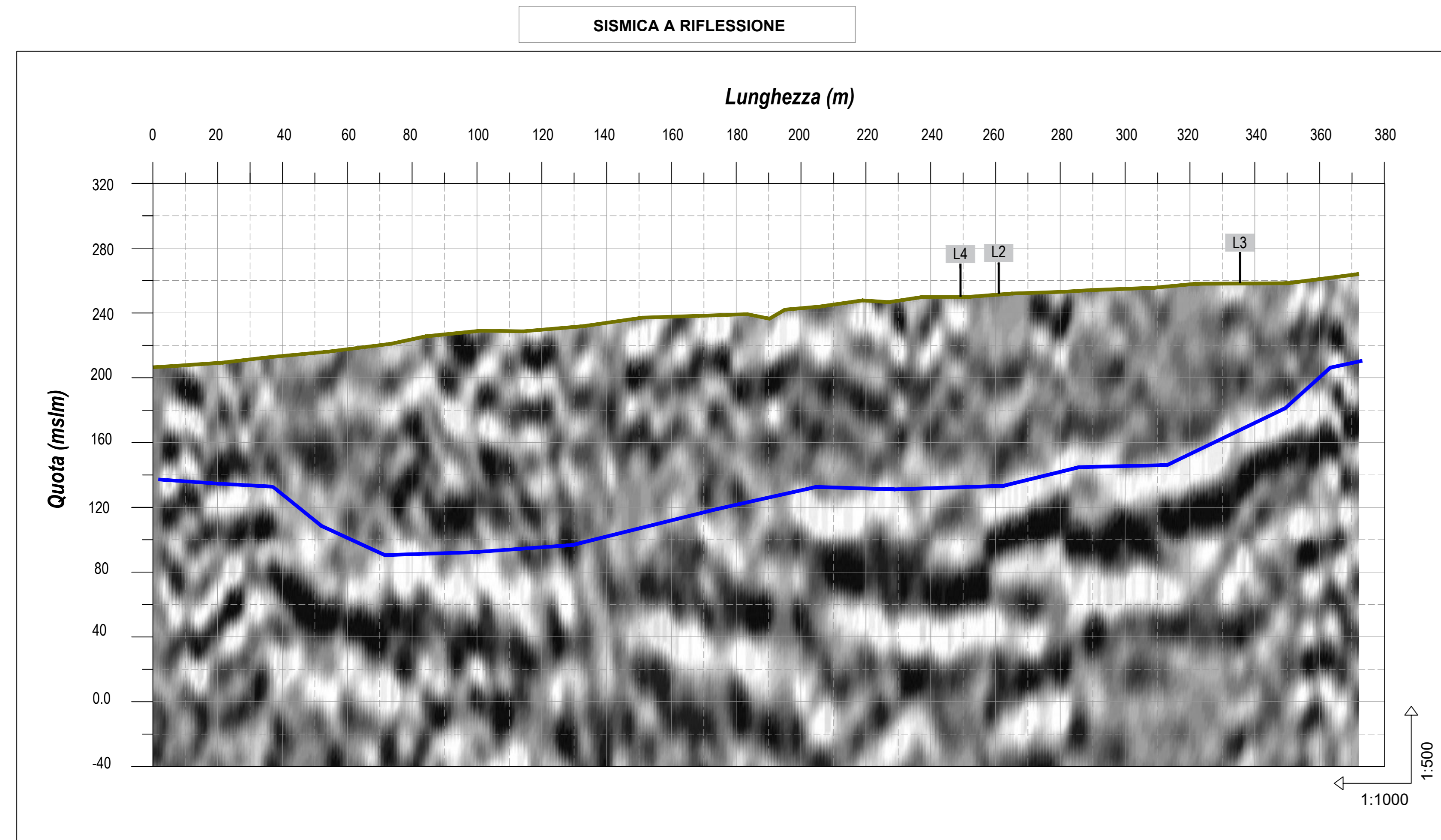
7 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



Strumentazione e acquisizione indagini sismiche



Strumentazione e acquisizione tomografia elettrica



LEGGENDA

Profili di indagine → Stratigrafia sondaggi

- Argilla limosa
- Argilla marnosa
- Sondaggio a distribuzione di nucleo

RESISTIVITA' (ohm·m)

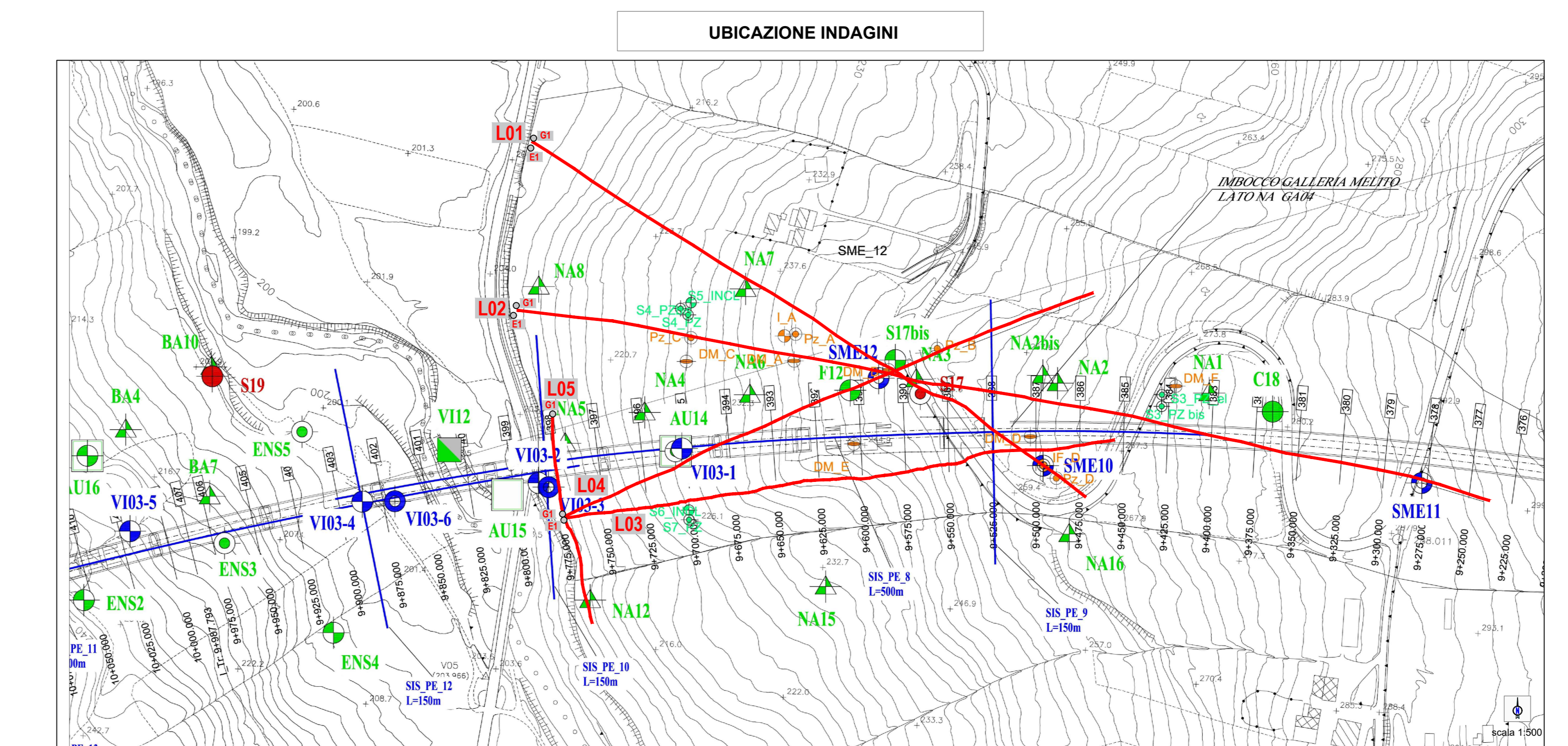
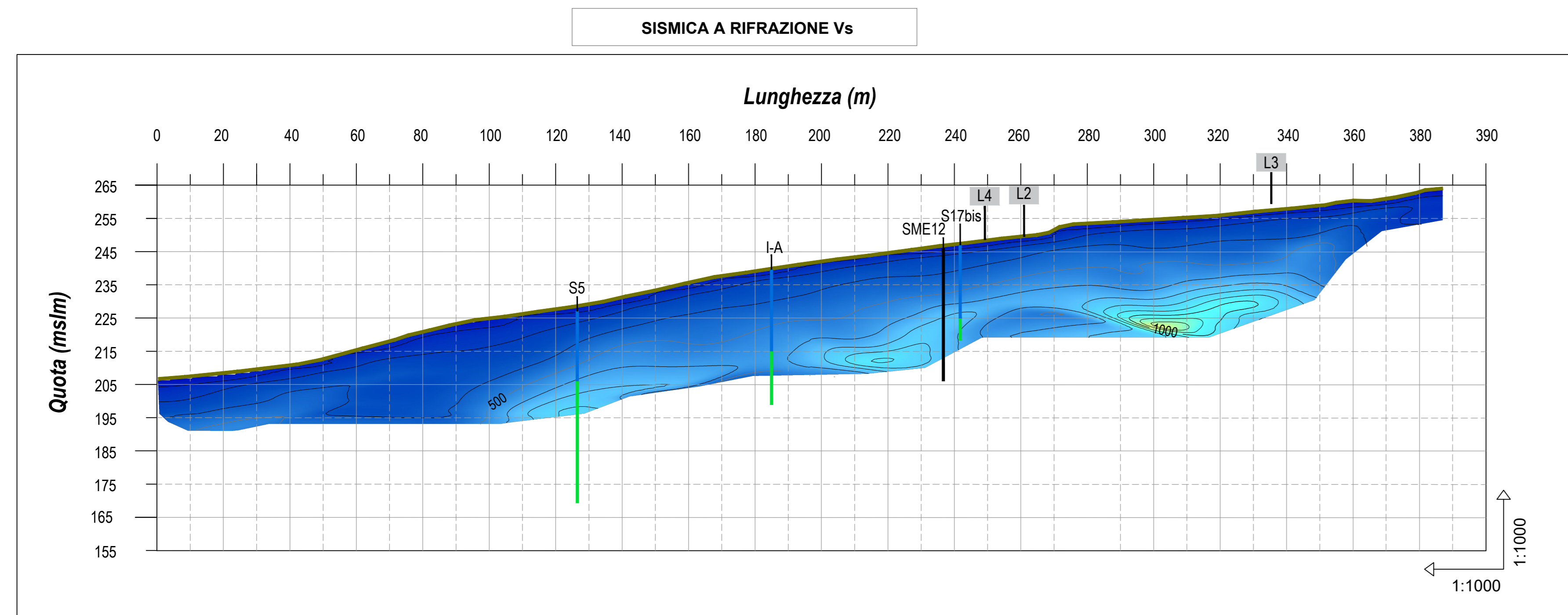
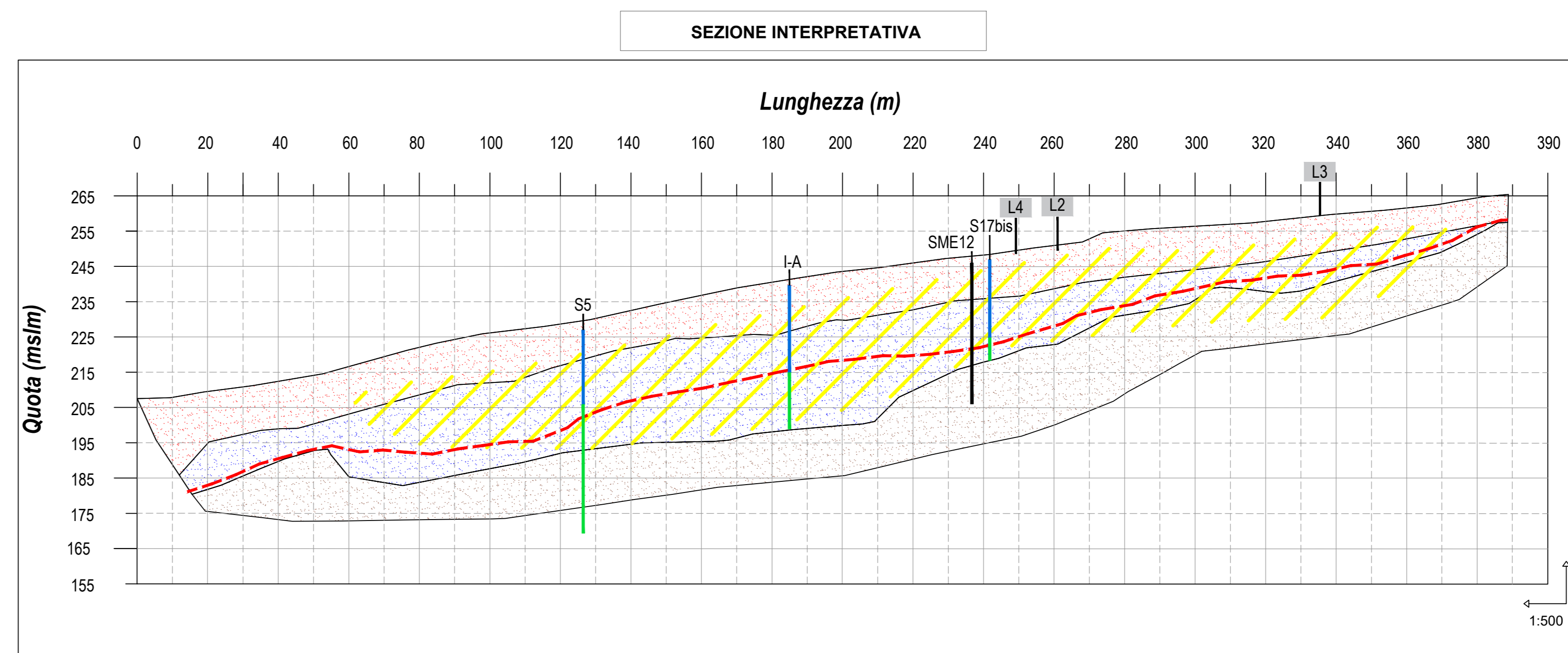
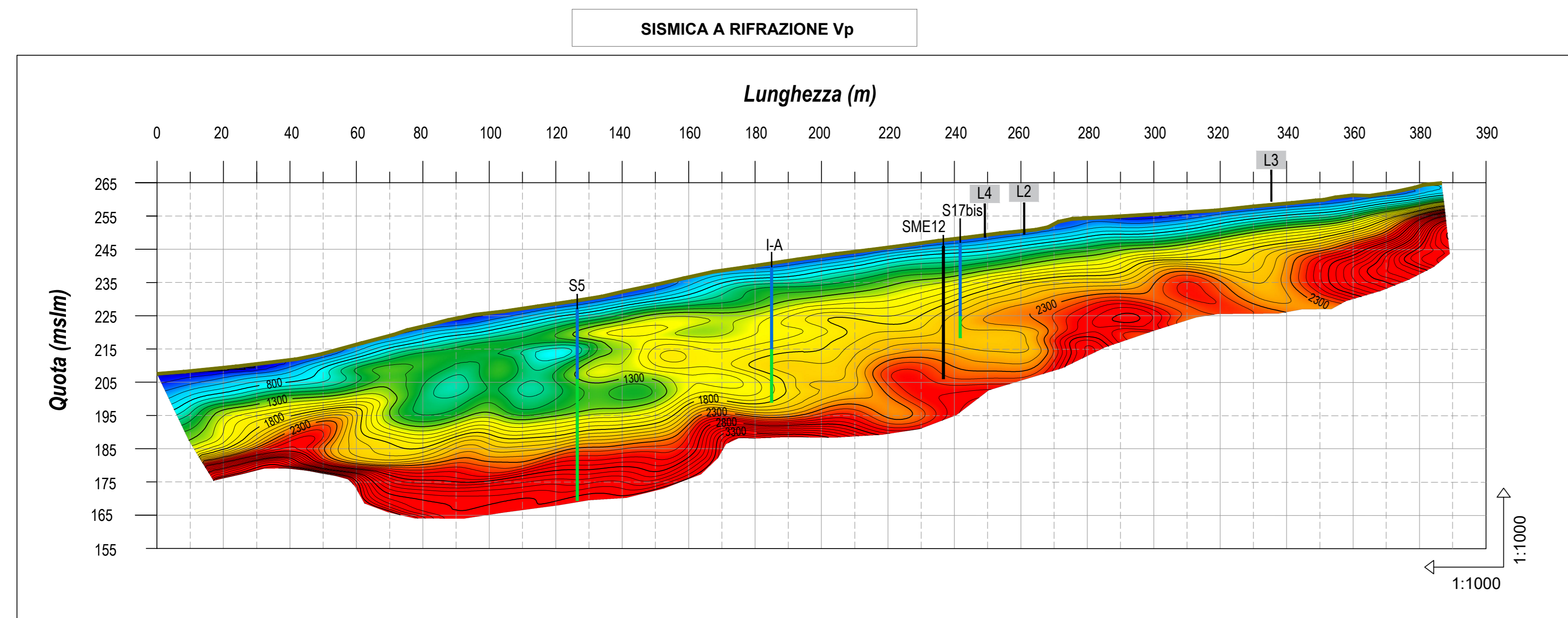
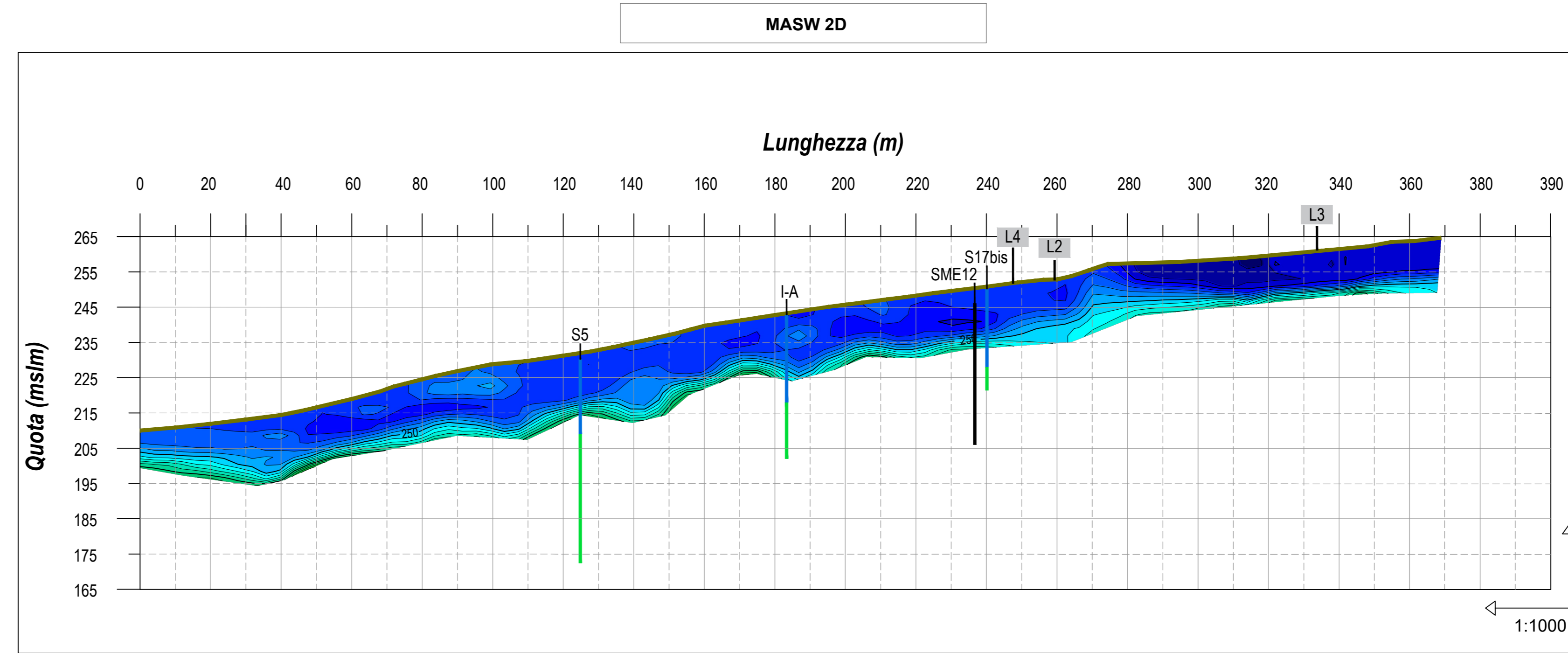
VELOCITA' ONDE S indagine masw 2D (m/s)

VELOCITA' ONDE S indagine tomografia sismica a rifrazione (m/s)

VELOCITA' ONDE P (m/s)

Sezioni interpretative

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm·m)	Descrizione
	< 7.5	prevalenza di materiali coesivi (limi e argille)
	> 7.5	materiali con minore componente argillosa
UNITA'	Vp (m/s)	
	A < 1200	zone colluviali
	B 1200 < Vp < 2300	materiale sciolto
	C > 2300	Materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche
		Lineamento di discontinuità definito da gradiente di velocità Vp
		Limite con materiale con diverse caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso)



LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI

Raddoppio tratta Apice-Orsara

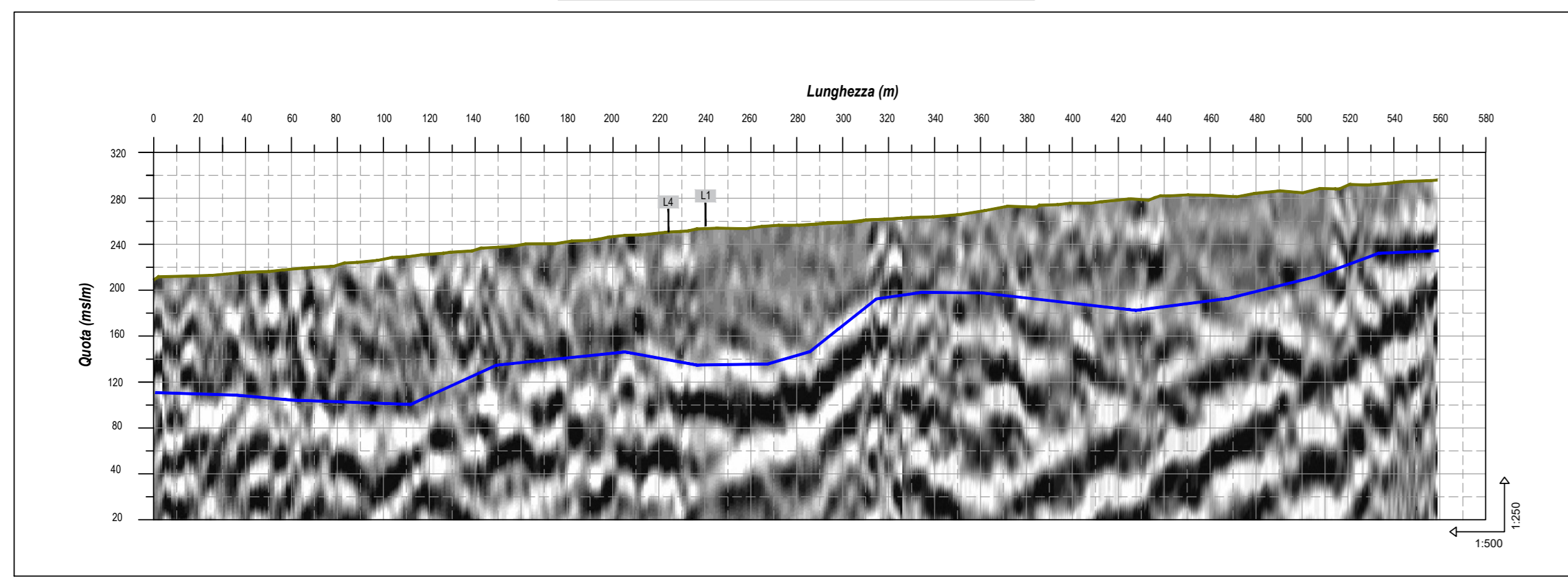
I lotto funzionale Apice-Hirpinia

Piano di indagini geofisiche V103 LINEA L01

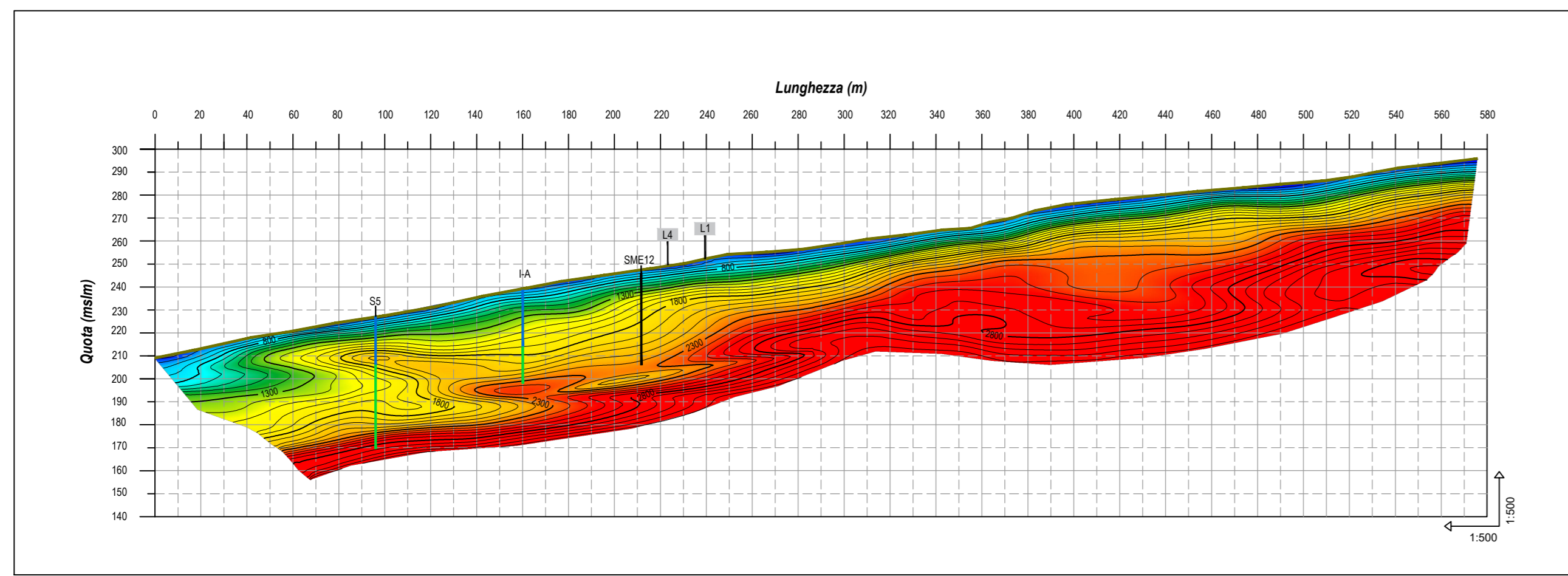
DATA	31/03/2022			
EMMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REGISTRO	CORTINOVIS			
APPROVATO	ASCARI			TAVOLA
Sismica a riflessione Sismica a rifrazione (Vp-Vs) Tomografia elettrica				01
COMMITTENTE	Hirpinia AV			SCALA
				1:1000 / 1:500
				FILE
				22001_01
				COMMESSA
				22001

PROFILO L02

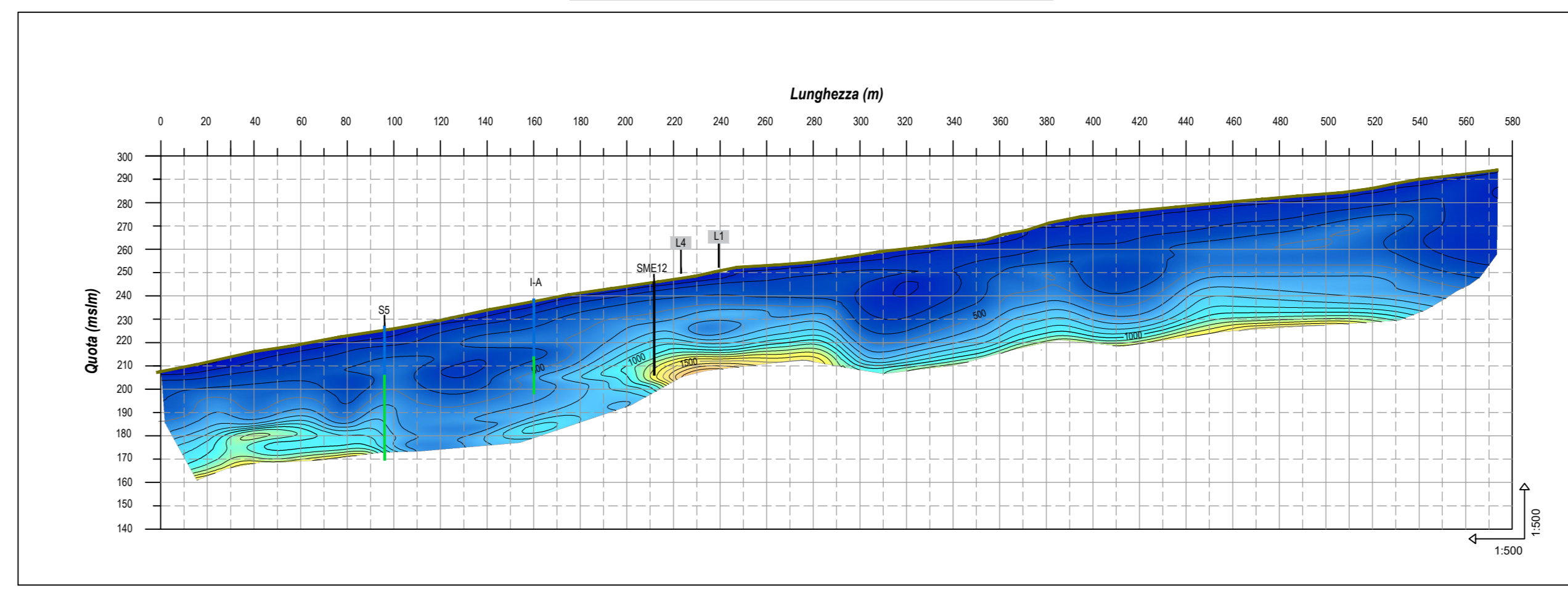
SISMICA A RIFLESSIONE



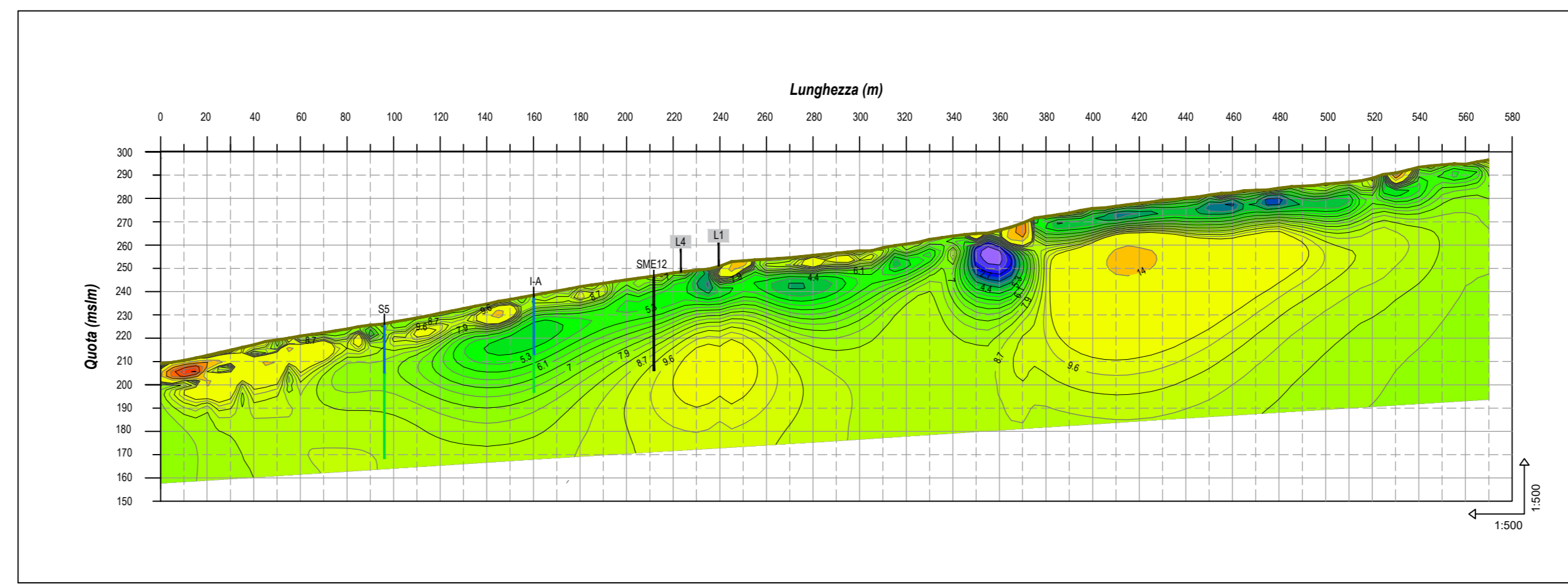
SISMICA A RIFRAZIONE Vp



SISMICA A RIFRAZIONE Vs

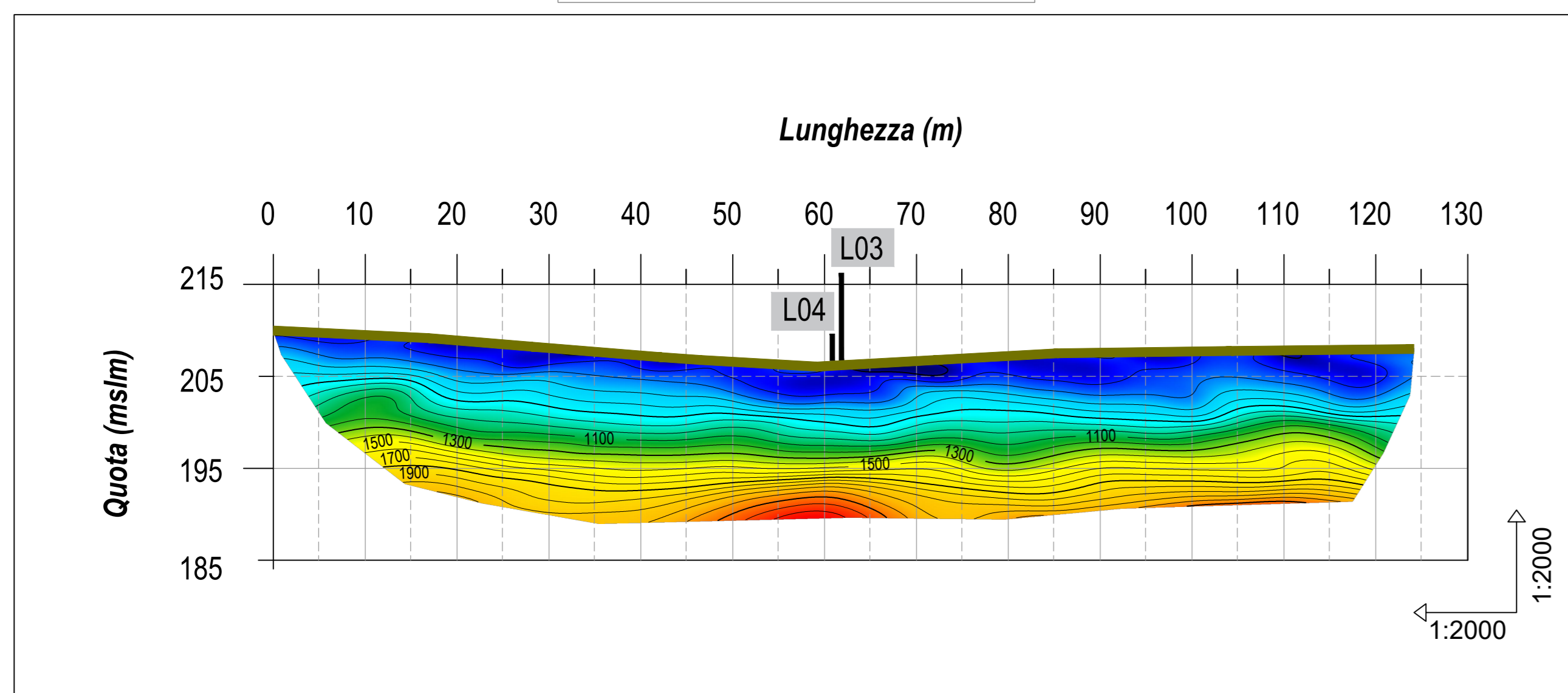


TOMOGRAFIA ELETTRICA

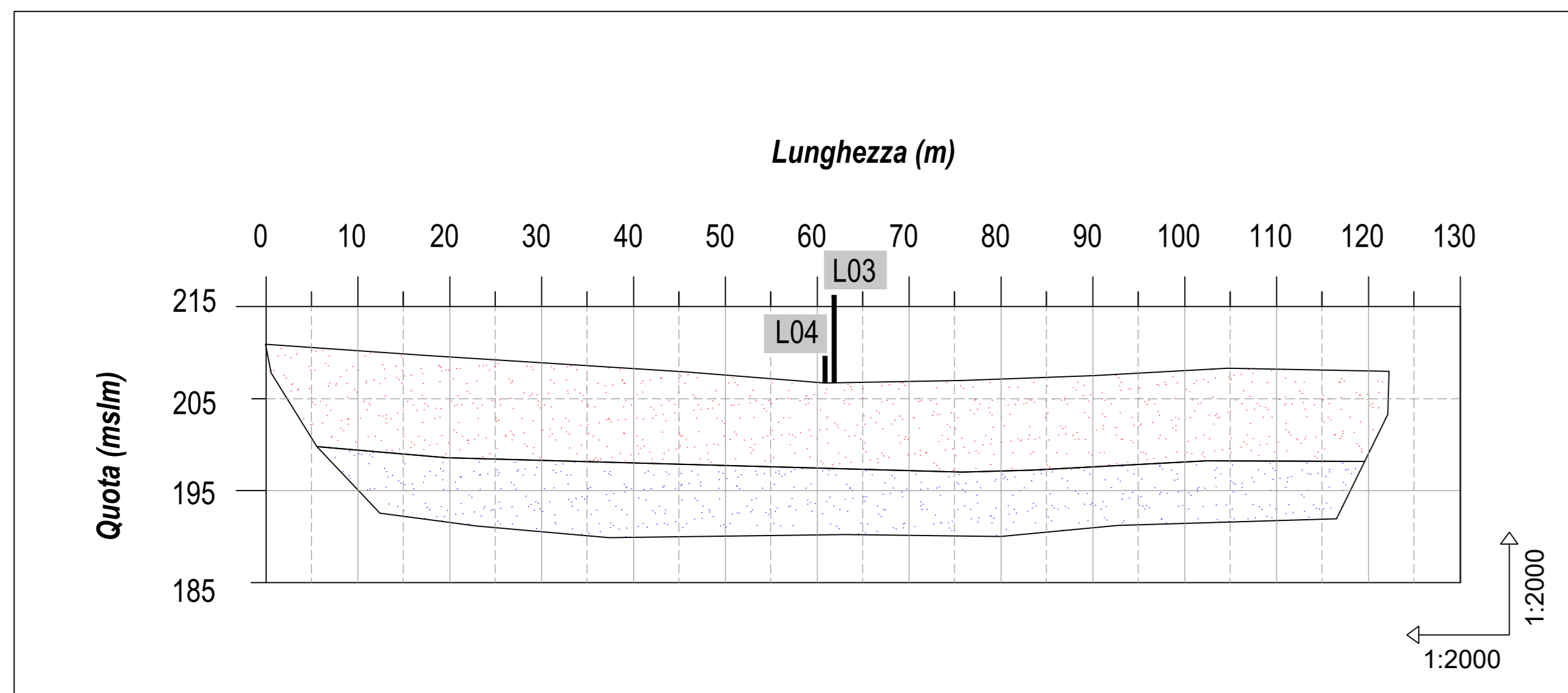


PROFILO L05

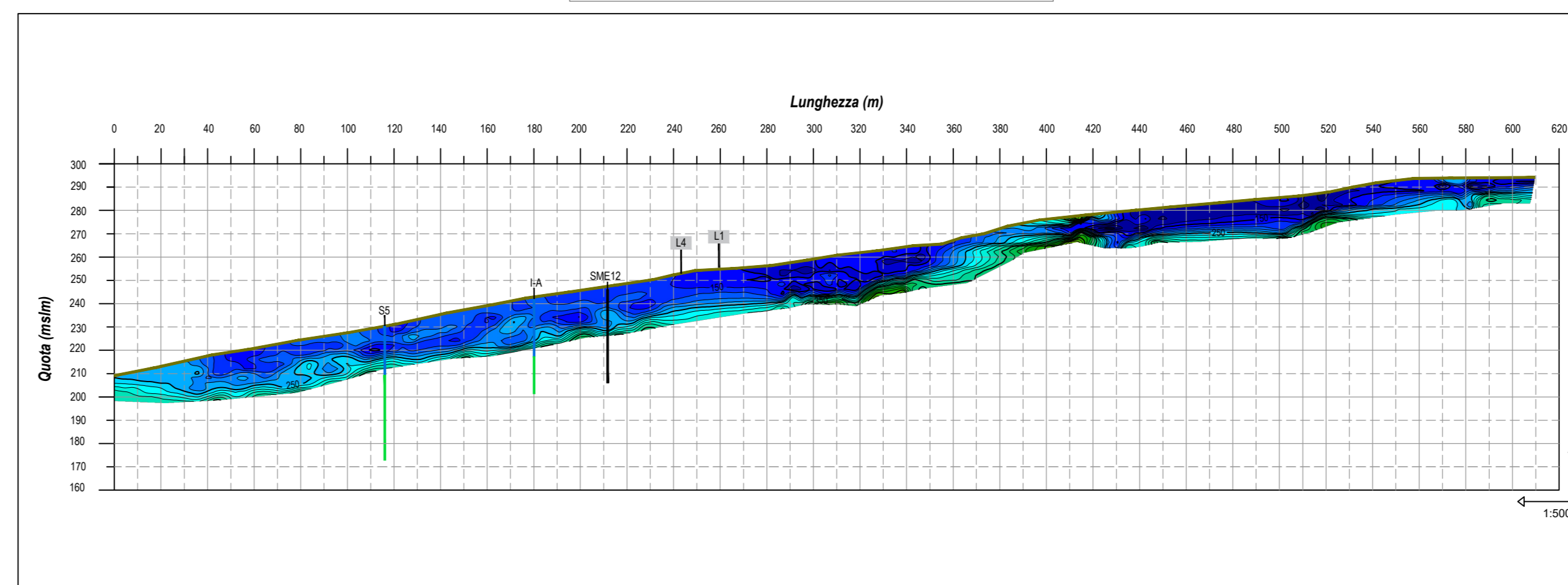
SISMICA A RIFRAZIONE Vp



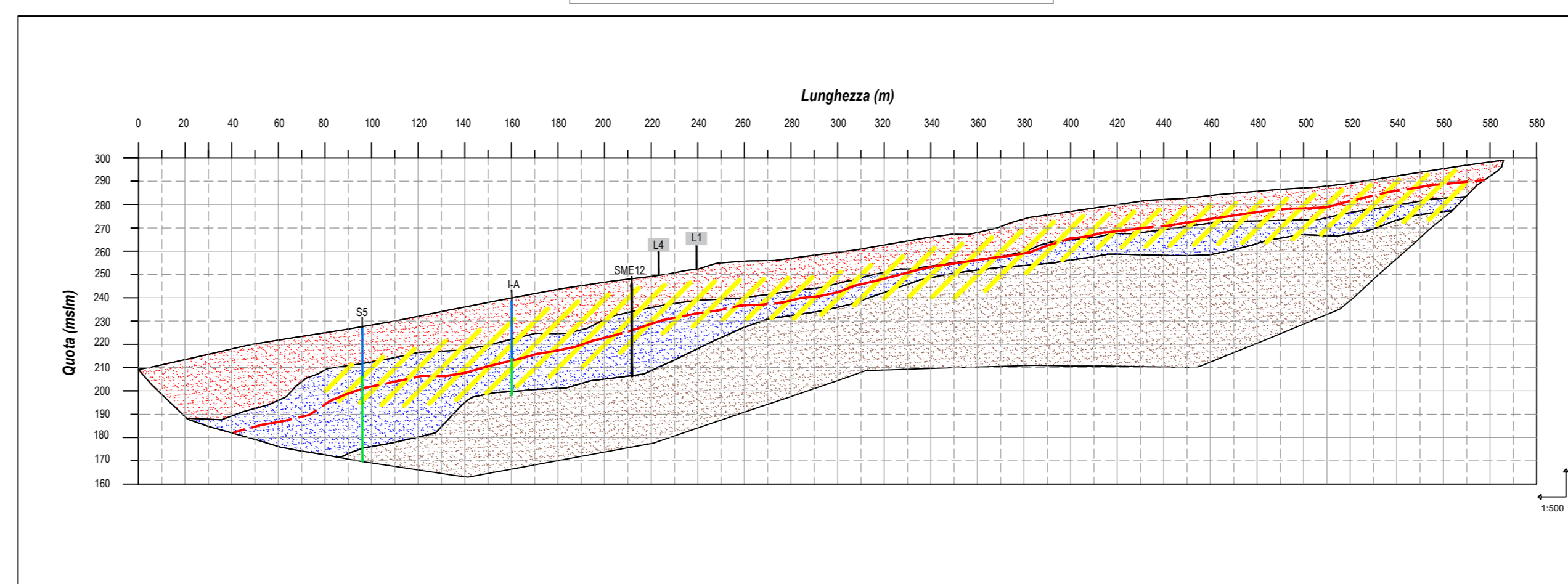
SEZIONE INTERPRETATIVA



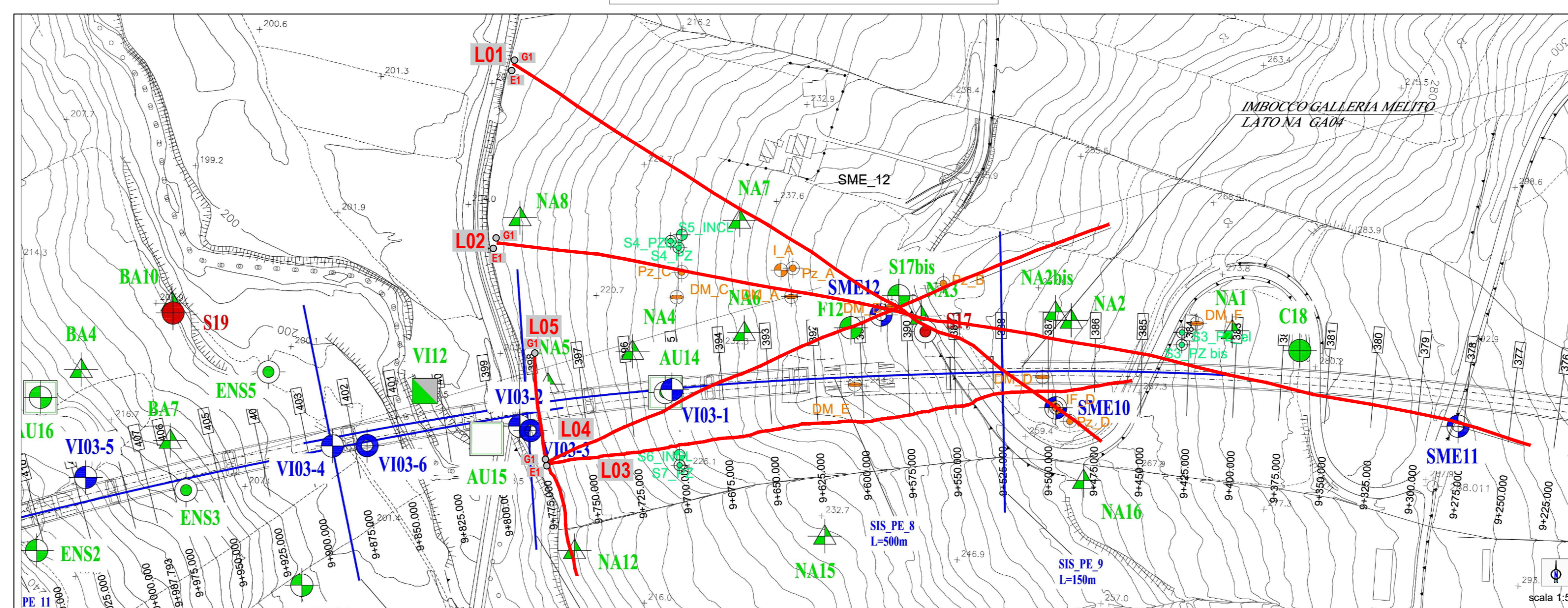
MASW 2D



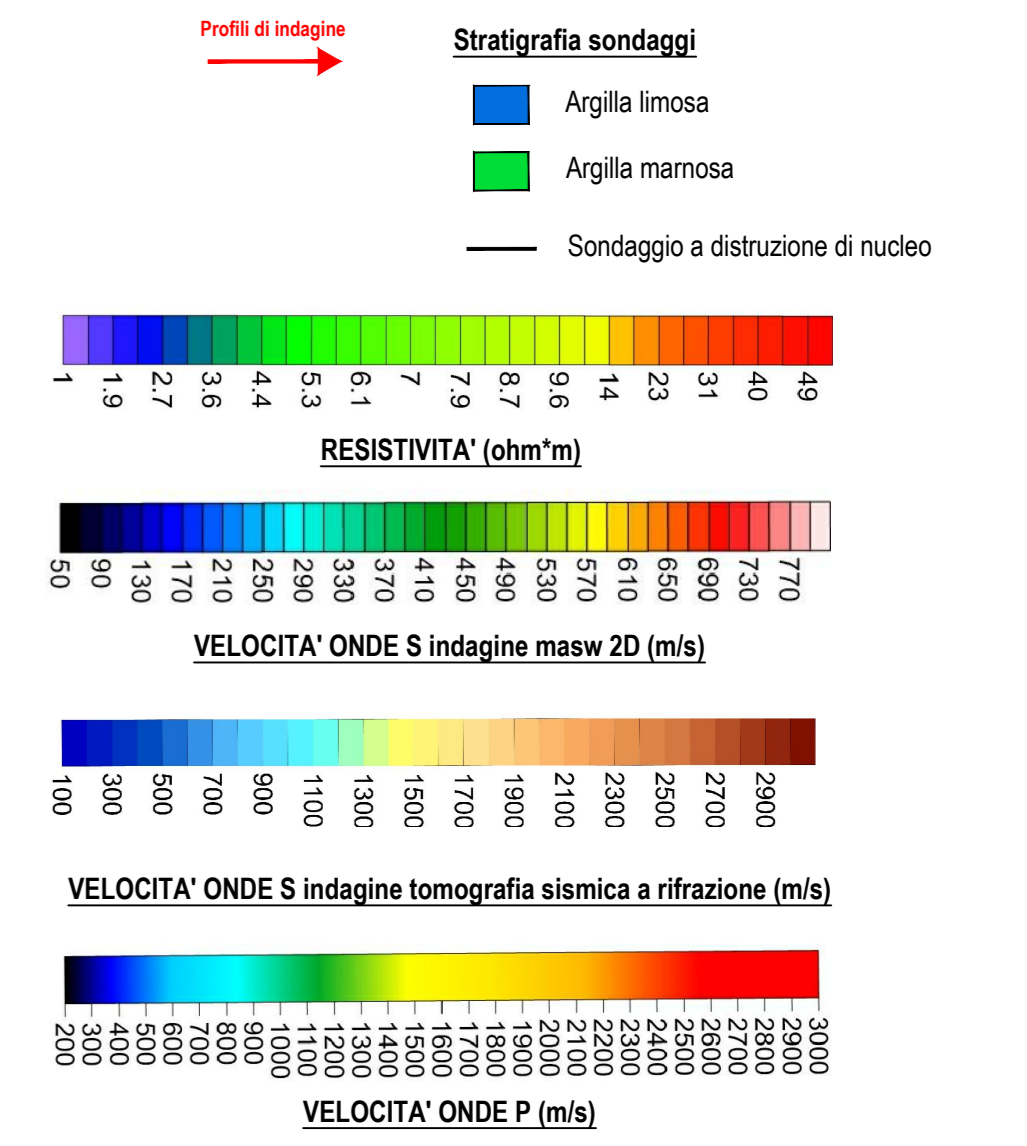
SEZIONE INTERPRETATIVA



UBICAZIONE INDAGINI



LEGENDA



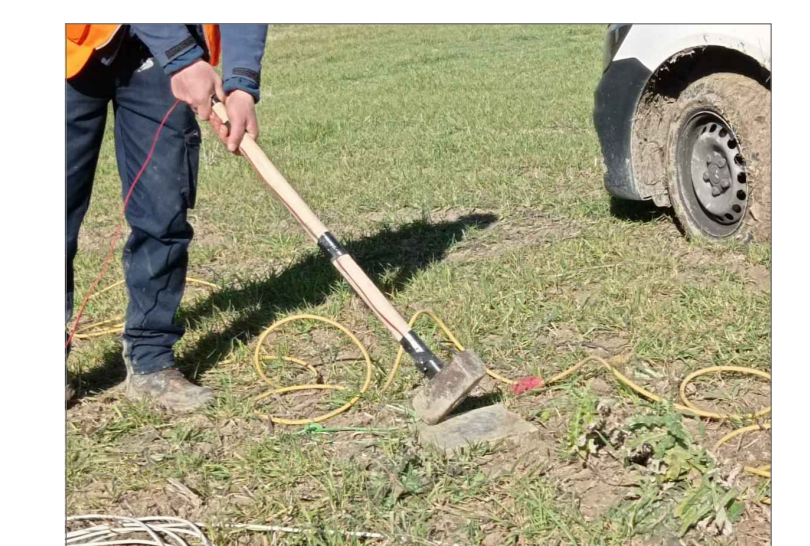
Sezioni interpretative

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm·m)	Descrizione
	<7.5	irrelevanza di materiali coesivi (limi e argille)
	>7.5	materiali con minore componente argillosa
UNITA'	Vp (m/s)	Descrizione
	A	< 1200 zona colluviale materiale sciolto
	B	1200-1900-2300
	2	> 2300 Materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche
		Lineamento di discontinuita' definito da gradiente di velocita' Vp
		Limite con materiali con diverse caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso)

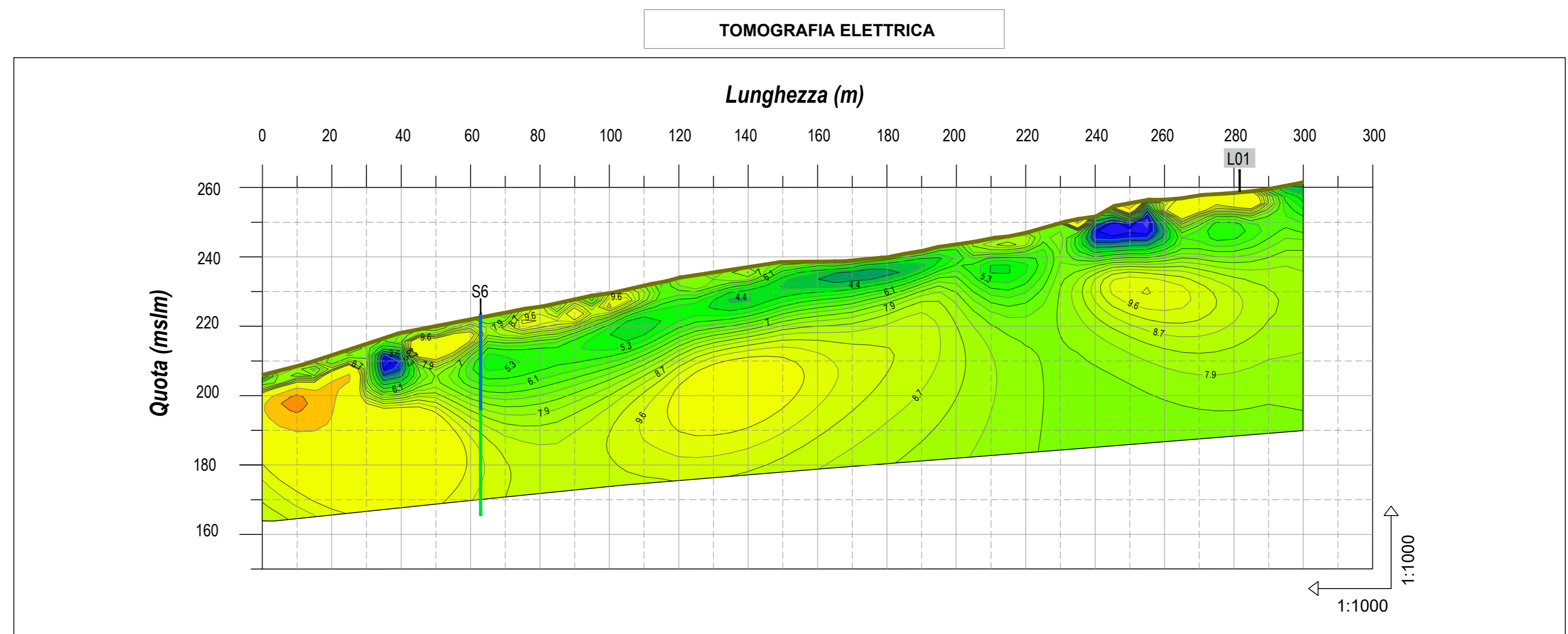
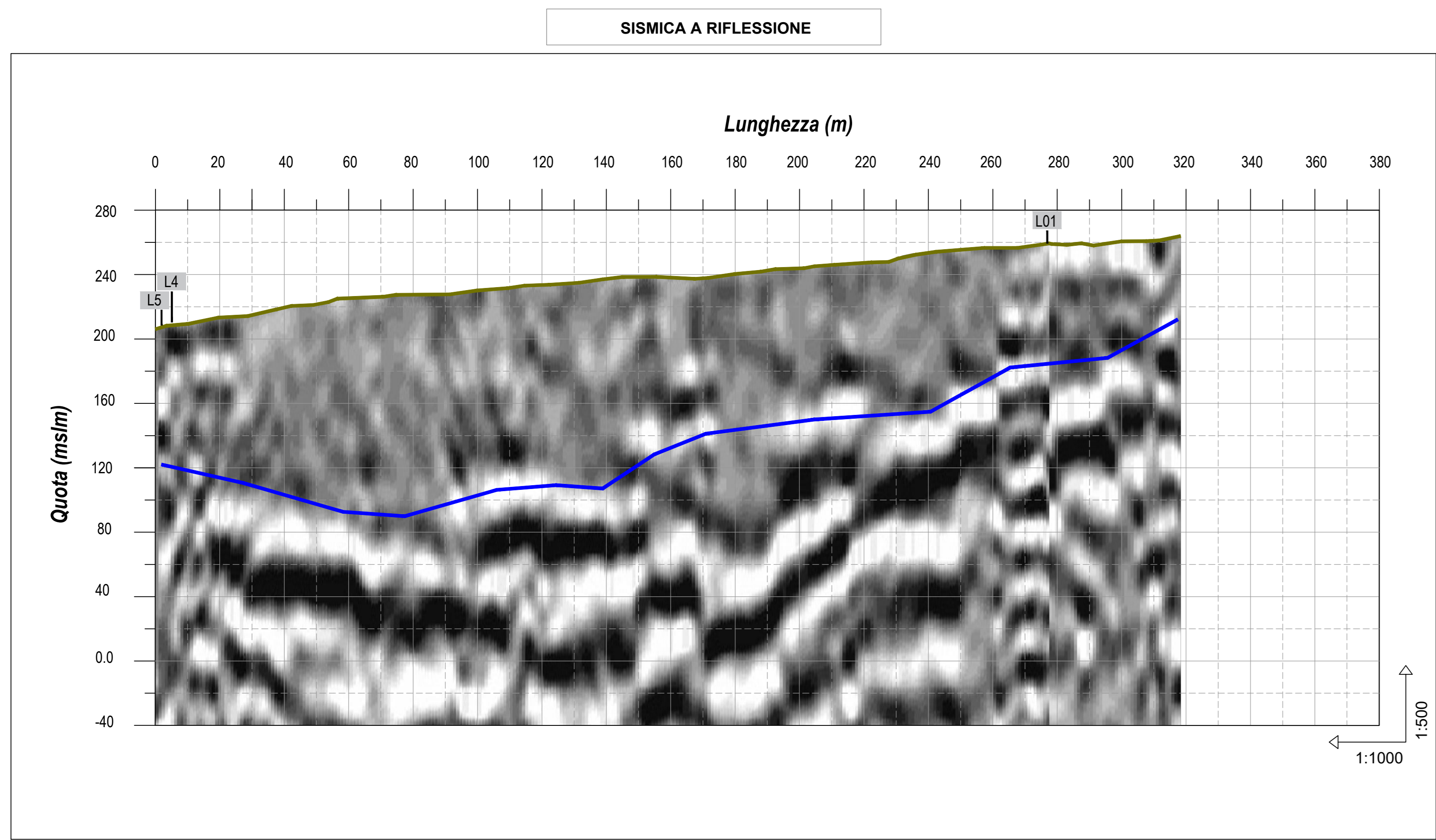
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI
Raddoppio tratta Apice-Orsara
Il lotto funzionale Apice-Hirpinia
Piano di indagini geofisiche V103
LINEE L02-L05



DATA	31/03/2022			
EMMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REDATTO	CORTINOVIS			
APPROVATO	ASCARI			
Sismica a riflessione Sismica a rifrazione (Vp-Vs) Tomografia elettrica				02
COMMITTENTE	Hirpinia AV			SCALA 1:500 / 1:250 / 1:2000
	Akron servizi geologici, ingegneria, ambiente			FILE 22001_01
				COMMESSA 22001



LEGENDA

Profili di indagine →

Stratigrafia sondaggi:

- Argilla limosa
- Argilla massosa
- Sondaggio a distruzione di nucleo

RESISTIVITA' (ohm·m)

VELOCITA' ONDE S indagine masw 2D (m/s)

VELOCITA' ONDE S indagine tomografia sismica a rifrazione (m/s)

VELOCITA' ONDE P (m/s)

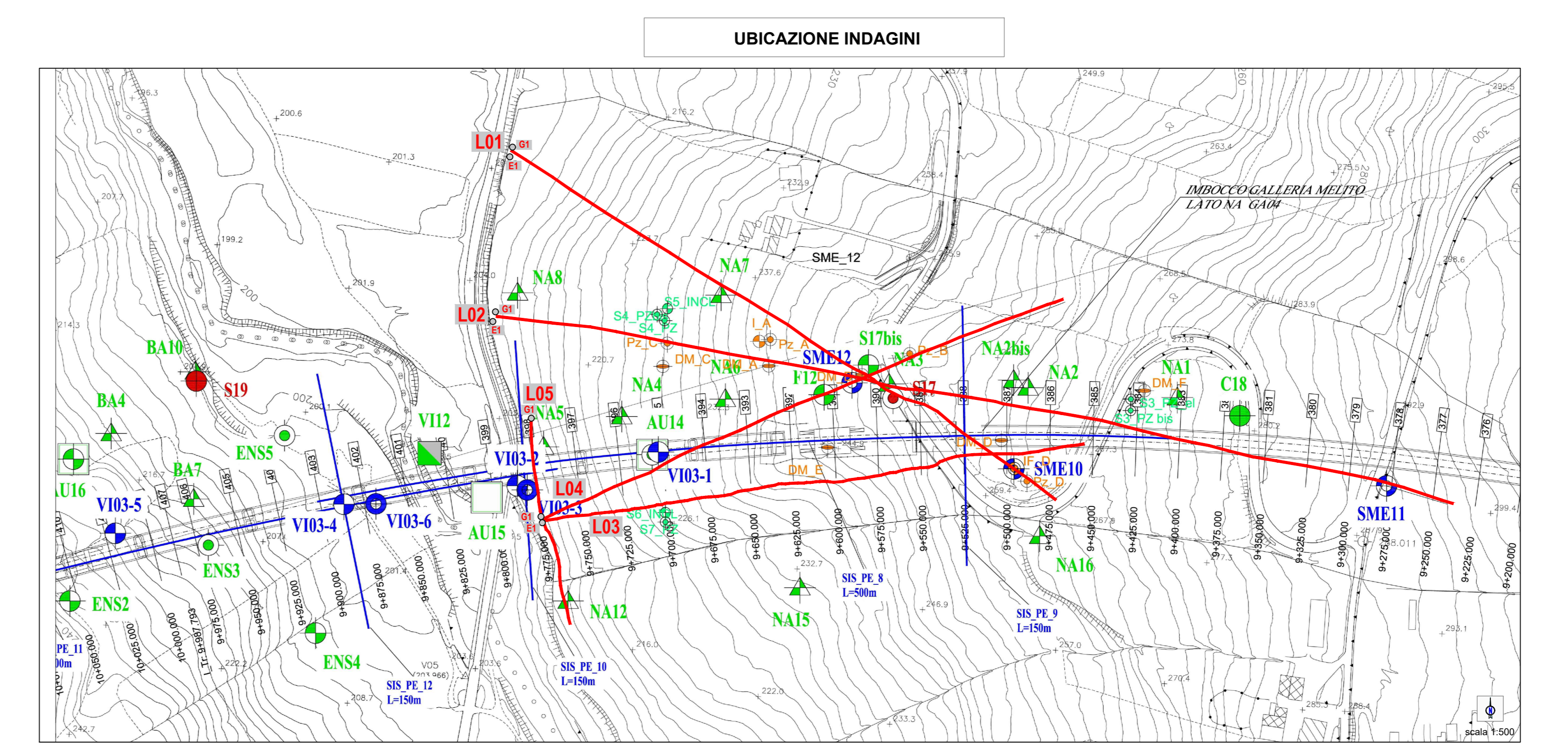
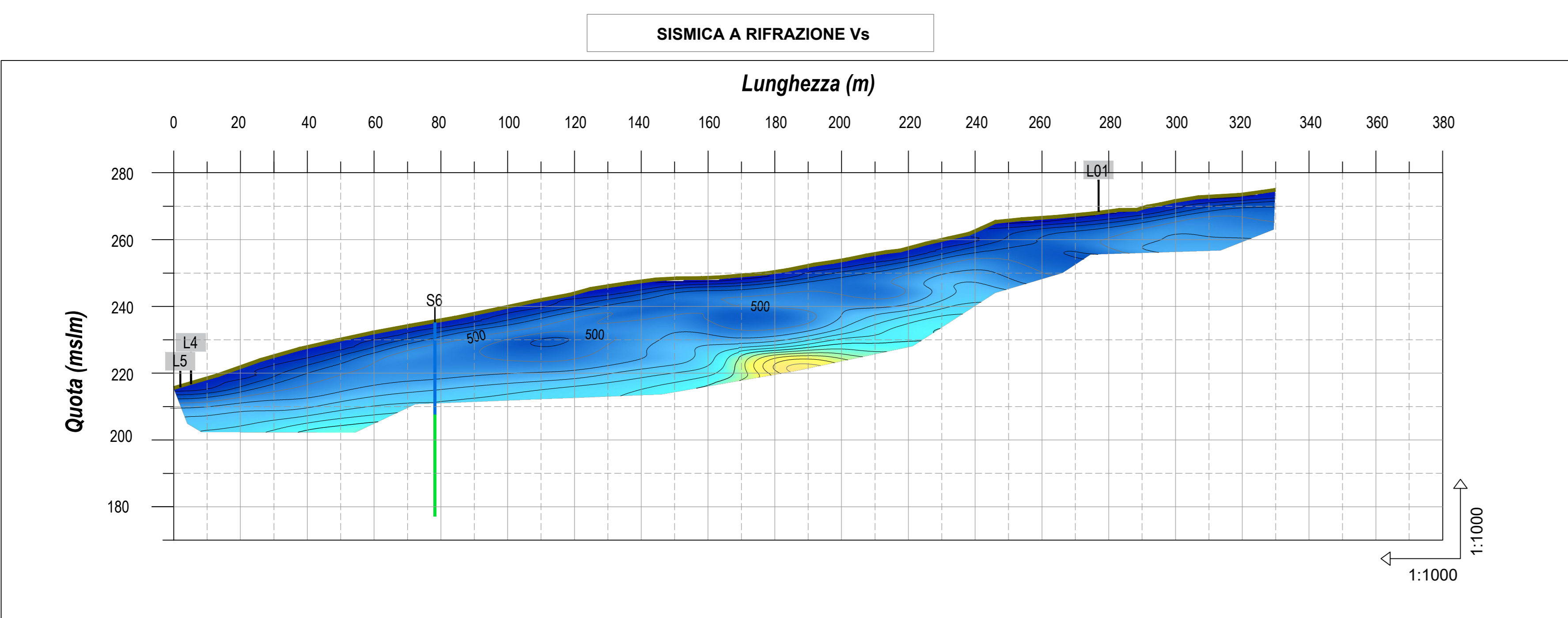
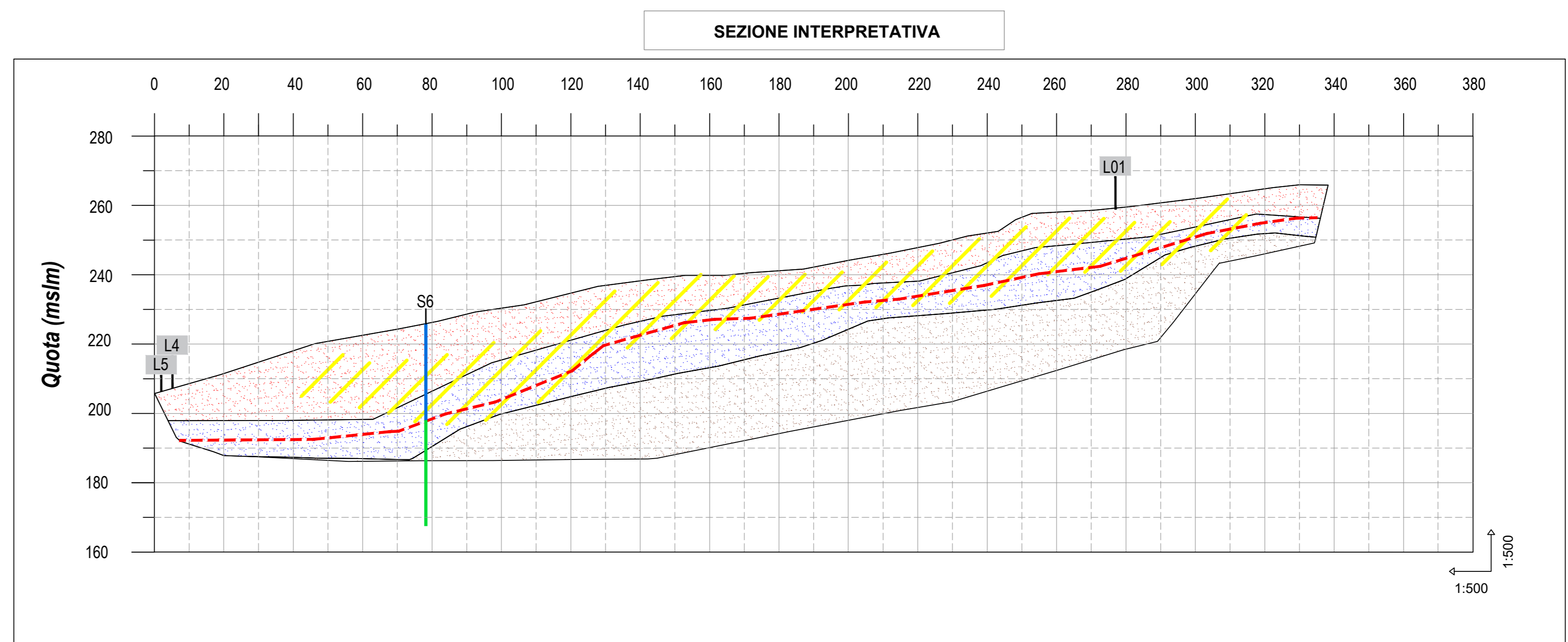
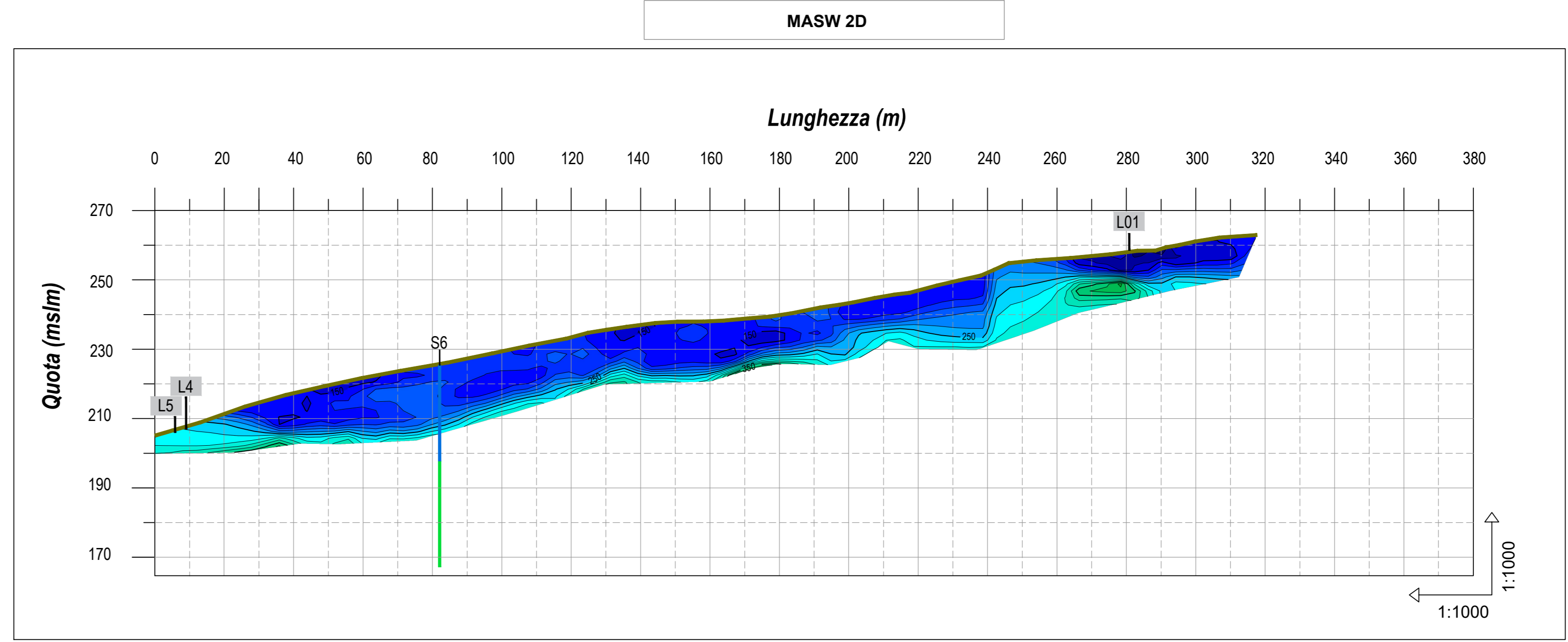
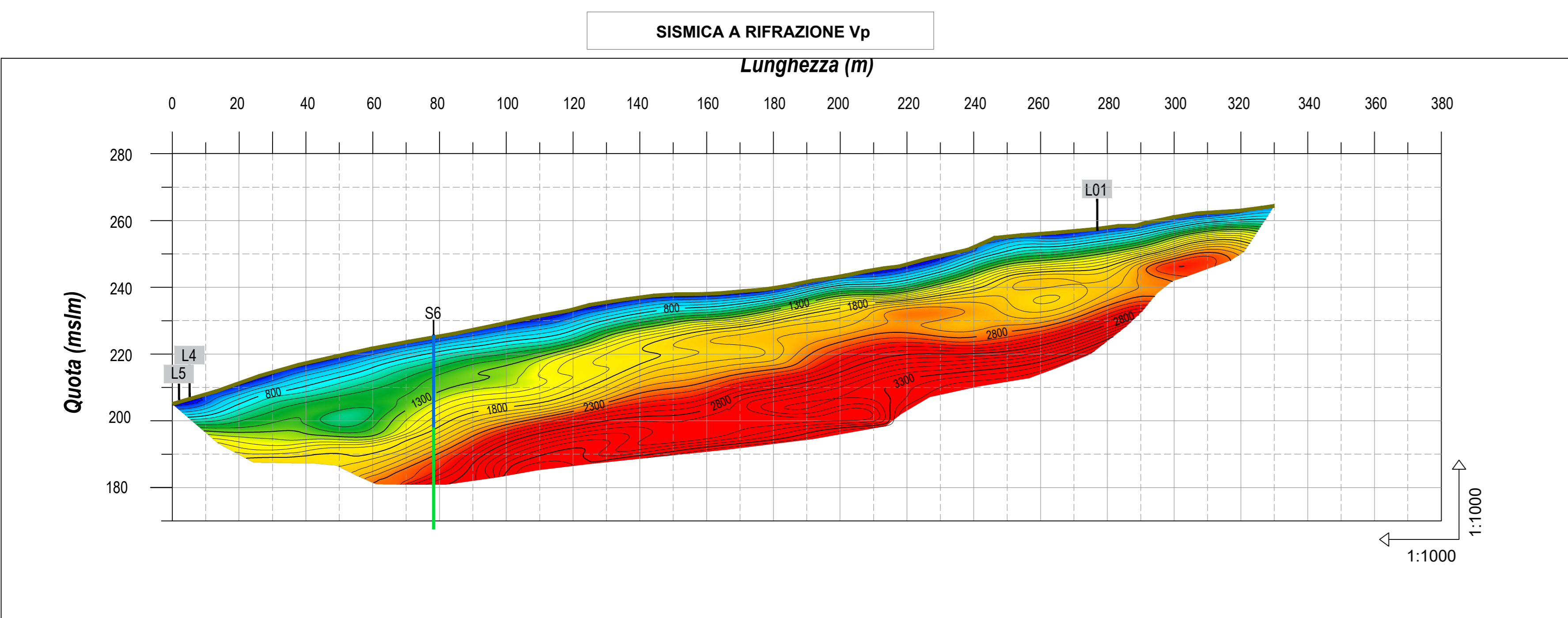
Sezioni interpretative

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm·m)	Descrizione
	< 7.5	prevalenza di materiali coesivi (limi e argille)
	> 7.5	materiali con minore componente argillosa

UNITA'	Vp (m/s)	Descrizione
	< 1200	zona colluviale
	1200-1700	materiale sciolto
	> 1700	Materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche

Lineamenti di discontinuita' definiti da gradienti di velocita' Vp

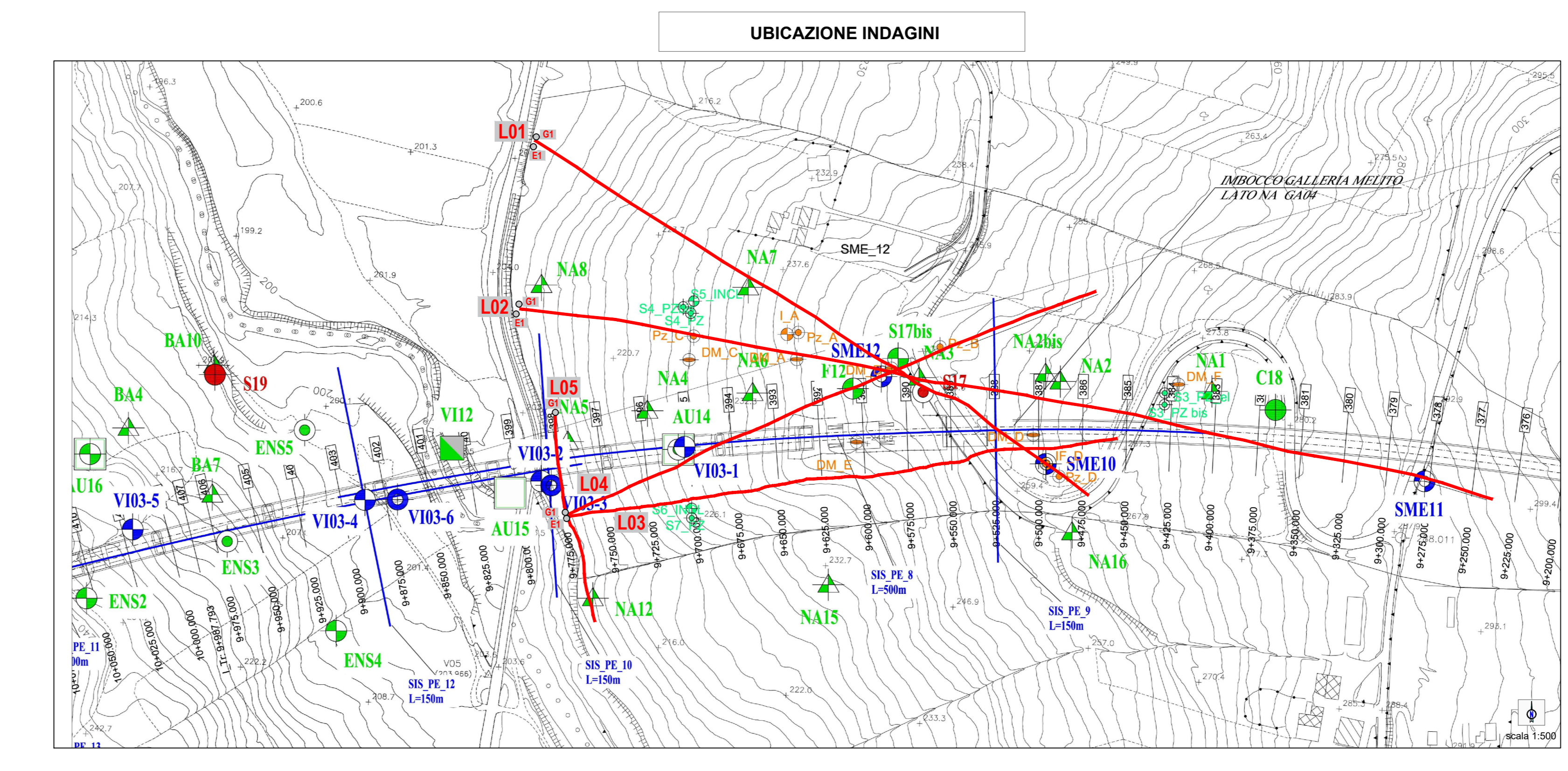
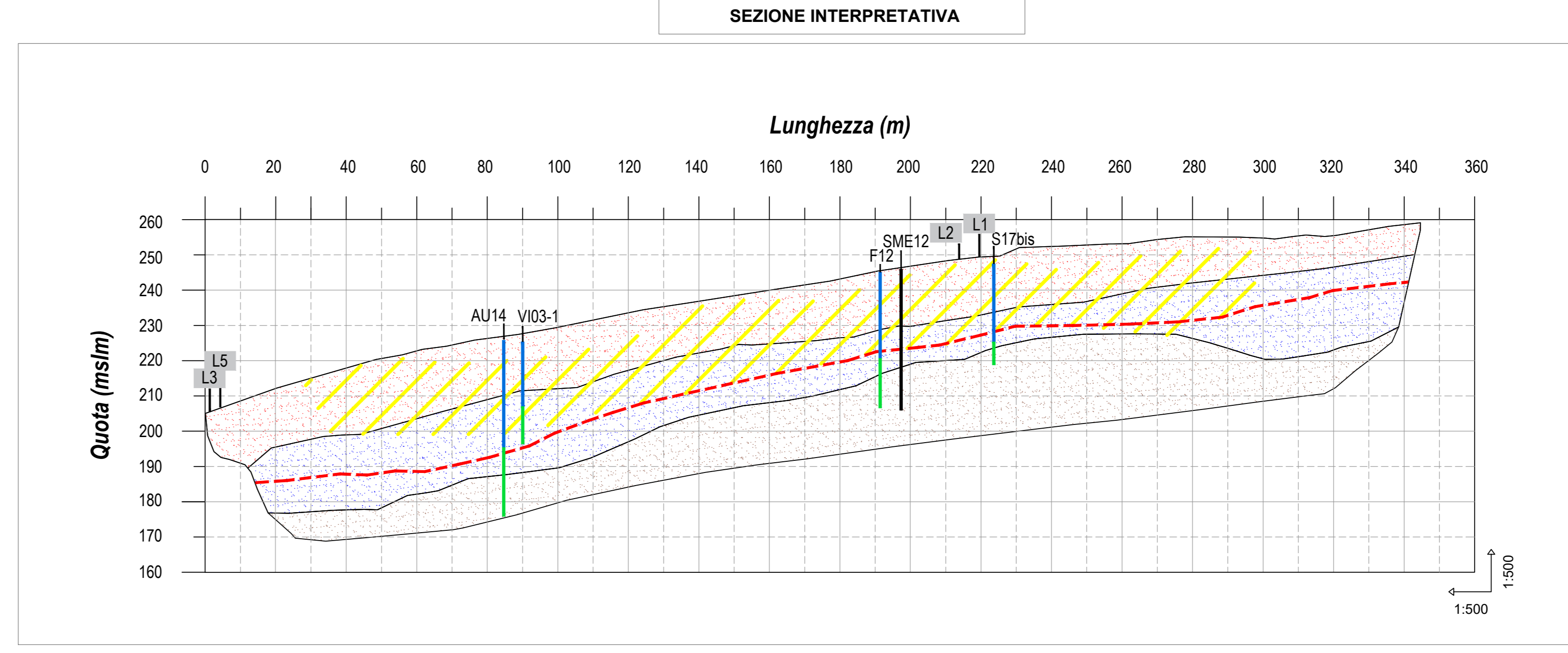
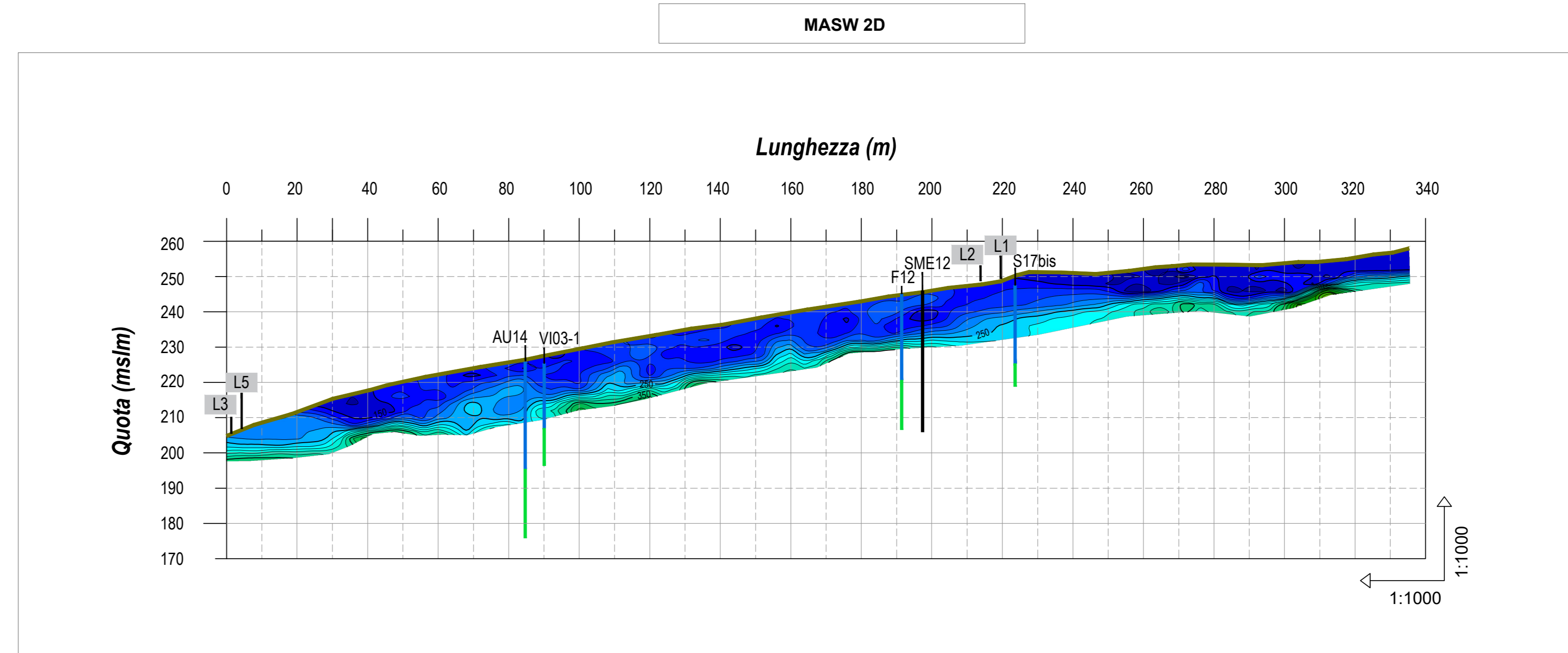
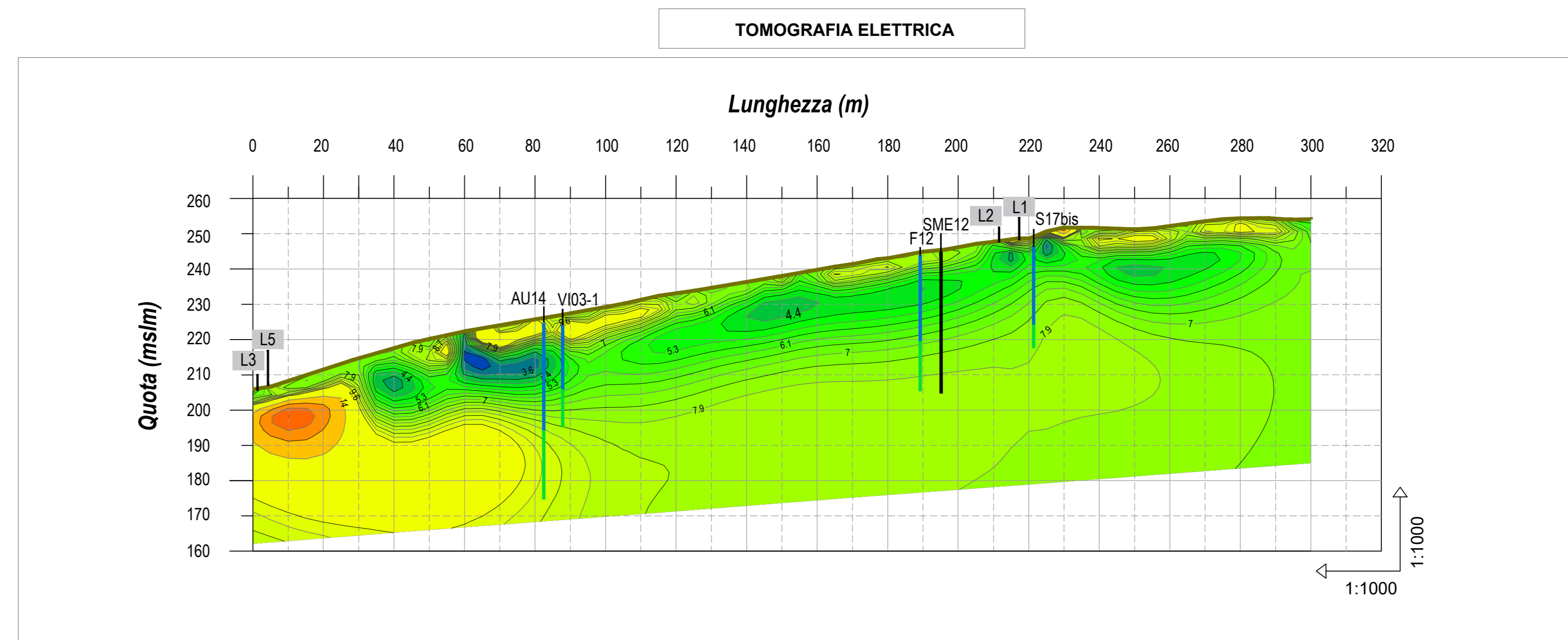
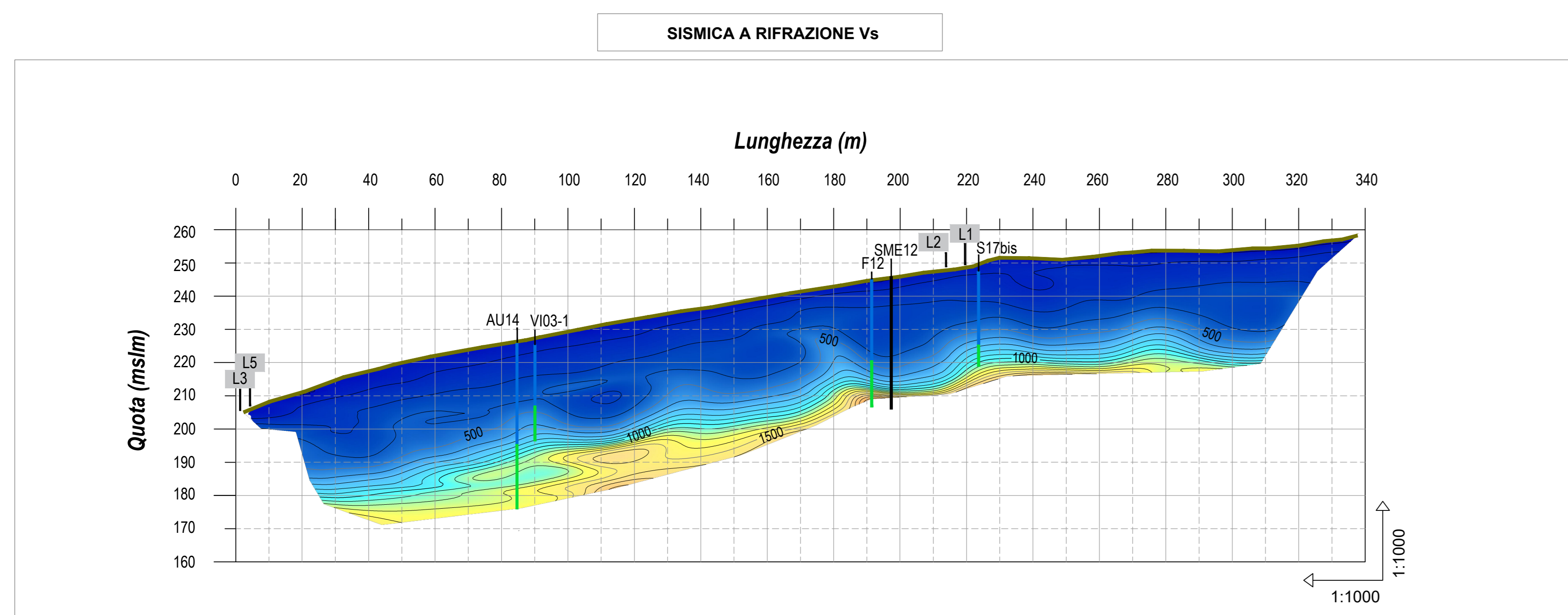
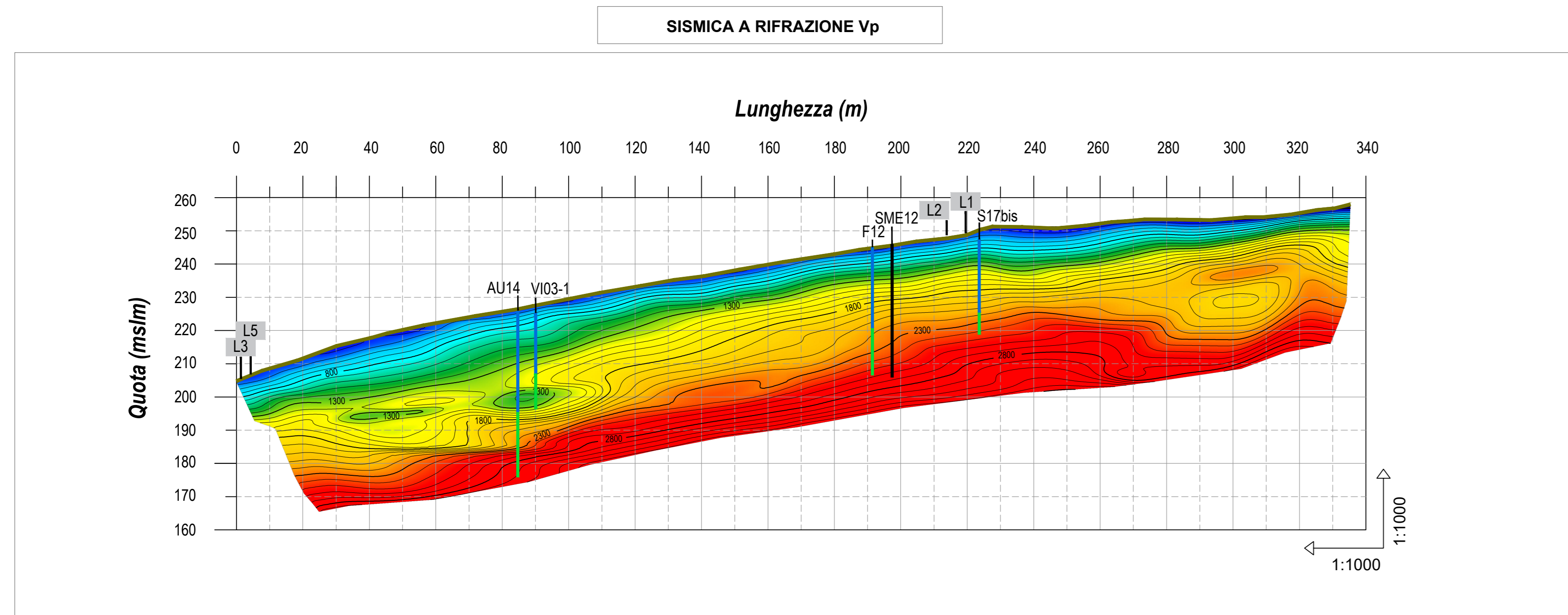
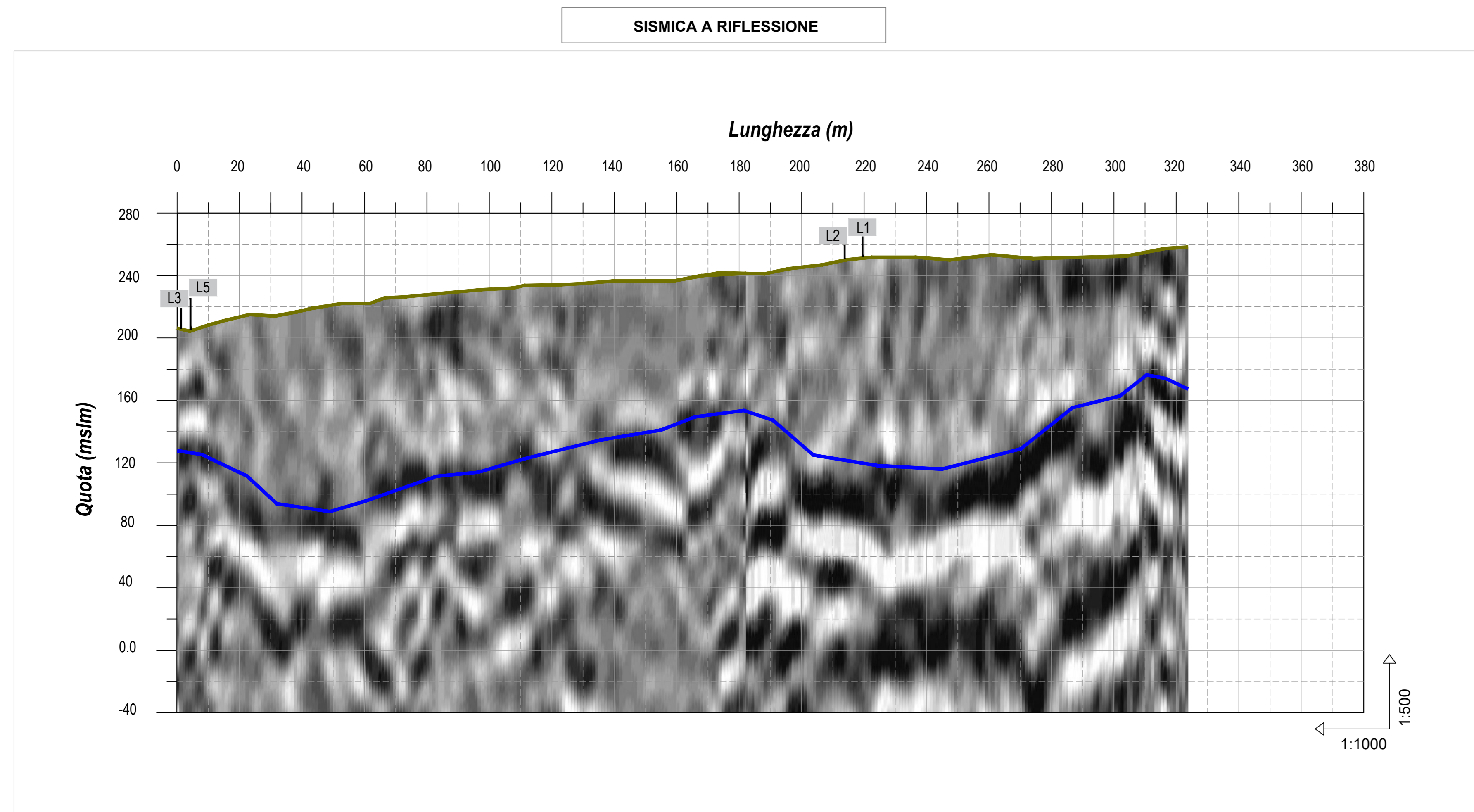
Limite di materiale con diverse caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso)



LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI
Raddoppio tratta Apice-Orsara
Il lotto funzionale Apice-Hirpinia

Piano di indagini geofisiche V103
LINEA L03

DATA	31/03/2022			
EMMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REGISTRO	CORTINOVIS			
APPROVATO	ASCARI			TAVOLA
Sismica a riflessione Sismica a rifrazione (Vp-Vs) Tomografia elettrica				03
COMMITTENTE	Hirpinia AV			SCALA 1:1000 / 1:500
	Akron servizi geologici, ingegneria, ambiente			FILE 22001_01
				COMMESSA 22001



LEGENDA

Profili di indagine → Stratigrafia sondaggi

- Argilla limosa
- Argilla marnosa
- Sondaggio a distruzione di nucleo

RESISTIVITA' (ohm.m)

VELOCITA' ONDE S indagine masw 2D (m/s)

VELOCITA' ONDE S indagine tomografia sismica a rifrazione (m/s)

VELOCITA' ONDE P (m/s)

Sezioni interpretative

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm.m)	Descrizione
	< 7.5	prevalenza di materiali coesivi (limi e argille)
	> 7.5	materiali con minore componente argillosa

UNITA'	Vp (m/s)	Descrizione
	< 1200	zona colluviale
	1200-1500-2300	materiale sciolto
	> 2300	Materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche

Lineamento di discontinuita definito da gradiente di velocita Vp

Limite con materiale con diversa caratteristiche geomeccaniche (substrato roccioso)

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI

Raddoppio tratta Apice-Orsara

I lotto funzionale Apice-Hirpinia

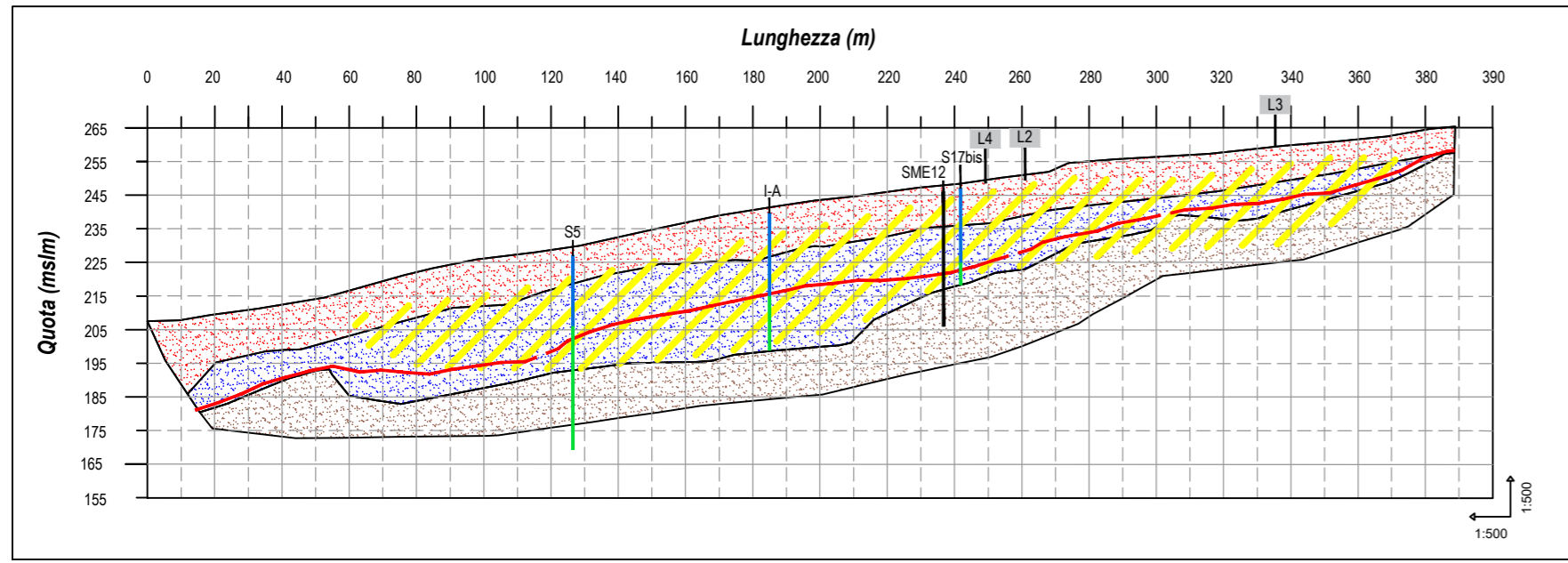
Piano di indagini geofisiche V103

LINEA L04

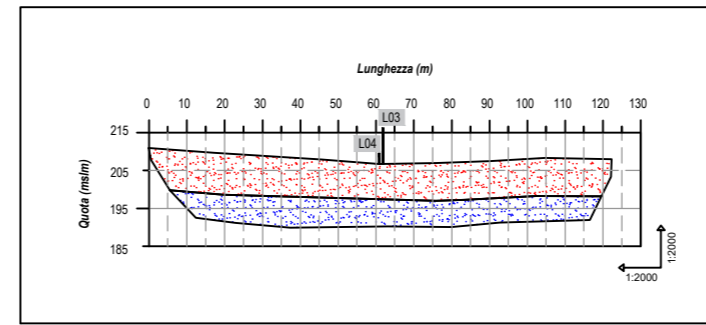


DATA	31/03/2022			
EMMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REGISTRO	CORTNOVIS			
APPROVATO				TAVOLA
Sismica a riflessione Sismica a rifrazione (Vp-Vs) Tomografia elettrica				04
COMMITTENTE	Hirpinia AV			SCALA
				1:1000 / 1:500
				FILE
				22001_01
				COMMESSA
				22001

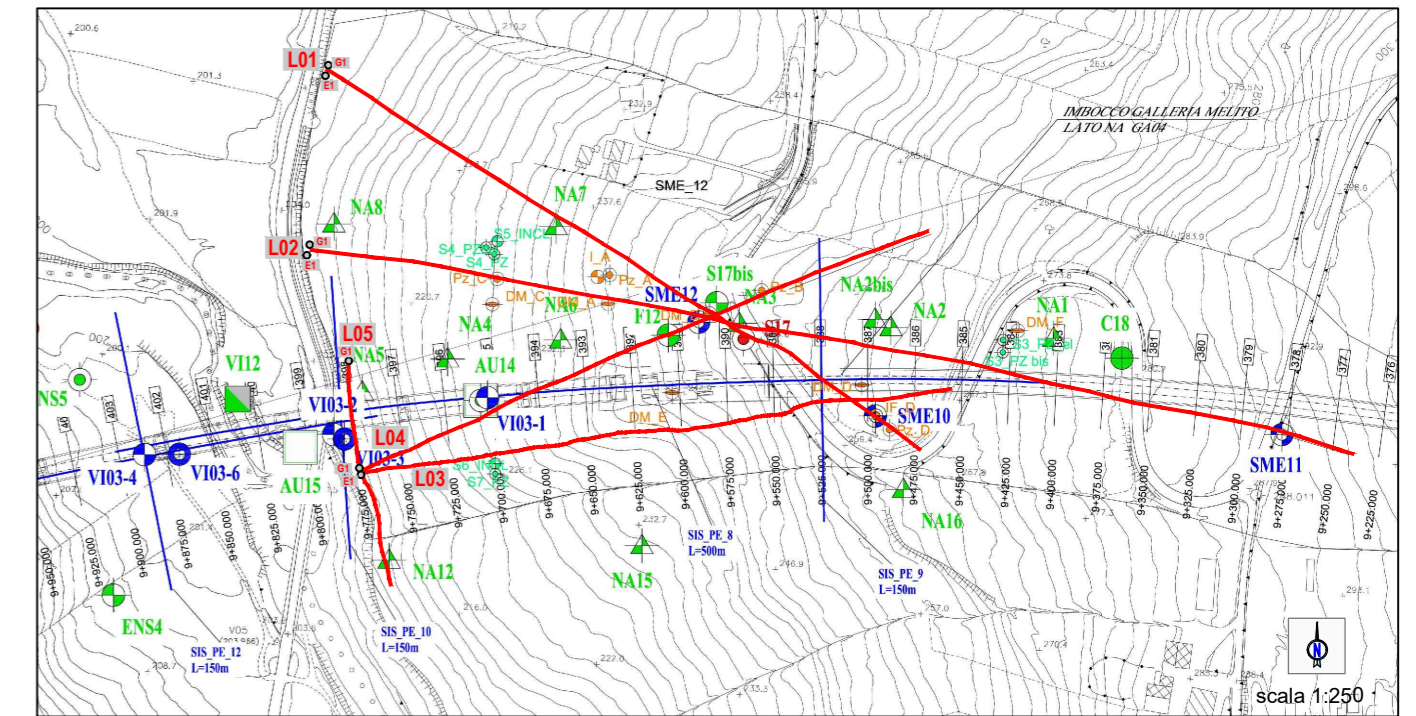
SEZIONE L1



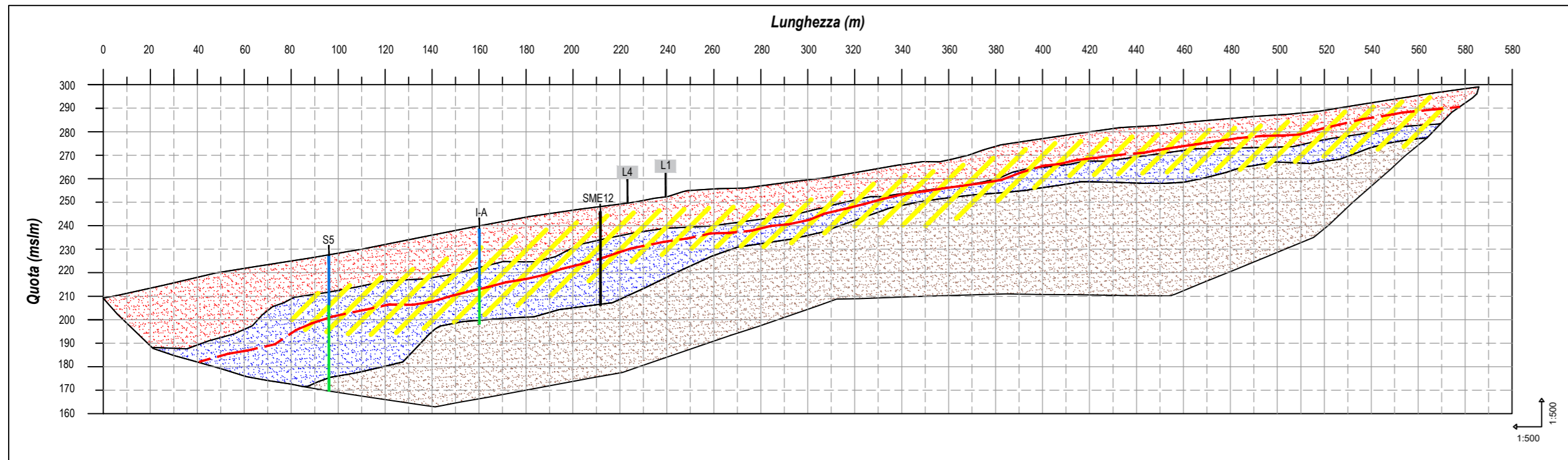
SEZIONE L5



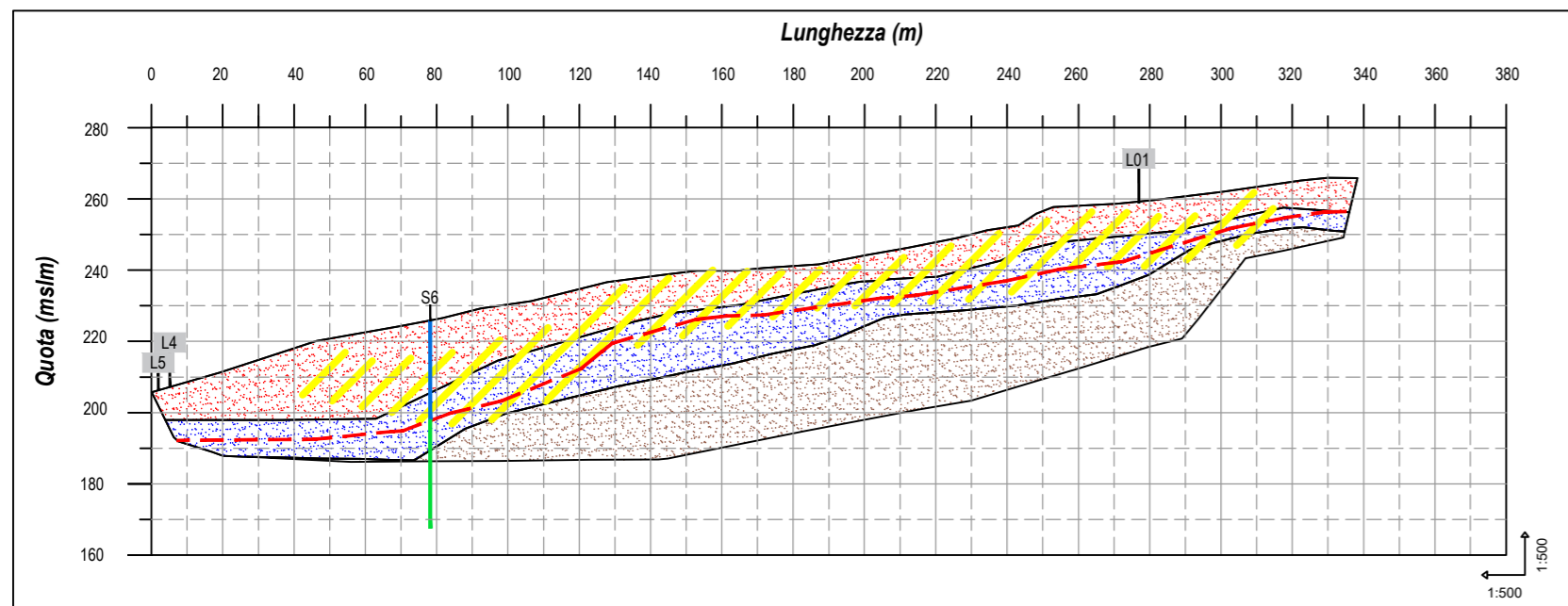
PLANIMETRIA INDAGINI



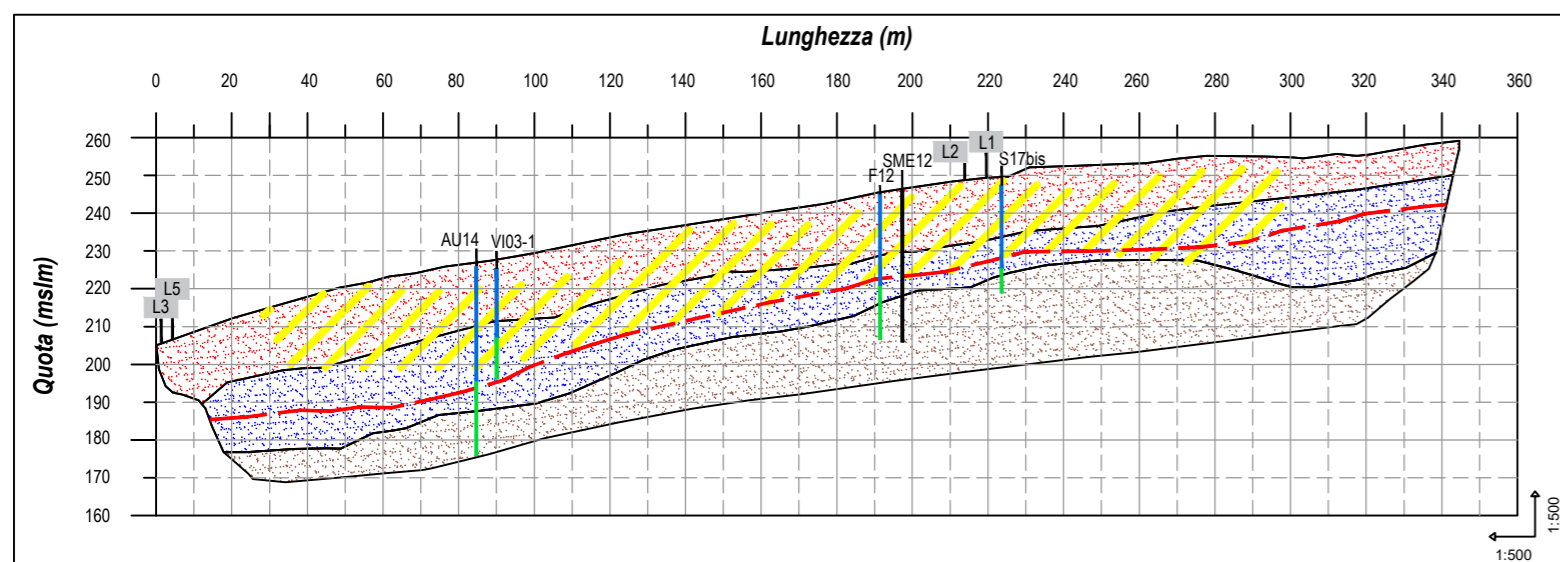
SEZIONE L2



SEZIONE L3



SEZIONE L4



LEGENDA

- Profili di indagine →
- Stratigrafia sondaggi**
- Argilla limosa
 - Argilla marnosa
 - Sondaggio a distruzione di nucleo

Sezioni interpretative

ZONE CONDUTTIVE	Rho (ohm*m)	Descrizione
	< 7.5	prevalenza di materiali coesivi (limi e argille)
	> 7.5	materiali con minore componente argillosa
UNITA'	Vp (m/s)	
1 A	< 1200	zona colluviale
	1200 < Vp < 2300	materiale sciolto
2	> 2300	materiali sciolti con migliori caratteristiche geomeccaniche
		Lineamento di discontinuità definito da gradiente di velocità Vp

LINEA FERROVIARIA NAPOLI-BARI

Raddoppio tratta Apice-Orsara
I lotto funzionale Apice-Hirpinia

Piano di indagini geofisiche VI03
LINEE L01-L02-L03-L04-L05



DATA	31/03/2022			
EMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REDATTO	CORTINOVIS			
APPROVATO	ASCARI			
SEZIONI INTERPRETATIVE				05
COMMITTENTE	Hirpinia AV			SCALA
				1:500
				FILE
				22001_01
				COMMESSA
				22001



Akron
servizi per geologia, ingegneria, ambiente