



Coordinamento Territoriale Nord Est

Area Compartimentale Veneto

Via E. Millosevich, 49 - 30173 Venezia Mestre T [+39] 041 2911411 - F [+39] 041 5317321  
Pec anas.veneto@postacert.stradeanas.it - www.stradeanas.it

Anas S.p.A. - Società con Socio Unico

Sede Legale

Via Monzambano, 10 - 00185 Roma T [+39] 06 44461 - F [+39] 06 4456224

Pec anas@postacert.stradeanas.it

Cap. Soc. Euro 2.269.892.000,00 Iscr. R.E.A. 1024951 P.IVA 02133681003 - C.F. 80208450587



cortina  
2021

## S.S. n° 51 "di Alemagna" Provincia di Belluno

### Piano straordinario per l'accessibilità a Cortina 2021

Attraversamento dell'abitato di  
Tai di Cadore

#### PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE ANAS S.p.A.

Coordinamento Territoriale Nord Est - Area Compartimentale Veneto

IL PROGETTISTA:

Ing. Pietro Leonardo CARLUCCI

IL GEOLOGO:

Geol. Emanuela AMICI

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

Dott. Marco FORMENTELLO

Arch. Lisa ZANNONER

ASSISTENZA ALLA PROGETTAZIONE:



ART Ambiente Risorse Territorio srl

strada Pietro Del Prato 15/A 43121 Parma

tel. +39 0521 090911 fax +39 0521 090999

www.artambiente.org info@artambiente.org

DIRETTORE TECNICO: Dott. Ing. Ivo Fresia

visto: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. Gabriella MANGINELLI

PROTOCOLLO:

DATA:

N. ELABORATO:

### GEOLOGIA

Documentazione Indagini Geofisiche

CODICE PROGETTO

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

MSVE14 D 1709

NOME FILE

T00\_GE00\_GEO\_RE03\_A-IndaginiGeofisiche.docx

REVISIONE

SCALA:

CODICE ELAB. T00GE00GEORE03

A

-

D

C

B

A

EMISSIONE

OTTOBRE 2017

G. VILLA

R. MALCOTTI

I. FRESIA

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO



## Indice

1	Premessa .....	1
2	PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE ESTATE 2017 .....	2
3	MASW .....	3
4	TOMOGRAFIA ELETTRICA .....	4

ISO 9001	elaborato	verificato	approvato	commessa	attività	prodotto	elaborato	revisione
ART	VL	RM	FR	709	04	91	003R	00



## **1 Premessa**

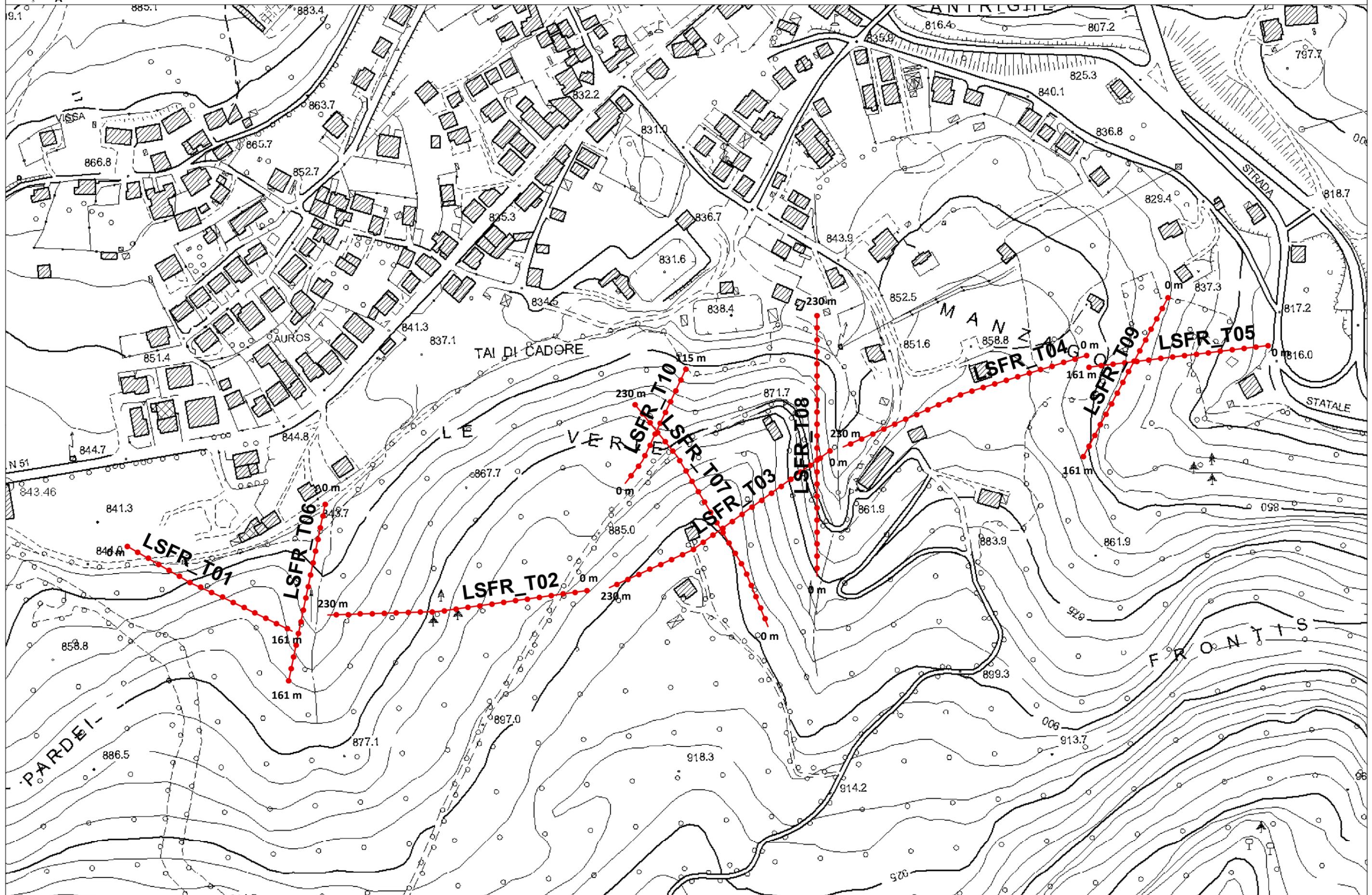
Il presente documento riporta integralmente i risultati delle indagini geofisiche di progetto definitivo dei “Lavori di miglioramento prestazionale e funzionale della S.S. 51 “Alemagna” nel tratto di attraversamento dell’abitato di Tai di Cadore (BL).

Di seguito sono riportati integralmente i certificati di prova e la documentazione ad essa allegata.

## **2 PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE ESTATE 2017**



scala 1:3000



### Riferimenti geografici degli stendimenti

Stendimento LSFR_T01			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
858.6 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.419080°	12.354081°
Stendimento LSFR_T02			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
883.1 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.418847°	12.356955°

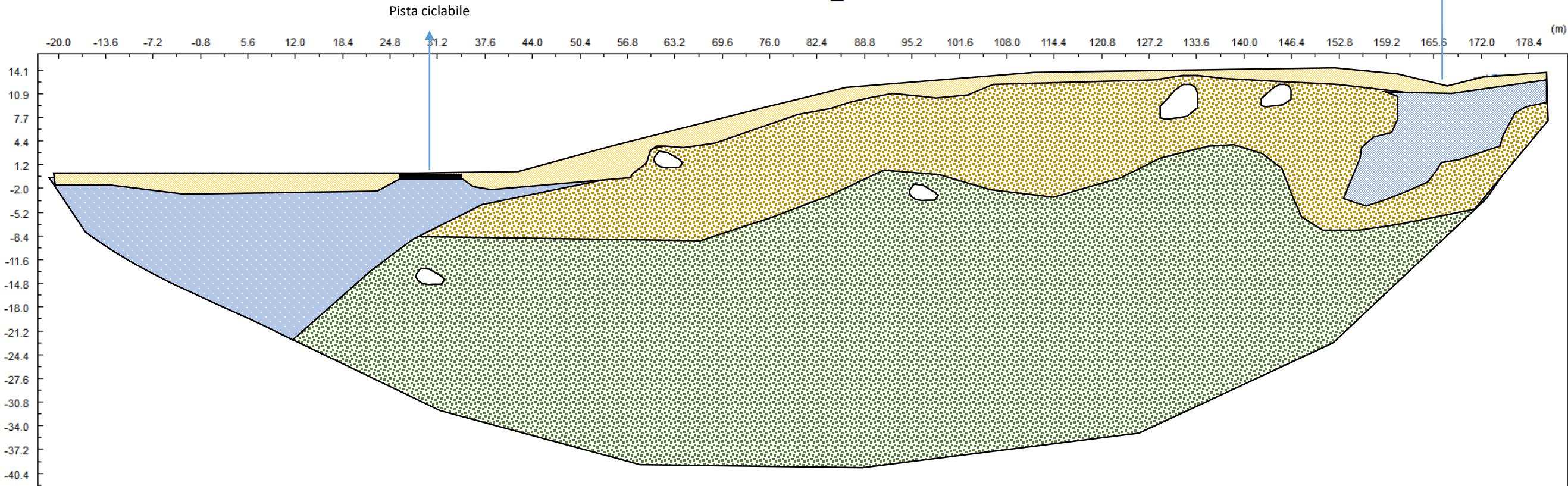
  


# SISMO-SEZIONE LSRF\_T01 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

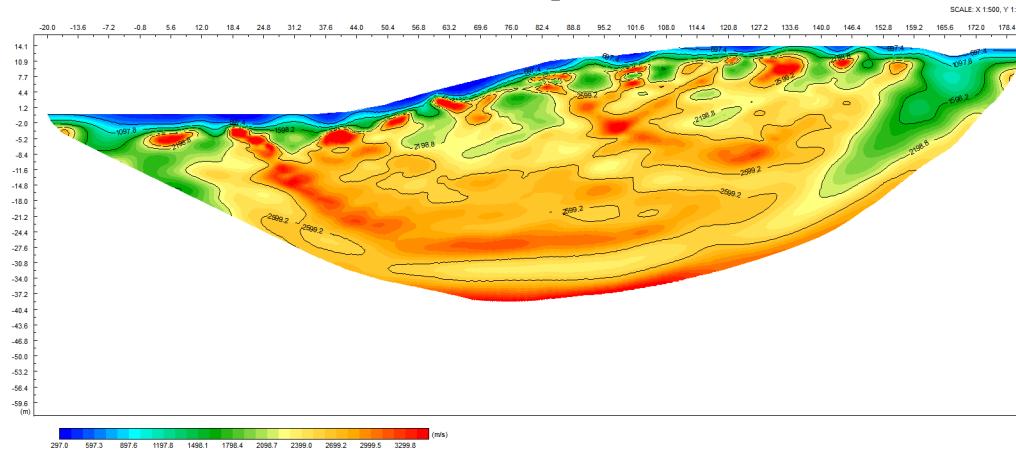
## LEGENDA

- Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  - Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  - Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  - Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
- Probabili trovanti

## TAI - LSRF\_T01



## TAI - LSRF\_T01

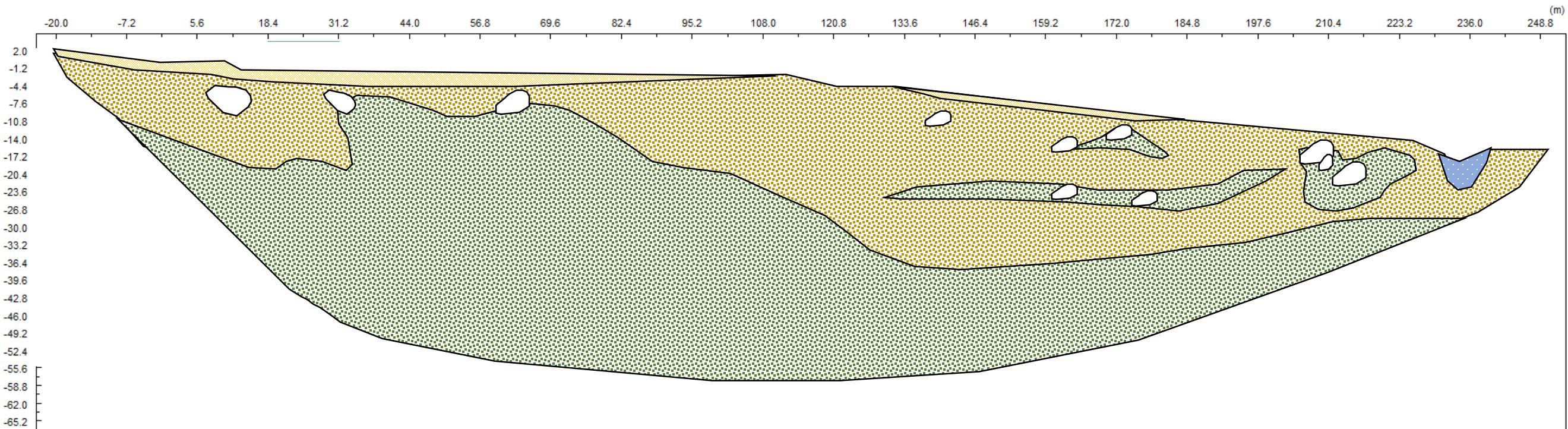


# SISMO-SEZIONE LSRF\_T02 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

## LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

## TAI - LSRF\_T02



TAI - LSRF\_T02

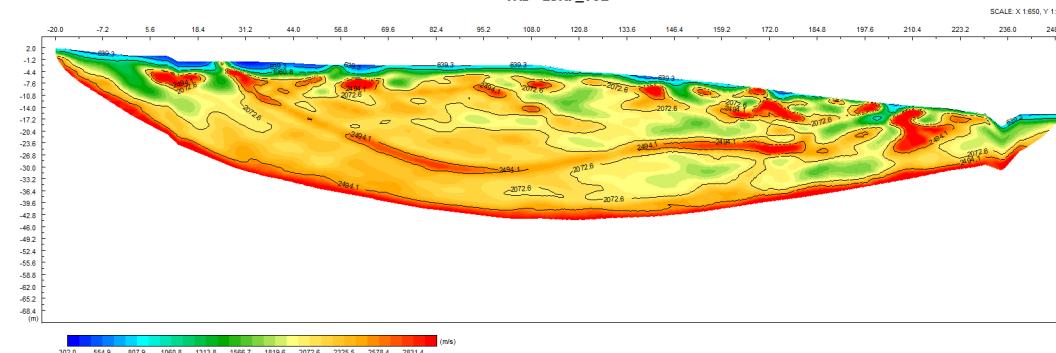




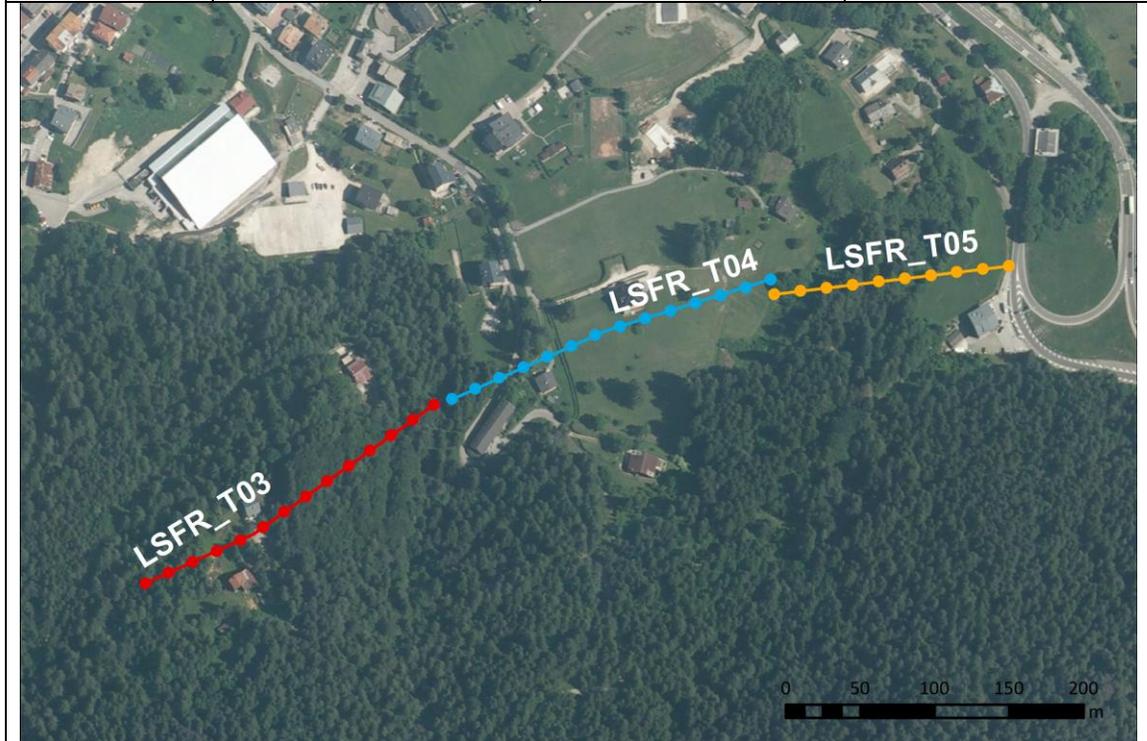
Fig.1-2: Stendimento  
LSFR\_T01



Fig.3-4: Stendimento  
LSFR\_T02

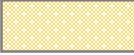


Stendimento LSFR_T03			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
899.3 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.419407°	12.360031°
Stendimento LSFR_T04			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
862.6 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.420388°	12.362844°
Stendimento LSFR_T05			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
832.0 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.420603°	12.365315°

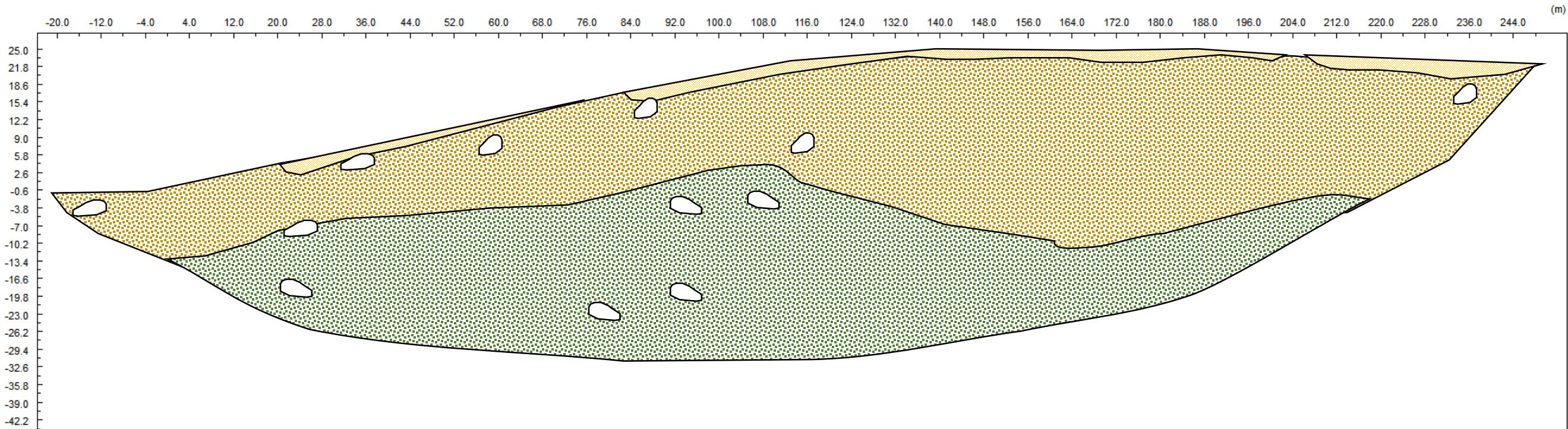


SISMO-SEZIONE LSRF\_T03 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

LEGENDA

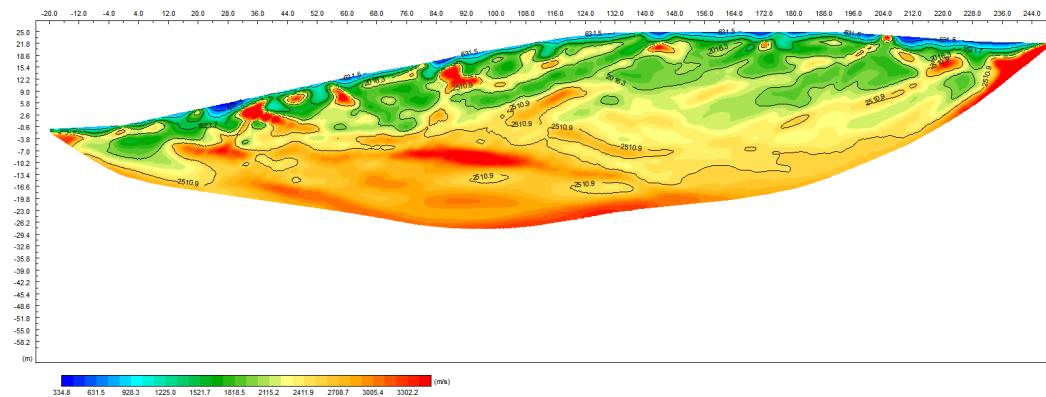
-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T03



TAI - LSRF\_T03

SCALE X 1:800, Y 1:800



Asse X: 0.0 ↔ 8.0 m 1:800  
 Asse Y: 0.0 ↔ 8.0 m 1:800

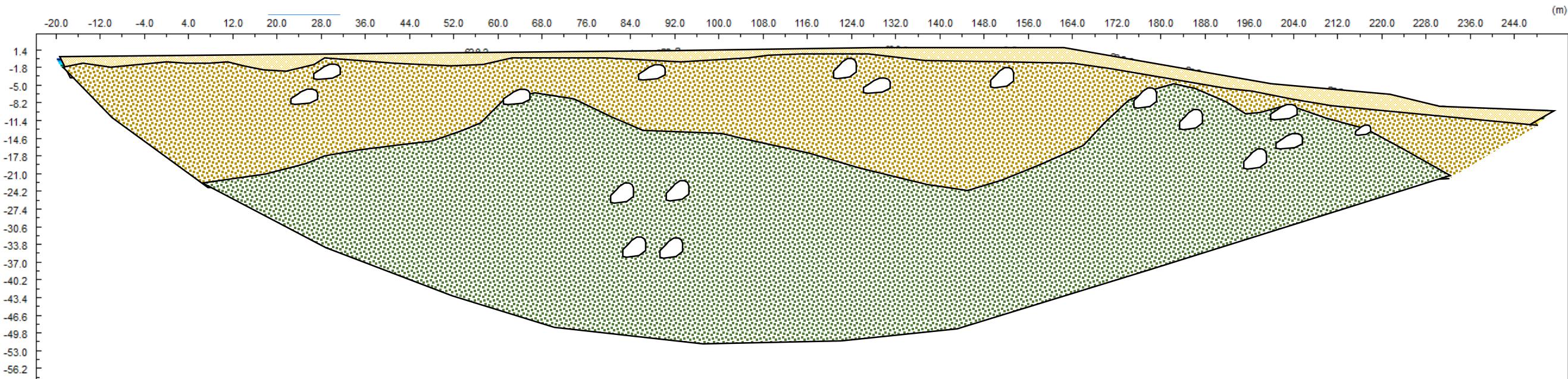


SISMO-SEZIONE LSRF\_T04 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

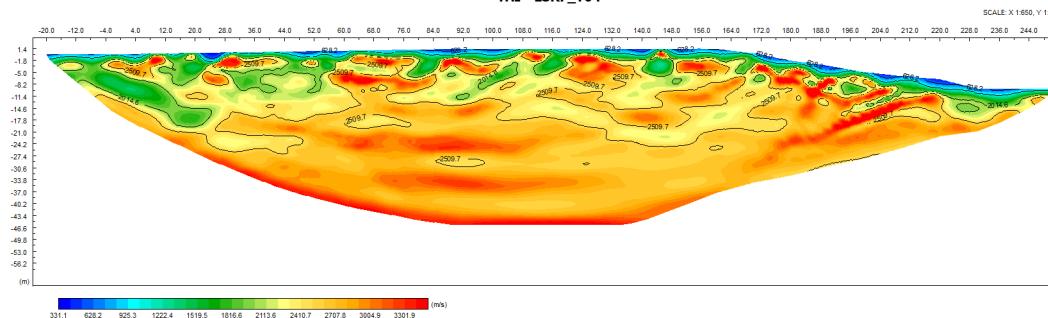
LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s <  $V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s <  $V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T04



TAI - LSRF\_T04

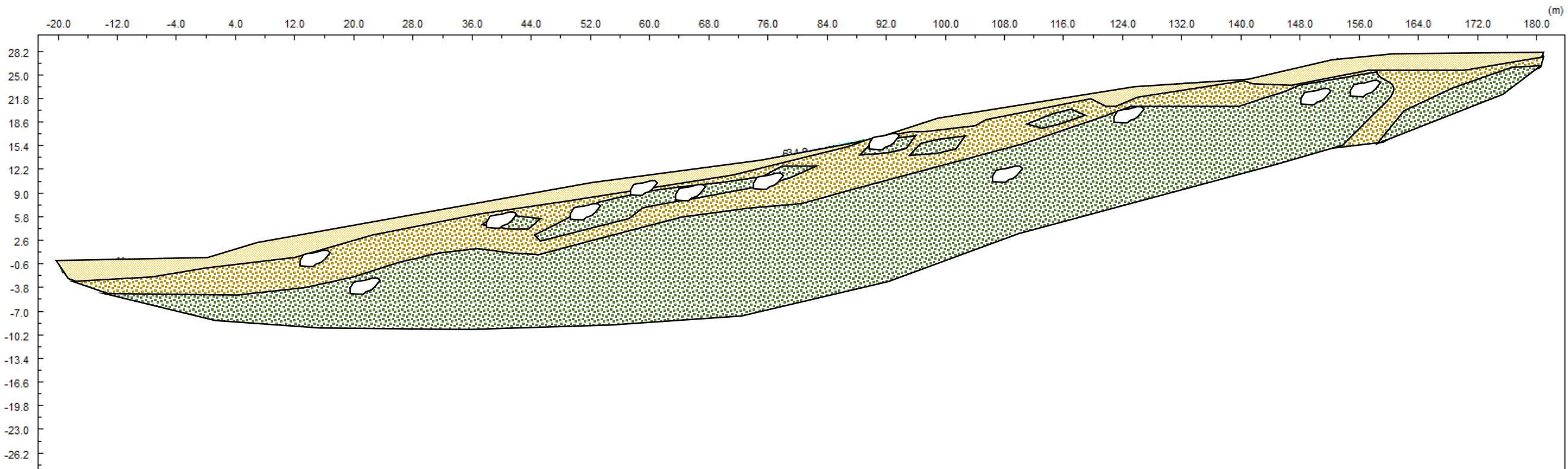


SISMO-SEZIONE LSRF\_T05 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T05



TAI - LSRF\_T05

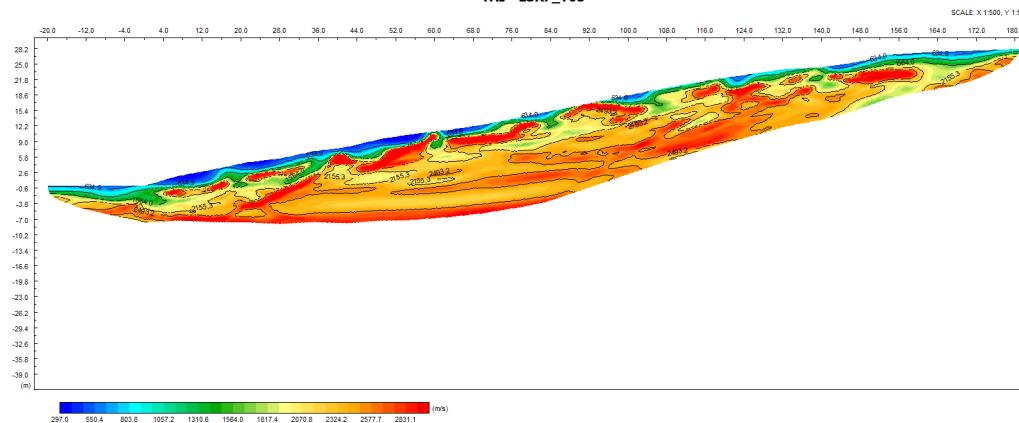




Fig.5-6: Stendimento  
LSFR\_T03



Fig.7-8: Stendimento  
LSFR\_T04





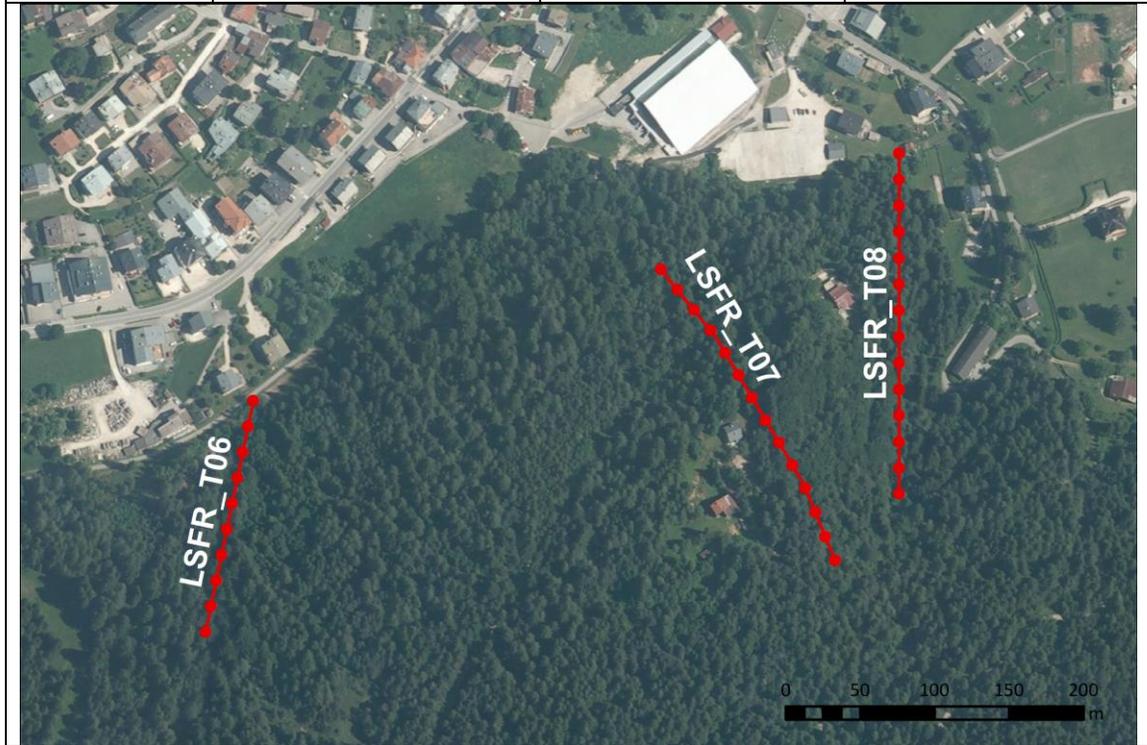
Fig.9-10: Stendimento  
LSFR\_T05



Fig.11-12: Stendimento  
LSFR\_T06



Stendimento LSFR_T06			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
853.8 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.419019°	12.355228°
Stendimento LSFR_T07			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
899.6 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.419538°	12.359877°
Stendimento LSFR_T08			
quota	coordinate	latitudine	longitudine
861.9 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.420015°	12.361140°

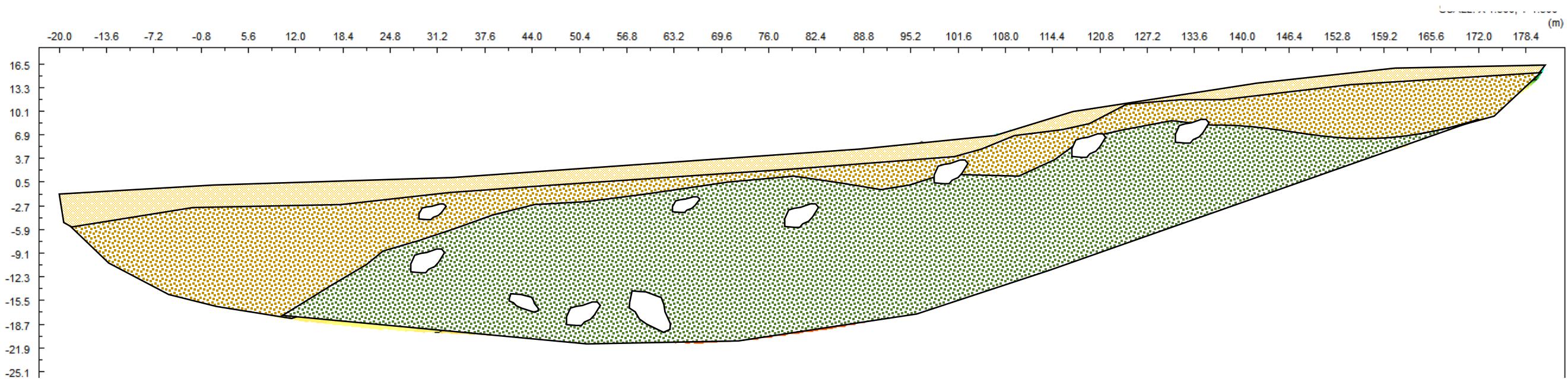


SISMO-SEZIONE LSRF\_T06 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

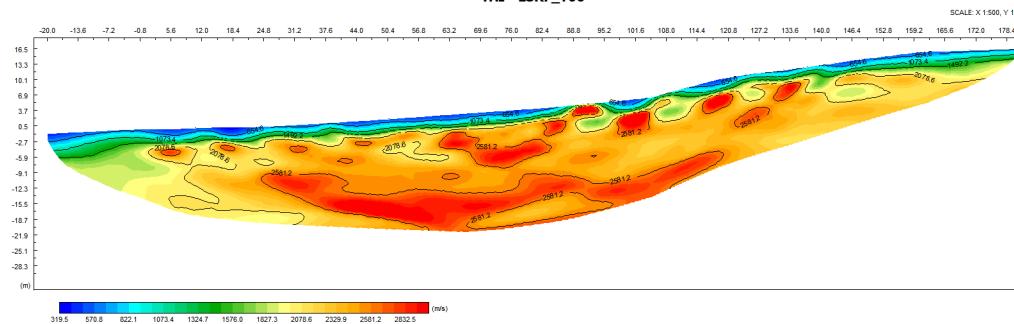
LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s <  $V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s <  $V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T06



TAI - LSRF\_T06

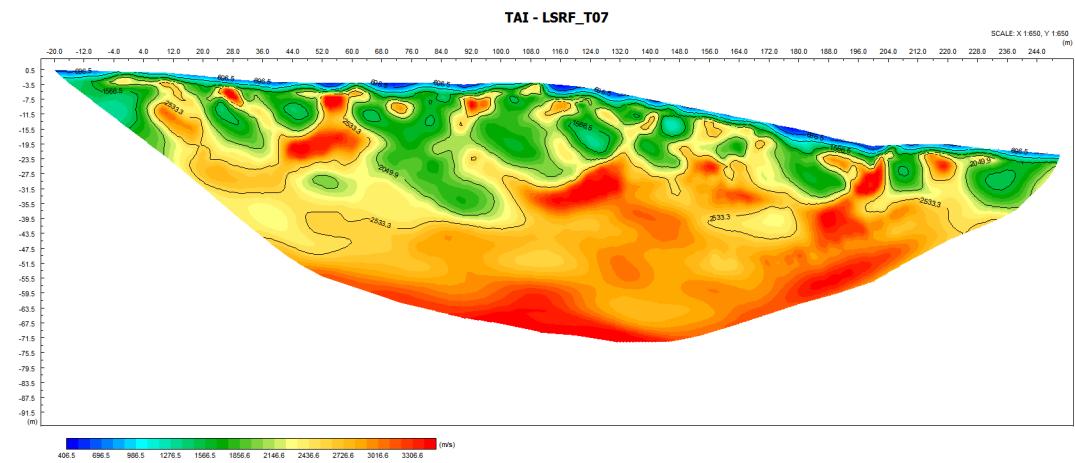
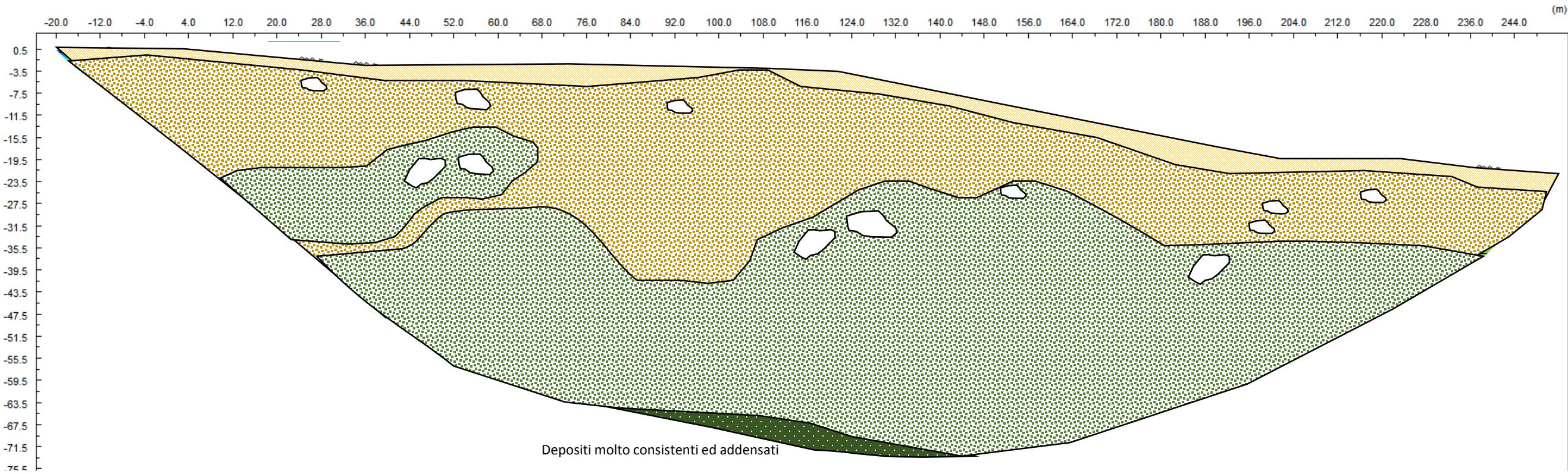


SISMO-SEZIONE LSRF\_T07 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T07



SISMO-SEZIONE LSRF\_T08 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
  -  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
  -  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T08

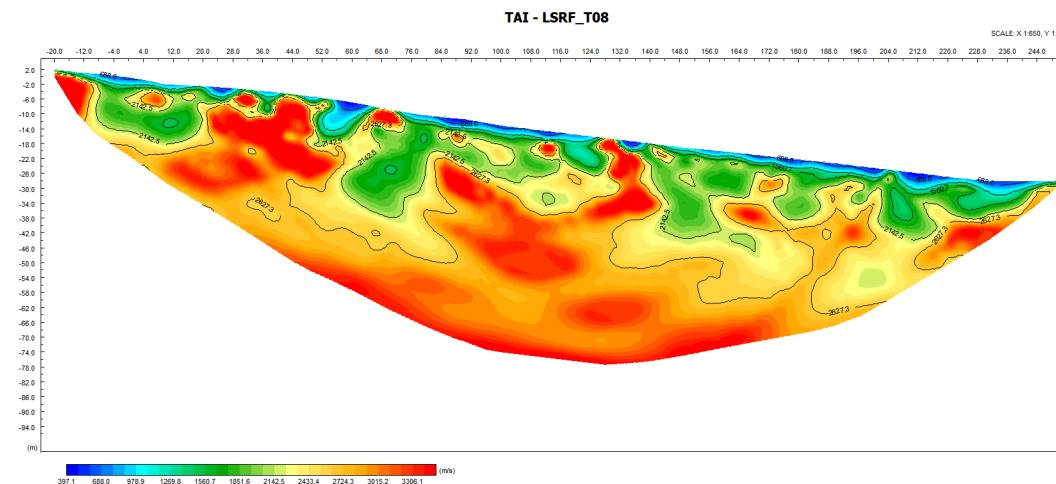
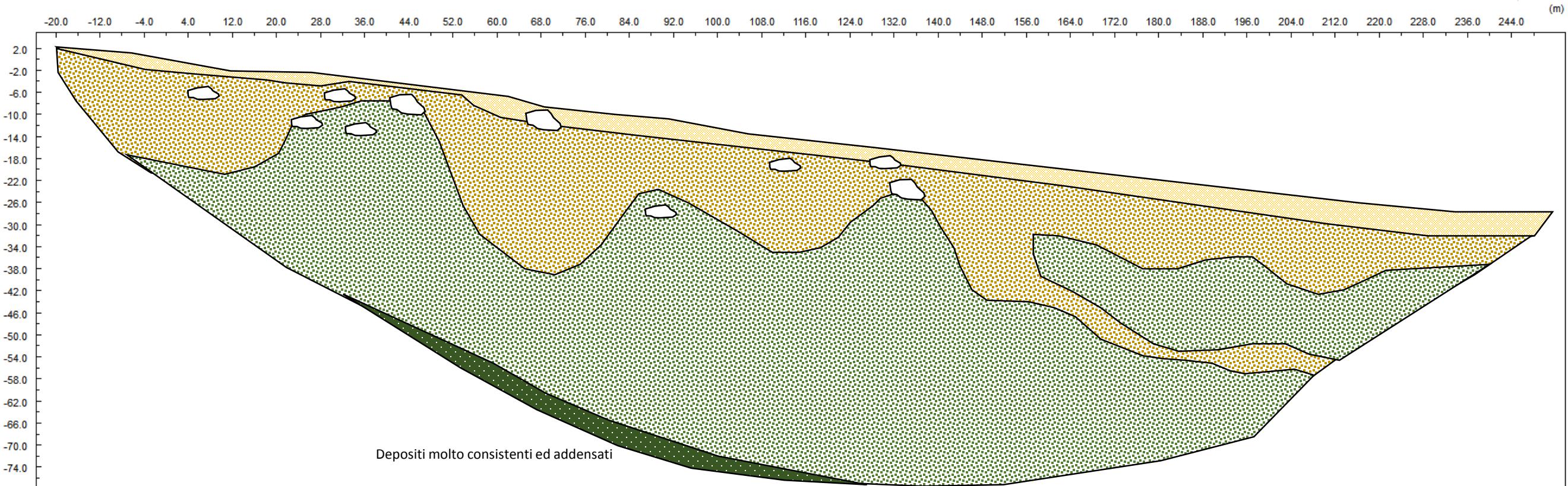




Fig.13-14: Stendimento  
LSFR\_T07



Fig.15-16: Stendimento  
LSFR\_T08



### Stendimento LSFR\_T09

quota	coordinate	latitudine	longitudine
842.5 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.420450°	12.364704°

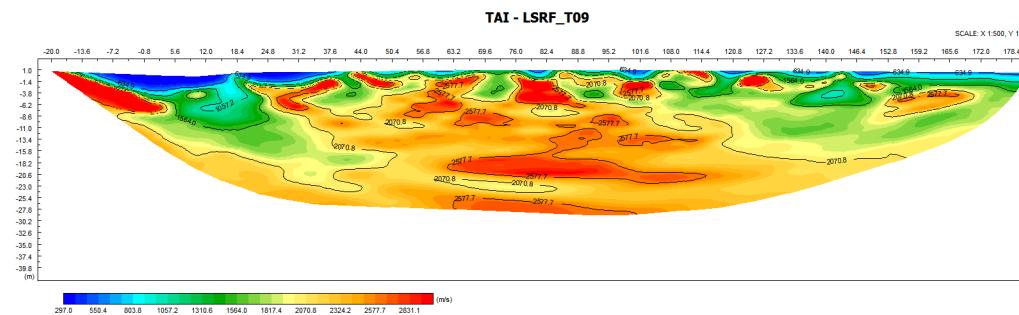
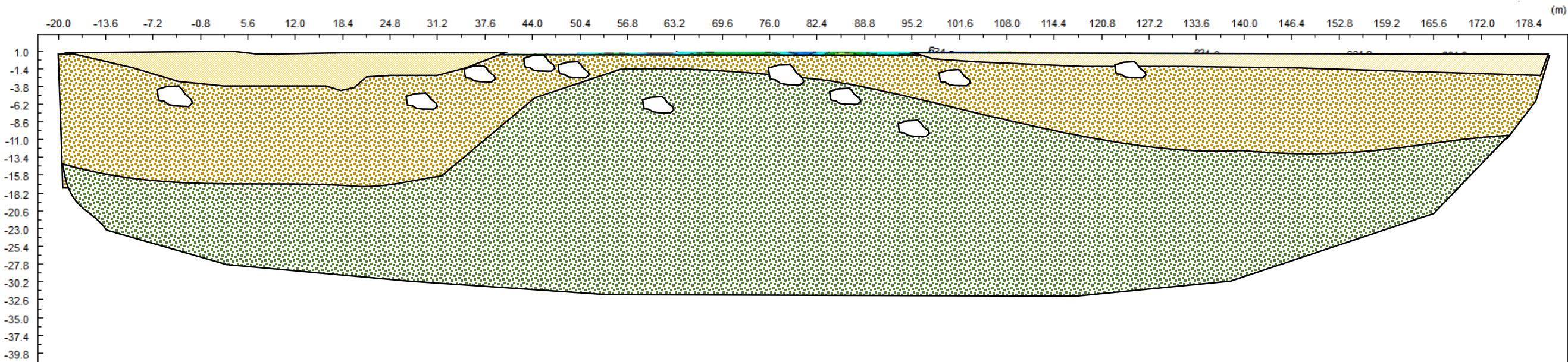


SISMO-SEZIONE LSRF\_T09 – INTERPRETAZIONE GEOLITOLOGICA

LEGENDA

-  Depositi sciolti, non addensati ( $V_p < 650$  m/s)
-  Depositi poco addensati palustri ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
-  Depositi poco/mediamente addensati ( $650$  m/s  $< V_p < 1700$  m/s)
-  Depositi ben addensati ( $1700 < V_p < 2500$  m/s)
-  Probabili trovanti

TAI - LSRF\_T09



### Stendimento LSFR\_T10

quota	coordinate	latitudine	longitudine
872.5 m s.l.m.	Geografiche (WGS 84)	46.420213°	12.359330°

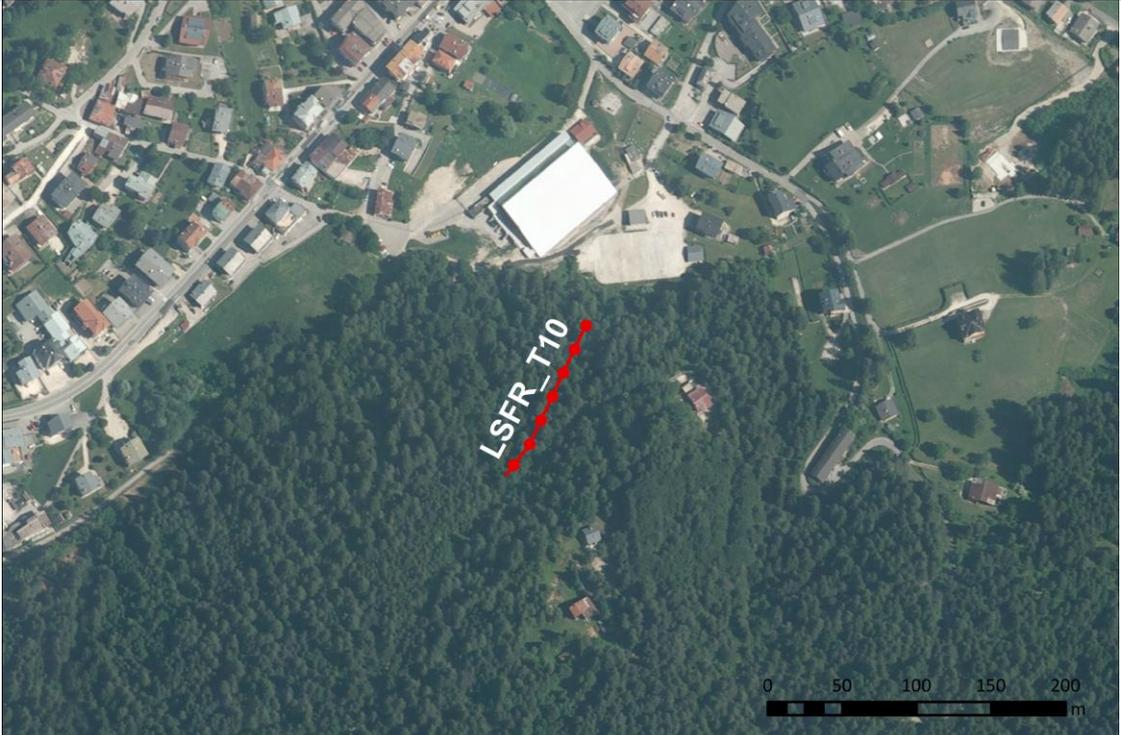






Fig.17-18: Stendimento  
LSFR\_T09



Fig.19-20: Stendimento  
LSFR\_T10





◀ Fig.21: Strumentazione utilizzata



Fig.22: Energizzazione mediante cannone sismico ▶

### **3 MASW**

## Indagine geofisica mediante tecnica sismica MASW

PROVINCIA DI BELLUNO

COMUNE DI PIEVE DI CADORE

# S.S. n. 51 “di Alemagna” VARIANTE DI TAI DI CADORE

Data: agosto 2017



COMMITTENTE

**ANAS S.p.A.**

PROGETTISTA

Redatta da:

**Dott.Geol. David Pomarè Montin**

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
2	UBICAZIONE.....	2
3	INDAGINI.....	3
4	NOTE RELATIVE ALL'ELABORAZIONE DEI DATI .....	5
5	INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE .....	5
6	CONCLUSIONI .....	7

### ALLEGATI

**ALL.1 – UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

**ALL.2 – RAPPORTO DI PROVA SINTETICO**

## 1 PREMESSA

La presente relazione illustra le modalità di esecuzione delle indagini geofisiche condotte nell'ambito degli approfondimenti per la realizzazione della cosiddetta variante di Tai di Cadore, inserita nel programma ANAS "Cortina 2021", e ne commenta brevemente i risultati. La variante prevede la realizzazione di una galleria di lunghezza 820 m circa, con imbocco ovest prossimo al confine comunale tra Pieve di Cadore e Valle di Cadore, e imbocco est coincidente con lo svincolo in loc. Galghena. Presso i due svincoli è prevista la realizzazione altrettante rotonde. Scopo dell'indagine è la classificazione sismica del sottosuolo, in linea con le disposizioni delle NTC 08.

A tale scopo è stata eseguita n.1 prospezione sismica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) a lato della ciclabile, in corrispondenza dello svincolo previsto allo sbocco della galleria in progetto. Per l'elaborazione dell'indagine ci si è riferiti:

- ad un sondaggio geognostico eseguito in corrispondenza dello stendimento;
- ai risultati di una tomografia sismica che ha incrociato lo stendimento sviluppandosi in direzione del tracciato in progetto, elaborata sia in onde P che in onde S.

## 2 UBICAZIONE

Lo stendimento sismico denominato MASW\_T01, è stato realizzato a valle della ciclabile, in un'area piana, erbata.

### Riferimenti geografici del sito

INDAGINE	Coordinate (centro stendimento)	latitudine	longitudine
MASW_T01	Geografiche (WGS 84)	46.419400°	12.352863°



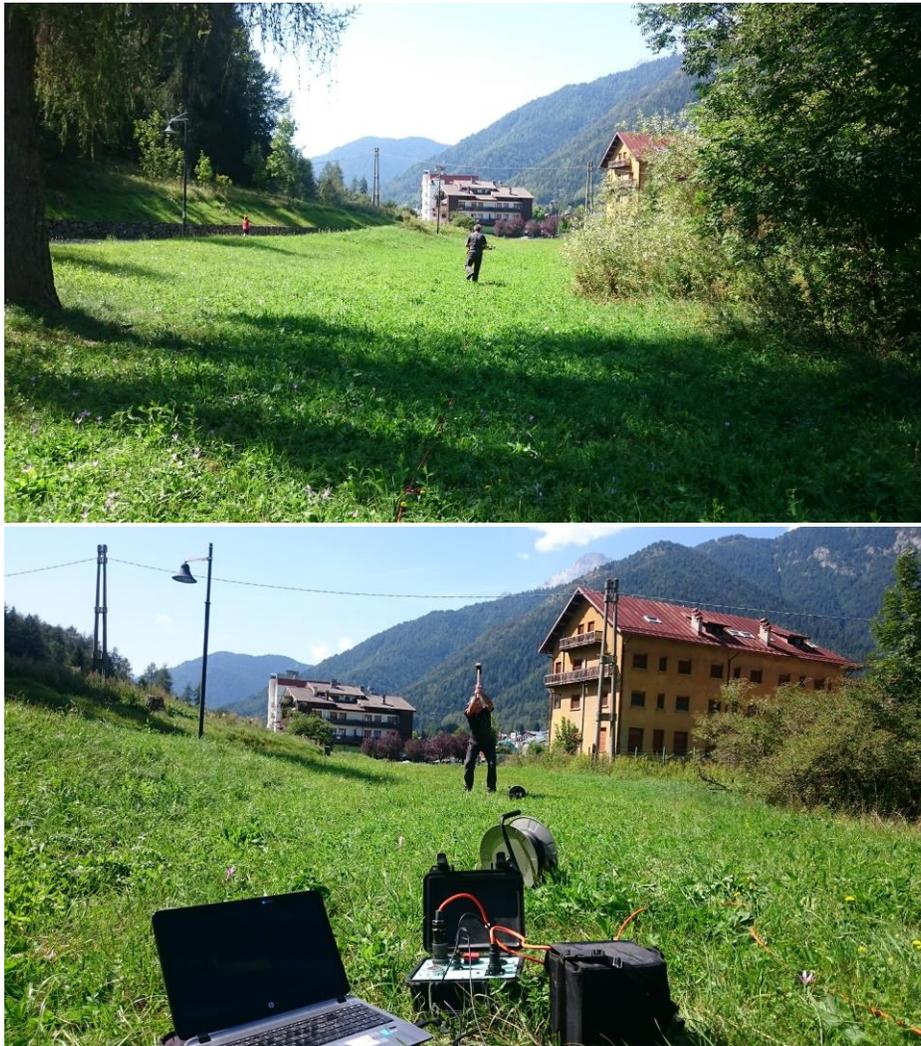


Fig.1 – Prospezione MASW\_T01. Vista da Est.

### 3 INDAGINE

Il giorno 30 agosto 2017 è stata eseguita un'indagine con metodo sismico attivo MASW a supporto del progetto per la realizzazione della cosiddetta variante di Tai di Cadore, allo scopo di parametrizzare il sottosuolo dal punto di vista sismico.

#### ***Principi fondamentali del metodo***

Il metodo MASW si basa sull'analisi della dispersione del segnale. Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali

corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

E' possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times \nu$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

### **Modalità esecutive**

Lo strumento utilizzato per la misura è il sismografo della Pasi srl mod.16S12-U (24 canali di acquisizione digitale con dinamica 16 bit e campionamento segnale ad intervalli di 1240 microsecondi). E' stato eseguito uno stendimento di lunghezza 55.0 m, con distanza intergeofonica di 5.0 m. Sono stati acquisiti i segnali relativi a battute realizzate ad una distanza di 8.0 e 5.0 m rispettivamente dal primo e dall'ultimo geofono (inversione della sorgente rispetto lo stendimento) al fine di confrontare più acquisizioni ed ottenere un dettaglio maggiore. L'inversione della sorgente permette la verifica di eventuali orizzonti inclinati e la validazione dei dati acquisiti. Tali acquisizioni sono state eseguite sia con guadagno "automatico con battuta", sia con lo stesso guadagno (1000) per ogni geofono ricevitore. La durata impostata per ogni acquisizione è di 1024 ms, il periodo di campionamento 250  $\mu$ s.

## 4 NOTE RELATIVE ALL'ELABORAZIONE DEI DATI

L'elaborazione dei acquisiti mediante metodo attivo (energizzazione su piastra) è stata effettuata con il software Easy MASW per il processing della dispersione delle velocità delle onde S generate artificialmente. In fase di elaborazione sono stati utilizzati un range di frequenze da 10 a 60 Hz, ed un range di velocità da 90 a 700 m/sec. Si è provveduto ad ampliare o ridurre i range in frequenza ed in velocità, al fine di analizzare uno spettro "pulito" da dispersioni dei dati in alta e bassa frequenza di origine antropica. La definizione del modello sintetico è stata supportata da un'operazione di picking e da dati diretti ricavati dai sondaggi eseguiti; la successiva inversione si è basata su un numero di iterazioni pari a 1000. Sono stati analizzati la percentuale di errore (molto bassa, pari allo 0.004%) ed il fattore di disadattamento della soluzione (pari a 0.008).

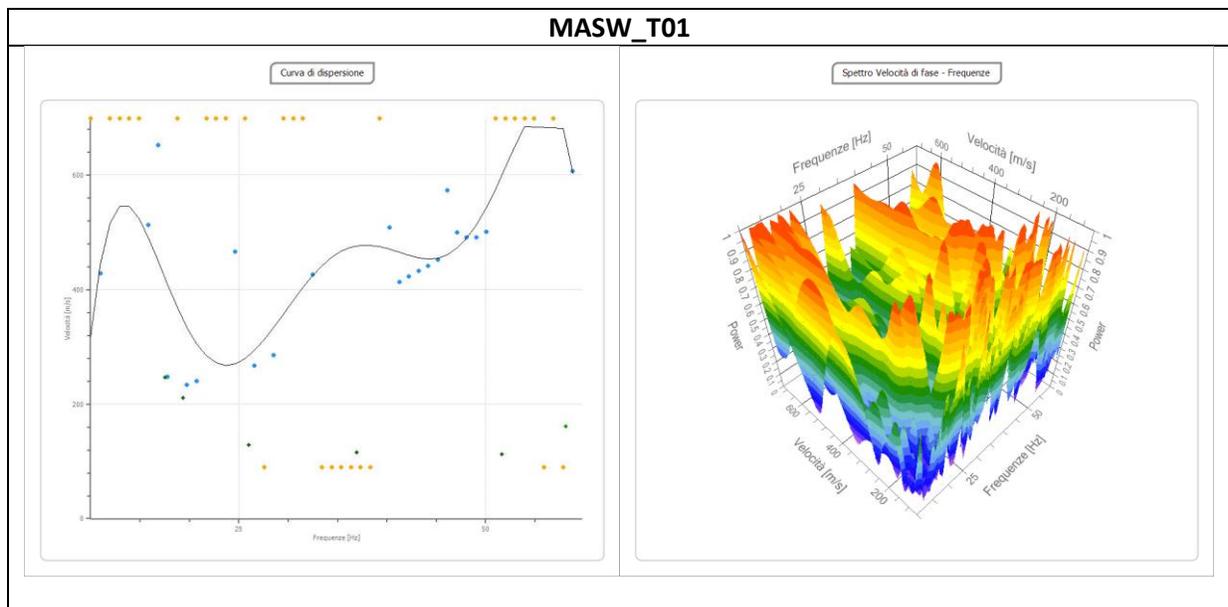


Fig.2 – Curva di dispersione e spettro velocità di fase – frequenza in 3D.

## 5 INTERPRETAZIONE DELLE MISURE ESEGUITE

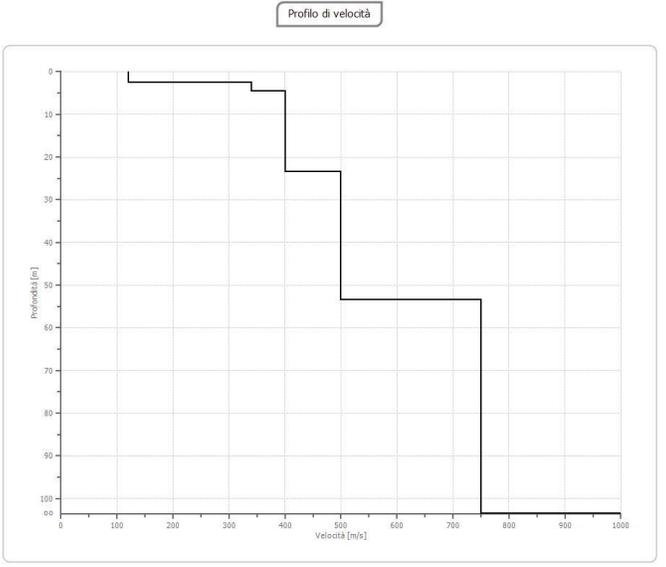
L'indagine evidenzia un'alta dispersione del segnale in superficie, che rende difficoltosa la lettura dello spettro; il primo modo risulta comunque facilmente distinguibile. Tale disturbo è stato attribuito alla presenza di un livello competente, quasi cementato, prossimo al piano campagna, evidenziato sia dalle due prove penetrometriche che dal sondaggio geognostico eseguiti nell'area.

### 5.1 Interpretazione sismica

Sulla base delle indagini svolte in ottemperanza alla normativa in vigore (DM 14/01/2008), i terreni di fondazione possono essere inseriti nella **categoria di sottosuolo C** (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori

superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s).

I risultati sono sintetizzati nella seguente tabella:

Vs30 (m/s) <sup>1</sup>	Categoria Sottosuolo – NTC08	Profondità substrato	Profilo Vs
343.97	C	> 30 m	

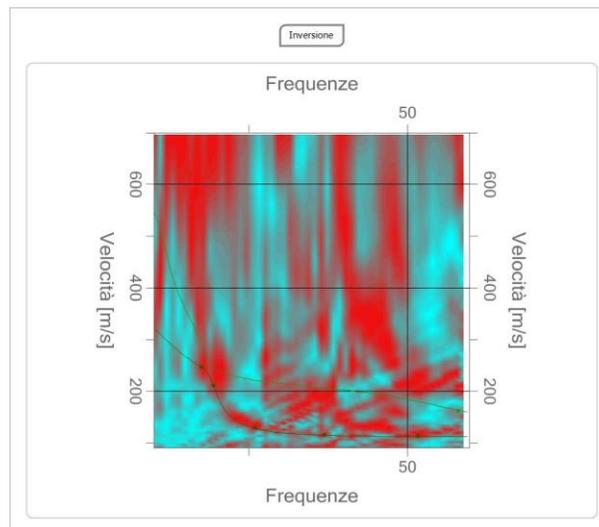


Fig.3 – inversione del modello (MASW) per la modellazione del sottosuolo.

<sup>1</sup> Valore di Vs30 riferita al p.c.

## 6 CONCLUSIONI

Sulla base delle indagini svolte in ottemperanza alla normativa in vigore (DM 14/01/2008), è stato possibile caratterizzare il sito indagato dal punto di vista sismico, classificando i sedimi di fondazione in **categoria di sottosuolo C**. In particolare si evidenzia un graduale aumento delle velocità  $V_s$  con la profondità, e non risultano registrazioni di  $V_s$  superiori a 800 m/s, riferibili al substrato roccioso (bedrock sismico).

Spoltore, agosto 2017

*Dott. Geol. Pomarè Montin David*



ALLEGATO 1 - UBICAZIONE DELLE INDAGINI

scala 1:2000



# ALL.2

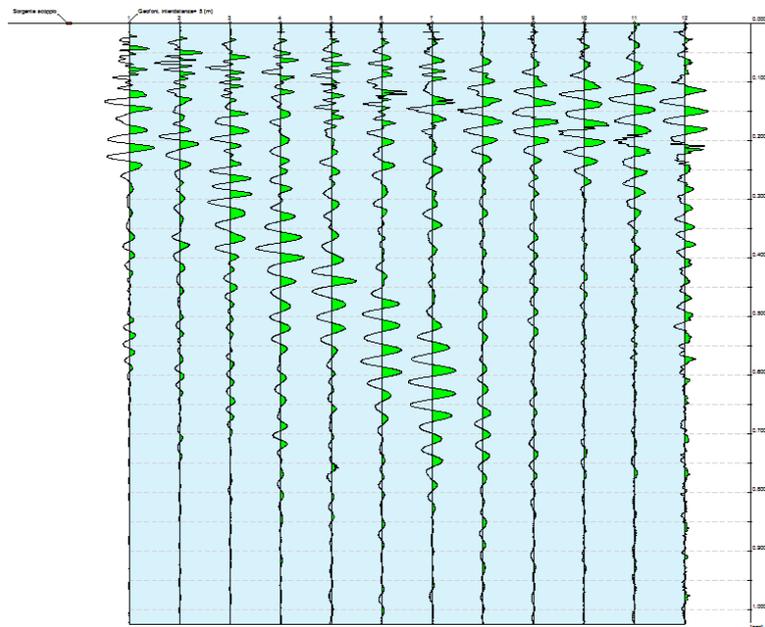
## RAPPORTO DI PROVA SINTETICO

### Indagine geofisica tramite tecnica MASW

#### Tracce

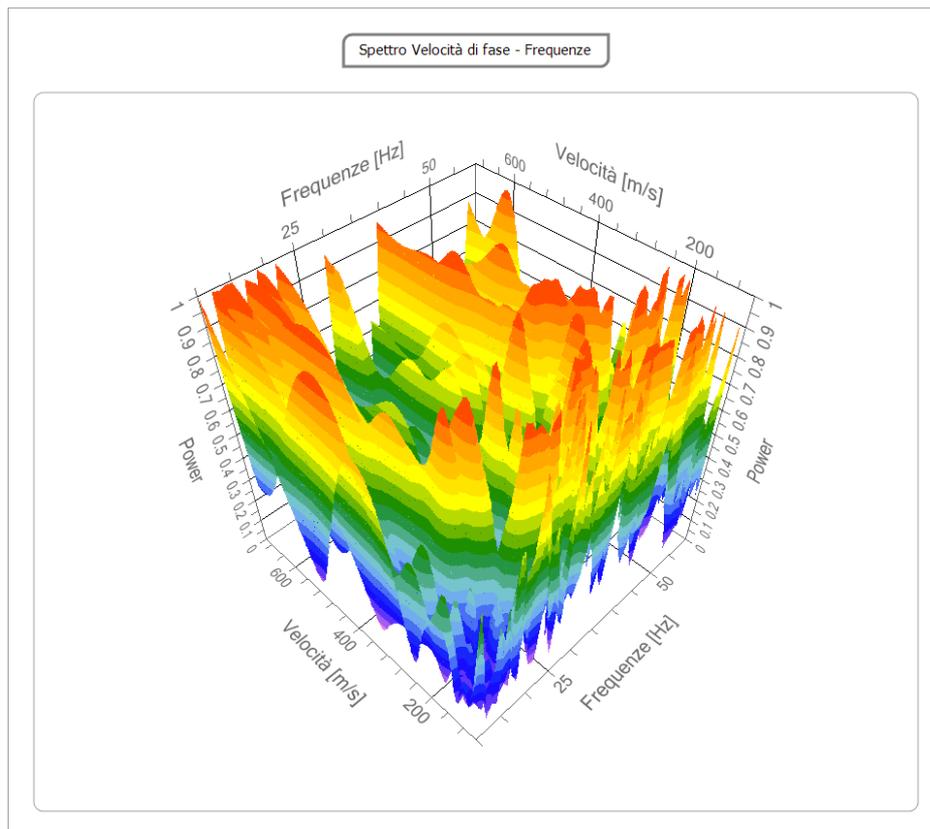
N. tracce	12
Durata acquisizione [msec]	1024.0
Interdistanza geofoni [m]	5.0
Periodo di campionamento [msec]	0.25

Operatore: David Pomarè Montin  
Responsabile: David Pomarè Montin  
Data: 08/09/2017



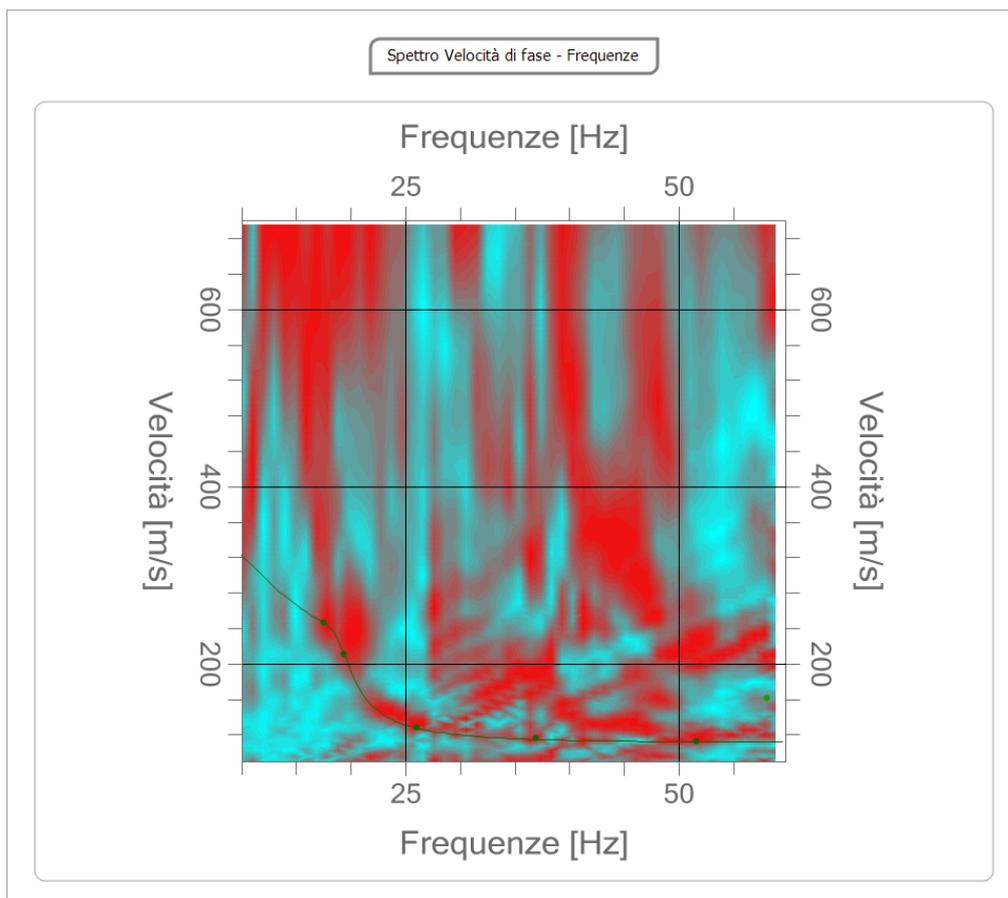
## Analisi spettrale

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	10
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	60
Velocità minima di elaborazione [m/sec]	90
Velocità massima di elaborazione [m/sec]	700
Intervallo velocità [m/sec]	1



### Curva di dispersione

n.	Frequenza [Hz]	Velocità [m/sec]	Modo
1	17.6	246.3	0
2	19.4	210.5	0
3	26.0	128.7	0
4	36.9	115.8	0
5	51.6	112.9	0
6	58.1	161.7	1



## Inversione

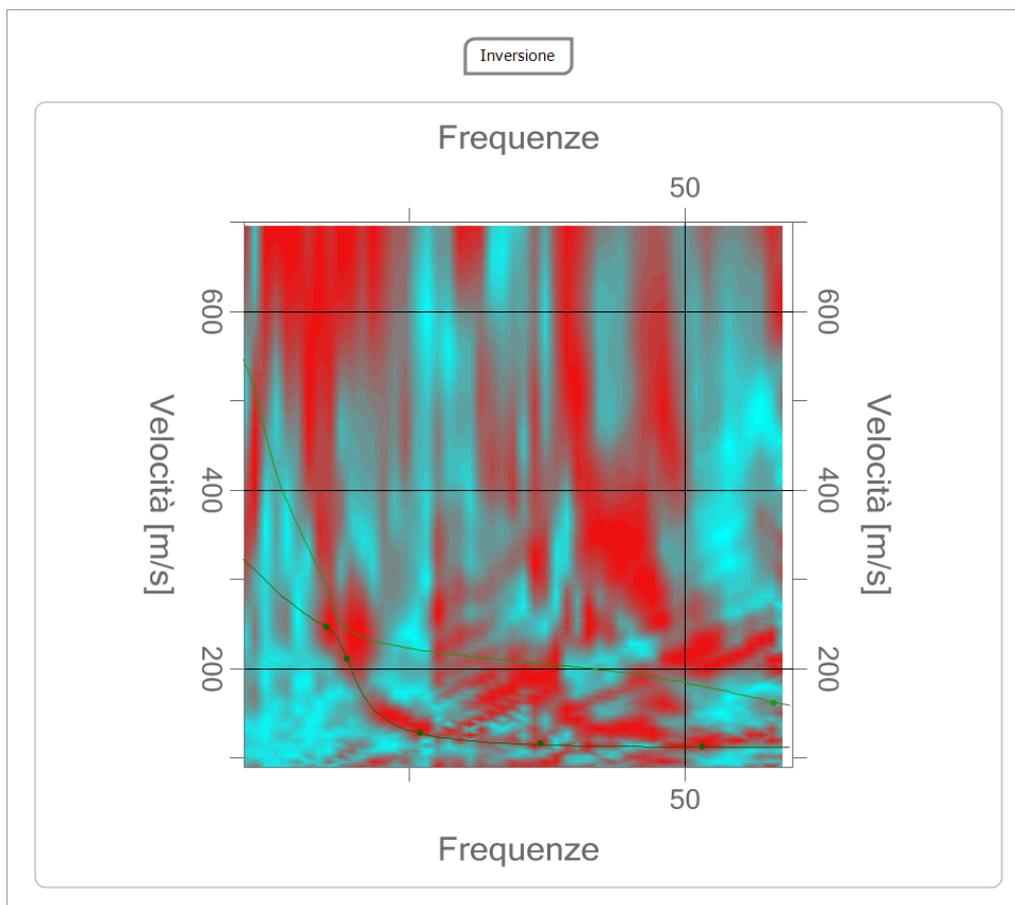
n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1		2.50	2.50	1800.0	0.3	No	224.5	120.0
2		4.50	2.00	1800.0	0.3	No	636.1	340.0
3		23.50	19.00	1900.0	0.3	Si	748.3	400.0
4		53.50	30.00	1960.0	0.3	Si	904.5	500.0
5		103.50	50.00	2000.0	0.3	Si	1356.8	750.0
6		oo	oo	2400.0	0.3	Si	1732.1	1000.0

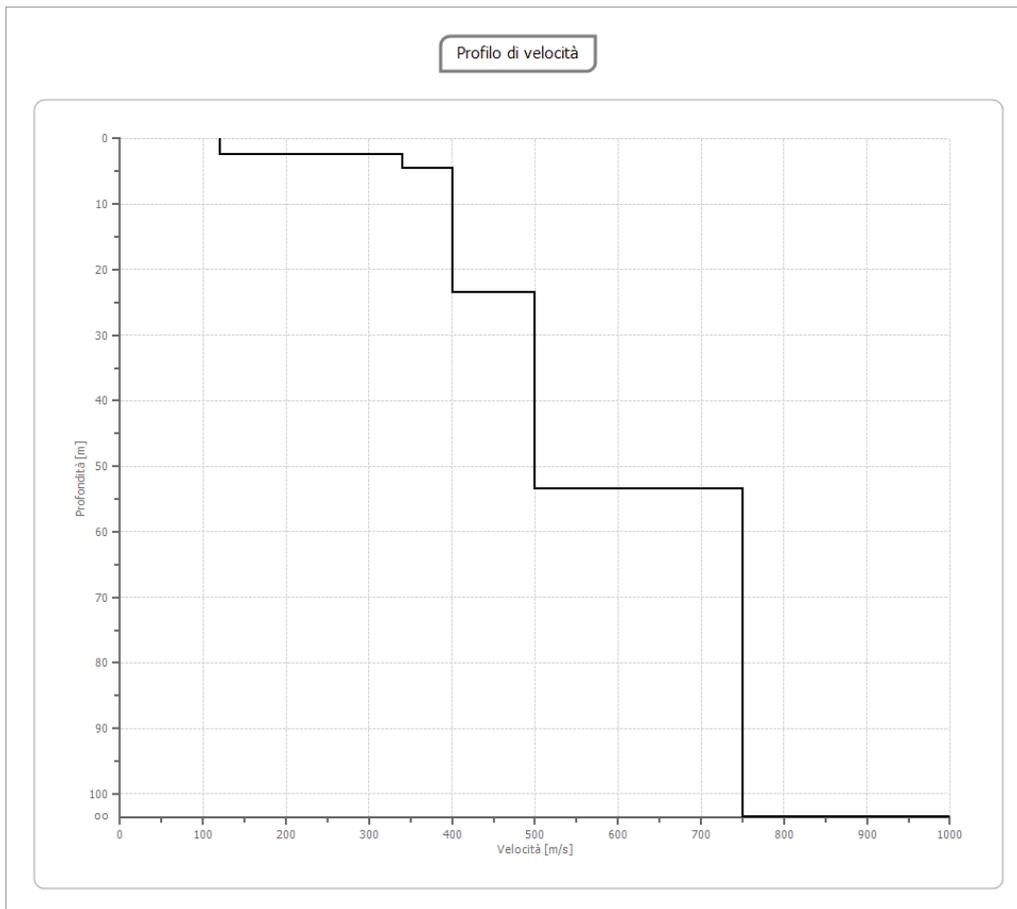
Percentuale di errore

0.004 %

Fattore di disadattamento della soluzione

0.008





## Risultati

<b>Profondità piano di posa</b>	0.00
<b>[m]</b>	
<b>Vs30 [m/sec]</b>	<b>343.97</b>
<b>Categoria del suolo</b>	<b>C</b>

Suolo di tipo C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < NSPT_{30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < cu_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

## 4 TOMOGRAFIA ELETTRICA



**IND.A.G.O. s.n.c.**  
Indagini e Opere Ambientali e Geologiche  
via Balzan, 1 - 45100 Rovigo - tel. 0425-25185  
[www.indago-rovigo.it](http://www.indago-rovigo.it)

## RAPPORTO TECNICO:

**OGGETTO:** MISURE TOMOGRAFICHE ELETTRICHE IN LOCALITA' TAI DI CADORE –  
COMUNE DI PIEVE DI CADORE (BL).

**REGIONE:** VENETO **COMUNE:** PIEVE DI CADORE (BL)



<b>AUTORI:</b>	<b>COMMITTENTE:</b>	<b>DATA:</b>
Dott. Geol. Enrico Farinatti	Dott. Geol. David Pomarè	Agosto 2017

## Sommario

1. PREMESSA.....	3
2. TOMOGRAFIA ELETTRICA .....	3
METODO DELLA RESISTIVITA' .....	3
METODO DELLA POLARIZZAZIONE INDOTTA .....	6
3. Strumentazione utilizzata .....	8
4. Caratteristiche geometriche degli stendimenti .....	8
5. Risultati indagine elettrica .....	9
ALLEGATI .....	10

## 1. PREMESSA

Lo scrivente, su incarico del dott. Geol. David Pomarè, ha eseguito una campagna di misure geoelettriche in località Tai di Cadore, nel comune di Pieve di Cadore (BL).

E' stata eseguita un'indagine tomografica elettrica (si veda l'ubicazione riportata di seguito; la linea rossa indica la posizione della sezione tomografica elettrica - ERT).



Fig. 1: Ubicazione indagine tomografica elettrica

## 2. 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.2).

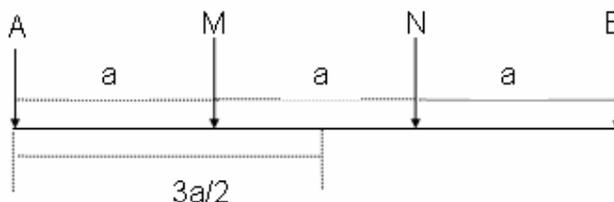


Fig. 2. Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo WENNER, comunemente utilizzato per l'acquisizione di dati di resistività elettrica. AB: elettrodi di corrente; MN: elettrodi di potenziale.

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 interelettrodiche.

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..

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 2, 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. Le geometrie quadripolari corrispondono 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.3, con  $C_1$   $C_2$  elettrodi di corrente e  $p_1$   $p_2$  elettrodi di potenziale.

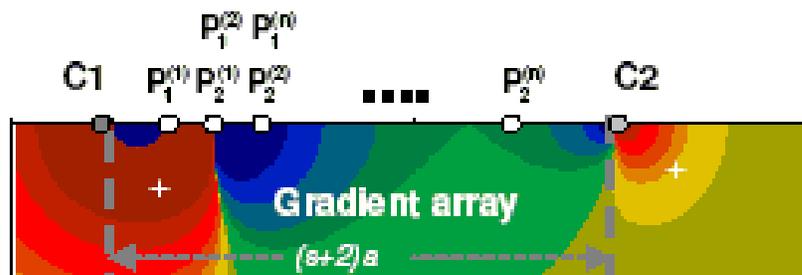


Fig. 3. Schematizzazione del dispositivo quadripolare tipo “Gradient array”, utilizzato per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica

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 elettrodi “tradizionali”, non sono molto praticate, in quanto richiedono una strumentazione particolarmente sofisticata.

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 iso-resistiva. 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.

#### METODO DELLA POLARIZZAZIONE INDOTTA

Il metodo della polarizzazione indotta venne per la prima volta descritto da Schlumberger negli anni '20 ed oggi viene applicato con successo in svariati campi d'indagine: dalle ricerche idriche al monitoraggio di eventuali inquinanti di terreni e acquiferi ad opera di fluidi organici (idrocarburi) e/o sostanze tossiche, a corpi sepolti di natura metallica. Per una valutazione corretta delle indicazioni fornite dall'applicazione di tale metodologia, è necessario conoscere i meccanismi e le modalità di interazione tra terreno e fluido organico.

Dal punto di vista fisico, il fenomeno della polarizzazione indotta comprende un'insieme di processi in regime transitorio, che avvengono nel terreno quando esso è sottoposto ad un campo elettrico, applicato tramite un classico dispositivo quadripolare ABMN (con AB = elettrodi di corrente e MN = elettrodi di potenziale). In sostanza, il terreno viene energizzato con una corrente di intensità costante attraverso gli elettrodi AB per un certo tempo T, e si misura il potenziale di equilibrio tra gli elettrodi MN. Tale potenziale, che si produce per effetto della polarizzazione del terreno, assume un andamento asintotico. Allo stesso modo, la ddp tra MN non cade istantaneamente a zero nel momento in cui si interrompe l'energizzazione, bensì decade in un certo tempo seguendo l'andamento di fig. 4.

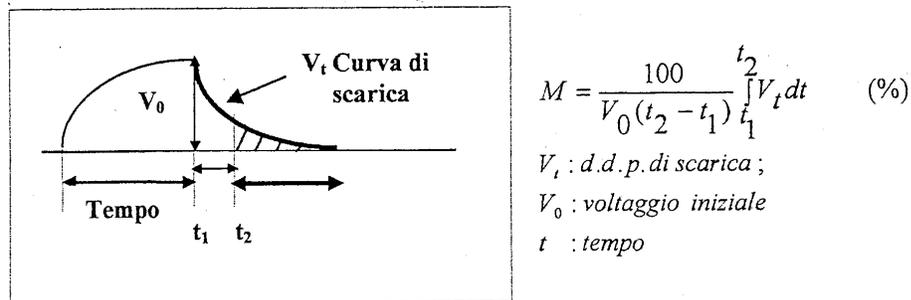


Fig. 4. Esempio di curva di scarica PI

Si può quindi assimilare il comportamento del terreno a quello di una distribuzione di condensatori che si caricano e si scaricano attraverso delle resistenze. Il tempo richiesto per ripristinare le condizioni di equilibrio è funzione del grado di polarizzabilità del terreno.

I principali fattori che influenzano la PI sono:

- la composizione mineralogica,
- la tessitura,
- la percentuale d'acqua (umidità naturale),
- la composizione chimica dell'acqua interstiziale (elettrolita).

In generale, i meccanismi che causano la PI sono poco conosciuti, ma per spiegare tale fenomeno si considerano due tipi di polarizzazione:

1. *Polarizzazione di membrana.*
2. *Polarizzazione di elettrodo.*

La polarizzazione di membrana, detta anche elettrolitica, si realizza quando nel terreno vi sono minerali fibrosi o lamellari, che presentano particelle superficiali cariche negativamente e che attraggono i cationi presenti nella soluzione elettrolitica che pervade i pori, formando un doppio strato elettrico. Le particelle d'argilla tabulari (fillosilicati) sono i minerali in cui meglio avviene questo processo, poiché gli ossigeni del reticolo cristallino, presenti sulla superficie di esfoliazione, a contatto con l'elettrolita attraggono i cationi del fluido formando una "nube" cationica. Questo addensamento di ioni determina una parziale ostruzione dei pori. Nel momento in cui si immette corrente tra gli elettrodi AB, il passaggio è ostacolato, in quanto gli ioni positivi passano attraverso la nube cationica, mentre quelli negativi sono attratti da essa, che funziona da membrana selettiva. Si formano così delle zone a diversa concentrazione ionica, ed è proprio questa diversa mobilità degli ioni che determina la polarizzazione. Al cessare della corrente esterna, le nubi ioniche si neutralizzano per diffusione, mantenendo una corrente transitoria dello stesso segno di quella applicata. Inoltre, la polarizzazione di membrana è influenzata dal

contenuto salino dell'elettrolita, nel senso che quanto è più bassa la sua concentrazione, tanto maggiore sarà l'effetto della polarizzazione.

La polarizzazione di elettrodo, detta anche metallica o elettronica, trae origine dalla presenza di minerali metallici o particelle conduttive disseminate nella matrice, come solfuri e ossidi, che determinano il passaggio da conduzione ionica nell'elettrolita ad elettronica nei minerali. Al passaggio della corrente, gli ioni si addensano sull'interfaccia dell'elemento conduttore ostacolando il flusso stesso di corrente, generando così un doppio strato elettrico, che costituisce l'equivalente di un dipolo elettrico. Si realizza quindi una resistenza addizionale transitoria detta "sovratensione" (overvoltage) o polarizzazione di elettrodo.

Il possibile contributo delle misure di PI per la definizione della geometria del materiale indagato e della presenza di eventuali fluidi risiede quindi nel carattere di polarizzabilità di quasi tutti i metalli (Zn escluso) e di molti ossidi e solfuri metallici.

### 3. 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  $\pm 600$  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 $\Omega$ . 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 ErtLab 2D-3D<sup>®</sup>.

### 4. Caratteristiche geometriche degli stendimenti

Come già anticipato è stato realizzato uno stendimento lineare, con interdistanza tra gli elettrodi di 5 m.

La lunghezza totale dello stendimento è risultata la seguente:

n. profilo	n. elettrodi	lungh. totale (m)	Offset elettrodi
1	48	235	5

La profondità d'indagine raggiunta è di circa 50 m da p.c..

## 5. Risultati indagine elettrica

La sezione di tomografia elettrica con il profilo di resistività è riportata in allegato; essa riproduce il modello di resistività reale del terreno ottenuto dall'inversione dei dati di campagna.

Il profilo presenta un range di resistività compreso tra 35 e 336 Ohm\*m ed una caricabilità (mV/V) compresa tra -193 e 137.

Le variazioni di resistività più significative vengono registrate nei primi 10m di profondità da p.c.. All'interno di questa fascia sono confinati i valori di resistività più alti (sino ad un max di circa 300 Ohmxm nel tratto superficiale di valle).

Al di sotto di questo layer la distribuzione della resistività appare più omogenea, con valori che si assestano attorno ai 100 Ohm\*m, che non sono propri di rocce, ma piuttosto di terreni sciolti.

Osservando il profilo di caricabilità, si possono notare valori più elevati concentrati nella parte finale della sezione. Viene a delinearsi una sorta di "conca" nella parte terminale della linea nella quale si concentrano gli elementi a maggior caricabilità. Si tratta probabilmente di materiali organici depositatisi su una superficie concava.

In allegato 1 si riporta la sezione dei dati di resistività e caricabilità.

Rovigo, Agosto 2017

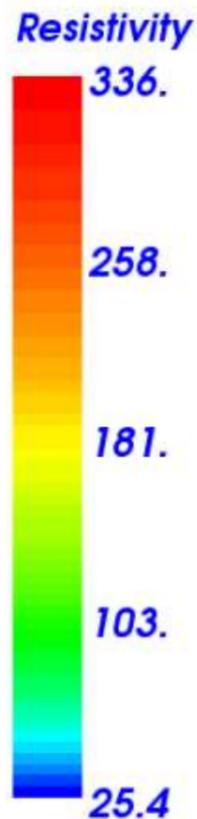
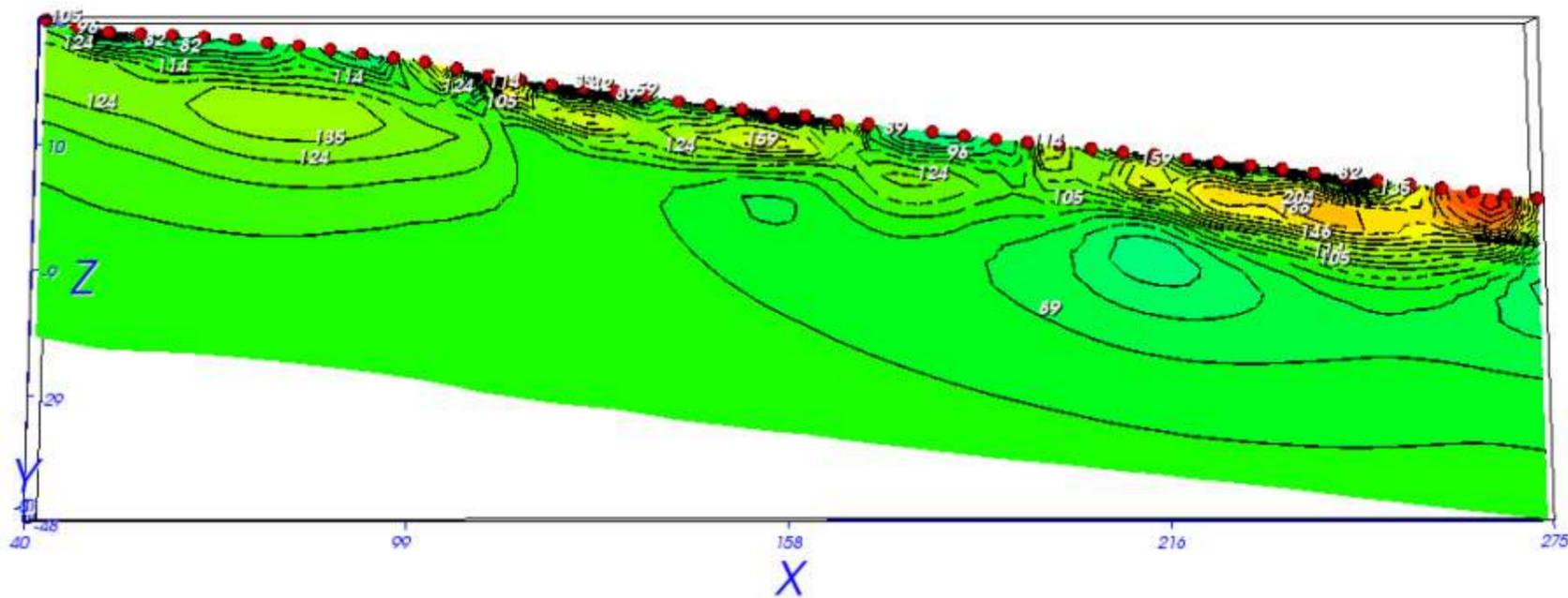
Dott. Geol. Enrico Farinatti



# ALLEGATI

# ALLEGATO 1 - PROFILI TOMOGRAFICI

RESISTIVITA'



POLARIZZAZIONE INDOTTA

