

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



## NODO DI BARI

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

### PROGETTO PRELIMINARE

## NODO DI BARI

### BARI NORD - VARIANTE SANTO SPIRITO PALESE

#### Indagini geofisiche

SCALA:

-

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

IA7X 00 R 69 IG GE0005 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	G.Pulelli	Giugno 2021	A.D'Arcangelo	Giugno 2021	G. DIMAGGIO	Giugno 2021	M. COMEDINI Giugno 2021

ITALFERR  
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE  
Dott. Geol. Massimo Comedini  
Ordine dei Geologi dell' Lazio  
n° 2103

File: IA7X00R69IGGE0005001A

n. Elab.:

## INDICE

1.	INDICAZIONI GENERALI .....	4
2	AZIONE SISMICA .....	13
2.1	<i>Categorie di suolo di fondazione</i> .....	13
3	SISMICA TOMOGRAFICA.....	14
3.1	MODALITÀ OPERATIVE.....	14
3.1.2.	<i>Sorgente di energia</i> .....	15
3.1.3.	<i>Apparato di ricezione</i> .....	15
3.1.4.	<i>Operazioni di campagna</i> .....	16
3.1.5.	<i>Acquisizione dati</i> .....	16
3.2.	ELABORAZIONE DATI.....	18
3.2.1.	<i>Elaborazione sismogrammi (preprocessing)</i> .....	18
3.2.2.	<i>Processing tomografico in velocità</i> .....	19
3.3.	MODALITÀ DI LETTURA ED INTERPRETAZIONE DEI DATI SISMICI .....	20
3.3.1.	TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE .....	20
4.	PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE.....	21
4.1.	MODALITÀ OPERATIVE .....	21
4.2.	ELABORAZIONE DATI.....	22
4.4.	MODALITÀ DI LETTURA ED INTERPRETAZIONE DEI DATI SISMICI .....	24
5.	INDAGINI GEORADAR .....	26
6.	INDAGINI MASW 2D .....	28
7	PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE .....	33
7.1.	MODALITÀ OPERATIVE .....	33
7.1.1.	<i>Sorgente di energia</i> .....	33
7.1.2.	<i>Apparato di ricezione</i> .....	34
7.1.3.	<i>Operazioni di campagna</i> .....	34
7.2.	ELABORAZIONE DATI.....	39
8	INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI.....	41

8.1.	<i>Generalità</i>	41
8.2.	<i>Principi sulla elasticità</i>	41
8.3.	<i>Parametri elastici</i>	42
9.	PROSPEZIONE ELETTRICA TOMOGRAFICA	44
9.1.	<i>Generalità</i>	44
9.2.	<i>Operazioni di campagna</i>	47
9.2.1	<i>Sorgente di energia ed apparati di ricezione</i>	47
9.2.2	<i>Acquisizione dati</i>	47
9.3.	<i>Elaborazione dati</i>	50
9.4.	<i>Comportamento della resistività nei materiali litologici</i>	51
10	CONCLUSIONI	52

# ITALFERR S.P.A.

## U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE

### Esecuzione di prospezioni geofisiche per il Progetto di Fattibilità Tecnico Economica di 2^Fase Bari Nord Santo Spirito-Palese

#### PROGETTO DI FATTIBILITA'

#### COMPLETAMENTO NODO DI BARI CODICI INTERVENTO

#### INDAGINI GEOFISICHE RELAZIONE TECNICA

### 1. INDICAZIONI GENERALI

Su incarico di ITALFERR SPA sono state eseguite indagini geofisiche per la caratterizzazione dei terreni su cui si sviluppa il progetto di fattibilità Tecnico Economico di 2^ Fase Bari Nord Santo Spirito-Palese.

In modo particolare nella campagna di indagini sono state applicate le procedure geofisiche più adeguate per la caratterizzazione geofisica dei terreni e la ricerca di eventuali cavità sotterranee.

A tale scopo sono state realizzate le seguenti indagini geofisiche:

- n° 12 Sezioni Geoelettrica tomografica;
- n° 2 Sezioni Rifrazione tomografiche ad onde di compressione e taglio;
- n° 2 Sezioni Riflessione ad onde di taglio;
- n° 2 Sezioni Georadar;
- n° 2 Sezioni MASW 2D
- n° 3 Prove in foro "Down Hole";

Le **sezioni geoelettriche tomografiche** realizzate sono le seguenti:

1) Sezione elettrica ERT1_GA01	96 stazioni	lunghezza della sezione 95.0 m.
2) Sezione elettrica ERT2_TR04	48 stazioni	lunghezza della sezione 117.5 m.
3) Sezione elettrica TE01_GA01	72 stazioni	lunghezza della sezione 213.0 m.
4) Sezione elettrica TE02_GA01	65 stazioni	lunghezza della sezione 192.0 m.
5) Sezione elettrica TE03_TR04	96 stazioni	lunghezza della sezione 285.0 m.
6) Sezione elettrica TE04_TR04	72 stazioni	lunghezza della sezione 213.0 m.
7) Sezione elettrica TE05_TR04	72 stazioni	lunghezza della sezione 213.0 m.
8) Sezione elettrica TE06_GA02	48 stazioni	lunghezza della sezione 141.0 m.
9) Sezione elettrica TE07_TR05	72 stazioni	lunghezza della sezione 213.0 m.
10) Sezione elettrica TE08_GA04	68 stazioni	lunghezza della sezione 201.0 m.
11) Sezione elettrica TE09_GA05	144 stazioni	lunghezza della sezione 429.0 m.
12) Sezione elettrica TE10_GA05	72 stazioni	lunghezza della sezione 213.0 m.

La lunghezza totale delle sezioni elettriche tomografiche eseguite è di **2525.5 m**

Nella sezione ERT1\_GA01 è stata utilizzata una spaziatura interelettrodica di 1 m, nella sezione ERT2\_TR04 una spaziatura interelettrodica di 2.5 m e per le restanti 10 sezioni (TE01÷TE10) una spaziatura interelettrodica di 3 m. Tutte le sezioni sono state acquisite con sequenza Dipolo-Dipolo che risulta più appropriata vista la finalità dell'indagine elettrotomografica mirata alla ricerca di cavità sotterranee.

Le **sezioni a sismica a rifrazione tomografiche** realizzate sono le seguenti:

1) Sezione rifrazione L1_GA01	96 stazioni	lunghezza della sezione 95.0 m.
2) Sezione rifrazione L2_TR04	48 stazioni	lunghezza della sezione 117.5 m.

La lunghezza totale delle 2 sezioni sismiche eseguite è di **212,5 m**, la spaziatura intergeofonica è di 1 m per L1\_GA01 e 2.5 m per L2\_TR04 con shot per entrambe le sezioni ogni 3-4 stazioni. L'acquisizione è avvenuta sia ad onde di compressione (P) che di taglio (S) allo scopo di fornire una completa parametrizzazione elastica dei materiali nonché definire le principali geometrie dei sismostrati presenti in sito e individuare eventuali cavità nel sottosuolo.

La posizione planimetrica delle sezioni a rifrazione tomografica è riportata in dettaglio negli allegati 2b e 4b unitamente alle altre indagini eseguite nell'area.

Le **sezioni sismiche a riflessione ad onde di taglio** sono sovrapposte ma non coincidenti con gli stendimenti di sismica a rifrazione (planimetria All.2b e All.4b). Le sezioni a sismica a riflessione realizzate sono le seguenti:

1) Sezione riflessione L1_GA01	72 stazioni	lunghezza della sezione 35.5 m.
2) Sezione riflessione L2_TR04	72 stazioni	lunghezza della sezione 35.5 m.

Il totale della lunghezza delle 2 sezioni sismiche a riflessione ad onde di taglio (S) eseguite è di **71.0 m** con spaziatura intergeofonica di 0,5 m e shot su tutte le stazioni. La riflessione ad onde di taglio è stata realizzata per l'individuazione di eventuali cavità nel sottosuolo.

Le **sezioni georadar** sono sovrapposte, ma non coincidenti con gli stendimenti sismici (Planimetria All.2b e All.4b). Le sezioni georadar realizzate sono le seguenti:

1) Sezione riflessione L1_GA01	lunghezza della sezione 23.0 m.
2) Sezione riflessione L2_TR04	lunghezza della sezione 26.0 m.

Il totale delle 2 sezioni georadar eseguite è di **49.0 m** acquisite con antenna da 100 Mega Hertz (MHz) in modo da avere una penetrazione nel suolo fino a 5-6 metri di profondità. Il georadar è stato anch'esso realizzato per l'individuazione di eventuali cavità sotterranee.

Le **sezioni MASW 2D** sono state realizzate sovrapposte, ma non coincidenti con gli stendimenti sismici (planimetria All.2b e All.4b). Le sezioni MASW 2D realizzate sono le seguenti:

- 1) Sezione riflessione **MASW1\_GA01** realizzati 21 masw.
- 2) Sezione riflessione **MASW2\_TR04** realizzati 21 masw.

Il totale delle 2 sezioni MASW acquisite è di **n°42 MASW**, di cui 21 MASW per la sezione MASW1\_GA01, con spaziatura intergeofonica di 1.0 m e 21 MASW per la sezione MASW2\_TR04 con intervallo geofonico di 2.5 m. I MASW 2D sono stati realizzati per la valutazione del parametro delle velocità delle onde di taglio (Vseq) e per l'individuazione di eventuali cavità sotterranee.

Le n°3 prospezioni in foro **Down Hole** realizzate con acquisizione dal basso verso l'alto sono:

- 1) Down Hole TR04 Numero misure 31 profondità 30.0 m.
- 2) Down Hole GA03 Numero misure 32 profondità 31.0 m.
- 3) Down Hole GA05 Numero misure 32 profondità 31.0 m.

La lunghezza totale delle 3 indagini in foro down hole eseguite è di **92 m** con acquisizione ad ogni metro di profondità sia ad onde di compressione (P) che di taglio (S).

Tutte le indagini realizzate sono state oggetto di rilievo mediante GNSS (GPS) differenziale riportate sulla cartografia a disposizione.

In coda alla relazione sono riportati gli Allegati grafici relativi alle ubicazioni planimetriche di tutte le indagini eseguite e le risultanze delle stesse.

### Immagini del sito e dell'attività di acquisizione dati



*Particolare indagini elettrica tomografica TR04\_ERT4 e Down Hole TR04*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE1*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE3*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE4*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE5*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE8*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE9*



*Particolare indagini Georadar linea GA01\_RADAR1*



*Particolare indagini Riflessione onde di taglio TR04\_L2 con energizzatore polarizzato "Elvis III"*



*Particolare indagini in foro Down Hole GA03\_*



*Particolare indagini in foro Down Hole GA05*



*Particolare indagini elettrica tomografica TE6 e rilievo topografico con GPS Leica.*

## 2 AZIONE SISMICA

### 2.1 Categorie di suolo di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ .

I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2. I valori di  $V_s$  sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,H} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\ll 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti.

Ai fini della definizione della azione sismica di progetto si definiscono le seguenti categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

A - Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

C - Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

D - Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.

E - Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

### **3 SISMICA TOMOGRAFICA**

#### **3.1 Modalità operative**

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) e vari punti di ricezione disposti sempre sulla superficie topografica (geofoni).

L'analisi della velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali ( $V_p$ ) nel sottosuolo, ottenuta conoscendo la distanza shot-ricevitore ed il relativo tempo di arrivo dell'impulso sismico (velocità=spazio/tempo), consente di rilevare, in sintesi, le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali poiché i valori di  $V_p$  sono proporzionali al grado di compattezza dei mezzi percorsi.

L'elaborazione dei dati e le relative rappresentazioni cartografiche sono state effettuate, secondo le disposizioni della Committenza, tramite tecnica analitica tomografica.

L'analisi tomografica, nella quale cioè il sottosuolo della sezione sismica viene suddiviso in minime celle analitiche, ha consentito rispetto ad analisi standard per rifrattori (ad esempio G.R.M., Generalized Reciprocal Method -Palmer 1980-) un'elaborazione più di dettaglio in termini di velocità particellari dell'intero ammasso, permettendo di distinguere mediante rappresentazioni a countour line di isovelocità anche intorni minimi con caratteristiche differenziate per variazioni di consistenza, grado di alterazione, petrografia, granulometria o addensamento.

Quindi, le prospezioni geosismiche a rifrazione, specialmente quelle con tecnica tomografica, mediante la delineazione particolareggiata di aree di discontinuità fisica possono validamente contribuire alla definizione dello stato di resistenza del materiale, ad ampie correlazioni stratigrafico-geomeccaniche ed a significative ricostruzioni geomorfologiche.

Riguardo inoltre alla correlazione con i contatti litostratigrafici individuati nei sondaggi geomeccanici, nel caso questi siano presenti, l'identificazione dei livelli o settori rilevati dalla prospezione geosismica con tecnica tomografica dipende dal grado di effettiva omogeneità dello spessore litostratigrafico.

Cioè molto spesso interferiscono, con effetti opposti, fenomeni di cementazione o di disaddensamento al tetto e/o al letto dello strato geologico, i quali causano rispettivamente un innalzamento e un abbassamento dei valori particellari di velocità sismica per cui non necessariamente devono coincidere livelli di discontinuità fisica e semplici delimitazioni geologiche.

Anzi la prospezione geosismica a rifrazione, specialmente quella con tecnica tomografica grazie al suo estremo dettaglio analitico, può mettere in luce importanti effetti di anisotropia laterale anche entro uno stesso livello litostratigrafico indicati da significative variazioni verticolaterali dei valori di velocità di propagazione delle onde elastiche che evidenziano stati particolari di degradazione non sempre individuabili direttamente dalle analisi litologiche e geotecniche relative ai limitati prelievi nei punti di perforazione.

Per l'insieme delle osservazioni sopra esposte, l'elaborazione dei diversi risultati ottenuti mediante un accurato rilievo di sismica a rifrazione, può rispondere validamente ad esigenze di sintesi analitica e geognostica secondo convenienti criteri di praticità.

Sono stati utilizzati geofoni da 40 Hz con asse strumentale verticale per ricezione onde P di compressione posizionati sul terreno ad intervalli regolari; tutte le stazioni riceventi erano collegate tra loro da cavo elettrico e ai sismografi utilizzati mediante cavi di rete.

Inoltre è stato usato un geofono (geofono del time break o hammer switch) applicato nelle estreme vicinanze dell'energizzazione, il quale ha costituito il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione; tale segnale viene trasmesso tramite impulsi radio o altro cavo elettrico (cavetto del time break) al sismografo.

Eseguito il posizionamento delle stazioni riceventi in superficie, collegati i geofoni sul terreno tramite morsetti bipolari al cavo elettrico e quest'ultimo al sismografo, verificati i segnali (via radio o cavetto) tra apparato di energizzazione e di ricezione, sono stati realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alla prospezione sismica in modo tale che dopo ogni energizzazione (o somma di energizzazioni) su ciascun punto prestabilito, venisse acquisito e registrato il segnale per la successiva elaborazione.



*Geofoni*

Gli impulsi sismici ricevuti dai sensori posizionati sulla superficie topografica sono stati acquisiti utilizzando apparecchiature elettroniche EG&G Geometrics Geode da 24 canali collegate in serie in modo che, avendo a disposizione un numero sufficiente di canali attivi per tutti i geofoni collegati, si può procedere con gli impatti lungo l'allineamento sismico senza dover effettuare altri collegamenti e registrazioni parziali durante la fase di acquisizione dati e quindi con notevole guadagno in tempi esecutivi di campagna.



*sismografi*

### 3.1.2. Sorgente di energia

Per la generazione delle onde sismiche di compressione e taglio è stato utilizzato un sistema "leggero", rappresentato da un maglio da 10 Kg, strumentato con sensori accelerometrici, che impatta su una piastra in metallo per le onde di compressione e su una trave, premuta sul terreno, per generare onde di taglio con polarizzazione Sh oppure con shot inclinato per la generazione anche di onde Sv.

### 3.1.3. Apparato di ricezione

Sono stati utilizzati geofoni da 40 Hz con asse strumentale verticale per ricezione onde P e da 14 Hz con asse strumentale orizzontale per la ricezione delle onde S, posizionati sul terreno ad intervalli variabili in funzione del dettaglio richiesto collegati tra loro da cavo elettrico e tramite questo al sistema di registrazione.

Inoltre è stato usato un geofono (geofono del time break o hammer switch) applicato nelle estreme vicinanze dell'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione; tale segnale viene trasmesso tramite impulsi radio al sismografo.

### 3.1.4. Operazioni di campagna

Le operazioni di campagna per consentire l'elaborazione tomografica più di dettaglio sono analoghe a quelle di sismica standard con elaborazione per rifrattori anche se, per i rilievi di sismica tomografica, il numero di registrazioni che vengono realizzate è assai superiore (anche più del doppio) per consentire di avere a disposizione una quantità di dati tale da coprire con la giusta geometria dei raggi e in maniera omogenea l'intera sezione sismica in tutti i settori e fino alle profondità adeguate senza lasciare tratti scoperti o disomogenei.

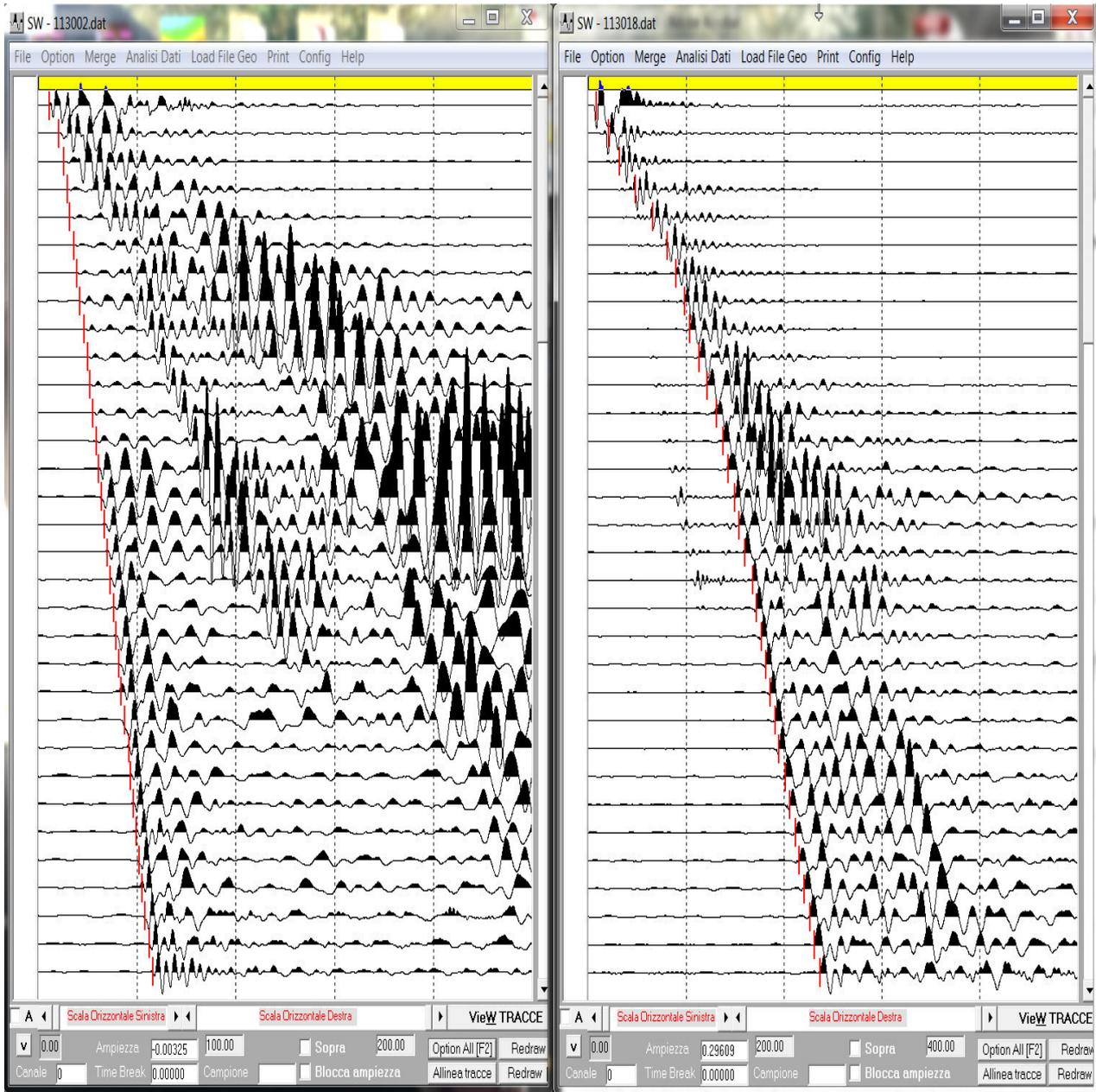
Eseguito il posizionamento dei geofoni sul terreno, collegati questi tramite morsetti bipolari al cavo elettrico e quest'ultimo al sistema di registrazione, verificati i segnali via radio tra apparato di energizzazione e di ricezione, sono stati realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alla prospezione sismica a rifrazione in modo tale che dopo ogni energizzazione (o somma di energizzazioni) su ciascun punto d'impatto prestabilito, si fosse acquisito e registrato il segnale sull'hard disk del p.c. collegato al sismografo per la successiva elaborazione da effettuarsi in sede.

### 3.1.5. Acquisizione dati

Gli impulsi sismici ricevuti dai geofoni posizionati sulla superficie topografica sono stati acquisiti utilizzando vari sismografi EG&G Geometrics Geode a 24 canali di registrazione simultanea in modo che, avendo a disposizione un numero sufficiente di canali attivi per tutti i geofoni collegati, si procede con gli impatti lungo l'allineamento sismico senza dover effettuare altri collegamenti e registrazioni parziali durante la fase di acquisizione dati e quindi con notevole guadagno in tempi esecutivi di campagna.

I dati acquisiti, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, vengono registrati nel supporto magnetico (computer) al quale sono collegati in serie i Geodi utilizzati.



*Esempio di records acquisiti L2 con shot sul geofono 1:  
onde di compressione P record time 0. 500 sec (a sinistra)  
ed onde di taglio disaccoppiate Sh record time 1 sec (a destra).*

## 3.2. ELABORAZIONE DATI

### 3.2.1. Elaborazione sismogrammi (preprocessing)

La prima operazione che è stata eseguita in sede, una volta terminata la fase di acquisizione dati in campagna, è stata quella di tradurre i file di dati.

Questa fase di preprocessing permette di convertire il formato con cui i dati sismici sono registrati dal sismografo EG&G GEOMETRICS GEODE in quello del programma elaborativo (**SeisView**<sup>®</sup>).

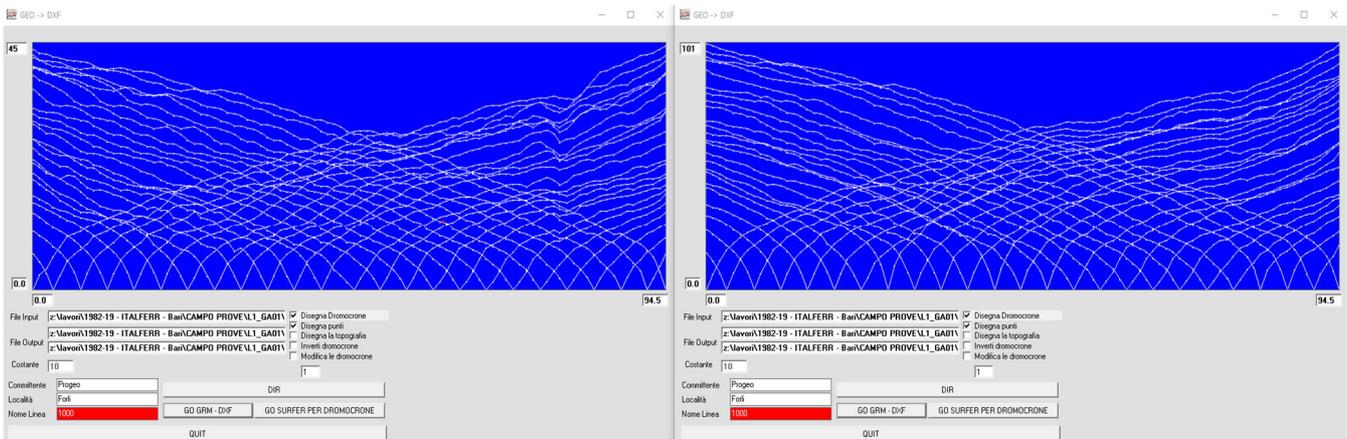
Di seguito viene eseguito il primo screening col programma Seisview per la ricerca su ciascuna traccia di ogni sismogramma del primo arrivo (F.B.P. - first break peak) dell'onda di compressione (P),.

Di ogni file di dati acquisito in campagna viene creato un nuovo file ottimizzato con i tempi di arrivo (in millisec) degli F.B.P.

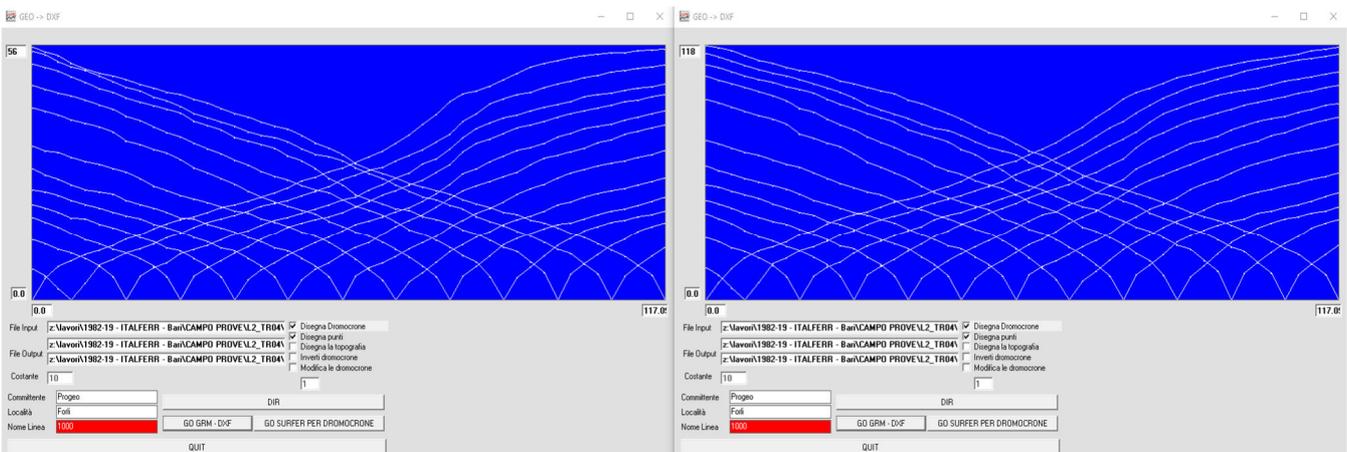
Tali dati vengono graficizzati per ottenere la rappresentazione delle Diagrafie Tempi-Distanze (Dromocrone) della sezione sismica sui quali effettuare alcune analisi preliminari ma poi passati nel programma **S.R.A.**<sup>®</sup> (Seismic Refraction Analysis sviluppato dalla Progeo) per l'elaborazione tomografica.

Alle figure successive sono riportate le dromocrone delle varie sezioni acquisite sia in onde di compressione che di taglio.

Questo sono i dati che vengono poi passati al programma di tomografia per effettuare l'inversione ed ottenere i valori in velocità di compressione e taglio.



*Set di dati utilizzati per il processing tomografico della sezione L1*



*Set di dati utilizzati per il processing tomografico della sezione L2*

### 3.2.2. Processing tomografico in velocità

L'elaborazione delle sezioni mediante analisi tomografica viene effettuata sia per avere un maggior dettaglio in termini di definizione della consistenza dell'ammasso sia per raggiungere maggiori profondità d'investigazione sopperendo quindi alla comune mancanza di rifrattori significativi procedendo in profondità specialmente in seguito alla presenza di materiale non sufficientemente differenziato nei termini dei parametri elastici.

#### **Definizione della geometria della ricerca**

La prima procedura di elaborazione tomografica consiste nella ricerca della geometria di percorso dei raggi sismici da ogni punto di energizzazione a ciascun geofono collegato che ha registrato l'impulso proveniente da quello stesso punto.

Tale operazione preliminare viene effettuata mediante tecniche di Ray Tracing Curvilineo.

#### **Ray tracing e definizione dei parametri di calcolo**

Il file di dati in Excel di ciascuna sezione sismica precedentemente ottenuto, è stato per questo inserito nel programma di calcolo **S.R.A.**<sup>®</sup> (Seismic Refraction Analysis, programma originale sviluppato dalla Progeo che utilizza la piattaforma di Windows) il quale traccia, sulla base di una prima modellazione in velocità del sottosuolo, i vari raggi sismici che coprono da un estremo all'altro dello stendimento sismico l'intera area investigata al di sotto della superficie topografica.

L'elaborazione tomografica è ottenuta utilizzando celle di analisi di larghezza coerente con la geometria d'indagine ed approssimativamente con larghezza pari alla metà della spaziatura dei sensori ed altezza pari ad un quarto di quest'ultima.

#### **Analisi delle risultanze delle velocità**

Il passo successivo è stato l'applicazione sempre con lo stesso programma **S.R.A.**<sup>®</sup> di procedure tipo **S.I.R.T.** (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) le quali forniscono valori di velocità sismica per partizioni unitarie (celle di analisi di dimensione metrica), col quale l'operatore ha cercato, con successive iterazioni dalla prima modellazione del sottosuolo, di far convergere (dal punto di vista statistico fino a quando gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati sono minimi rispetto a quelli definiti in input) i dati modellati con quelli reali e corrispondenti ai tempi ottenuti dalle dromocrone originali.

In pratica le successive approssimazioni calcolate dall'elaboratore coi dati sempre più affinati e inseriti dall'operatore terminano quando le dromocrone, relative a quella data distribuzione di velocità particellari, sono coincidenti e con scarto minimo (mediamente inferiore a 0.5%) con quelle reali ottenute dalle letture degli F.B.P. sui sismogrammi.

Inoltre con tale tecnologia elaborativa si sopperisce alla mancanza di rifrattori significativi e alla presenza, assai comune col procedere in profondità, di materiale non sufficientemente differenziato nei termini fisici dei parametri elastici, per cui le tecniche tradizionali di sismica a rifrazione non riescono a discriminare il grado di consistenza, alterazione o disomogeneità dell'ammasso.

L'elaborazione sismica tomografica è stata ottenuta utilizzando celle di analisi di larghezza coerente con la geometria d'indagine ed approssimativamente con larghezza pari alla metà della spaziatura ed altezza pari ad un quarto di questa.

La grande quantità di dati così ottenuti dall'elaborazione permette di valutare, con elevato dettaglio, quali sono le caratteristiche dei materiali dell'ammasso, di localizzare eventuali anomalie ed avere una immagine coerente alla realtà (ricordiamo che la sezione ottenuta è pur sempre un modello matematico magari anche molto realistico ma pur sempre un modello).

### 3.3. MODALITA' DI LETTURA ED INTERPRETAZIONE DEI DATI SISMICI

In sintesi vengono fornite le chiavi di lettura per l'interpretazione dei dati raccolti.

Per le specificità tecniche di ogni tipologia di prospezione si rimanda ai § 6.0 - Sismica tomografica.

#### 3.3.1. Tomografia sismica a rifrazione

La tecnica sismica a rifrazione, in questo caso con processing tomografico, opera in conformità con la legge di Snell applicata all'ottica cioè i fronti d'onda o in maniera semplificata le traiettorie dell'irradiamento sismico sono soggette a percorrenze le cui geometrie sono funzione delle caratteristiche elastiche dei materiali.

Operando in un sistema ad elementi discreti, nel quale si particellizza il sottosuolo in un insieme di celle singole di analisi ed imponendo che in ognuna di queste avvenga il fenomeno della rifrazione parziale si ottiene un set di dati il cui andamento è funzione delle caratteristiche elastiche di ogni singola cella.

Il processing tomografico permette di risalire, dato il valore sperimentale totale, a quello relativo ad ogni cella il quale non sarà funzione di una singola traiettoria ma condizionato dall'intero set di traiettorie.

Sistemi sofisticati di analisi permettono inoltre di valutare i gradienti cioè rilevare i tratti dove i passaggi verticolaterali dei parametri assumono una maggiore "rapidità" tramite i quali è possibile condizionare l'inversione tomografica non verso una ineccepibile soluzione matematica con il minimo scarto ma verso una soluzione geologicamente attendibile determinata da una discretizzazione dell'ammasso per strati ed elementi omogenei dal punto di vista deformativo.

Ne consegue che una sezione sismica tomografica è sintetizzabile e semplificabile per elementi i quali presentano una discreta omogeneità nei parametri caratteristici ( $V_p$ ,  $V_s$ ,  $M_a$  ecc. ma nel caso in esame solo in  $V_p$  – Velocità delle onde di compressione).

Questa sintesi normalmente viene esplicitata tramite una omogeneità nel pattern di colori utilizzati permettendo una lettura ed interpretazione facilitata.

Oltre ai falsi colori con i quali sono rappresentate le sezioni è importante "leggere" anche i valori delle isolinee del parametro rappresentato in quanto questi forniscono il "metro" di lettura permettendo di qualificare i materiali definendone le caratteristiche di consistenza ed eventualmente la deformabilità.

E' importante "valutare" le interdistanze tra le varie isolinee e laddove queste sono molto ravvicinate (in valore) normalmente si è in presenza di una interfaccia di rigidità significativa

Per le finalità dell'indagine la presenza di una notevole omogeneità dei parametri di velocità indica una quasi isotropia dei materiali per cui in questi settori è molto probabile trovare litologie simili come granulometria.

E' da considerare anche l'errore della misura tomografica: il valore della velocità è derivato da un calcolo iterativo che tiene in considerazione tutto il dataset quindi tutte le traiettorie dei raggi e le "coperture", cioè la quantità di raggi per ogni singola cella di analisi ad elementi finiti. Il sistema di calcolo ottimizza lo scarto distribuendolo su tutte le celle e tendendo a ridurlo al minimo ma i "filtri" che vengono utilizzati per non rendere troppo "matematica" la soluzione ma anche "geologica" impongono che una parte di "errore" o deviazione rimanga proprio per rendere valida ed "interpretabile geologicamente" la rappresentazione con "contour line" e falsi colori.

Come si può rilevare quindi nella fase interpretativa occorre aver ben presente che esiste una corretta modalità di lettura dei dati, chiaramente dettata dall'esperienza, ma anche da conoscenze della geologia locale.

## 4. PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE

### 4.1. Modalità operative

La tecnica sismica a riflessione ad onde di taglio è una metodologia geofisica largamente impiegata nella ricerca di strutture geologiche-tettoniche e cavità, in particolare con obiettivi poco profondi.

La tecnica di prospezione a riflessione più comune presuppone il cosiddetto rilievo continuo: gli orizzonti riflettenti vengono seguiti in modo continuo lungo il profilo mediante stendimenti simmetrici (split spread) o asimmetrici (end on) rispetto al punto di energizzazione.

Il risultato di un profilo sismico dipende in gran parte dai parametri utilizzati nel corso dell'acquisizione dati, parametri che vengono scelti dopo aver realizzato un profilo walkaway.

Si tratta di un test in campagna per saggiare le caratteristiche dell'obiettivo scopo della ricerca e dei terreni da cui scegliere la migliore configurazione dei parametri di acquisizione.

I parametri da definire in questa procedura sono i seguenti:

- 1) lunghezza della registrazione (record length) e intervallo di campionamento (sample rate);
- 2) massima distanza tra sorgente e geofono (maximum offset);
- 3) minima distanza tra sorgente e geofono (minimum offset);
- 4) distanza tra le stazioni geofoniche;
- 5) tipo di stendimento ("END-ON", ovvero asimmetrico con shot da un estremo sezione);
- 6) controllo automatico di guadagno (AGC OFF);
- 7) filtri digitali (Notch ON).

Per i punti 2) e 3), la distanza tra sorgente e geofono viene normalmente scelta in funzione degli obiettivi ed eventualmente modificabile in sito se i test iniziali indicassero dati non adeguati.

In via del tutto teorica, si può considerare il maximum offset all'incirca uguale alla profondità del riflettore che si vuole evidenziare; il minimum offset dovrebbe essere il più piccolo possibile (al fine di registrare anche i primi arrivi delle onde rifratte, indispensabili per le correzioni statiche), compatibilmente con l'esigenza di evitare sia la saturazione del segnale ai geofoni, sia la registrazione di disturbi che, in prossimità della sorgente, hanno un'ampiezza tale da obliterare completamente la riflessione.

Nel caso altresì di un profilo con tutte le tracce attive, definito "full fold", si è vincolati allo shot entro lo stendimento ed i parametri al punto 2 e 3 non possono essere gestiti.

Una riflessione o eco si verifica sempre in presenza di altri segnali sismici come "rumori di fondo" antropici che possono interferire con essa o addirittura oscurarla; nasce da qui la necessità di migliorare il più possibile il rapporto Signal/Noise (S/N) con vari espedienti.

Una delle tecniche più diffuse è quella di operare con la cosiddetta "copertura CDP" (Common Depth Point), ovvero riunire i dati provenienti dallo stesso punto sulla superficie riflettente, apportare le dovute correzioni in tempi legate alla determinazione della velocità media al di sopra del riflettore (percorsi diversi dell'onda riflessa legati a differenti distanze sorgente-geofono) e quindi sommare le tracce in questione (stacking) rafforzando il segnale riflesso.

Con tale metodo, registrando cioè più segnali riflessi da uno stesso punto riflettente (copertura multipla) che abbiano seguito percorsi diversi, è evidente che gli impulsi che giungono in fase (segnali) si sommano, e quelli non in fase (disturbi vari) si attenuano.

Le sezioni sismiche sono state acquisite generando onde di taglio quindi i sensori da utilizzare per la registrazione dei sismogrammi devono essere polarizzati orizzontalmente.

Uno dei motivi fondamentali dell'utilizzo del sistema ad onde di taglio è che permette di avere una risoluzione molto elevata nei primi 30-40 m finanche riuscire a ricostruire la geometria dei possibili vuoti o cavità all'interno della formazione calcarea.

Le onde di compressione permettono di raggiungere profondità d'indagine più elevate perdendo però in risoluzione soprattutto nei primi 30-40 m.

Le sezioni sono state acquisite con 72 tracce attive, shot su tutte le stazioni quindi ogni 0.50 metri e copertura nominale di 3600.

Per la generazione delle onde taglio è stata utilizzata la sorgente vibrometrica per onde di taglio modello "Elvis III S8".

La scelta di questa strumentazione è stata mutuata dalle caratteristiche del sito al fine di ottenere dati a maggiore risoluzione rispetto a sorgenti di tipo impulsivo oltre ad essere meno invasiva potendo essere impiegata su strade cittadine, tratturi e campi essendo sufficientemente leggera e trasportabile.

Gli impulsi sismici ricevuti dai geofoni posizionati sulla superficie topografica sono stati acquisiti utilizzando array di sismografi EG&G Geometrics Geode a 24 canali collegati in serie.

I parametri di acquisizione per la sezione ad onde di taglio sono stati i seguenti:

Durata della vibrata	10 secondi
Tempo del record in output	1 secondo
Intervallo di campionamento	1 millisecondo
Filtri	esclusi (OFF)
Stendimento	2D rolling end-off
Geofoni	Orizz. 10 Hz spaziati 1.0 metri
N° canali acquisiti per shot	72
Energizzatore	Vibro seis EIVIS III S8
Tipo Sweep	20-240 Hz lineare, 10 secondi
Intervallo P.V. (Punti Vibrazione)	0.50 metro
Primo P.V.	sul geofono 1
Ultimo P.V.	sull'ultimo geofono
Stacks/P.V.	1 destra + 1 sinistra a polarità invertita

#### 4.2. Elaborazione dati

L'elaborazione computerizzata è avvenuta impiegando il software **Claritas** (<https://www.petrosys.com.au/claritas>) di cui si è licenziatari e si è articolata fundamentalmente nei quattro punti successivi:

- 1) "editing" e "sorting" e "muting";
- 2) correzioni statiche;
- 3) operatori di filtraggio (filtri Bandpass e FK);
- 4) analisi di velocità – correzioni statiche residue – stack e depth conversion

1) I file salvati dal sismografo sono in formato demultiplexato (SEG 2), ovvero presentano, una dopo l'altra, le tracce relative ai successivi canali e devono essere trasformate in un unico file in formato standard (seg y) nel quale sono presenti ed organizzati tutti i record.

Su questo file si prosegue con analisi di editing, muting e killing che consistono in una fase di "pulizia" per eliminare fisicamente da record le tracce troppo rumorose o errate, per ridurre il "rumore di fondo" o per eliminare parti di record che presentano segnali non utili come ad esempio l'air wave, il "ground roll" ecc. cioè segnali non corrispondenti a riflessioni che se utilizzati riducono il rapporto segnale/rumore non permettendo di avere dati adeguati.

2) Si procede quindi con le correzioni statiche, ovvero quelle correzioni che implicano uno slittamento lungo la scala dei tempi dell'intera traccia sismica.

Un tipo di correzione statica è la cosiddetta "datum static", usata per compensare il fatto che i geofoni si possono trovare a quote diverse l'uno dall'altro rispetto al "datum" il quale viene fatto corrispondere normalmente alla quota più alta del profilo della sezione; un'altra correzione statica è la "weathering correction" usata per compensare le differenze di velocità di propagazione delle onde sismiche negli strati più superficiali.

3) La correzione più laboriosa è invece la correzione dinamica o NMO (Normal Move Out correction), usata per compensare la diversa lunghezza dei percorsi delle onde riflesse dovuta semplicemente ad una diversa distanza tra punto di scoppio e geofoni.

In questo modo la riflessione osservata nella scala dei tempi viene correlata ad un orizzonte particolare e resa indipendente dall'offset dei geofoni.

Solo dopo questa correzione le tracce CDP possono essere sommate tra loro per enfatizzare le riflessioni.

8) Infine, con il termine di filtraggio si definiscono tutte quelle operazioni che possono influenzare la frequenza, la fase e l'ampiezza della traccia sismica, prima o dopo lo stacking CMP o CDP (filtraggio in frequenza, compensazione di fase, deconvoluzione).

Nell'immagine sottostante vengono presentate alcune immagini del flow del processing utilizzato con Globe Claritas.

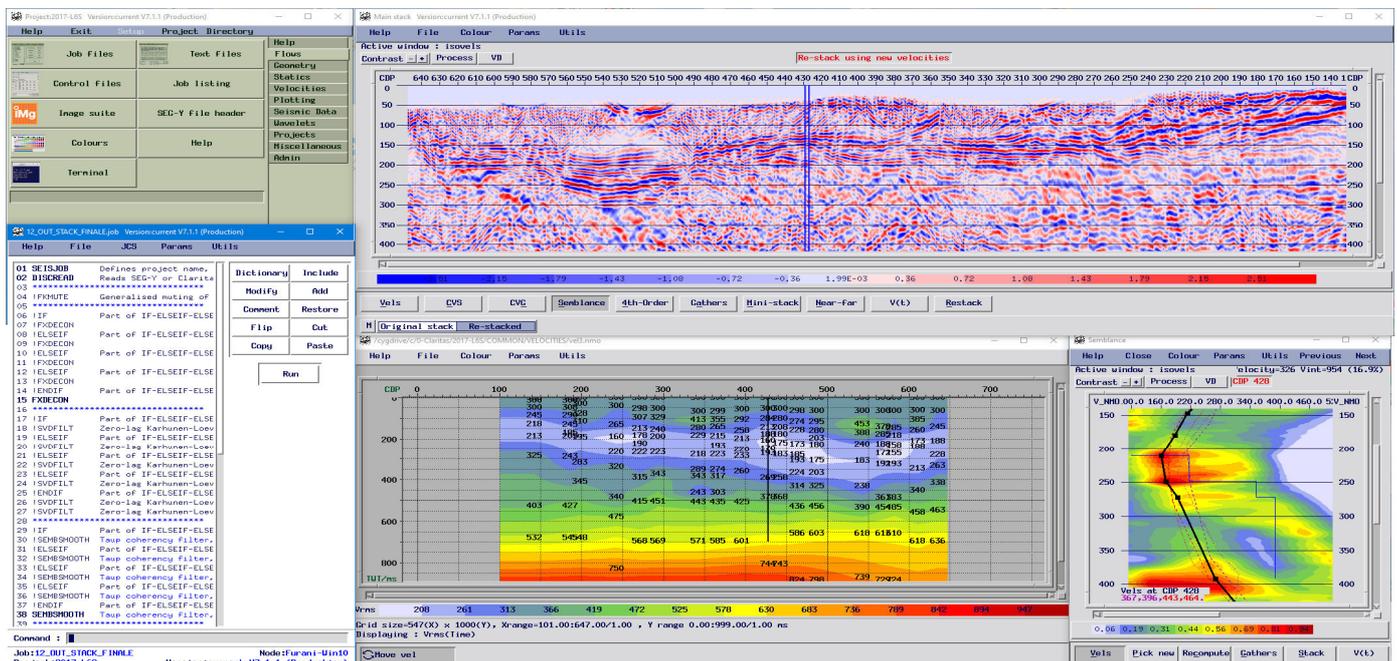


Fig. 4.1 - Esempio - Clip di alcune finestre del processing a riflessione della sezione ad onde di taglio mediante software Globe Claritas (Flow chart)

Sulla sismosezione sismica sono indicati alcuni dei principali orizzonti riflettenti definiti sulla base di un significativo fattore di coerenza laterale il quale è ricavato comparando sequenze laterali di picchi presenti nelle tracce sismiche (CMP – Common Mid Point) ed accoppiati da valori simili sia in ampiezza sia in frequenza.

Combinando i valori ottenuti attraverso l'analisi di coppie progressive di CMP o CDP viene ottenuta la coerenza laterale degli eventi riflessi che si differenziano nella qualità del segnale (fattore di coerenza laterale).

Tale distinzione risulta importante, soprattutto a livello interpretativo, in quanto tanto più elevato risulta il fattore di coerenza tanto più certo e definito si presenta il riflettore.

La non continuità laterale di questi eventi riflettenti, ed in particolare la traslazione lungo l'asse dei tempi, viene generalmente interpretata come attenuazione del segnale riflesso sull'orizzonte oppure presenza di pinch out o faglia se netta e ben definita (lineazioni tettoniche riportate in tratteggio rosso o magenta di sintesi interpretativa).

L'aspetto interpretativo consiste nella attribuzione dei pattern di riflessione a specifiche individualità geologico-strutturali dell'ammasso.

#### 4.4. Modalità di lettura ed interpretazione dei dati sismici

In sintesi vengono fornite le chiavi di lettura per l'interpretazione dei dati raccolti.

Per una analisi di dati di sismica a riflessione si valutano inizialmente le coerenze laterali degli echi prodotti dalle riflessioni dei fronti d'onda sismici.

Dal processing l'immagine finale primaria che si ricava è la sismosezione nella quale in ascissa sono riportate le progressive di sezione ed in ordinata i tempi a due vie (andata e ritorno degli echi).

E' questa la sezione primaria sulla quale valutare le coerenze laterali, le intensità dei riflettori ed altri elementi geometrici da cui ottenere informazioni per l'interpretazione.

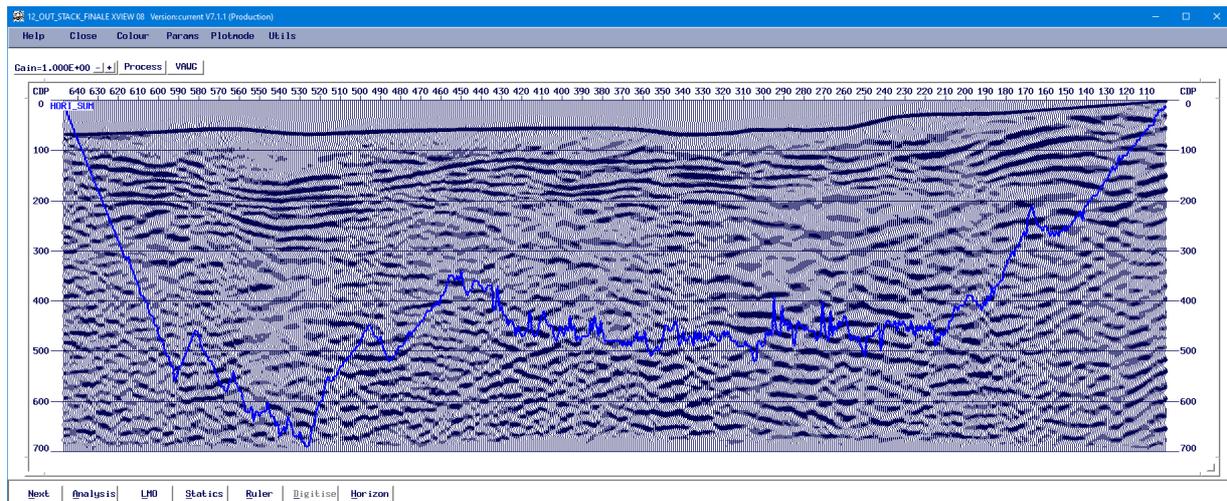


Fig. 4. 2 – Esempio di Sismosezione ad onde di taglio con sovrappressa la copertura sismica in blu

Sull'immagine della sismosezione è riportata in blu la "copertura sismica" effettiva che rappresenta il numero delle tracce sismiche/10 utilizzate nello stack finale dei CDP.

Questa è normalmente inferiore alla "copertura nominale" in quanto varie tracce possono essere eliminate o per troppo rumore, oppure corrotte oppure prive di segnale utile ecc.

In questo caso la massima copertura effettiva è nel tratto centrale della sezione con valori massimi di 48 (4800%), e scende ad 1 sugli estremi a significare che le tracce CDP centrali derivano da una somma di almeno 48 tracce utili acquisite mentre lateralmente questa scende a 1.

La "copertura sismica" è un parametro molto importante da calibrare in fase di progettazione della sezione: maggiore è la copertura sismica e maggiore sarà la risoluzione ed affidabilità della sezione processata: sull'immagine risulta ben evidente che il tratto centrale è maggiormente definito mentre lateralmente sui bordi la risoluzione tende a diminuire drasticamente.

Sulla sismosezione si rilevano orizzonti continui suborizzontali o leggermente inclinati che presentano coerenza e continuità laterale. Questi allineamenti rappresentano superfici di riflessione (interfacce) ove il coefficiente di riflessione, cioè il rapporto delle velocità del mezzo superiore e inferiore, risulta significativamente elevato ( $>>1$ ) determinando pertanto che parte dell'energia sismica venga riflessa anziché totalmente trasmessa.

Tanto più questo coefficiente si discosta da 1, o in aumento o in riduzione, tanto maggiore sarà l'energia riflessa e più visibile risulterà sulla sezione sismica l'interfaccia.

Laddove sulle sezioni non si presentano riflessioni si è in presenza di una situazione "sterile", cioè di ammasso omogeneo, che non presenta significativi passaggi verticali il che non significa compatto ma tendenzialmente isotropo.

Ma se i segnali che derivano da questi settori "sterili" sono di bassa intensità è lecito considerare di essere in presenza di un elevato assorbimento dell'energia sismica quindi fratturazione ed eventualmente carsismo diffuso.

L'assorbimento dell'impulso sismico però porta anche ad una minore profondità d'indagine in quanto sulle interfacce più profonde non si genera una onda riflessa di energia sufficiente da poter essere ricevuta dai sensori in superficie: è necessario considerare che la dispersione o assorbimento avviene sia in andata che in ritorno.

Analogamente anche se si è in presenza di riflettori ad elevato coefficiente di riflessione sui quali la maggior parte dell'energia viene riflessa, si riduce la profondità massima d'indagine in quanto la porzione che si trasmette si riduce a una frazione.

In entrambi i casi si tende ad intervenire, dopo i primi test, incrementando se possibile, la quantità di energia immessa per lo shot.

In seguito la sismosezione, presentando la scala delle ordinate in tempi doppi (andata e ritorno), deve essere trasformata in metri (Depth conversion) per avere una immagine in scala metrica reale.

Una conversione corretta permette di posizionare nello spazio gli elementi significativi ("pattern") da cui estrapolare informazioni, ovviamente gli elementi con questa trasformazione tendono ad essere deformati e stirati per cui possono nascere alcune geometrie anomale ma per verificare la loro correttezza si torna sempre alla sismosezione.

Dall'analisi delle riflessioni pertanto si ricavano dei "pattern" o "scheletro" cioè elementi rappresentati da linee che uniscono i vari eventi riflessi omologhi: la valutazione della coerenza laterale (continuità) di questi eventi fornisce un indice sul grado di omogeneità strutturale.

Ridotta coerenza laterale, elevata entropia e "nervosismo" degli echi, settori a ridotta intensità come anche la variazione delle frequenze del segnale riflesso sono indici qualitativi della fratturazione.

Il disassamento con dislocazione oppure il fenomeno della diffrazione sulla verticale dei pattern può essere un elemento che permette di individuare la presenza di una faglia oppure di una fascia di fratturazione per stress tettonico.

Una volta raccolti tutti questi elementi, evitando di fermarsi al particolare, si tende a sintetizzarli e correlarli alla geologia ed alla tettonica locale in quanto sono queste le informazioni primarie più significative ottenibili da una sezione sismica a riflessione.

## 5. INDAGINI GEORADAR

Per questa tipologia d'indagine si è utilizzata la seguente strumentazione:

- georadar Sir 3000 della G.S.S.I. (U.S.A) con convertitore analogico/digitale da 16 bit;
- antenna trasmittente-ricevente con frequenza principale di 100 MHz (Mod GSSI 5103);
- cavo di collegamento radar-antenna da 3 m.

I rilievi georadar o GPR (Ground Probing Radar) si basano sulla risposta di un segnale elettromagnetico di carattere impulsivo ad alta frequenza che viene inviato e ricevuto da un'antenna.



Fig.1 – GSSI antenna utilizzata

La presenza di discontinuità di proprietà elettromagnetiche del materiale provoca fenomeni di rifrazione, riflessione e diffrazione dell'energia elettromagnetica incidente su tale discontinuità.

In generale, si analizza la risposta dell'onda elettromagnetica che viene riflessa in corrispondenza delle discontinuità del mezzo e che ritorna in superficie, dove viene captata da un'antenna ricevente.

Le due porzioni dell'antenna ovvero la porzione emittente e quella ricevente sono allodate in un unico involucro vedasi immagini di Fig.2 della pagina precedente

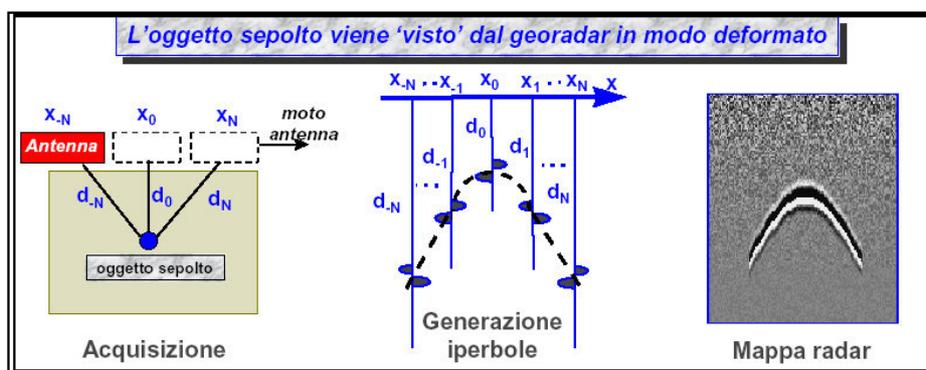


Fig.2 Schema di Acquisizione georadar

Il principio di funzionamento del georadar differisce da quello del radar convenzionale in quanto il mezzo di trasmissione non è più l'aria ma una roccia o un terreno; la risoluzione è in genere decimetrica o centimetrica, e il campo di misura è limitato ad alcuni metri di profondità.

In geofisica ambientale il georadar è utilizzato per l'individuazione di sottoservizi e strutture antropiche sepolte (cisterne interrato, fondazioni, ecc.); le applicazioni principali del georadar interessano anche le indagini archeologiche e la valutazione dell'integrità strutturale di elementi architettonici.

La rappresentazione dei dati acquisiti avviene normalmente su un diagramma tempi-ampiezze del segnale ricevuto dal georadar.

Spostando l'antenna lungo una direzione prestabilita e accostando i diversi diagrammi tempi-ampiezze per i successivi segnali si ottengono delle sezioni georadar, detti radargrammi, in cui le ampiezze di riflessione sono rappresentate in funzione del tempo di andata e ritorno (*twt*) e della posizione dell'antenna lungo il profilo di acquisizione.

Durante l'acquisizione gli impulsi sono ripetuti con frequenza tra 30 e 100 kHz.

Le tracce rilevate dall'antenna ricevente sono mediate prima di essere registrate: in tal modo ogni singola traccia registrata è il risultato di una operazione di *stacking* che ha come effetto l'aumento del rapporto segnale/rumore.

In acquisizione si opera inoltre impiegando dei filtri in dominio di frequenza (filtri passa banda) con banda passante larga abbastanza da non perdere segnale utile.

Successivamente è possibile procedere ad un ulteriore filtraggio digitale sulle tracce acquisite.

Opportune procedure di elaborazione dei dati consentono di passare dalle sezioni radar grezze a immagini che meglio localizzano gli oggetti sepolti.

## 6. INDAGINI MASW 2D

Le sezioni MASW 2D ad onde di taglio, sono state ottenute mediante una acquisizione in continuo di singoli MASW 1D. Nelle operazioni di campagna sono stati collocati a terra 72 sensori sismici verticali da 4,5 Hz quindi proceduto all'acquisizione di singoli array sismici a 24 sensori (MASW 1D) ogni volta traslati lungo l'intero stendimento.

L'interdistanza tra i sensori nello stendimento MASW1\_GA01 è di 1.0 m e sullo stendimento MASW2\_TR04 la spaziatura intergeofonica è di 2.5m.

Ad una distanza dal primo sensore pari a circa il doppio della interdistanza geofonica dell'array, è stato eseguito uno shot sismico rilevato dai 24 sensori e acquisito dal sismografo collegato.

Eseguita l'energizzazione e l'acquisizione del dato l'intero apparato è stato traslato tramite software per la distanza pari a due sensori e quindi ripetuta la stessa procedura con l'acquisizione di un altro MASW.

L'elaborazione continua dei dati acquisiti ha permesso di generare una sezione MASW 2D ad onde di taglio S per l'intera lunghezza del tratto percorso dallo stendimento.

### 6.1. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

MASW è l'acronimo di Multichannel Analysis of Surface Waves; è una tecnica di esplorazione sismica introdotta per la prima volta in GEOPHYSICS da Park et al., (1999) e consente di stimare la rigidità del terreno misurando la velocità dell'onda di taglio ( $V_s$ ) del sottosuolo in modalità 1-D, 2-D e 3-D comunemente fino a 30 m di profondità.

La tecnica MASW utilizza le onde di superficie sismiche generate da vari tipi di fonti sismiche - come la mazza – analizzandone le velocità di propagazione ricavandone infine le variazioni di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) al di sotto dell'area indagata.

La velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) è una delle costanti elastiche strettamente correlata ai moduli di Young e di Taglio. Nella maggior parte dei casi,  $V_s$  è un indicatore diretto della resistenza al suolo (rigidità) e quindi comunemente può essere usato per stimare la capacità portante.

La procedura generale per produrre una tipica sezione trasversale della S-velocità 2D ( $V_s$ ) consiste nel raccogliere record sismici multicanale in più posizioni, come illustrato di seguito.

Ogni record genera quindi un profilo di velocità 1-D (profondità) ( $V_s$ ), il multiplo dei quali costruirà la sezione trasversale 2D finale.

### 6.2. Applicazioni

Le informazioni sulla velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) dei materiali del sottosuolo sono direttamente correlate alla proprietà di rigidità dei materiali, che è la proprietà primaria trattata in tutti i progetti di ingegneria geotecnica. In questo senso, il metodo MASW può essere applicato a qualsiasi progetto di ingegneria geotecnica che richiede la mappatura della rigidità del sottosuolo nei formati 1-D, 2-D e 3-D.

Il tipo più comune di applicazione è la mappatura suolo-roccia, che delinea il confine topografico tra suolo e roccia attraverso un'interfaccia con un aumento significativo della velocità ( $V_s$ ) (ad esempio, da 300 m/sec a 1000 m/sec). Mostra inoltre la variazione verticale e orizzontale della rigidità del suolo visualizzando le variazioni di velocità ( $V_s$ ) all'interno del suolo (ad es. 100 m / sec - 300 m / sec).

Questo limite mostra spesso presenta un graduale cambiamento di velocità su un certo intervallo di profondità piuttosto che un'interfaccia definita in modo nitido, ciò indica la possibile zona esposta all'aria

in cima al substrato roccioso. Più recentemente si stanno utilizzando misure MASW per rilevare anomalie del sottosuolo (cavità, sinkhole ecc.).

Queste anomalie possono includere zone localizzate a bassa velocità create da vari motivi come tunnel di utilità esistenti, sviluppo del vuoto dovuto al collasso, substrato roccioso fortemente esposto alle intemperie, perdita di coesione nei materiali riempiti, ecc. In questo caso, il rilevamento è spesso facilitato da approcci di mappatura della velocità come analisi back-scattering e generazione di sezioni di offset comune.

Un altro tipo di applicazione è la valutazione delle prestazioni che viene eseguita prima e dopo l'applicazione di un'operazione specifica. Ciò include la valutazione della compattazione per materiali superficiali e sotterranei durante la costruzione di strade e edifici. Include anche la valutazione delle prestazioni di stuccatura.

La caratterizzazione del sito sismico richiede una valutazione di una velocità media delle onde di taglio ( $V_s$ ) per la profondità massima di 30 m. Questa è l'applicazione 1-D (ovvero profondità) più comune del metodo MASW.

In generale, le applicazioni MASW possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

- Mappatura del Suolo;
- Caratterizzazione sismica locale;
- Localizzazione di anomalie o difformità nel sottosuolo;
- Analisi della compattazione;
- Analisi delle consistenze del terreno.

### 6.3. Procedure generali

La metodologia sismica MASW è relativamente semplice: in campagna si deve predisporre un allineamento di geofoni equamente distanziati lungo una linea di rilevamento lineare (Figura 2.1).

Considerando la dipendenza frequenza-profondità delle onde superficiali e le caratteristiche di risposta dei geofoni, i geofoni a bassa frequenza (4,5 Hz) vengono normalmente utilizzati come ricevitori e una sorgente sismica a impatto elevato come una mazza da 10 kg può produrre una segnale a banda larga, relativamente bassa frequenza.

La distanza ( $x_1$ ) tra la sorgente e la stazione più vicina (chiamata offset della sorgente) viene scelta per ridurre al minimo gli effetti del campo vicino causati dall'eccessiva relazione stress-deformazione dalla sorgente di impatto (Park et al., 2002; 2001).

Questo offset viene di solito scelto per essere quasi uguale alla profondità massima di indagine. Tuttavia, esistono situazioni in cui è meglio operare con distanze inferiori alla profondità d'indagine (Park et al., 1999a).

La spaziatura del ricevitore ( $dx$ ) viene scelta per evitare ogni possibile aliasing spaziale della lunghezza d'onda più corta registrata e per massimizzare l'efficacia dell'analisi della dispersione (Park et al., 2001).

La lunghezza totale dell'array dei sensori ( $x_T$ ) ne determina l'offset.

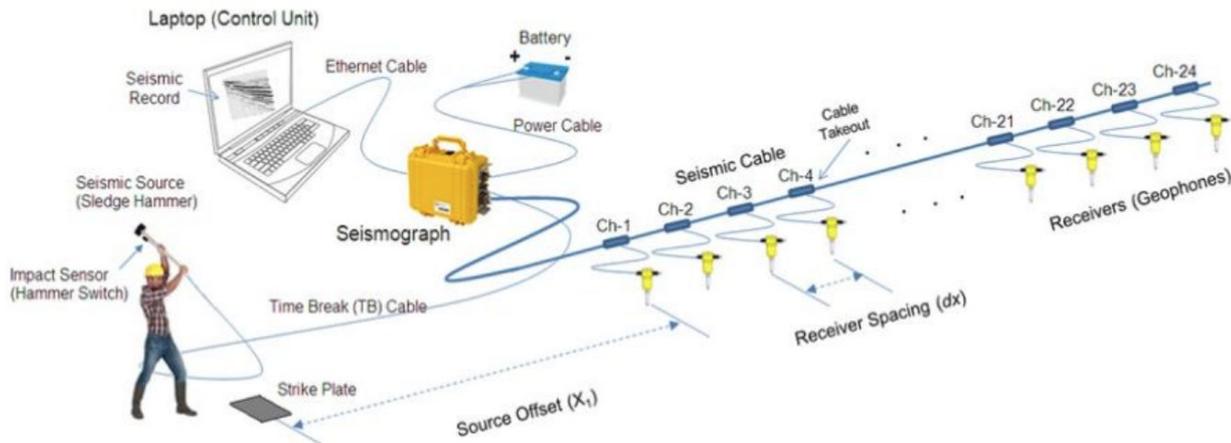


Figura 1. Configurazione MASW

La storia della vibrazione correlata al campo d'onda sismica generato dalla sorgente viene misurata da ciascun geofono all'interno della dispersione ed è rappresentata da una serie temporale definite come traccia (Figura 2.2).

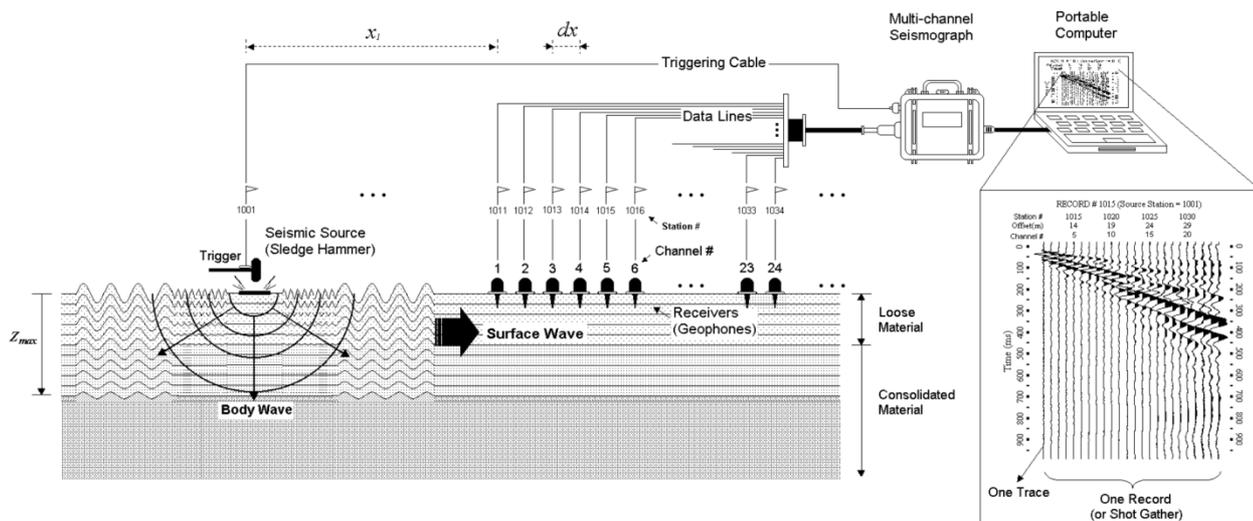


Figura 2. Tipica configurazione di campo per prova MASW

Da ogni misurazione deriva un singolo profilo Vs 1-D del suolo direttamente sotto l'allineamento dei sensori. In un rilevamento progettato per generare una mappa Vs 2-D, una configurazione SR scelta viene spostata in modo uniforme e coerente di una data distanza (chiamata intervallo di sorgente, che di solito è un multiplo della spaziatura del singolo ricevitore).

Questo stile di acquisizione dati a diffusione mobile è chiamato modalità roll-along (Sheriff and Geldart, 1982).

Lo schema generale del trattamento dei dati prevede i seguenti passaggi:

1. eliminare (modifica) i colpi rumorosi;
2. convertire i dati sismici grezzi (SEG-2) nel formato di elaborazione (SEG-Y), combinando tutti gli shot generati per essere elaborati in un unico file;
3. assegnare la geometria del campo e ricompilare il set di dati della modalità di acquisizione (singola o roll-along);

4. visualizzare tutti i colpi raccolti per valutare il rapporto segnale-rumore generale (S / N);
5. selezionare i vari shot ed elaborarle le dispersioni per determinare intervalli ottimali di frequenza e velocità di fase;
6. analisi della curva di dispersione per tutti gli shot generati;
7. analisi di inversione per tutte le curve di dispersione analizzate;
8. costruire una mappa Vs 1-D o 2-D dai risultati di inversione usando uno schema di interpolazione 1-D o 2-D appropriato.

Gli shot generati con errori di trigger o con S / N al di sotto delle soglie accettabili vengono scartati.

Tutti i restanti raggruppamenti vengono quindi convertiti e combinati in un singolo file con numeri di file di campo in aumento sequenziale (numero record).

I numeri di stazione per sorgente e ricevitori e la spaziatura del ricevitore vengono assegnati a ciascun record nel file combinato.

Quindi, tutti i record con codifica geometrica vengono ricompilati nel set di dati della modalità roll-along equivalente eliminando determinate porzioni di tracce in ciascun record.

Tutti i record vengono quindi visualizzati per valutare generalmente la qualità dei dati (S / N).

Successivamente, vengono selezionati diversi record da diverse posizioni lungo la linea di rilevamento e le loro caratteristiche di dispersione vengono esaminate usando il metodo di imaging (Park et al., 1998).

Durante questo passaggio, viene scelto un intervallo ottimale di frequenze e velocità di fase che viene utilizzato per guidare l'elaborazione di tutti i record nel set di dati.

Ogni record viene analizzato per generare un'immagine di dispersione (chiamata immagine di overtone) con la tendenza alla dispersione in modalità fondamentale identificata e una curva di dispersione del segnale estratta in base all'immagine identificata.

Una volta estratte tutte le curve di dispersione necessarie, vengono invertite per generare un profilo Vs 1-D da ciascuna curva di dispersione.

Al profilo Vs risultante viene assegnata la posizione della stazione nel mezzo della diffusione del ricevitore. Quando tutti i profili Vs 1-D vengono generati per tutte le curve di dispersione, viene utilizzato uno schema di interpolazione 2-D (ad esempio, schema bilineare o Kriging) per costruire la mappa Vs-2 finale.

L'acquisizione dei dati MASW più tipica per la caratterizzazione del sito sismico (SSC) richiede un sistema di acquisizione sismica a 24 canali composto da sismografo a 24 canali, cavo sismico con 24 collegamenti (da asporto), 24 geofoni verticali o orizzontali a bassa frequenza (ad es. 4.5-Hz quelli) e un martello pesante (ad es. 10 kg o più pesante).

I parametri geometrici (dx e X1) influenzano la profondità massima di indagine (Zmax).

In generale, la dispersione del ricevitore più lunga associata a una spaziatura del ricevitore più lunga assicura uno Zmax più profondo. Inoltre, è necessario un offset della sorgente più lungo (X1) per una data diffusione del ricevitore per garantire l'alta qualità delle onde di superficie per lunghezze d'onda relativamente più lunghe minimizzando il più possibile alcuni effetti dannosi, come gli effetti del campo vicino.

Sono necessarie lunghezze d'onda più lunghe per l'analisi di profondità più profonde. D'altra parte, è necessario anche un X1 più corto per garantire la stessa qualità per lunghezze d'onda relativamente brevi necessarie per l'analisi a profondità più basse.

Pertanto, di solito è una combinazione di diversi X1 che può raggiungere la massima qualità possibile per una vasta gamma di lunghezze d'onda per coprire il maggior intervallo di profondità possibile per una data impostazione.

In effetti, la stessa combinazione di X1 diversi può essere applicata sui lati anteriore (avanti) e posteriore (retro) della diffusione del ricevitore in modo che la possibile modifica della proprietà del sottosuolo nella direzione laterale (ad esempio, modifica della profondità della roccia fresca) possa essere correttamente rappresentato durante l'elaborazione.

All'analisi dei dati, tutti i record di campo vengono elaborati per generare immagini di dispersione corrispondenti, che vengono quindi impilate per generare un'immagine di dispersione impilata della massima qualità, come illustrato nella figura 2.3

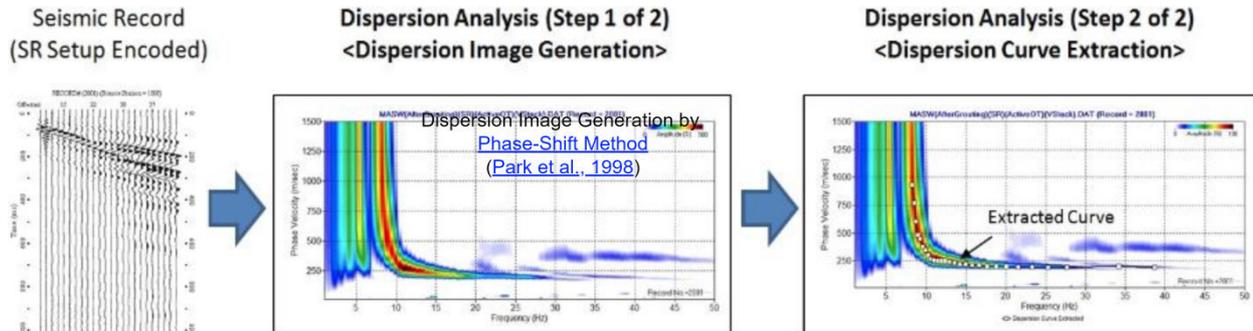


Figura 3 – Analisi MASW (sismogramma – Spectral analysis e curva di dispersione – Picking).

Questa immagine impilata avrà il rapporto segnale-rumore (SN) più elevato rispetto a tutte le altre a causa degli effetti di rumore incoerenti soppressi, mentre gli effetti di dispersione delle onde superficiali coerenti migliorati, per quanto possibile. Allo stesso tempo, gli effetti avversi sul campo vicino e lontano (se presenti) saranno attenuati attraverso lo stesso effetto di media.

Infine, la curva di dispersione in modo fondamentale più affidabile (M0) viene estratta da questa immagine sovrapposta e il profilo più affidabile della velocità dell'onda di taglio 1-D ( $V_s$ ) si ottiene dall'inversione di questa curva, come illustrato nella figura 2.4.

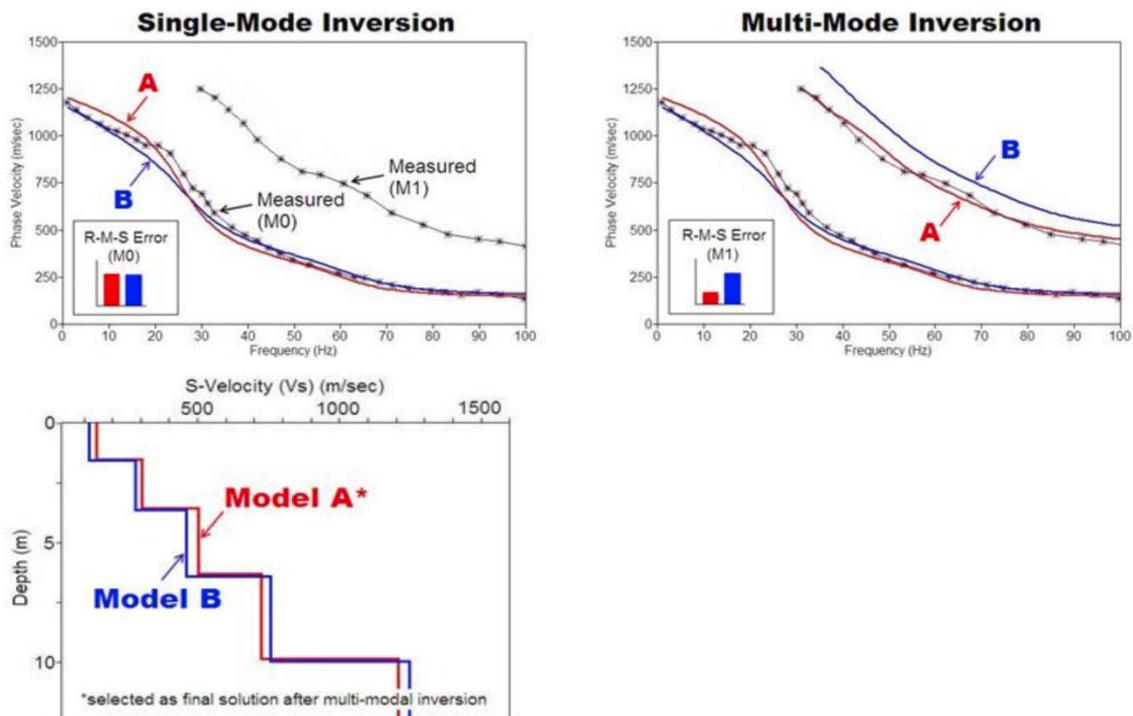


Figura.4 – Inversione dei dati (Curva di dispersione con picking – Log  $V_s$ )

## 7 PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE

### 7.1. Modalità operative

La tecnica down-hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio.

#### 7.1.1. Sorgente di energia

Per effettuare tali operazioni è necessario utilizzare una sorgente di energia a polarizzazione verticale ed orizzontale: con la prima si generano onde di compressione P mentre con la seconda onde di taglio polarizzate Sh.

Nel caso in esame si è scelta una sorgente di energia che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza oltre a caratteristiche dinamiche ripetitive similari; il generatore usato e denominato “Hammer Blow” è rappresentato da un maglio di 8 Kg usato da un operatore; lasciato cadere con forza da circa 2 m su una piastra di acciaio per la generazione delle onde di compressione (P) ed orizzontalmente, colpendo un supporto solidale, per attrito radente al terreno, (trave in legno con sopra un autocarro) per quelle di taglio (S).



Figura 7.1 Immagine degli apparati di energizzazione

### 7.1.2. Apparato di ricezione

L'apparato di ricezione è costituito da due sonde disposte ad un metro l'una dall'altra e sono entrambe provviste di un apposito meccanismo di ancoraggio alle pareti del foro durante la registrazione dell'impulso e di disancoraggio per essere mobilizzato lungo la verticale del sondaggio stesso. (vedasi foto in figura 4, di una singola sonda).

Entrambe le sonde (sonda 3D) sono formate da un gruppo di sensori composto da tre geofoni da 14 Hz smorzati del 70%, dei quali uno con l'asse funzionale verticale (V) e due orizzontali (H1 e H2) fra loro ortogonali.

Oltre alla sonda calata entro il foro si utilizza in superficie un interruttore piezoelettrico applicato all'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione ed alcuni geofoni di riferimento (tre nel nostro caso) posizionati nelle vicinanze della bocca del foro che rimangono fissi per tutte le misure effettuate nel sondaggio e che costituiscono il dispositivo di controllo del trigger affinché tutti gli impulsi sismici possano essere corretti con uno shift del tempo nella fase di preprocessing nel caso in cui si opti per una elaborazione di tipo progressivo tomografico.



Figura 7.2 - Sonda 3D

### 7.1.3. Operazioni di campagna

Dopo aver eseguito il collegamento al sismografo del cavo elettrico per i 6 canali delle due sonde 3D, dell'interruttore piezoelettrico solidale all'apparato di energizzazione e dei tre geofoni di riferimento si è effettuato il posizionamento della doppia sonda 3D a fondo foro e si sono realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alla prospezione down-hole a partire da fondo foro.

Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode con un passo di campionamento di 0.02 millisecc, tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su P.C.

Sui sismogrammi le tracce sono distinte secondo lo schema sottostante:

canale 1-segnale del geofono verticale	(V)
canale 2-segnale del geofono orizzontale	(H1)
canale 3-segnale del geofono orizzontale	(H2)
canale 4-segnale del geofono verticale	(V)
canale 5-segnale del geofono orizzontale	(H1)
canale 6-segnale del geofono orizzontale	(H2)
canale 7-segnale del geofono di riferimento posizionato sul punto di battuta	(Rif 1)
canale 8-segnale del geofono di riferimento posizionato a 1 metro dal punto di battuta	(Rif 2)
canale 9-segnale del geofono di riferimento posizionato in prossimità della bocca pozzo	(Rif 3)

La fase di taratura della strumentazione consiste nella seguente procedura; si posiziona la doppia sonda 3D (differenziale) a fondo foro e viene dato un impulso per le onde di compressione (direzione alto-basso).

Un esempio di record è la registrazione riportata nell'immagine seguente: con la freccia rossa si indica il tempo di arrivo delle onde di compressione:

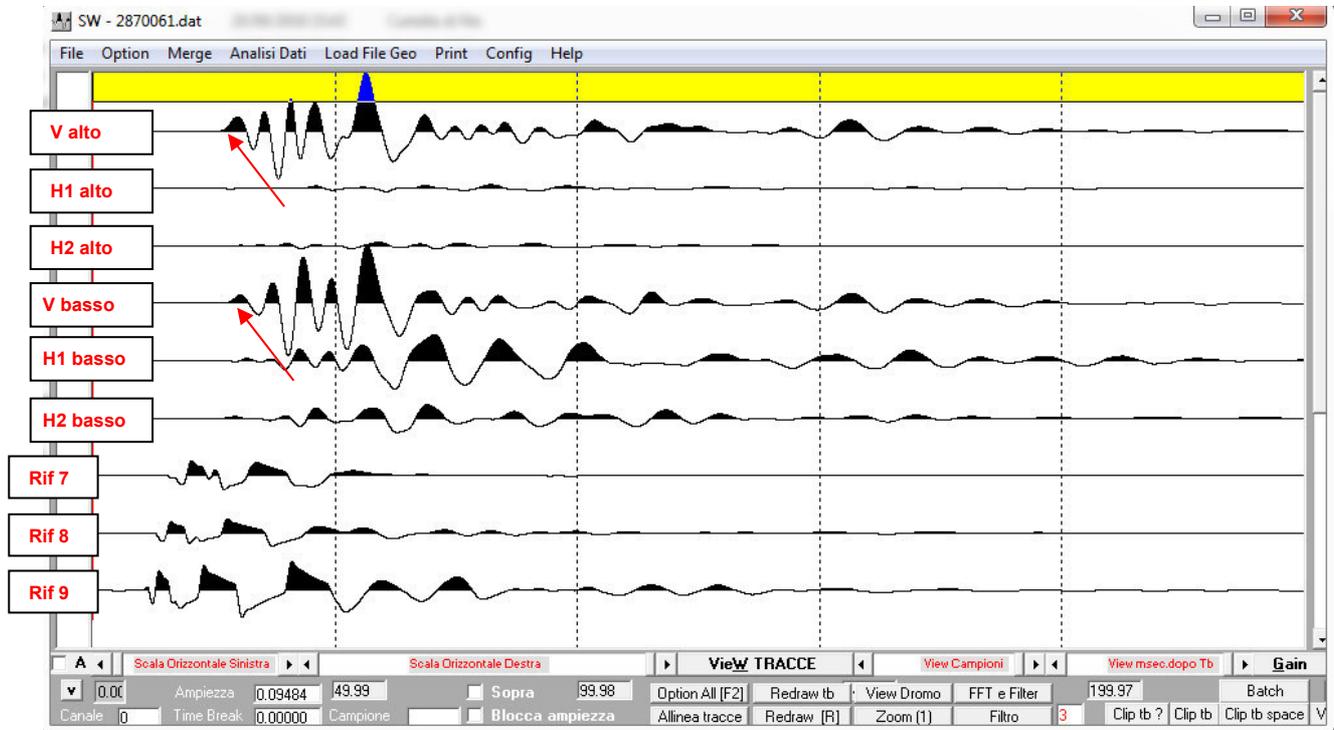
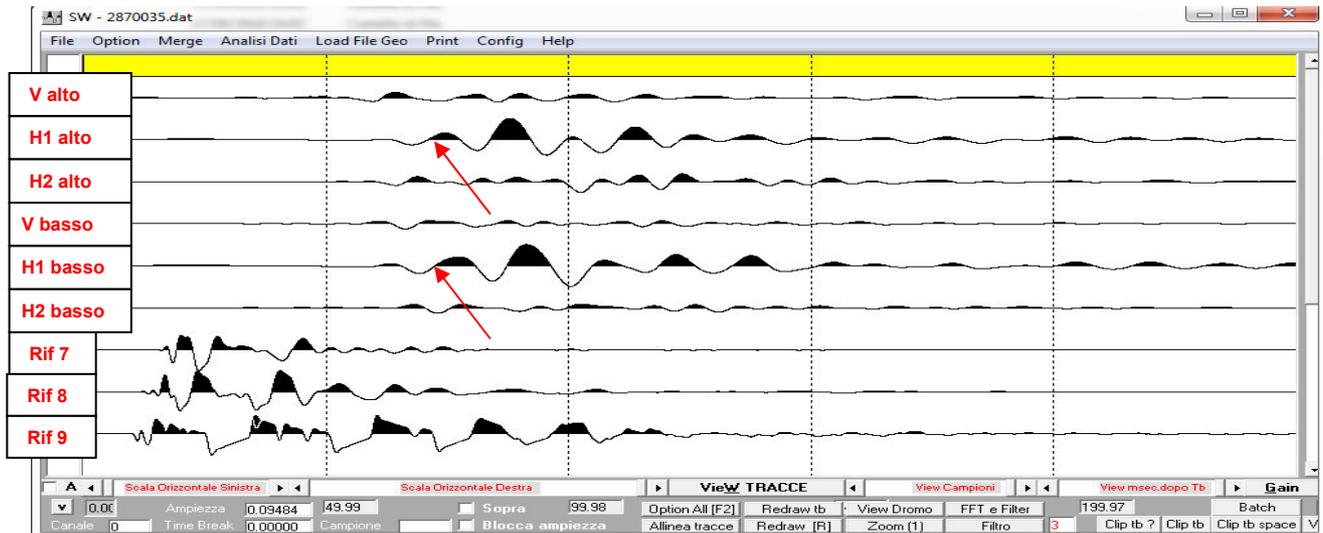


Figura 7.3 - Esempio record Down Hole eseguito con sonda differenziale

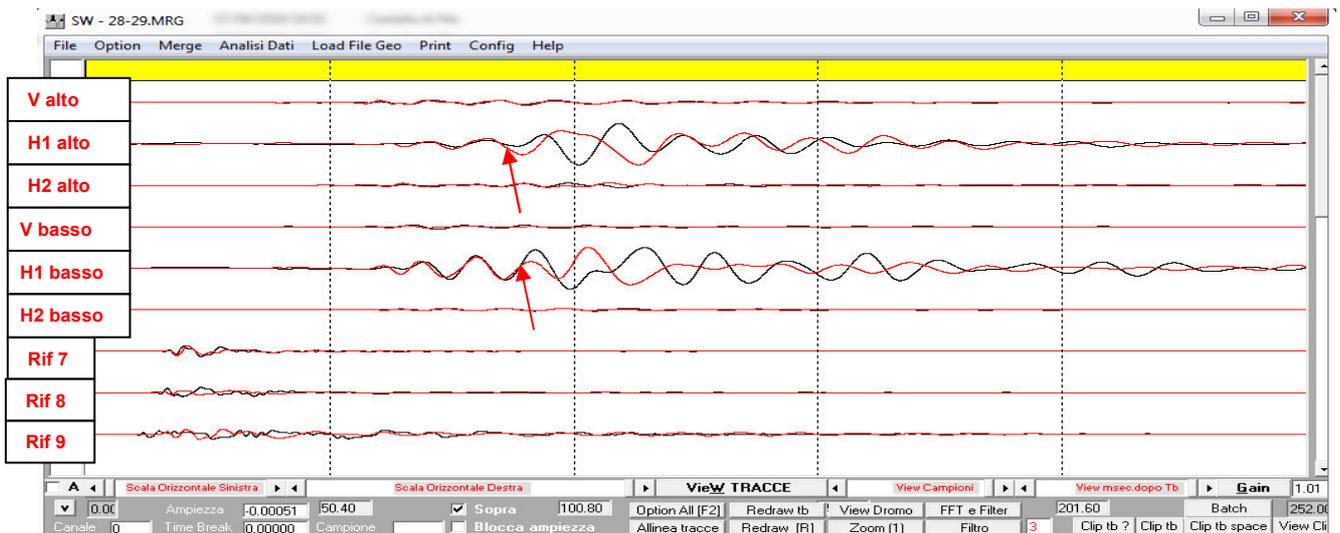
In tale registrazione risultano perfettamente definite le tracce della sonda differenziale nei canali V alto e V basso e i canali di riferimento Rif 7, Rif 8 e Rif 9 che sono realmente le tracce che risultano necessarie all'elaborazione per questo tipo di impulso.

Al fine della determinazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio alle varie profondità si è provveduto alla registrazione di un impulso polarizzato sul piano orizzontale con la sonda posizionata a fondo foro, la registrazione relativa a tale impulso è riportata qui di seguito.

In tale registrazione risultano perfettamente definite le tracce H1 alto e H2 basso che sono i due geofoni orizzontali omologhi (stessa polarità e direzione) ma distanti un metro uno dall'altro e i geofoni di riferimento Rif 7, Rif 8 e Rif 9 in superficie. Per avere la certezza del tempo di arrivo dell'onda di taglio si è provveduto ad una energizzazione polarizzata sul piano orizzontale creando uno shot a polarità invertita.



Il sismogramma cumulato dei due record (in rosso ed in nero) a polarizzazione invertita che ne consegue è quello qui di seguito presentato.



In questo sismogramma risulta evidente che la traccia H1 rossa è invertita di fase rispetto a quella H1 blu come si rileva anche dal diagramma a farfalla di seguito dove le due tracce vengono visualizzate sovrapposte. E' presente un minimo shift in quanto su queste tracce originali non è stata ancora effettuata la correzione del trigger.

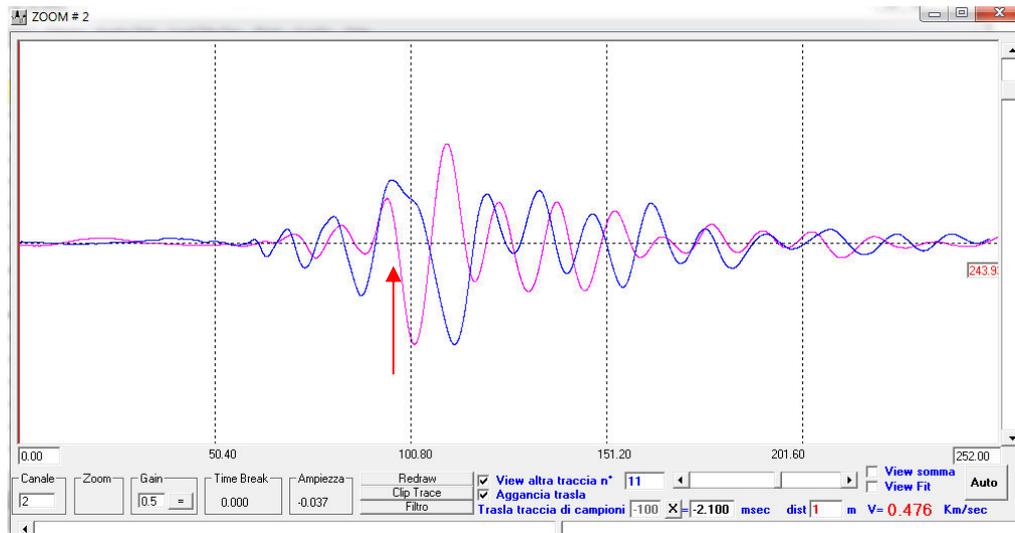


Figura 7.4 – Esempio di diagramma a farfalla per valutare l'inversione di polarità delle onde di taglio

Verificata la validità dei segnali, procedura ripetuta a varie ordinate sul foro, si inizia la prospezione da fondo foro fino alla superficie topografica realizzando tre energizzazioni: una per le onde di compressione e due a polarizza invertita per le onde di taglio, per ogni step di misura metrica.

Al fine della fase di acquisizione vengono tutti i sismogrammi relativi ad ogni singolo canale (con il metodo progressivo) e procedere alle analisi primarie di correzione del trigger utilizzando i gather dei vari geofoni di riferimento posizionati in superficie.

Di seguito viene riportata l'immagine relativa al canale di riferimento Rif 5 ovvero quello relativo al geofono di riferimento posizionato ad un metro dallo shot.

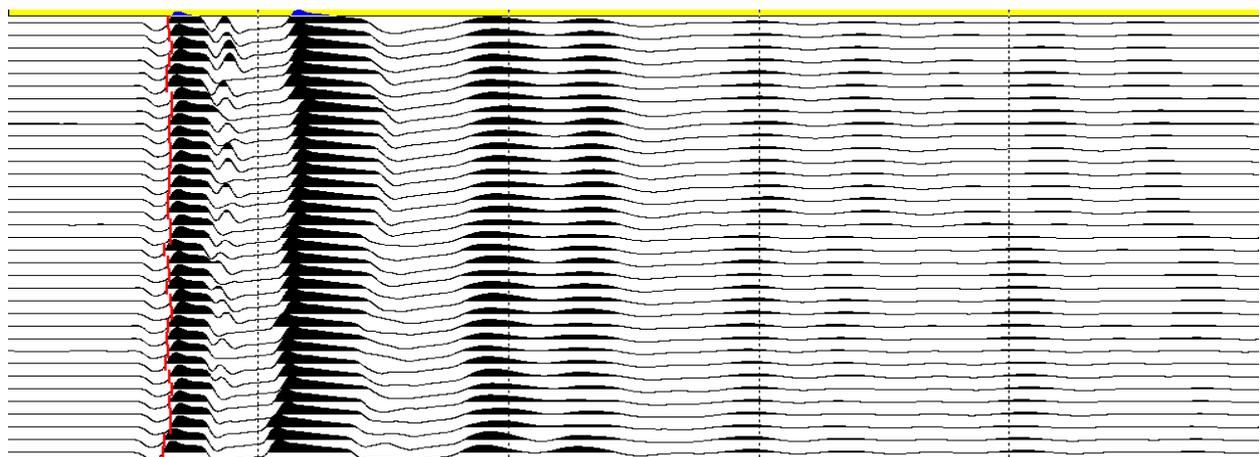


Figura 7.5 – Esempio Gather del canale di riferimento n° 5

Bisogna notare che gli arrivi a questo canale fisso sul terreno (segnati in rosso) devono essere simili per tutte le energizzazioni.

Piccole differenze di tempo sono da imputare a differenze di partenza (trigger) del segnale per cui si deve poi procedere alle necessarie correzioni.

Analoga procedura si attua per le correzioni del tempo "0" relativo alle onde di taglio.

Applicate le correzioni di tempo "0" al sismogramma relativo a tutte le energizzazioni effettuate sul canale 1 V (relativo al geofono verticale) e si ottiene il sismogramma che viene utilizzato per effettuare le letture del primo arrivo.

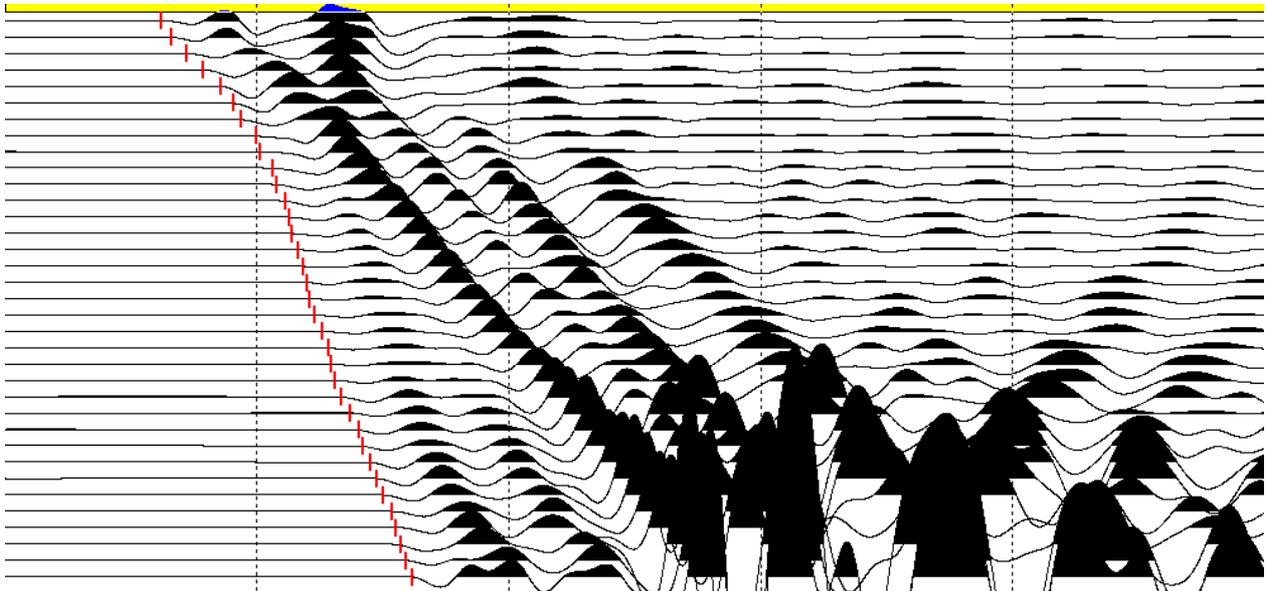


Figura 7.6 – Esempio: Gather delle onde di compressione - canale 1 (V1)

Stessa procedura si applica al sismogramma relativo al canale H1 e H2 e su tali sismogrammi si realizzano le letture dei primi arrivi, l'immagine seguente fa riferimento al canale H1.

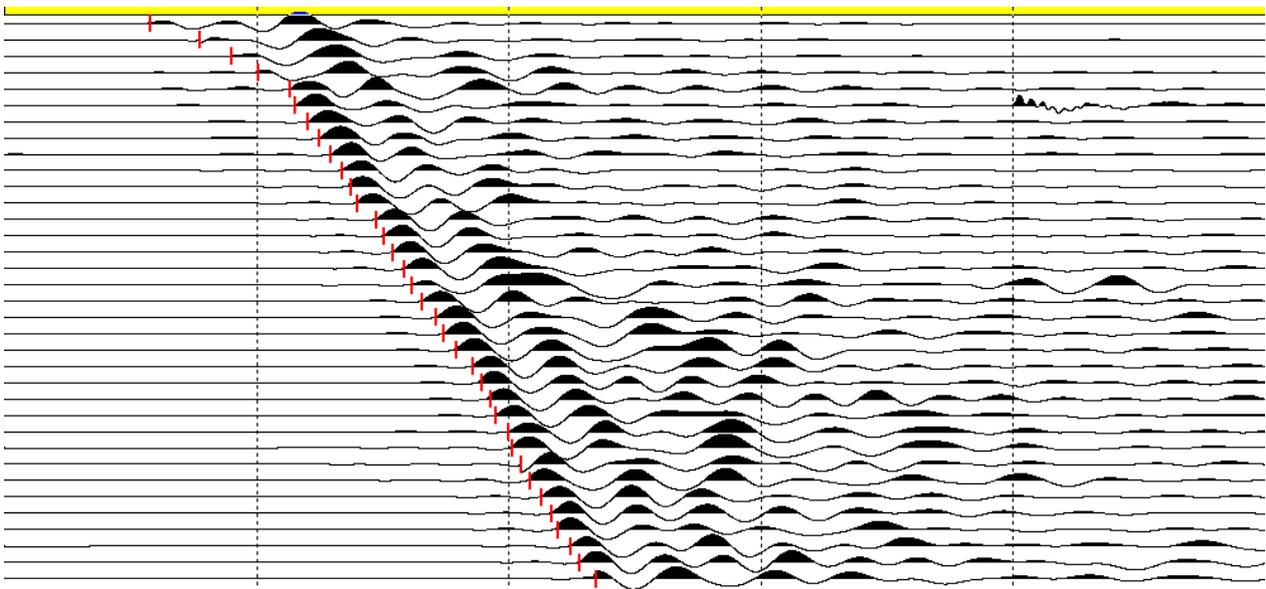


Figura 7.7 - Esempio: Gather delle onde di taglio - canale 2 (H1)

## 7.2. Elaborazione dati

Il procedimento elaborativo dei dati down hole si è realizzato secondo due modalità:

1. progressiva tomografica;
2. differenziale.

### Elaborazione Progressiva tomografica

Questo consiste nell'interpretazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P e di taglio S. Per l'analisi di questi dati vengono utilizzati programmi di utilità originali della Progeo.

Il procedimento di calcolo si sviluppa secondo i seguenti ulteriori step.

a) Definizione della geometria della ricerca

- coordinate del sensore in pozzo (2D o 3D),
- posizionamento punto di shot.

b) Input tempi di arrivo onde P e onde S

Realizzazione dei file dei dati relativi ai tempi di arrivo delle onde P ed S associate alle coordinate spaziali delle stazioni di misura.

c) Input modello di velocità

In base alle conoscenze stratigrafiche e sismiche vengono definiti degli intervalli a velocità costante lungo l'asse del foro in funzione dei quali viene realizzato il ray tracing (step n).

d) Ray tracing

Vengono create le traiettorie dei raggi sismici in base ai modelli di velocità definiti allo step m).

Per il calcolo si sono utilizzati i seguenti parametri:

- anisotropia ellittica (massima velocità in senso verticale)
- tolleranza lineare (.05%)
- tolleranza angolare (1")
- numero di iterazioni (500)
- multi pathing (on)
- plane layer (on)

e) Definizione dei parametri di calcolo

Il programma utilizzato necessita, per il calcolo della sezione in profondità lungo la verticale del foro e in funzione dei valori di velocità, dei seguenti parametri di calcolo:

- definizione tipo di griglia (1 cella ogni m)
- tipo di anisotropia del mezzo investigato (verticale)
- numero di iterazioni (500)
- algoritmo di calcolo (S.I.R.T.)

L'algoritmo S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) crea un'immagine di velocità apprezzabile, sufficientemente stabile e che converge velocemente verso i valori sperimentali.

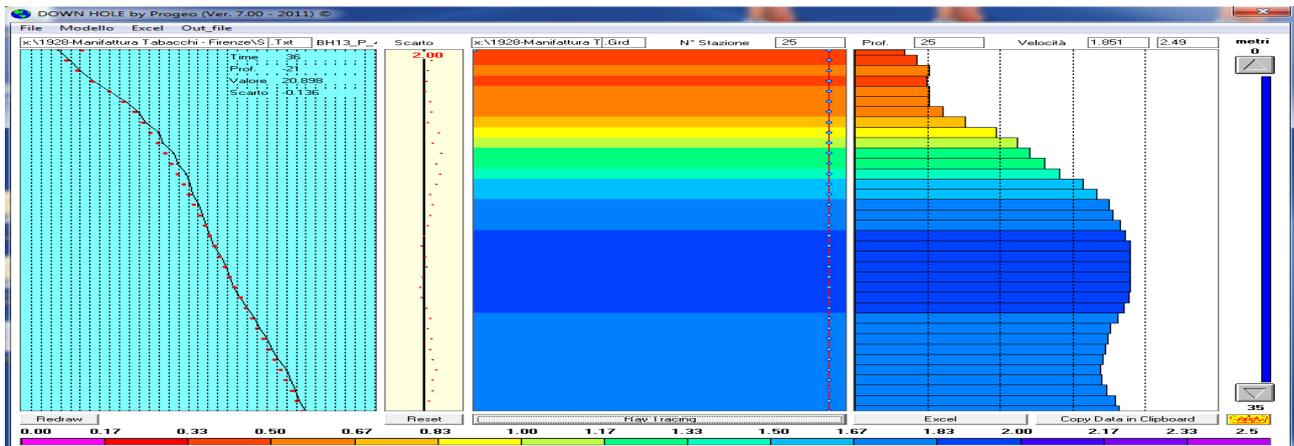


Figura 7.8 - Esempio: Immagine di uno step del processing del Down Hole Tomografico

**f) Analisi delle risultanze**

Queste vengono inizialmente valutate dal punto di vista statistico attraverso gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati rispetto a quelli definiti in input. In base a tali valori possono essere modificati i parametri di calcolo per una migliore ottimizzazione. Si passa in seguito all'analisi delle velocità intergeofoniche relative alle onde P ed S dalla quale si ricava un modello di velocità più adeguato (a tale modello si farà riferimento in seguito come velocità intervallari). Il calcolo riprende perciò dallo step c) con l'input del nuovo modello di velocità e si procede fino a quando gli scarti e le varianze divengono minimi.

**g) Predisposizione tabelle e grafici dei dati**

I dati calcolati al punto e) vengono riportati in un foglio elettronico appositamente predisposto allo scopo di calcolare i moduli elastici relativi e graficizzare le risultanze.

**r) Conversione in immagini computerizzate**

La prospezione down hole con elaborazione tomografica si concretizza nella definizione di celle analitiche elementari; per ogni cella il valore della velocità tomografica rappresenta il valore medio risultante dei valori differenziali relativi a tutti i tragitti elementari dei raggi di investigazione che attraversano la cella considerata. La determinazione delle celle elementari che definiscono la rappresentazione tomografica deriva dalle variazioni dei parametri cinematici  $V_p$  e  $V_s$  in funzione del grado di consistenza differenziata del materiale.

## 8. INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI

### 8.1. Generalità

L'elasticità di un corpo dipende soprattutto da tre fattori: isotropia, omogeneità e continuità.

Per isotropia si intende uguaglianza delle proprietà vettoriali di un corpo in tutte le direzioni; per omogeneità si intende la distribuzione spaziale uniforme dei vari costituenti del materiale nella sua struttura interna; per continuità si intende l'assenza di interruzioni nei legami che uniscono tra loro i vari costituenti del materiale.

Da ciò si deduce che l'elasticità non può essere che una schematizzazione teorica perché nessun corpo reale può rispondere ai requisiti richiesti di isotropia, omogeneità e continuità.

Nei corpi reali ogni deformazione provoca nell'interno un assetamento strutturale che è irreversibile, per cui non ci può essere un recupero istantaneo e totale della deformazione al cessare della sollecitazione.

Tuttavia questa schematizzazione teorica può avere una sua validità reale se considerata entro certi limiti di intensità e durata dell'applicazione della sollecitazione.

Nel campo delle indagini sismiche con generazione di onde p ed s tutti i materiali rientrano nel campo delle deformazioni elastiche essendo sia l'intensità della forza applicata ed il tempo in cui questa agisce ridotta ad alcuni millisecondi.

Le onde sismiche si propagano nell'interno della terra con velocità, frequenza e ampiezza che dipendono dalle proprietà elastiche delle rocce.

### 8.2. Principi sulla elasticità

Vengono qui di seguito richiamati alcuni principi sulla elasticità per comprendere le relazioni che legano le velocità delle onde sismiche alle caratteristiche elastiche dei materiali.

Si definisce come *sforzo*  $S$  il rapporto tra la forza applicata ad una piccola superficie e l'area di tale superficie.

Se la forza viene applicata normalmente all'area lo sforzo è di *trazione* o di *compressione* se in direzione opposta.

Quando invece la forza è parallela all'area lo sforzo è *tangenziale* o di *taglio*.

Lo sforzo di compressione provoca un accorciamento del corpo, quello di trazione un allungamento e quello di taglio una deformazione angolare.

La *deformazione longitudinale* ( $\epsilon_i$ ) è il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo.

L'angolo di cui ruota il corpo in seguito ad uno sforzo di taglio è la *deformazione tangenziale* ( $\epsilon_o$ ).

Per piccole deformazioni, lo sforzo longitudinale è proporzionale alla deformazione  $\epsilon_i$ , e la costante di proporzionalità è il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale*.

Lo stesso dicasi per lo sforzo di taglio la cui deformazione tangenziale è proporzionale al *Modulo di Taglio* o di *Rigidità*.

Se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti tre gli assi cartesiani) applicando una pressione idrostatica uniforme si avranno componenti dello sforzo uguali e la deformazione sarà rappresentata da una variazione di volume indicata numericamente dal coefficiente di compressibilità o, inversamente, dal *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume*.

Da un punto di vista bidimensionale, uno sforzo di trazione o compressione, causa sia un allungamento o raccorciamento e contemporaneamente una contrazione o dilatazione; la costante che lega tali variazioni è il *coefficiente di Poisson*.

### 8.3. Parametri elastici

Per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici ricavati dalle prove geomeccaniche, può essere opportuno fornire al Progettista altri parametri (oltre ai singoli valori di velocità sismica) contemporaneamente alla rilevazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche ( $V_p$  e  $V_s$ ) nel sottosuolo.

Si tratta dei Moduli elastici dinamici del terreno i quali possono contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte del manufatto sul terreno di fondazione.

Attraverso la determinazione sia delle velocità delle onde di compressione sia delle velocità delle onde di taglio è possibile ricavare vari parametri (per ulteriori dettagli si veda, tra i più recenti, "The rock physics handbook – tools for seismic analysis in porous media" di G. Mavko, T. Mukerji e J. Dvorkin, Cambridge University Press, UK, pp. 1-329, 1998);

- Coefficiente di Poisson ( $\nu$ )
- Peso di volume ( $\gamma_{din}$ )
- Modulo di Elasticità dinamico ( $E_{din}$ )
- Modulo di Taglio dinamico ( $G_{din}$ )
- Modulo di Compressibilità dinamico ( $K_{din}$ )

Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri elastici, in funzione di  $V_p$ ,  $V_s$  sono le seguenti:

Coefficiente di Poisson 
$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

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

Densità geofisica 
$$\delta_{din} = \frac{\gamma}{g} \quad (g = 9.8 - \text{accelerazione di gravità m/sec})$$

Modulo di Elasticità 
$$E_{din} = V_p^2 \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1-\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (E_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Modulo di Taglio 
$$G_{din} = \delta_{din} \cdot V_s^2 \quad (G_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Modulo di Compressibilità 
$$K_{din} = \frac{E_{din}}{3 \cdot (1-2 \cdot \nu)} \quad (K_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Per gli scopi dell'indagine uno dei parametri più significativi per identificare le possibili deformazioni dell'ammasso può essere rappresentato dal Modulo di Taglio dinamico; il *Modulo di Taglio* o di *Rigidità*  $G_{din}$  definisce la *deformazione tangenziale* di un corpo, intesa come l'angolo di cui ruota il corpo stesso in seguito ad uno sforzo di taglio.

Anche il *coefficiente di Poisson* può ben identificare lo stato di consistenza e deformabilità del materiale d'ammasso; tale parametro può presentare un range di variazione compreso tra un massimo di 0.5 ed un minimo di 0.

Le indicazioni seguenti fanno riferimento a valori caratteristici del parametro sempre consci che il sistema geologico non è mai né isotropo né perfettamente elastico oltre ad essere multifase (solido, acqua e gas).

Valori di Poisson di 0.5 sono caratteristici di materiali che si deformano senza cambiamenti di volume (es. acqua), valori leggermente inferiori (0.47 - 0.498) sono tipici di argille o materiali molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali da poco consolidati a sovraconsolidati; per le rocce si presentano range di variazioni molto ampi collegati in particolare sia al grado di fratturazione sia alla presenza di cavità, stratificazioni e litologie e comunque tra (0.46 e 0.20).

E' importante sottolineare che i moduli dinamici risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

## 9. PROSPEZIONE ELETTRICA TOMOGRAFICA

Le sezioni elettrotomografiche sono state realizzate utilizzando una spaziatura tra gli elettrodi variabile da 1 m a 3 m.

La profondità investigata risulta direttamente proporzionale alla lunghezza dello stendimento con un rapporto circa pari a 1/5-1/6. La geometria di investigazione in profondità delle sezioni elettriche tomografiche è assimilabile ad un trapezio rovesciato dove la massima profondità sarà nella parte centrale dello stendimento sino alla perdita di informazioni alle due estremità.

### 9.1. Generalità

Il metodo geoelettrico si basa sulla misura tra due elettrodi (detti convenzionalmente MN) della differenza di potenziale  $\Delta V$  connessa alla distribuzione nel sottosuolo di una corrente elettrica  $I$  immessa in una diversa coppia di elettrodi, detti AB. Si dimostra che si ottiene un valore di resistività apparente:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

che è funzione, oltre che della posizione reciproca dei 4 elettrodi anzidetti (dipendenza contenuta nel parametro  $K$ , detto fattore geometrico), della distribuzione della resistività elettrica delle rocce nel sottosuolo interessato dalla propagazione della corrente  $I$ .

I dati così acquisiti devono essere “interpretati” per ottenere, dall’insieme dei valori di  $\rho_a$  (resistività apparente), un modello dell’effettiva distribuzione delle resistività elettriche reali nel sottosuolo indagato.

Da questa distribuzione, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, il modello geofisico viene trasformato in modello geolitologico.

La tomografia di resistività elettrica di superficie ha come obiettivo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo effettuando delle misure di potenziale elettrico in seguito all’immissione di corrente elettrica nel sottosuolo.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di Ohm, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$J = \sigma E$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica [Siemens/m] del mezzo,  $E$  è l'intensità del campo elettrico applicato (V/m),  $J$  è la densità di corrente (A/m<sup>2</sup>).

Nelle indagini geoelettriche si è soliti esprimere anziché la conducibilità, la resistività  $\rho = 1/\sigma$  [ $\Omega$ m]. Nella pratica ciò che viene misurato è la differenza di potenziale tra due punti della superficie (schema sottostante, figura 6).

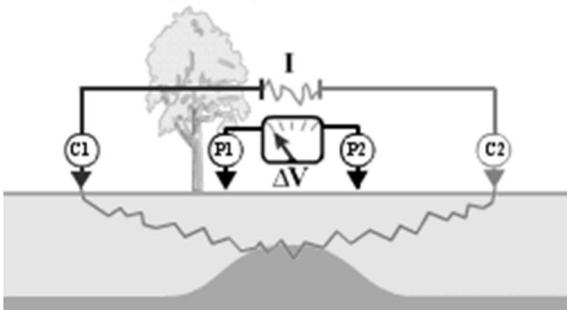


Figura 10.1 - Schema di base usato per le indagini elettriche: gli elettrodi C1 e C2 sono le sorgenti di corrente elettrica mentre P1 e P2 sono gli elettrodi di misura del potenziale

Nel caso di un semispazio omogeneo la differenza di potenziale misurata agli elettrodi P1 e P2 è pari a:

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)$$

Le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali e quindi eterogenei, la resistività inoltre varia in uno spazio tridimensionale per cui dalla corrente I e dalla differenza di potenziale si calcola un valore di resistività apparente:

$$\rho_a = k \frac{\Delta\Phi}{I}$$

dove:

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)}$$

è un fattore geometrico che dipende dalla configurazione degli elettrodi.

Gli strumenti di misura, i georesistivimetri, rilevano un valore di resistenza ( $R = \Delta\Phi/I$ ), per cui la resistività apparente si calcola come:

$$\rho_a = kR$$

Tale resistività è un valore appunto “apparente” che corrisponde cioè alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettrodica.

L'esecuzione di misure di resistività ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività.

Se invece si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali.

La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta pseudosezione.

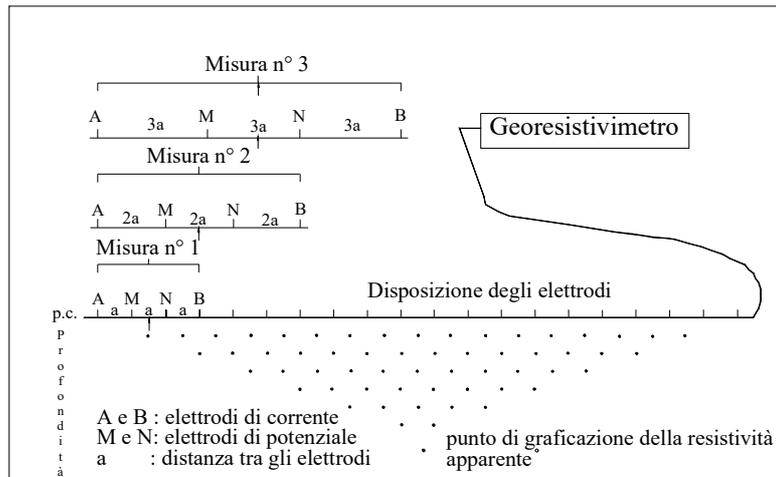
Per effettuare le misure ERT si utilizzano un certo numero di elettrodi (48-96 nelle configurazioni più recenti) disposti lungo un profilo, con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste.

Questi sono collegati con un cavo multipolare al georesistivimetro, che consiste in un'unità switching che può essere esterna o interna, comandata da un microprocessore.

Tale unità ha la funzione di selezionare, per ogni lettura, gli elettrodi attivi (di corrente e di tensione).

La sequenza delle misure, così come il tipo di array, l'intensità di corrente e la durata delle acquisizioni, sono parametri di input usualmente impostati dall'utente.

Il formato di uscita della strumentazione normalmente permette di ottenere per ogni misura, la corrente immessa, la differenza di potenziale, la configurazione elettrodica, la resistività apparente ed una stima statistica sulla qualità delle misure.



*Sistema di acquisizione dei dati utilizzando il dispositivo di WENNER*

La metodologia di misura multielettrodo (messa a punto da Barker, 1981) permette di disporre sul terreno non 4 elettrodi per volta ma un numero superiore, generalmente disposti lungo un profilo, con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste.

Agli elettrodi viene alternativamente inviata la corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza preprogrammata ed automatica.

Si ottiene così una pseudosezione di resistività apparente che, con un algoritmo di inversione, viene convertita in resistività reale.

La distribuzione della resistività reale sulla sezione interpretativa copre solo una parte della sezione (di forma trapezoidale o triangolare, a seconda che si usi il dispositivo di acquisizione di Wenner o dipolo-dipolo), mentre le estremità della sezione (non essendo coperte dai percorsi delle linee elettriche) non forniscono informazioni utili.

Le configurazioni elettrodiche più utilizzate nelle indagini geofisiche di resistività sono sicuramente la Wenner, la Dipolo-Dipolo e la Wenner-Schlumberger.

Le configurazioni differiscono principalmente in relazione a potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale.

La configurazione Wenner presenta un'alta risoluzione verticale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni orizzontali, una buona profondità di investigazione, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale, essendo quest'ultima inversamente proporzionale a K.

La configurazione Dipolo-Dipolo, presenta invece una alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali (variazioni laterali di resistività, cavità ecc.), profondità di investigazione e ampiezza del segnale misurato minori rispetto al Wenner, ma con una maggiore copertura orizzontale.

Il dispositivo Wenner-Schlumberger rappresenta una soluzione ibrida ed è quello più utilizzato in geofisica ambientale poiché costituisce il giusto compromesso tra le caratteristiche sopra descritte.

Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente, la distribuzione nel sottosuolo delle resistività reali, è necessario risolvere un "problema inverso".

In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l'assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla.

Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai "parametri del modello" che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati.

Nel caso della tomografia elettrica, si vuole stimare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo a partire da misure effettuate in superficie.

Il software utilizzato nell'inversione (ERTLAB64©) implementa un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività reale.

Dal modello geofisico, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geolitologico.

## 9.2. Operazioni di campagna

La sequenza di misura ha previsto una configurazione Dipolo-Dipolo e mista Wenner e Schlumberger con tempo di acquisizione pari a 0.25 secondi e voltaggio massimo di 400 V con un dispositivo combinato di acquisizione dati (Wenner e Schlumberger) su 10 livelli.

Per ogni misura si è definita una ripetizione minima pari a 2 ed una massima pari a 4.

L'errore massimo è stato fissato pari al 2% (differenza tra le misure ripetute).

### 9.2.1 Sorgente di energia ed apparati di ricezione

Agli elettrodi viene alternativamente inviata la corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza preprogrammata ed automatica.

Gli elettrodi sono costituiti da paletti in acciaio collegati tra loro da un cavo multiconduttore.

Nel caso specifico, lo strumento utilizzato consente il collegamento simultaneo di 4 cavi con 24 connettori in modo da consentire l'utilizzo simultaneo di un massimo di 96 conduttori indipendenti (nel caso in esame sono stati tutti utilizzati); sono state utilizzate prese esterne per l'attacco agli elettrodi disponibili in funzione del dettaglio e della profondità d'indagine.

### 9.2.2 Acquisizione dati

Per l'indagine in oggetto è stato utilizzato un georesistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments, Orlèans Cedex, Francia) a 96 elettrodi, collegato a cavi multielettrodo a 24 uscite che possiede caratteristiche di tensione massima di 600 V e potenza di 175 W (con alimentazione da batteria esterna da 70 A/h).

Lo strumento di acquisizione dati è costituito da un georesistivimetro digitale con unità di controllo e gestione multielettrodo, in grado di eseguire via software la misura e la memorizzazione della resistenza di contatto degli elettrodi e la misura, la memorizzazione e l'azzeramento dei potenziali spontanei.



*Georesistivimetro IRIS Syscal Pro a 96 canali*

La risoluzione di tali misure è di 30 nV, mentre la possibilità di memorizzazione di tutti i dati relativi all'acquisizione è di alcune migliaia di misure costituite ciascuna dai valori di resistività, differenza di potenziale (con verifica della qualità del dato tramite il calcolo della deviazione standard), intensità di corrente (con iniezione di corrente in quantità, periodo e sequenza opportune) e geometria degli elettrodi.

#### Cenni sulle caratteristiche elettriche dei materiali

La resistività dei terreni è controllata principalmente dai seguenti fattori:

1. grado di saturazione dei pori;
2. porosità;
3. salinità del fluido presente nei pori;
4. temperatura;
5. presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.);
6. presenza di argilla.

La relazione empirica (proposta da Archie) è valida per suoli avente scarsa componente argillosa (sabbie, ghiaie):

$$\rho_s = \rho_f a \phi^{-n} S^{-m}$$

dove:

- $\rho_s$  resistività ( $\Omega \cdot m$ ) del suolo parzialmente saturo di fluido,
- $\rho_f$  resistività ( $\Omega \cdot m$ ) del fluido presente nei pori,
- $S$  frazione del volume di pori occupata dal fluido,
- $m$  coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2),
- $a$  costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia : 0.62),
- $n$  coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia :2.15),
- $\phi$  porosità del suolo.

La resistività del fluido  $\rho_f$  è calcolabile qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es.  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ , ecc.) utilizzando la formula:

$$\rho_f = 0.0123 + 10 (3.562 - 0.955 \log 10C)$$

dove  $C$  è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

I fluidi altamente salini, come ad esempio il percolato che si forma nelle discariche di rifiuti solidi urbani, possono rendere terreni naturalmente resistivi (sabbie, ghiaie) in terreni a comportamento conduttivo.

I cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di argilla (e, in minor misura, di limo) offrono cammini addizionali per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti.

Esistono relazioni semi-empiriche valide per il calcolo della resistività di sedimenti con componente argillosa non trascurabile, che non riporteremo in questo contesto.

Si ricordi soltanto nel seguito che terreni limoso-argillosi risultano sempre più conduttivi rispetto a quelli sabbiosi e ghiaiosi, ovviamente a parità di saturazione e a parità di fluido presente nei pori.

Tipicamente le resistività possono scendere, in corrispondenza delle zone più argillose, fino a valori inferiori a 15-20  $\Omega \cdot m$ , anche nel caso di terreno relativamente secco.

Per i materiali più lapidei le resistività tendono inevitabilmente ad incrementare raggiungendo valori anche di varie migliaia di Ohm ma nella maggior parte dei casi le rocce locali, costituite principalmente da marne con gessi e calcari, giungono attorno ad un massimo di 100-200 Ohm.

Nei casi in cui si rilevino valori più elevati si può essere in un contesto anomalo per la presenza di cavità per dissoluzione dei gessi dove si può giungere anche a valori superiori a 200-300 Ohm.

E' da considerare che la presenza di cavità rende infinita la resistività, ovviamente nel settore dove questa è presente, ma si deve considerare che la misura elettrica considera anche i materiali presenti tra la superficie e la cavità stessa per cui non si avranno mai valori infiniti ma più elevati del contesto in cui questa si trova.

Per questo motivo, per la ricerca di cavità, si devono valutare i parametri dell'ammasso in cui questa si localizza e considerare "anomali" i valori decisamente superiori alla media per valore ed anche perché il processing tende poi a confinare.

Il processing elettrico è un processo iterativo che può essere infinito ma che viene sospeso dal tecnico quando l'immagine tende ad essere sufficientemente definita per fornire una corretta e plausibile interpretazione.

Nella tabella seguente si riportano a semplice titolo indicativo i range di resistività elettrica di alcuni terreni e rocce.

Materiale	Resistività ( $\Omega.m$ )	Materiale	Resistività ( $\Omega.m$ )
Acqua dolce	10-100	Dolomie	500 - 10000
Acqua salata	0.2	Calcare, gesso	500 - 3500
Suolo di copertura	10 - 200	Gneiss e graniti sani	2000 - 10000
Argille	1-50	Gneiss e graniti alterati	100 - 1000
Argille sabbiose - silt	25 - 100	Marne	10-50
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400	Piroclastiti	50-600
Sabbie con argille	50 – 300	Rocce ignee	100 - 10000
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000	Arenarie	200 - 5000
Ghiaia e sabbia secca	1000 - 10000	Tufi	150 - 1000
Ghiaia e sabbia sature d'acqua dolce	50-500		
Ghiaia e sabbia sature d'acqua salata	2-10		

*Valori caratteristici di resistività elettrica da Ulriksen (1982), Telford (1990), Reynolds (1997).*

### 9.3. Elaborazione dati

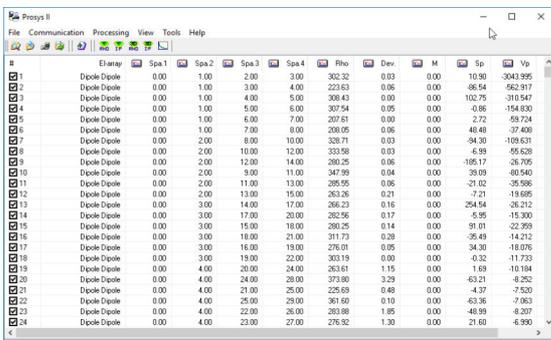
L'aspetto elaborativo della tomografia elettrica consiste nell'inversione 2D dei profili elettrici di superficie ottenute tramite l'array di misure secondo la metodica usata (Wenner, dipolo-dipolo ecc.) definiti in funzione sia degli obiettivi della ricerca sia della "stabilità" del campo elettrico locale. L'elaborazione dei dati è stata sviluppata secondo due fasi successive a cui precede una fase di filtraggio dei dati per ridurre il "rumore" ambientale".

La prima fase è consistita nella ricostruzione di "pseudosezioni" di resistività tramite l'utilizzo di software di contouring (Surfer della Golden Software) e in un preliminare filtraggio delle misure con l'utilizzo del software Prosys II (specialmente nel caso disturbi alle misure per presenza di sottoservizi, solette in cemento armato, ecc. Nella seconda fase si è proceduto al calcolo dei valori di resistività vera tramite inversione bidimensionale e sviluppo di un adeguato modello di distribuzione della resistività del sottosuolo. Il software impiegati (ERTLAB e RES2DINV) utilizzano il metodo degli elementi finiti (FEM) in due dimensioni per modellare la risposta elettrica del sottosuolo ed applicano l'eventuale correzione topografica.

Dato in input la geometria della linea di acquisizione ed il file di dati relativo alle misure di resistività apparente il software definisce una maglia discreta di elementi trapezoidali per permettere la compensazione di qualsiasi tipo di dislivello tra le posizioni elettrodiche. La procedura di calcolo iterativo di inversione, dei parametri di resistività apparente in resistività reale, minimizza l'errore tra i dati di campo e quelli simulati mediante il FEM secondo la metodica proposta da Sasaki (1994) ed altri.

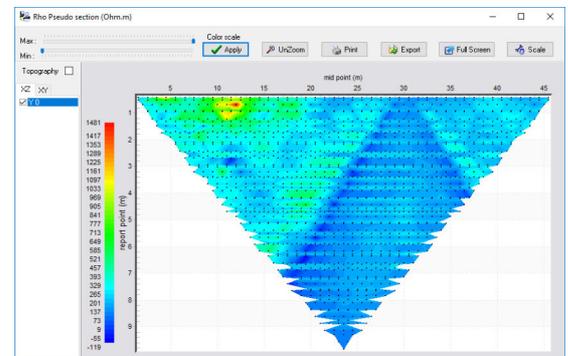
La convergenza dell'algoritmo è ottenuta con la stima automatica di un parametro di stabilizzazione (metodo dei coefficienti reciproci generalizzati) mentre la riduzione del "rumore di fondo" viene realizzata mediante regressione lineare iterativa valutando le varianze statistiche di ciascuna misura. La rappresentazione tomografica finale della sezione di resistività reale avviene sempre mediante software di contouring (Surfer) con il quale i valori dei parametri elettrici vengono espressi mediante contour line delle iso-resistive e falsi colori.

Le variazioni di resistività, per rendere confrontabili i risultati delle diverse sezioni, sono state rappresentate secondo una scala di colori uniforme per tutte le sezioni.

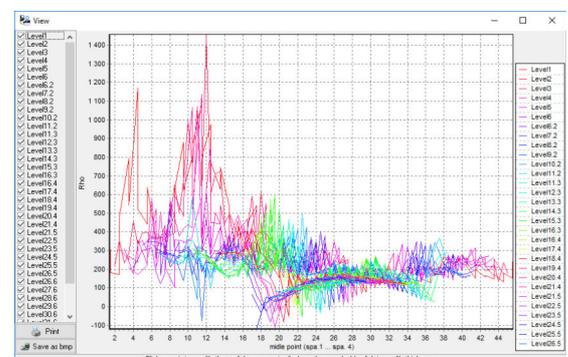


#	Elarray	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4	Rho	Dev	M	Sp	Vp
01	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	2.00	3.00	302.32	0.03	0.00	10.90	-3043.999
02	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	3.00	4.00	223.63	0.06	0.00	68.54	-562.917
03	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	4.00	5.00	308.43	0.00	0.00	102.75	-310.547
04	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	5.00	6.00	307.54	0.05	0.00	0.86	-154.830
05	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	6.00	7.00	207.91	0.00	0.00	2.72	-59.724
06	Dipolo Dipolo	0.00	1.00	7.00	8.00	208.05	0.06	0.00	48.48	-37.408
07	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	8.00	10.00	328.71	0.03	0.00	-54.30	-109.631
08	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	10.00	12.00	333.98	0.03	0.00	6.99	-55.628
09	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	12.00	14.00	280.25	0.06	0.00	-185.17	-26.705
10	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	9.00	11.00	347.99	0.04	0.00	39.09	80.540
11	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	11.00	13.00	285.95	0.06	0.00	-21.02	-35.996
12	Dipolo Dipolo	0.00	2.00	13.00	15.00	263.26	0.21	0.00	7.21	-19.685
13	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	14.00	17.00	266.23	0.16	0.00	254.54	-26.212
14	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	17.00	20.00	282.56	0.17	0.00	5.95	-15.300
15	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	15.00	18.00	280.25	0.14	0.00	91.01	-22.399
16	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	18.00	21.00	311.73	0.28	0.00	-35.49	-14.212
17	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	16.00	19.00	276.91	0.05	0.00	34.30	-18.076
18	Dipolo Dipolo	0.00	3.00	19.00	22.00	303.19	0.00	0.00	0.32	-11.733
19	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	20.00	24.00	263.61	1.15	0.00	1.69	-18.184
20	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	24.00	28.00	373.80	2.29	0.00	63.21	-6.292
21	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	21.00	25.00	225.69	0.48	0.00	-4.37	-7.520
22	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	25.00	29.00	381.60	1.10	0.00	63.36	-7.063
23	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	22.00	26.00	303.99	1.85	0.00	-49.99	-6.207
24	Dipolo Dipolo	0.00	4.00	23.00	27.00	276.92	0.30	0.00	21.60	-6.990

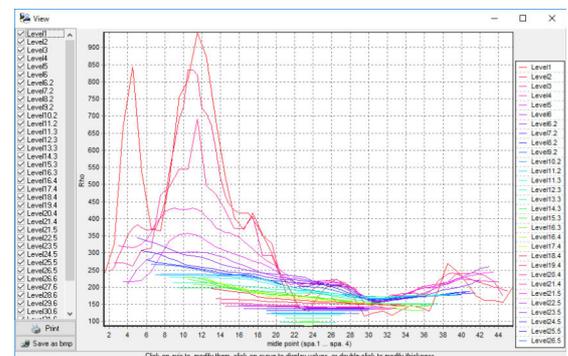
Dati raw



Pseudo sezione prefiltering



Log dati prefiltering



Log dati dopo il filtraggio

#### 9.4. Comportamento della resistività nei materiali litologici

La resistività elettrica delle rocce è controllata essenzialmente dalla conduzione elettrica di tipo elettrolitico attraverso i pori, le fratture, le faglie e le zone di debolezza strutturale.

La conduzione elettrica nelle soluzioni elettrolitiche nelle formazioni rocciose avviene essenzialmente attraverso i pori interconnessi, lungo le superfici dei grani solidi, attraverso le fratture e le faglie; ovviamente l'apporto alla conduzione elettrica dei minerali silicati è praticamente trascurabile.

In generale per una roccia con una determinata porosità efficace, tanto maggiore è il contenuto di sali disciolti nell'acqua, tanto più elevata è la conducibilità e minore la resistività (è un rapporto inversamente proporzionale).

Gli elementi principali che governano la resistività elettrica dei mezzi rocciosi sono pertanto riassumibili in:

- 1) le condizioni di porosità, saturazione in acqua e contenuto salino;
- 2) l'incremento della temperatura abbassa la viscosità delle acque e aumenta la mobilità ionica, con il risultato che la resistività elettrica si abbassa;
- 3) formazioni calcaree con grani omogenei presentano numerosi spazi intergranulari vuoti e che, se saturi, danno bassi valori di resistività; viceversa formazioni calcaree con grani eterogenei presentano una porosità efficace ridotta e quindi bassi valori di resistività;
- 4) fenomeni di dissoluzione lungo le fratture nei calcari e nelle arenarie aumentano la porosità e abbassano la resistività elettrica; mentre la precipitazione di alcuni minerali occlude i pori e tende ad aumentare i valori di resistività;
- 5) una roccia granitoidale consente il passaggio della corrente elettrica nelle microfratture e lungo l'interfaccia tra i grani minerali; la porosità è tipicamente molto bassa e pertanto i valori di resistività sono molto elevati mentre le formazioni di basalto presentano molte microcavità o pori tra di loro non interconnessi; pertanto in generale un basalto anche con elevata porosità può presentare elevati valori di resistività.

In generale i processi geologici riducono i valori di resistività della roccia, salvo alcune eccezioni. L'alterazione superficiale o idrotermale di rocce granitoidi diminuisce i valori di resistività; la fratturazione di rocce basaltiche diminuisce la resistività di diversi ordini di grandezza; fenomeni di microfratturazione, fratture e faglie attive, fenomeni di dissoluzione aumentano la permeabilità dei fluidi e pertanto abbassano la resistività.

La precipitazione di rocce carbonatiche e di silicati riduce invece la porosità e la permeabilità dei fluidi e pertanto aumenta la resistività.

Fenomeni di compattazione e cementazione e fenomeni metamorfici provocano solitamente effetti di aumento dei valori di resistività.

Infine l'intrusione salina provoca un aumento degli ioni in soluzione il che equivale ad una riduzione della resistività.

Il ruolo delle particelle di argilla è invece particolarmente importante, in quanto esse agiscono solitamente come un percorso di conduzione elettrica, dovuta a fenomeni definiti di doppio strato o di scambio di cationi, separata dalla normale conduzione di tipo elettrolitico.

La resistenza totale di questo percorso elettrico aggiuntivo è normalmente molto bassa; l'effetto di particelle di argilla disseminate sulla resistività complessiva delle rocce aumenta di importanza al diminuire della conducibilità idraulica attraverso i pori.

Le alterazioni di tipo idrotermale, specialmente nelle rocce silicee, trasformano in feldspati in caolinite, montmorillonite e altri minerali argillosi. Nelle rocce basiche, le trasformazioni in minerali quali clorite e serpentinite possono provocare variazioni della resistività elettrica.

In ragione delle diverse motivazioni sopra accennate, i rilievi elettrici non sono in grado di caratterizzare in modo univoco un determinato litotipo o distinguere tra differenti litotipi.

Viceversa, la caratterizzazione elettrica di ammassi rocciosi consente di ottenere informazioni di notevole affidabilità circa le condizioni idrogeologiche del sito, la presenza di zone argillificate e l'esistenza di faglie e zone di riempimento di materiale fluido o argilloso.

## 10 CONCLUSIONI

Per la caratterizzazione sismica dei suoli e la ricerca di possibili cavità nel sottosuolo sono state eseguite prospezioni geofisiche nell'area interessata dal "Progetto di Fattibilità Tecnico Economico di 2<sup>a</sup> Fase Bari Nord Santo Spirito-Palese".

La campagna di indagine ha comportato l'esecuzione di indagini geofisiche di tipo: Tomografia Elettrica, Tomografia Sismica a onde di compressione e taglio, sismica a Riflessione a onde di taglio, MASW 2D, Radar e prove in foro Down Hole.

Le indagini eseguite hanno permesso di determinare i seguenti parametri e caratteristiche del terreno:

- **n°12 Tomografie elettriche** con configurazione Dipolo-Dipolo: sezioni elettrotomografiche della resistività del terreno per la definizione di strutture, stratificazione e cavità.
- **n°2 Sismica a Rifrazione**: sezione tomografica ad onde compressione Vp, taglio Vs e conseguenti moduli elastici dinamici (Coefficiente di Poisson, modulo di taglio G, modulo di elasticità E e modulo di compressibilità K).
- **n°2 Sismica a Riflessione**: per la ricerca di possibili cavità.
- **n°2 sezioni Georadar**: per la ricerca di possibili cavità superficiali.
- **n°2 MASW 2D**: onde di taglio Vs per ottenere la Vseq e la ricerca di cavità.
- **n°3 Down Hole** per caratterizzare i terreni con i seguenti parametri: compressione Vp, taglio Vs e conseguenti moduli elastici dinamici (Coefficiente di Poisson, modulo di taglio G, modulo di elasticità E).

Tutte le sezioni sono state oggetto di rilievo GNSS (GPS) differenziale e riportate sulla cartografia a disposizione:

- All.1 Corografia indagini geofisiche;
- All.2a Planimetria TE01 - GA01;
- All.2b Planimetria ERT1 - GA01,  
Sismica Rifrazione L1 - GA01,  
Sismica Riflessione RAD1 - GA01,  
MASW 2D - GA01,  
Radargrammi; - GA01
- All.3 Planimetria TE02;
- All.4a Planimetria TE03;
- All.4b Planimetria ERT2 – TR04,  
Sismica Rifrazione L2 – TR04,  
Sismica Riflessione RAD2 – TR04,  
MASW 2D - TR04,  
Down Hole - TR04  
Radargrammi - TR04;
- All.5 Planimetria TE04;
- All.6 Planimetria TE05;
- All.7 Planimetria TE06;
- All.8 Planimetria TE07;
- All.9 Planimetria TE08;
- All.10 Planimetria TE09;
- All.11 Planimetria TE10;

Le prospezioni geofisiche di tipo **Elettrico tomografico** sono state realizzate circa in asse al progetto della nuova linea ferroviaria come rappresentato nelle relative planimetrie.

Le indagini elettriche tomografiche sono state acquisite con configurazione elettrodica Dipolo-Dipolo che consente di rilevare le variazioni stratigrafiche del terreno sottostante, ma soprattutto è la configurazione più idonea per poter valutare le variazioni verticali riconducibili anche a cavità nella formazione calcarea locale.

La valutazione, attraverso sezioni elettrotomografiche, della possibile presenza di cavità all'interno dell'ammasso calcareo micritico, può essere individuata mediante:

- 1) aree localizzate ad alta resistività. L'eventuale presenza di grandi cavità comporta contrasti di resistività molto marcati (3÷4 volte) rispetto ai valori circostanti. Differenze di minore entità possono invece essere attribuiti a zone maggiormente fratturate o con presenza di carsismo di bassa entità (aree vacuolate);
- 2) presenza di anomalie a bassa resistività possono essere invece riferibili a cavità riempite con materiali fini (limi argillosi) derivanti dal disfacimento dei calcari.

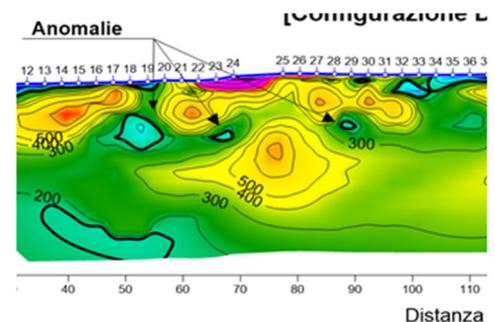
Per le risultanze dell'indagine si rimanda all'analisi visuale delle singole sezioni elettrotomografiche rappresentate nelle figure:

- All.12 Sezioni geoelettrica GA01-TE01 – GA01-TE02: Resistività;
- All.13 Sezioni geoelettrica GA01- ERT L1-: Resistività;
- All.14 Sezioni geoelettrica TR04 – ERT L2: Resistività;
- All.15 Sezioni geoelettrica TR04-TE03 : Resistività;
- All.16 Sezioni geoelettrica TR04-TE04 – TR04-TE05: Resistività;
- All.17 Sezioni geoelettrica GA02-TE06 – TR05-TE07: Resistività;
- All.18 Sezioni geoelettrica GA04-TE08 – GA05-TE10: Resistività;
- All.19 Sezioni geoelettrica GA05-TE09 : Resistività;

Di seguito alcune considerazioni su alcuni particolari rilevati nelle sezioni geoelettriche:

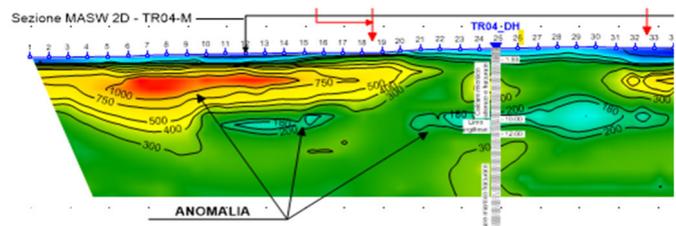
Nella **sezione TE01** (particolare nella figura a lato) sono visibili anisotropie a bassa resistività nel tratto di sezione compreso tra gli elettrodi e17 ed e29 potenzialmente riconducibili a cavità riempite con materiale fine.

Tali possibili cavità corrispondono ad una porzione di sezione elettrotomografica fortemente antropizzata in superficie per la presenza della strada e di altri manufatti. Queste interferenze superficiali potrebbero influenzare i risultati dell'indagine creando leggeri contrasti di resistività anche in profondità.



Nella **sezione TR04\_ERT2** è presente una fascia anomala a bassa resistività di maggiore dimensioni in corrispondenza degli elettrodi da e10 a e16 e da e20 a e35, a profondità di circa 9-12 m dal p. c.

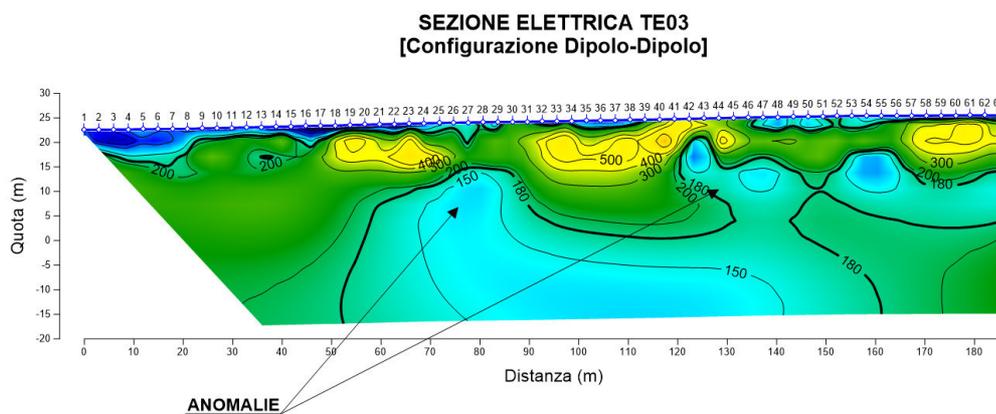
Questa tipologia di anomalia può corrispondere a cavità nel substrato litoide calcareo riempita da materiale sciolto fine di disfacimento. Nel sondaggio meccanico (TR04\_DH) presente al centro della sezione è stata rilevata la presenza di limi e argille tra i 10 e 12 metri di profondità dal piano campagna.



Nella sezione si denota anche una fascia (di colore rosso con resistività sopra i 1000 Ohm\*m) riferibile ad una lente di calcare micritico vacuolato o con fratturazione aperta che determinano un incremento della resistività nell'ammasso.

Nella **sezione TE03** (figura in basso) sono presenti anomalie a bassa resistività di maggiore dimensioni in corrispondenza degli elettrodi da e22 a e31 e tra e41 ed e57a profondità di circa 9-12 m dal p.c. Questa tipologia di anomalia può corrispondere a cavità nel substrato litoide calcareo riempite da materiale sciolto-fine di disfacimento.

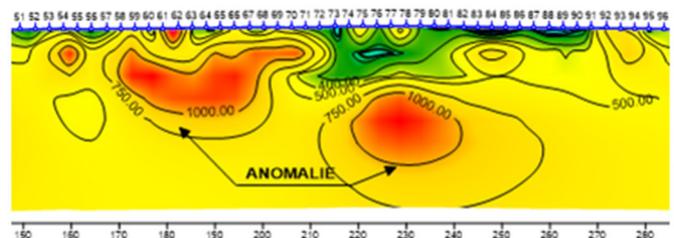
Nel sondaggio meccanico (TR04\_DH) ubicato poco distante dalla sezione è stata rilevata la presenza di limi e argille tra i 10 e 12 metri di profondità.



Le **sezione TE04 e TE06** presentano nel complesso una resistività molto più bassa rispetto alle restanti sezioni acquisite. Tale differenza può coincidere con una maggiore fratturazione nei calcari micritici di questi siti, che riempite di materiali fini di disfacimento del calcare rendono l'ammasso roccioso molto più conduttivo.

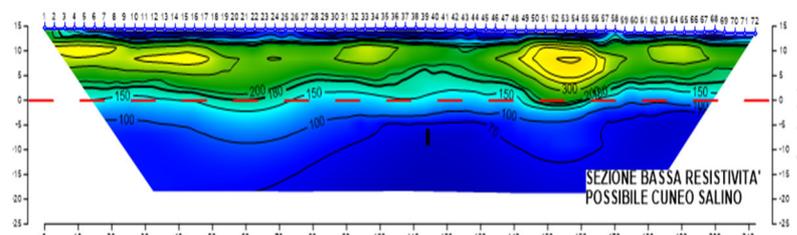
Nella **sezione TE08** è presente una fascia a bassa resistività in quasi tutta la sezione. Questa anomalia si sviluppa da una profondità tra i 2.5 m ai 5 m dal piano campagna e potrebbe corrispondere ad una cavità nel substrato litoide calcareo riempita da materiale sciolto fine di disfacimento.

Nella **sezione TE09** sono presenti anomalie diffuse ad alta resistività (di colore rosso con resistività sopra i 1000 Ohm\*m) che possono essere attribuite a zone calcaree vacuolate.



Nella **sezione TE10** è presente un orizzonte di anomalia a bassa resistività lungo tutta la sezione (linea rossa tratteggiata in figura a lato).

Quest'ultimo si sviluppa in profondità da circa quota 0,0 s.l.m facendo presumere, vista anche la vicinanza della sezione al mare, la presenza del cuneo salino. L'acqua interstiziale salata comporta infatti una forte abbassamento della resistività del terreno.



Le 2 **sezioni sismiche tomografiche ad onde compressione e taglio** sono state posizionate con il centro della sezione in corrispondenza del relativo sondaggio (L1 su GA01 e L2 su TR04) in modo da ottenere una caratterizzazione sismica dei terreni sottostanti e verificare la visibilità delle cavità in termini di velocità delle onde di compressione, taglio e dei relativi parametri elastici.

Le risultanze di tali indagini sono rappresentate nelle relative sezioni tomografiche in termini di velocità onde compressione  $V_p$ , velocità onde taglio  $V_s$ , coefficiente Poisson, modulo elasticità  $E^\circ$ , e modulo di taglio  $G^\circ$ .

Dall'analisi delle sezioni è possibile individuare differenti interfacce geofisiche significative che separano corpi geologici con caratteristiche di deformabilità tali da consentire una loro classificazione in Unità Geofisiche. Si rimanda all'analisi visiva delle singole immagini nelle figure allegate per i dettagli:

- All.20           Sezioni sismica tomografica L1 tavole:  $V_p - E^\circ$ ;
- All.21           Sezioni sismica tomografica L1 tavole:  $V_s - \text{Log } V_s$ ;
- All.22           Sezioni sismica tomografica L1 tavole: Poisson –  $G^\circ$ ;
- All.23           Sezioni sismica tomografica L2 tavole:  $V_p - E^\circ$ ;
- All.24           Sezioni sismica tomografica L2 tavole:  $V_s - \text{Log } V_s$ ;
- All.25           Sezioni sismica tomografica L2 tavole: Poisson –  $G^\circ$ ;

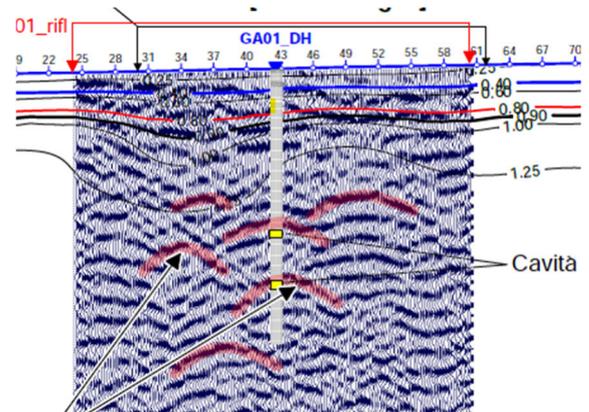
Nelle rispettive sezioni e nella planimetria dell'area (All-2b.) sono rappresentate le sovrapposizioni con le altre tipologie di indagini realizzate in modo da confrontarne i risultati principalmente in termini di visibilità delle cavità sotterranee.

Le 2 **sezioni sismiche a riflessione ad onde di taglio** sono state anch'esse rispettivamente centrate sui due sondaggi dove sono state riscontrate delle cavità. Nel sondaggio GA01 le cavità sono vuote, mentre nel sondaggi TR04 sono riempite di materiale fine derivante dal disfacimento dei calcari.

Le risultanze di tali indagini sono rappresentate nelle relative sezioni in termini di tempo e di velocità delle onde taglio  $V_s$  con sovrapposizione del modello di velocità  $V_s$  della rifrazione tomografica.

Dall'analisi delle sezioni è possibile individuare diverse iperbole significative (vedi figura a fianco) che lasciano supporre la presenza di cavità. Si rimanda all'analisi visuale delle singole immagini nelle figure allegate per i dettagli:

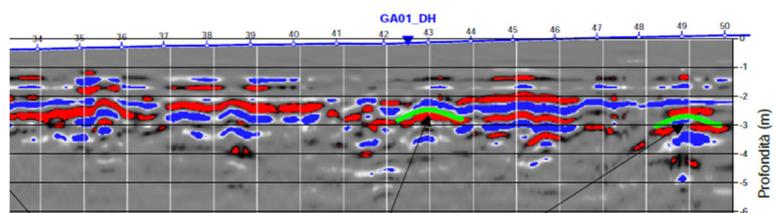
- All.26           Sismica a riflessione GR01;
- All.27           Sismica a riflessione TR04;



Le 2 **sezioni georadar** sono state realizzate centrate sui due sondaggi GA01 e TR04 dove sono state riscontrate delle cavità. In questo modo è possibile valutare la "visibilità" delle cavità più superficiali con questa tipologia di indagine avente una capacità di penetrazione inferiore alle precedenti metodologie.

Dall'analisi delle sezioni è possibile individuare diverse iperbole significative nei primi 5 m di profondità che lasciano supporre la presenza di cavità superficiali. Si rimanda all'analisi visuale delle singole immagini nelle figure allegate per i dettagli:

SEZIONE GEORADAR GA01-RAD



- All.28 Sezione Georadar - GA01
- All.29 Sezione Georadar - TR04

Le **sezioni sismiche MASW 2D** sono state realizzate per una valutazione in termini di velocità delle onde di taglio ( $V_{seq}$ ) del terreno e per valutare se tale tecnica possa individuare delle cavità nella formazione calcarea locale.

Le risultanze di tali indagini sono rappresentate nelle relative sezioni 2D in termini di velocità onde taglio  $V_s$  con il suo rispettivo Log di velocità di taglio equivalente nei primi trenta metri ( $V_{seq}$ ):

- All.30 Sezione masw 2D - GA01\_MASW L1
- All.31 Sezione masw 2D - TR04\_MASW L2

Le prospezione geofisiche in foro di tipo **Down Hole** sono state eseguite in 3 fori di sondaggio opportunamente attrezzati con tubo PVC cementato. Tali prove hanno portato alla determinazione delle velocità onde compressione  $V_p$ , velocità onde taglio  $V_s$ , coefficiente Poisson, modulo elasticità  $E^\circ$ , modulo di compressibilità  $K^\circ$  e modulo di taglio  $G^\circ$ .

I risultati sono rappresentati in forma grafica e numerica negli allegati riportati a fine relazione (All. da 31 a 43).

Tabella riassuntiva principali risultanze indagine DOWN HOLE:

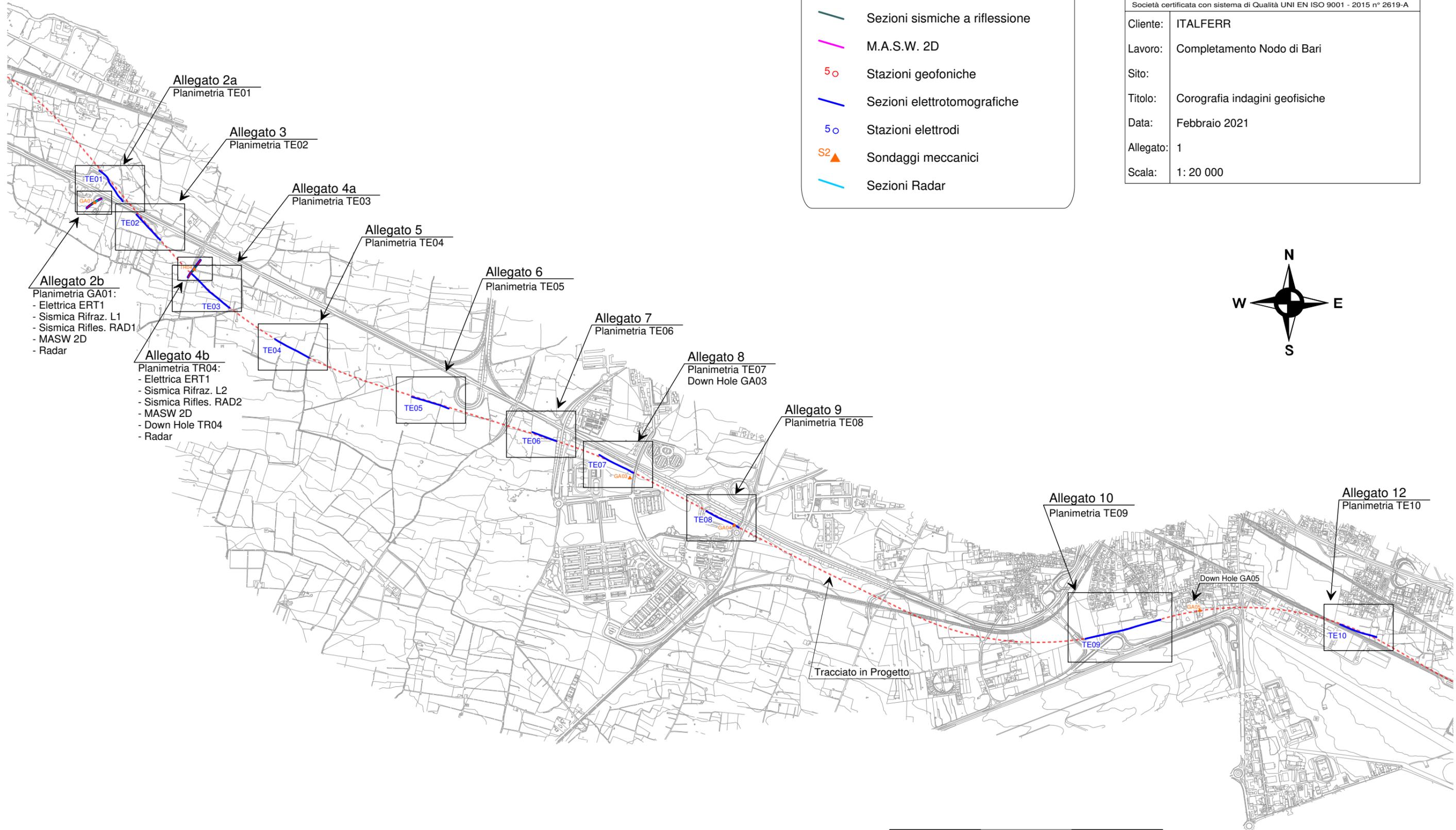
SONDAGGIO	Profondità (m)	$V_{seq}$ (m/s)	Classe Suolo	Allegato
DH_TR04	30	312	<b>A</b>	da 32 a 35
DH_GA03	31	327	<b>E</b>	da 36 a 39
DH_GA05	31	325	<b>E</b>	da 40 a 43

A riguardo della valutazione della  **$V_{eq}$  nel sito TR04**, si precisa che la geometria del sottosuolo rilevata dalle indagini eseguite e dal sondaggio meccanico, ha rilevato la presenza del substrato litoide a  $V_s > 800$  m/sec a circa 3 m di profondità dal piano campagna attuale a cui segue una cavità riempita di materiale fine che determina un intervallo stratigrafico (da 9 m a 12 m di profondità) con velocità delle onde di taglio inferiori a 800 m/sec. Ai fini dei calcoli della  $V_{seq}$  tale intervallo, essendo localizzato all'ampiezza della cavità, non è stato preso in considerazione.

**PROGEO S.r.l.**  
Dott. Gabriele Pulelli



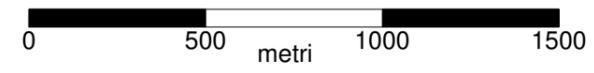
Hanno collaborato:  
Dott. Andrea Fabbri  
Dott. Stefano Tomidei  
Dott. Maurizio Furani

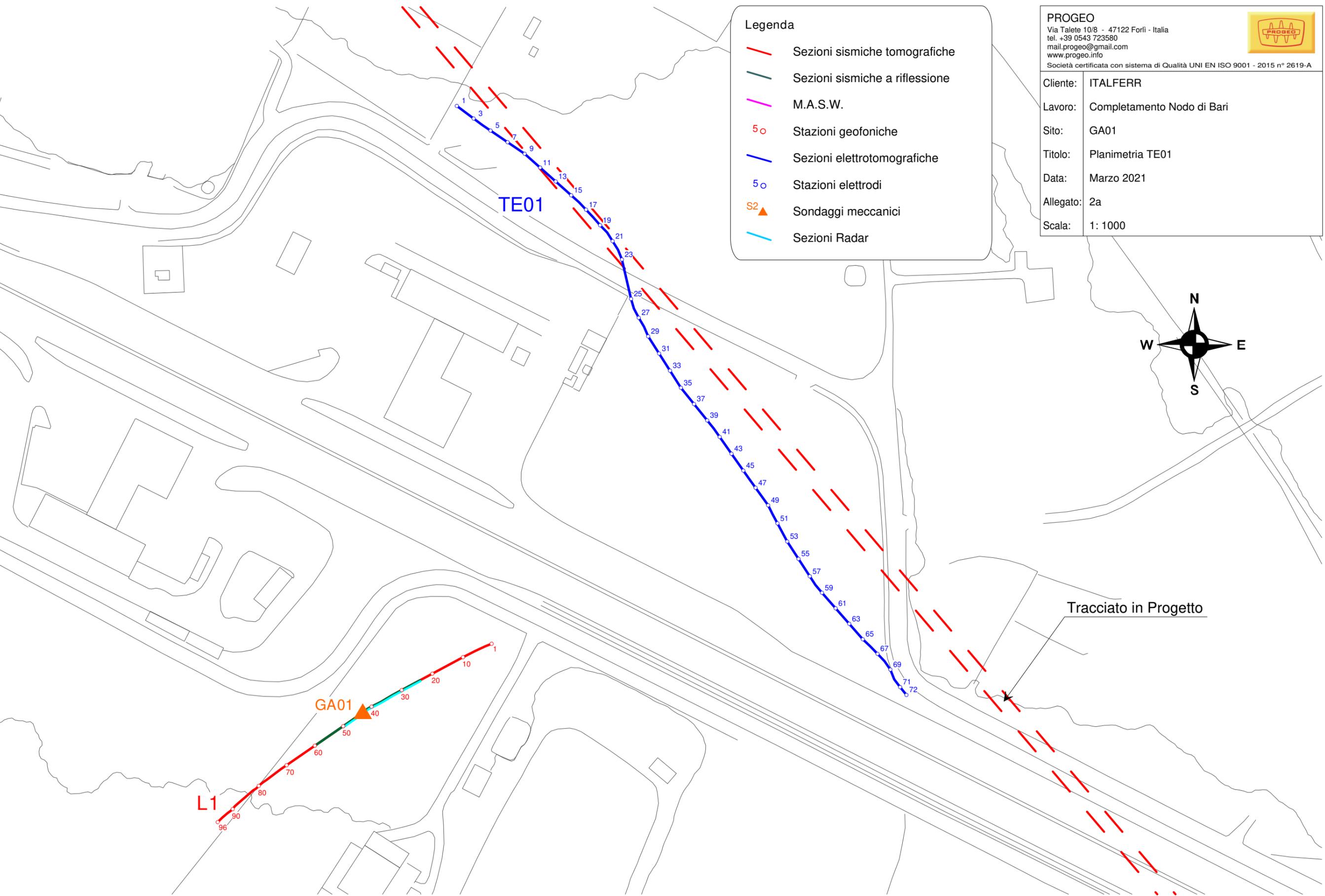


**Legenda**

- Sezioni sismiche tomografiche
- Sezioni sismiche a riflessione
- M.A.S.W. 2D
- 5 o Stazioni geofoniche
- Sezioni elettrotomografiche
- 5 o Stazioni elettrodi
- S2 ▲ Sondaggi meccanici
- Sezioni Radar

<b>PROGEO</b> Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia tel. +39 0543 723580 mail.progeo@gmail.com www.progeo.info Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A	
Cliente:	ITALFERR
Lavoro:	Completamento Nodo di Bari
Sito:	
Titolo:	Corografia indagini geofisiche
Data:	Febbraio 2021
Allegato:	1
Scala:	1: 20 000



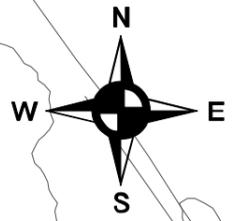


**Legenda**

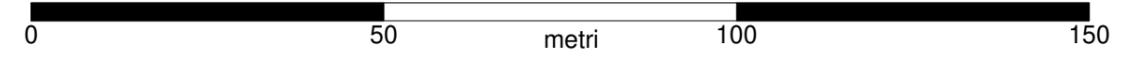
- Sezioni sismiche tomografiche
- Sezioni sismiche a riflessione
- M.A.S.W.
- Stazioni geofoniche
- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici
- Sezioni Radar

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** GA01  
**Titolo:** Planimetria TE01  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 2a  
**Scala:** 1: 1000



Tracciato in Progetto

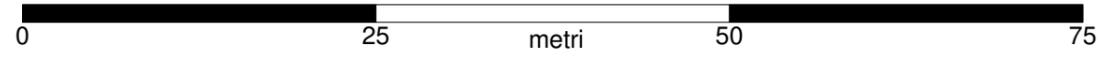
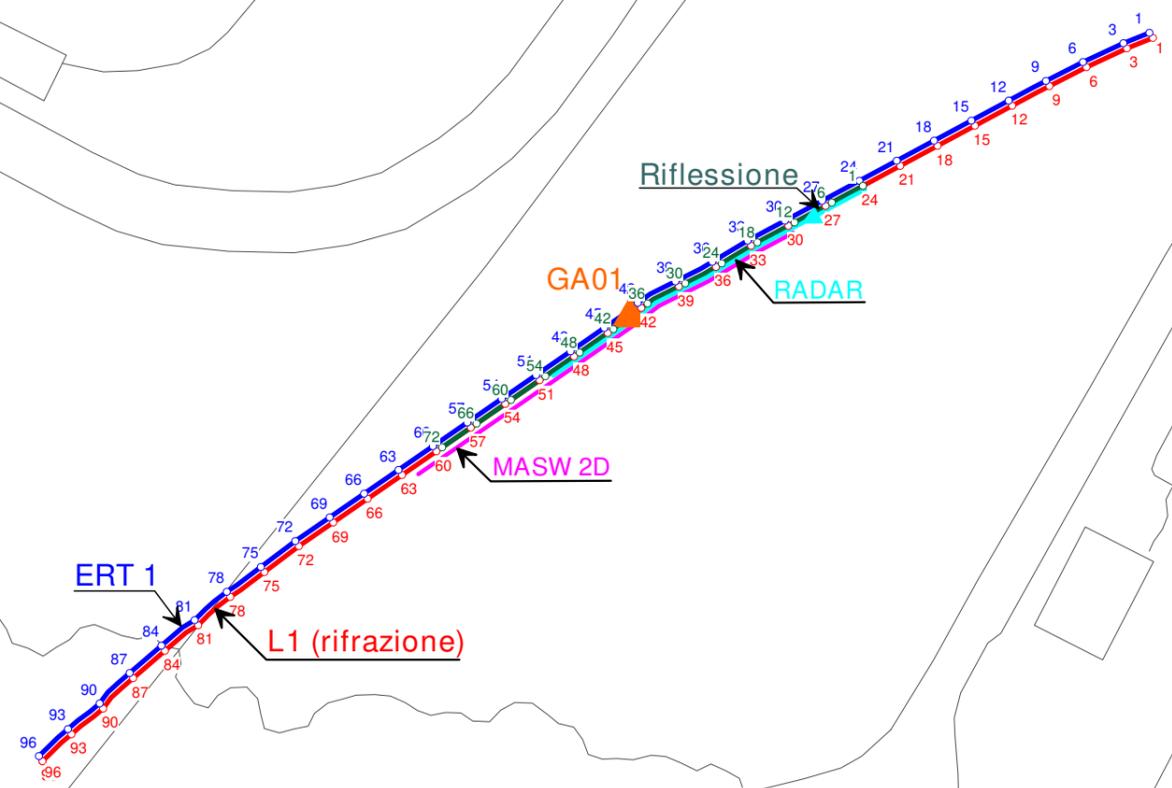
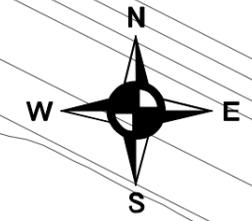


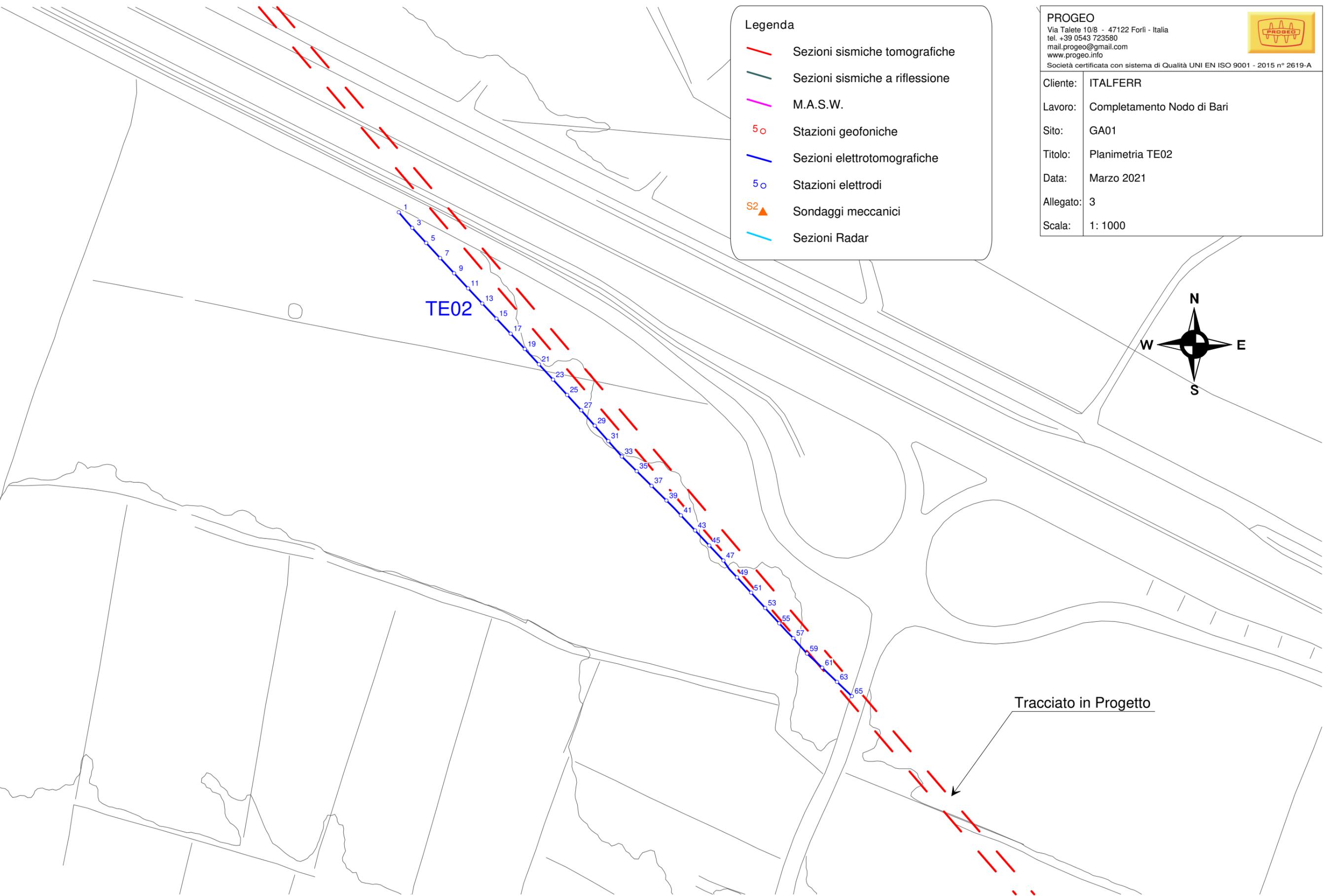
Legenda

- Sezioni sismiche tomografiche
- Sezioni sismiche a riflessione
- M.A.S.W. 2D
- 5 o Stazioni geofoniche
- Sezioni elettrotomografiche
- 5 o Stazioni elettrodi
- S2 ▲ Sondaggi meccanici
- Sezioni Radar

**PROGEO**  
Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
tel. +39 0543 723580  
mail.progeo@gmail.com  
www.progeo.info  
Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

Cliente:	ITALFERR
Lavoro:	Completamento Nodo di Bari
Sito:	GA01
Titolo:	Planimetria GA01
Data:	Marzo 2021
Allegato:	2b
Scala:	1: 500



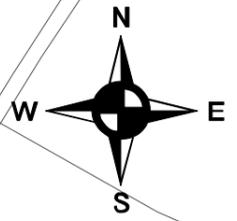


**Legenda**

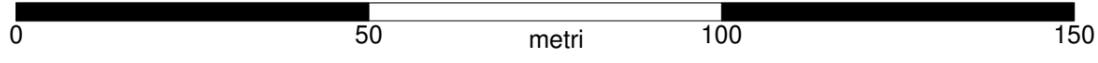
- Sezioni sismiche tomografiche
- Sezioni sismiche a riflessione
- M.A.S.W.
- Stazioni geofoniche
- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici
- Sezioni Radar

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** GA01  
**Titolo:** Planimetria TE02  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 3  
**Scala:** 1: 1000



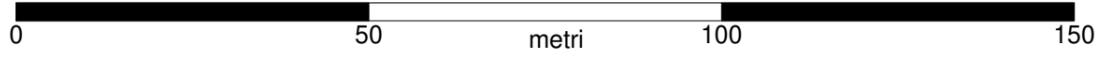
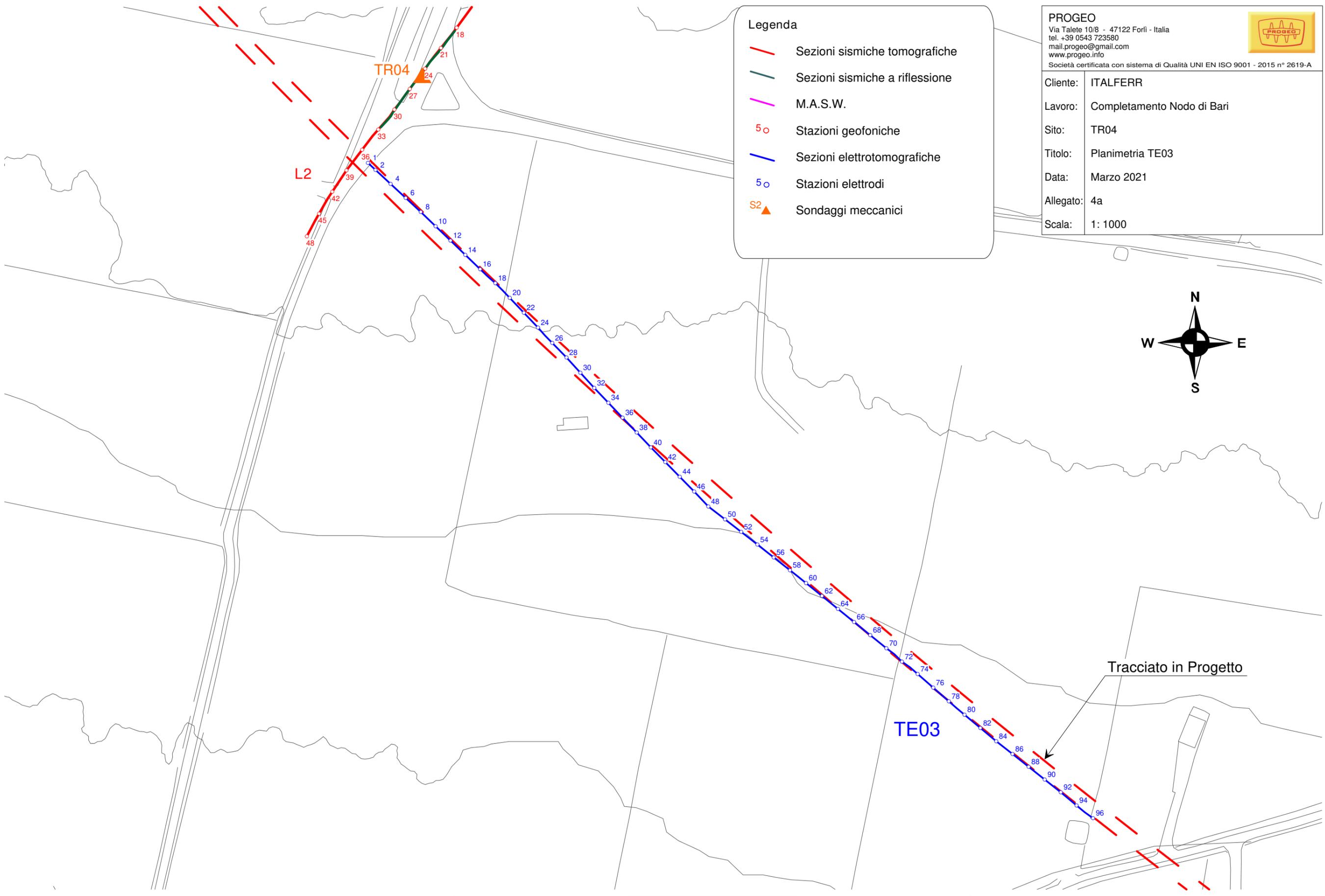
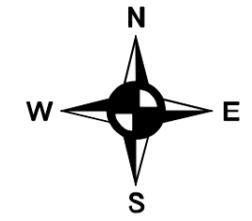
Tracciato in Progetto



- Legenda**
-  Sezioni sismiche tomografiche
  -  Sezioni sismiche a riflessione
  -  M.A.S.W.
  -  Stazioni geofoniche
  -  Sezioni elettrotomografiche
  -  Stazioni elettrodi
  -  Sondaggi meccanici

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** TR04  
**Titolo:** Planimetria TE03  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 4a  
**Scala:** 1: 1000



PROGEO

Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
tel. +39 0543 723580  
mail.progeo@gmail.com  
www.progeo.info



Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

Cliente: ITALFERR

Lavoro: Completamento Nodo di Bari

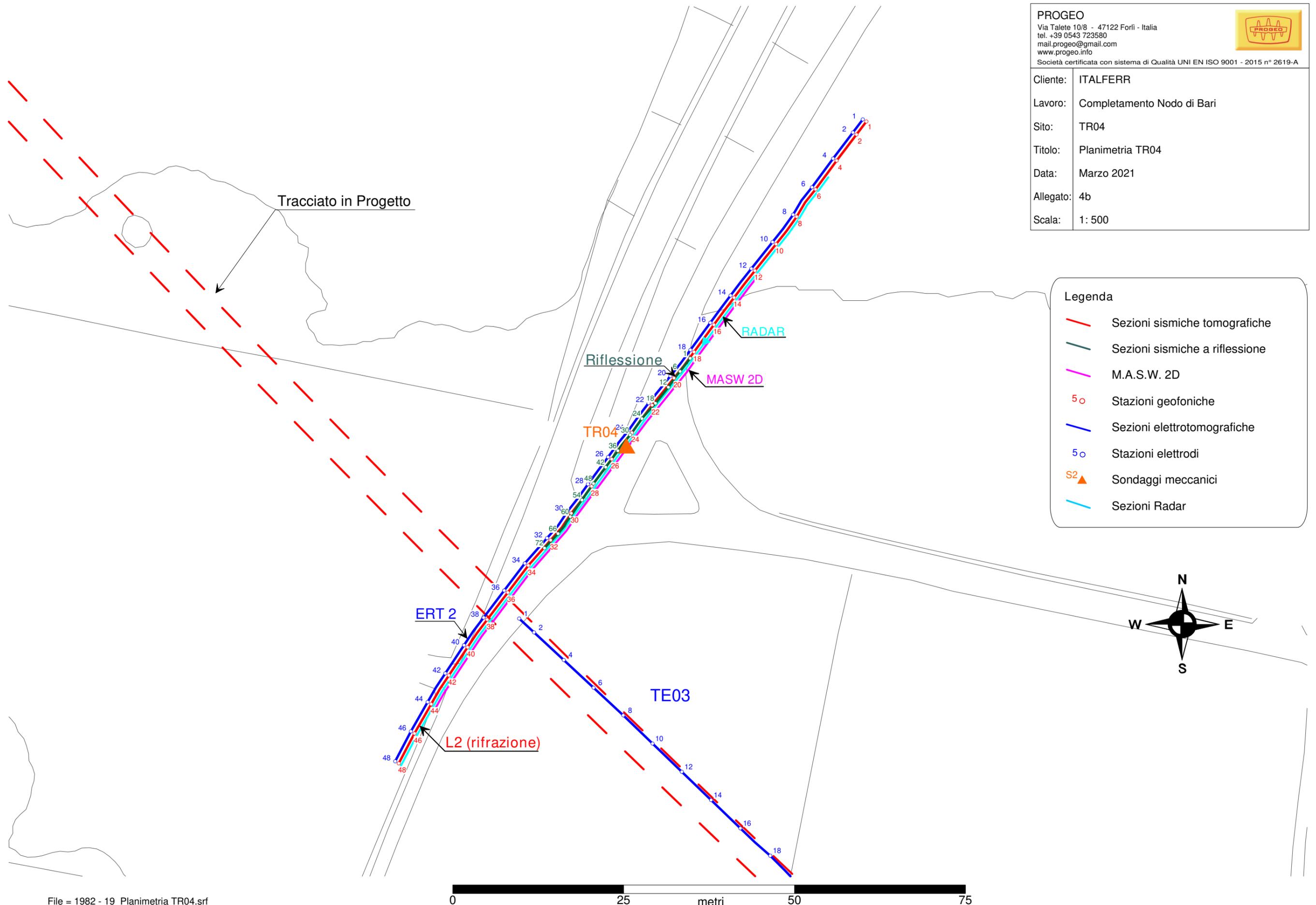
Sito: TR04

Titolo: Planimetria TR04

Data: Marzo 2021

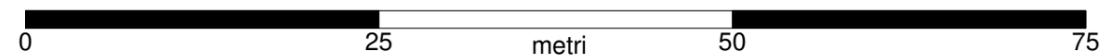
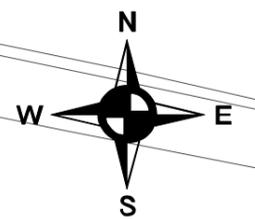
Allegato: 4b

Scala: 1: 500



Legenda

- Sezioni sismiche tomografiche
- Sezioni sismiche a riflessione
- M.A.S.W. 2D
- Stazioni geofoniche
- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- Sondaggi meccanici
- Sezioni Radar

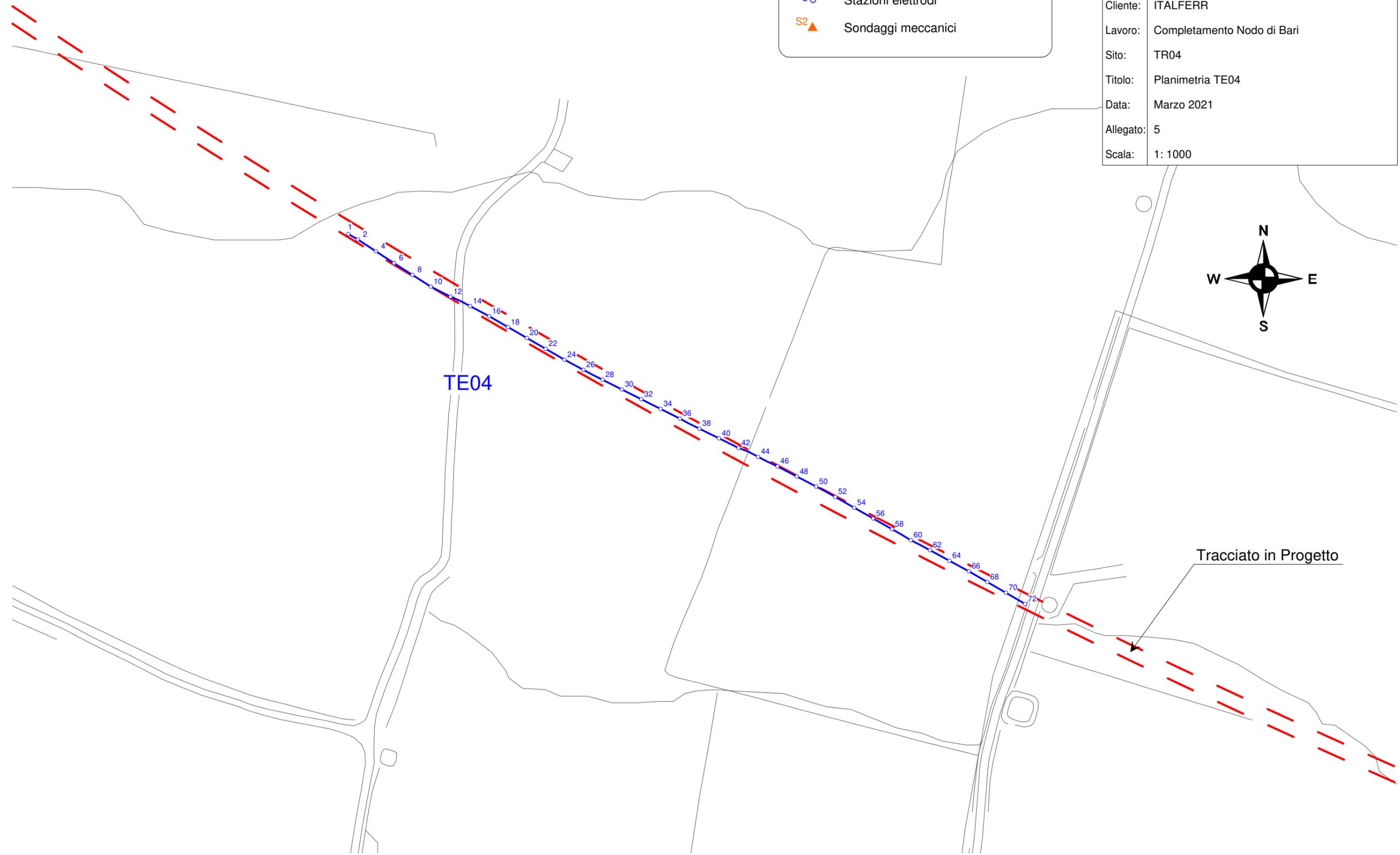
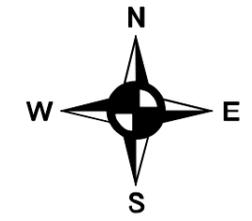


Legenda

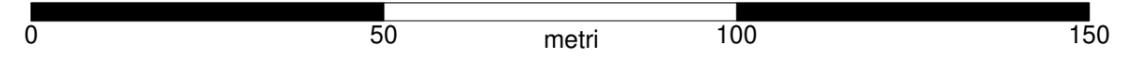
- Sezioni elettrotomografiche
- 5 o Stazioni elettrodi
- S2 ▲ Sondaggi meccanici

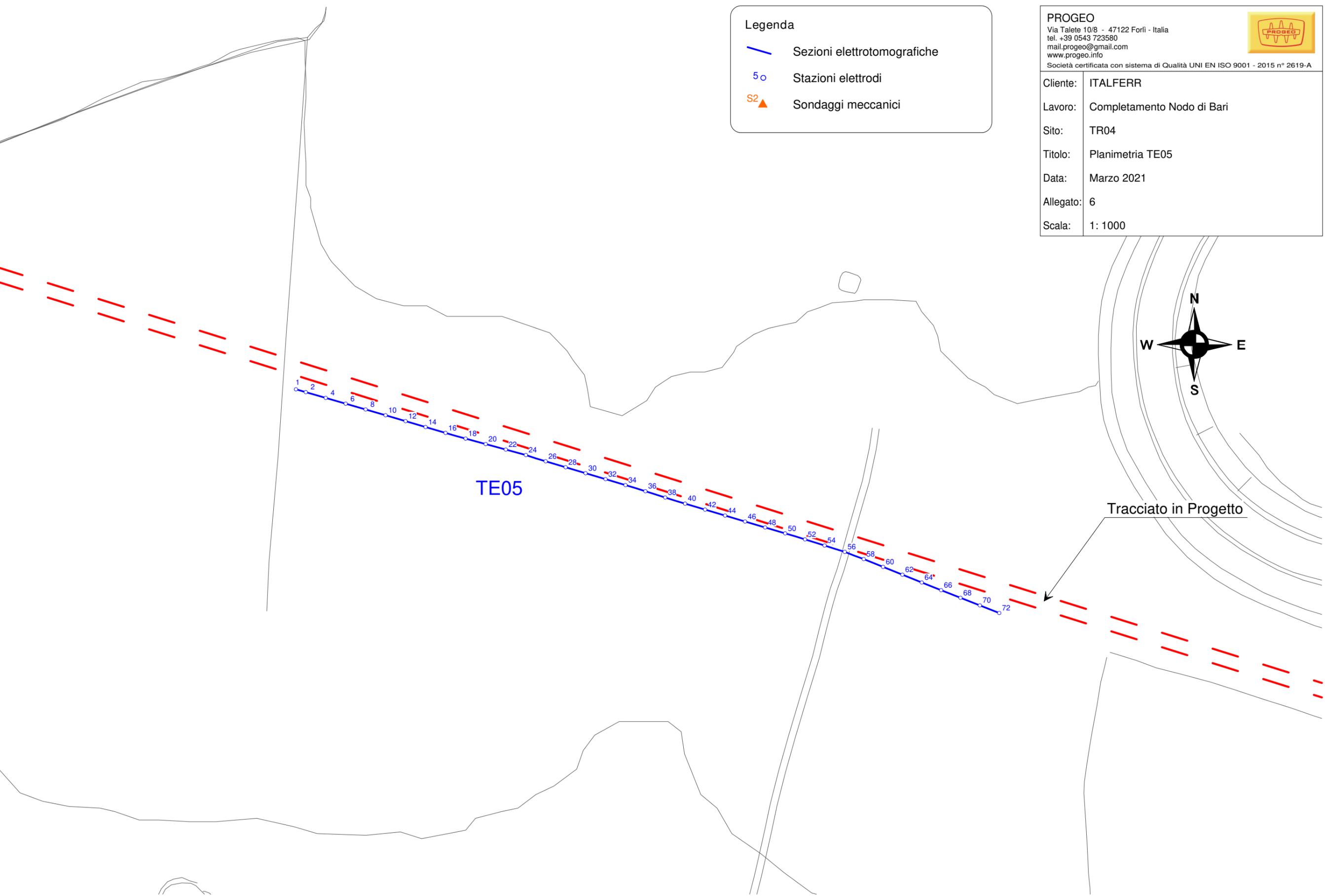
**PROGEO**  
Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
tel. +39 0543 723580  
mail.progeo@gmail.com  
www.progeo.info  
Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

Cliente:	ITALFERR
Lavoro:	Completamento Nodo di Bari
Sito:	TR04
Titolo:	Planimetria TE04
Data:	Marzo 2021
Allegato:	5
Scala:	1: 1000



Tracciato in Progetto



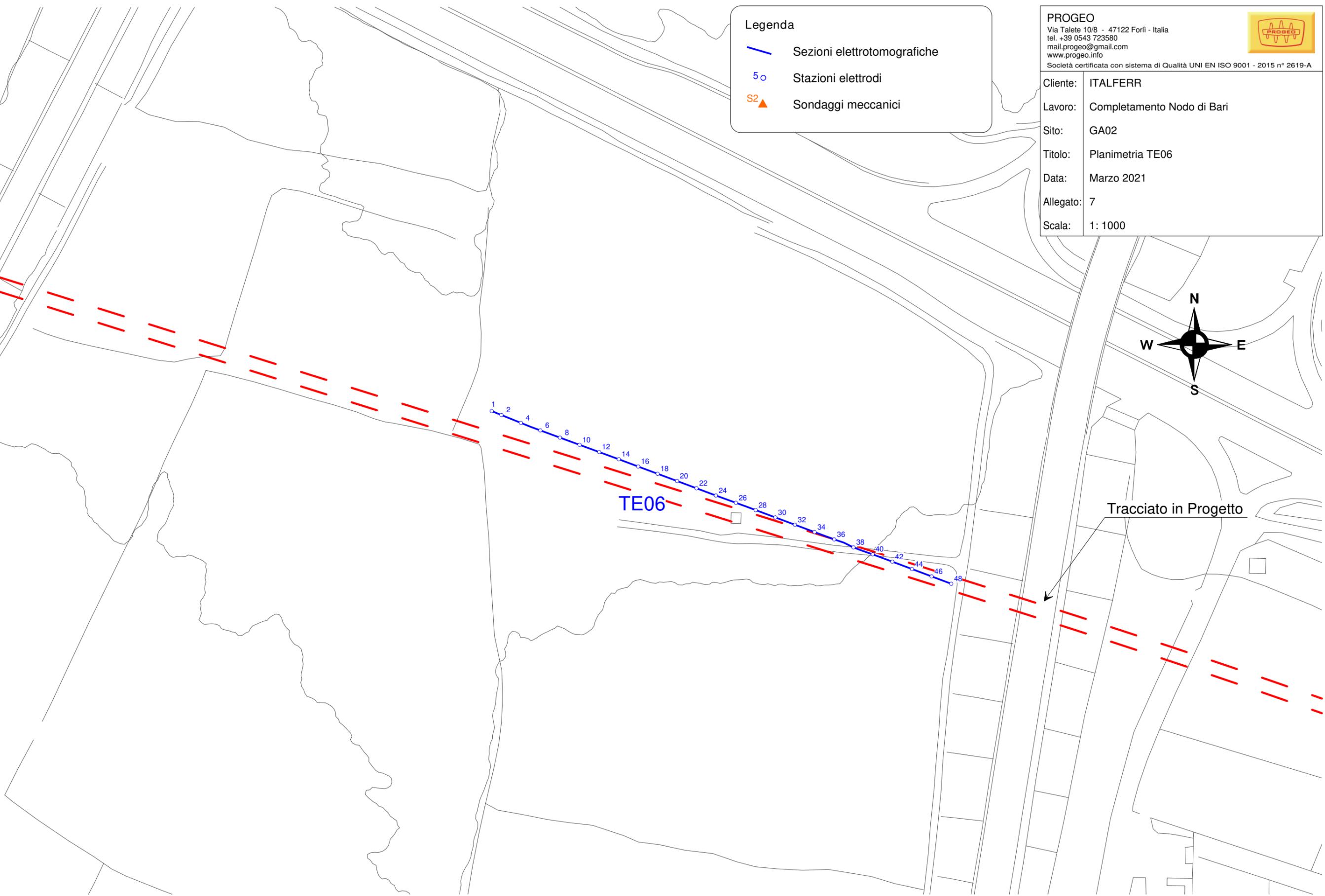


**Legenda**

- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** TR04  
**Titolo:** Planimetria TE05  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 6  
**Scala:** 1: 1000

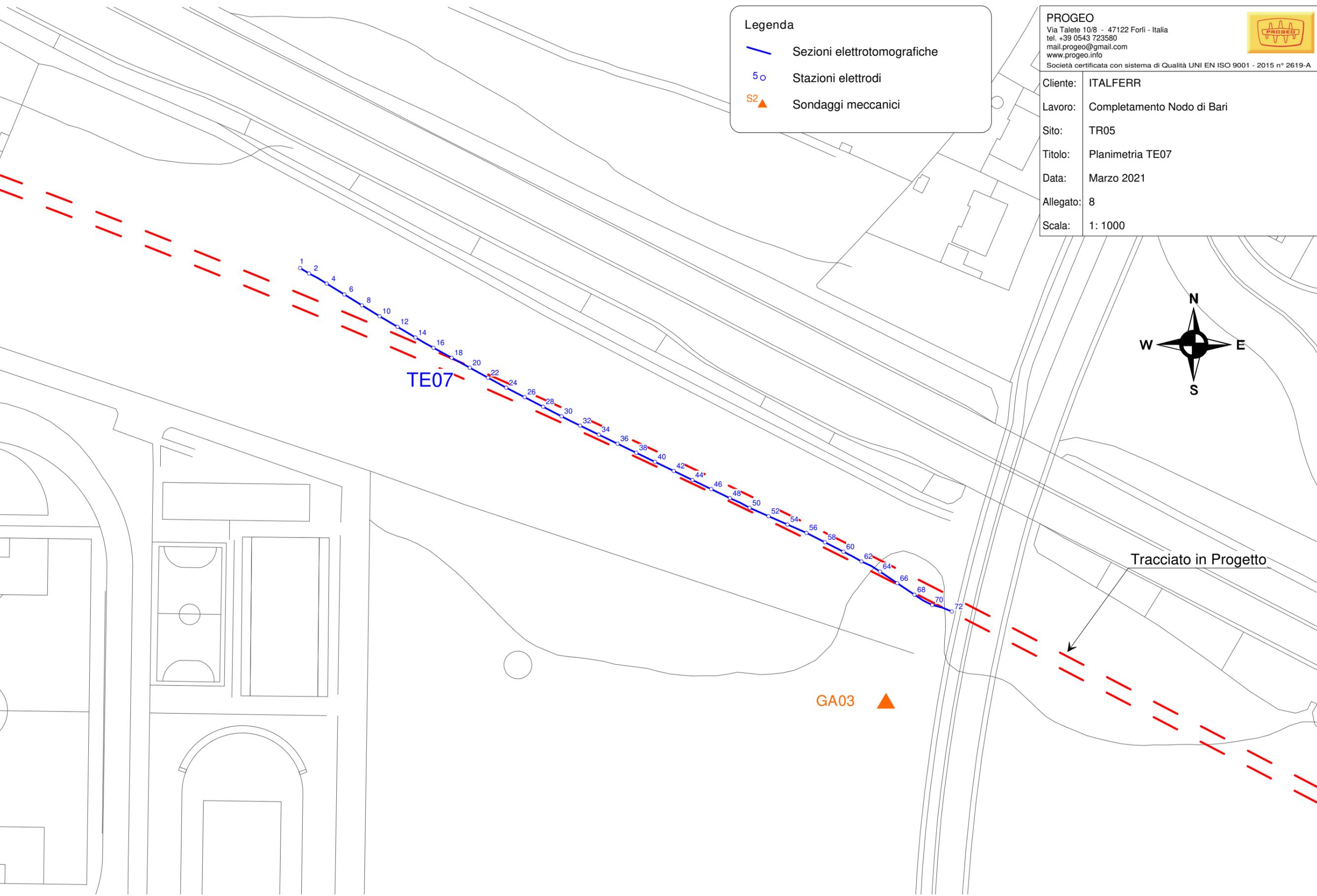


**Legenda**

- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** GA02  
**Titolo:** Planimetria TE06  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 7  
**Scala:** 1: 1000

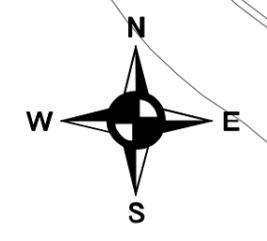


**Legenda**

- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici

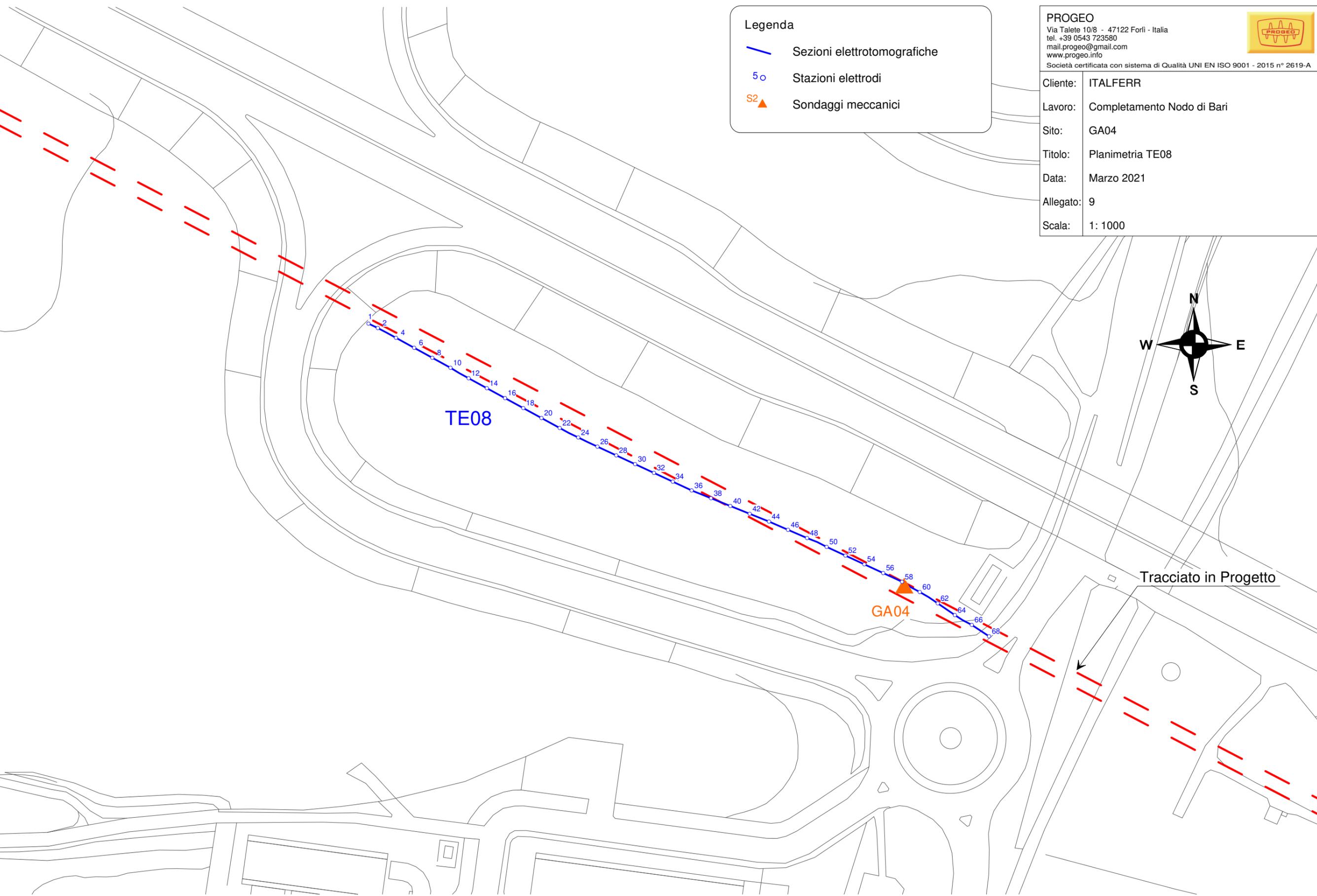
**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** TR05  
**Titolo:** Planimetria TE07  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 8  
**Scala:** 1: 1000



Tracciato in Progetto



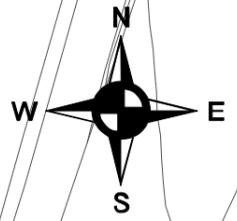


**Legenda**

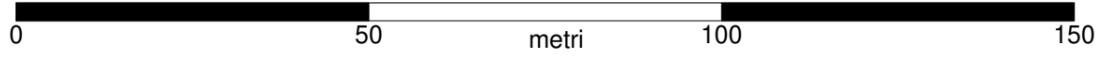
- Sezioni elettrotomografiche
- Stazioni elettrodi
- ▲ Sondaggi meccanici

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** GA04  
**Titolo:** Planimetria TE08  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 9  
**Scala:** 1: 1000



Tracciato in Progetto

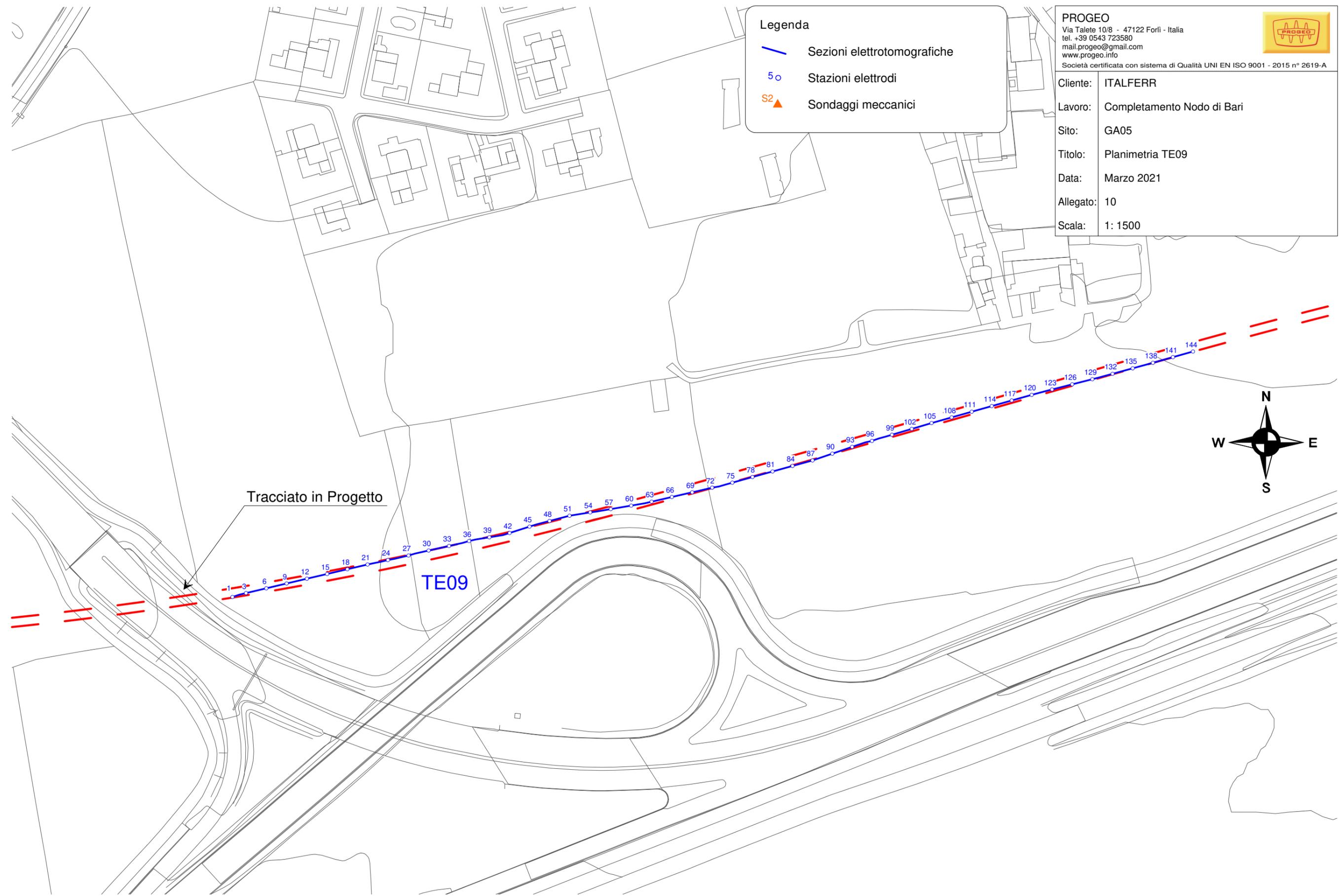


Legenda

- Sezioni elettrotomografiche
- 5 o Stazioni elettrodi
- S2 ▲ Sondaggi meccanici

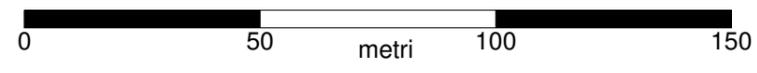
**PROGEO**  
Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
tel. +39 0543 723580  
mail.progeo@gmail.com  
www.progeo.info  
Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

Cliente:	ITALFERR
Lavoro:	Completamento Nodo di Bari
Sito:	GA05
Titolo:	Planimetria TE09
Data:	Marzo 2021
Allegato:	10
Scala:	1: 1500



Tracciato in Progetto

TE09

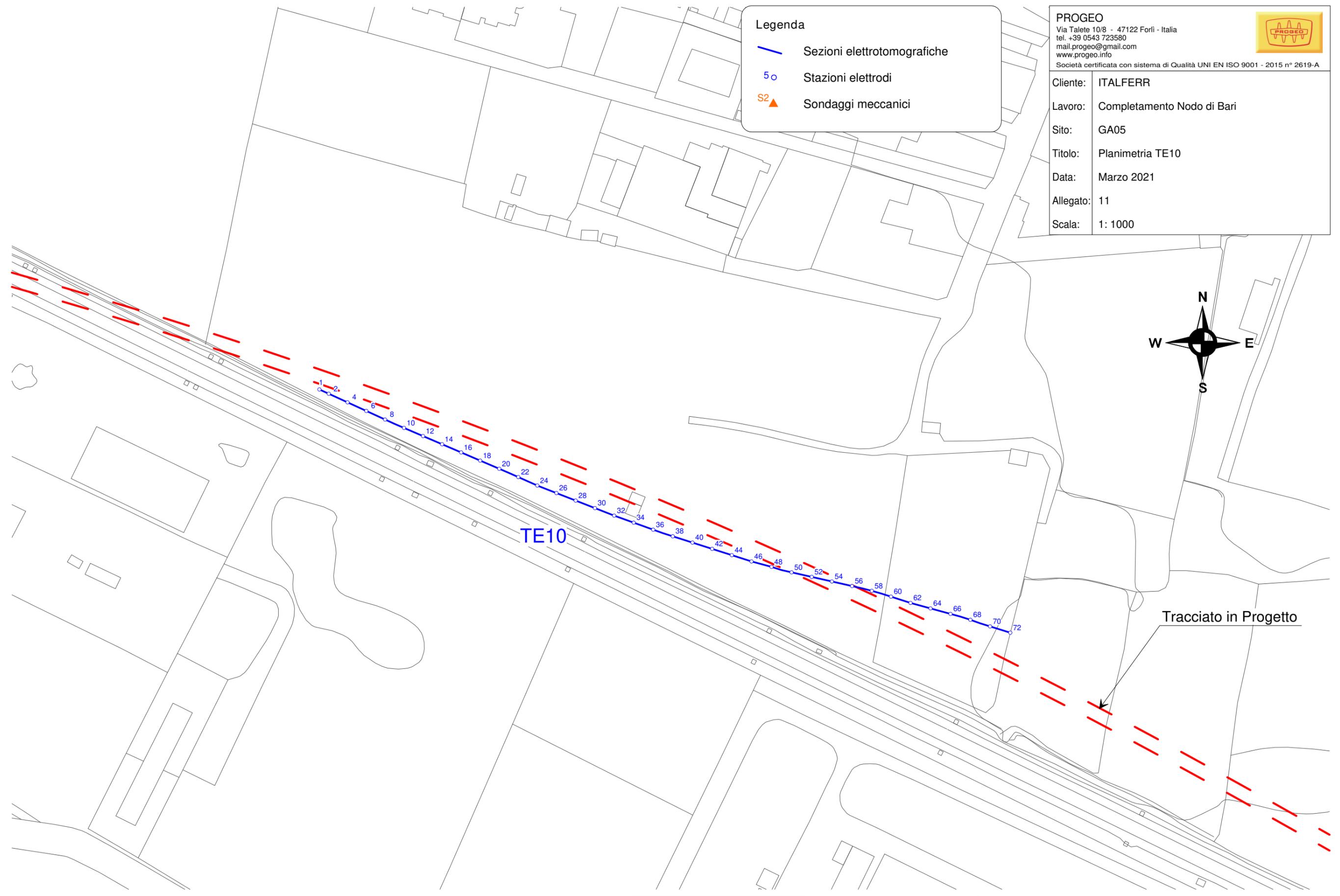
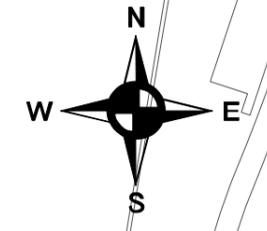


**Legenda**

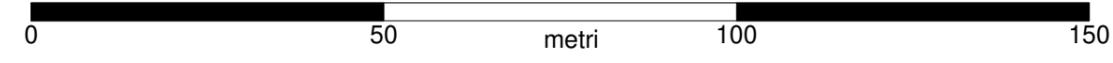
-  Sezioni elettrotomografiche
-  Stazioni elettrodi
-  Sondaggi meccanici

**PROGEO**  
 Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail.progeo@gmail.com  
 www.progeo.info  
 Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

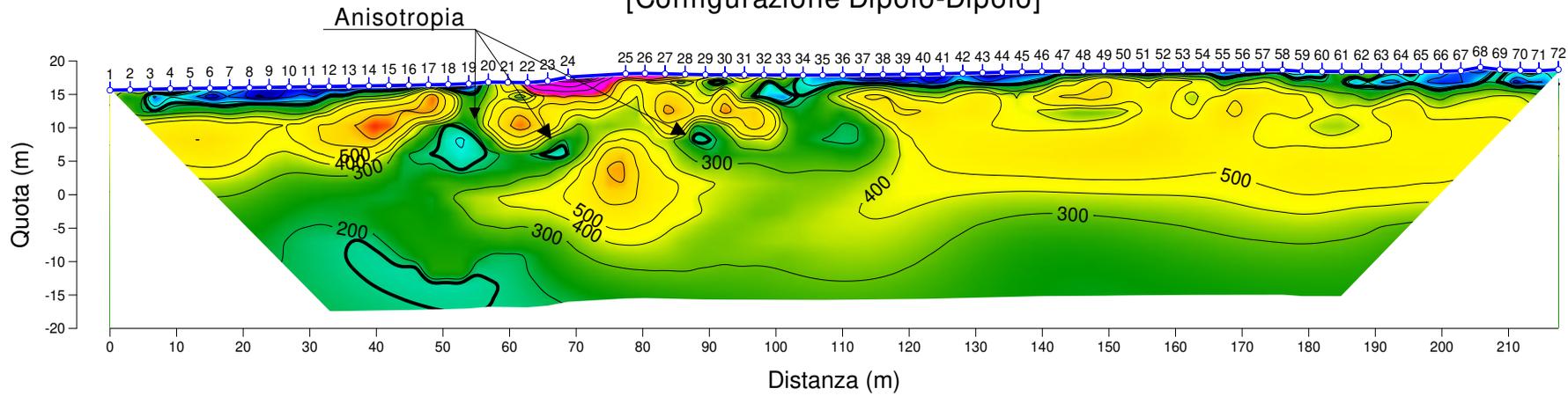
**Cliente:** ITALFERR  
**Lavoro:** Completamento Nodo di Bari  
**Sito:** GA05  
**Titolo:** Planimetria TE10  
**Data:** Marzo 2021  
**Allegato:** 11  
**Scala:** 1: 1000



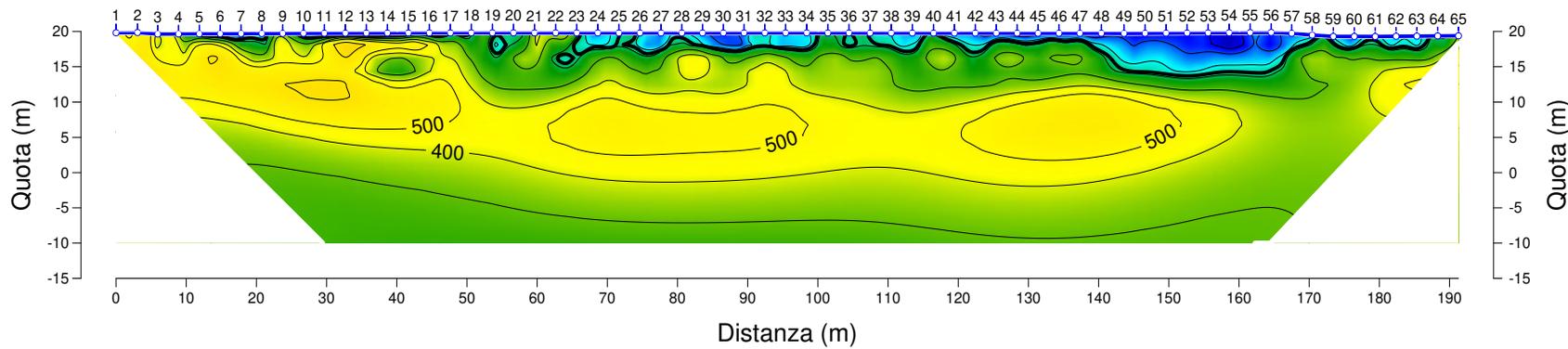
Tracciato in Progetto



### SEZIONE ELETTRICA TE01 [Configurazione Dipolo-Dipolo]

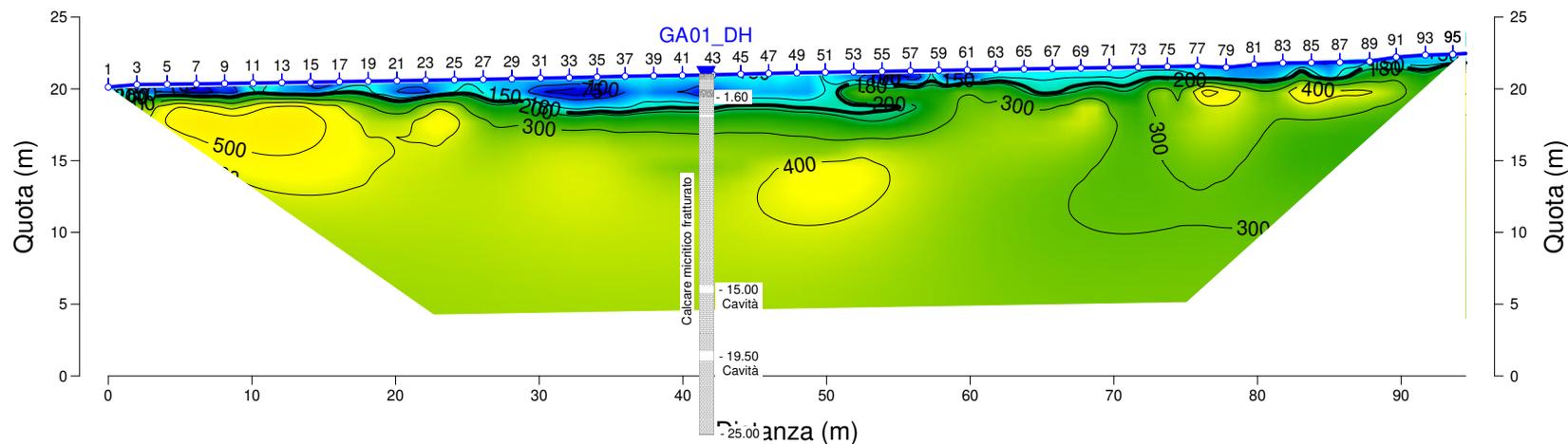


### SEZIONE ELETTRICA TE02 [Configurazione Dipolo-Dipolo]

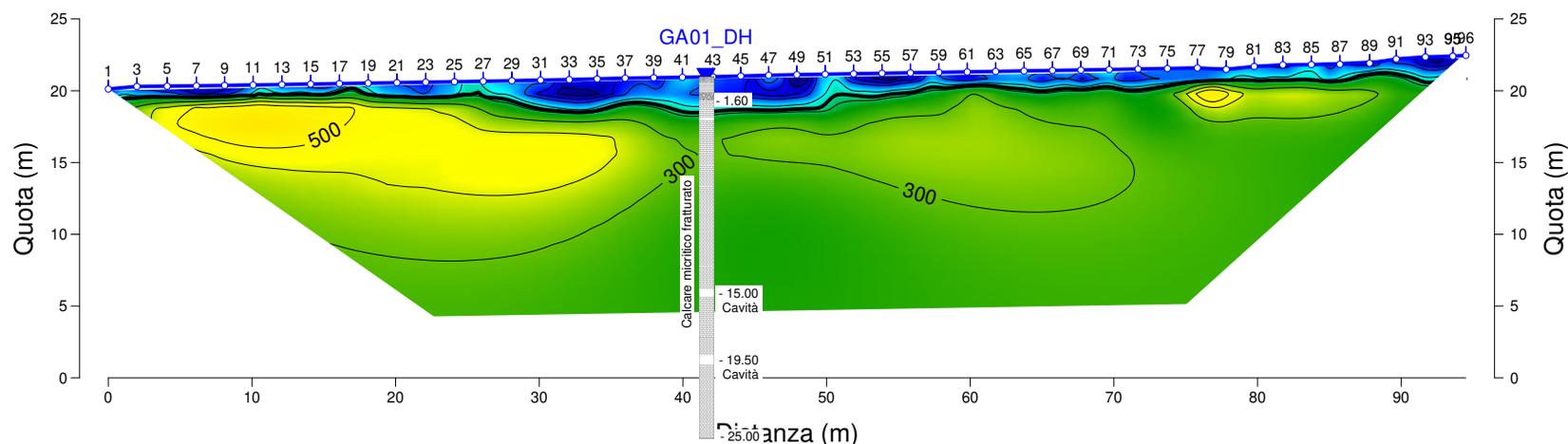




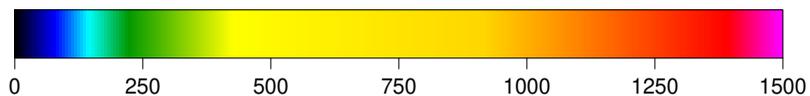
### SEZIONE ELETTRICA GA01-ERT1 [Configurazione Dipolo Dipolo]



### SEZIONE ELETTRICA GA01-ERT1 [Configurazione Wenner Schlumberger]



Scala della resistività (Ohm\*m)



Scala 1:500

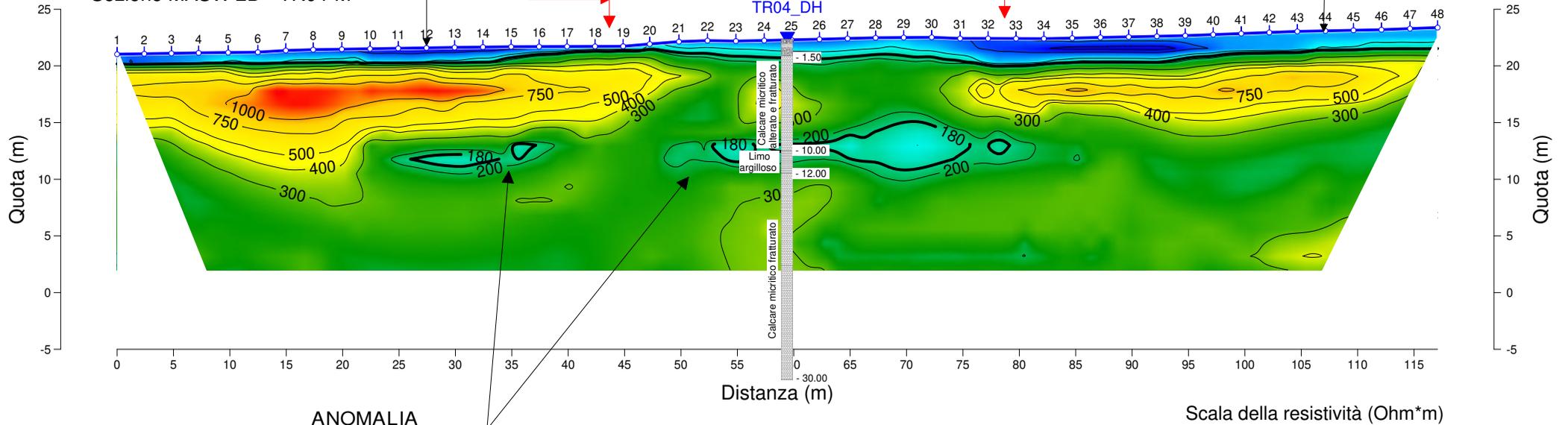
Allegato 13



### SEZIONE ELETTRICA TR04-ERT2 [Configurazione Dipolo-Dipolo]

Sezione a riflessione TR04\_rifl

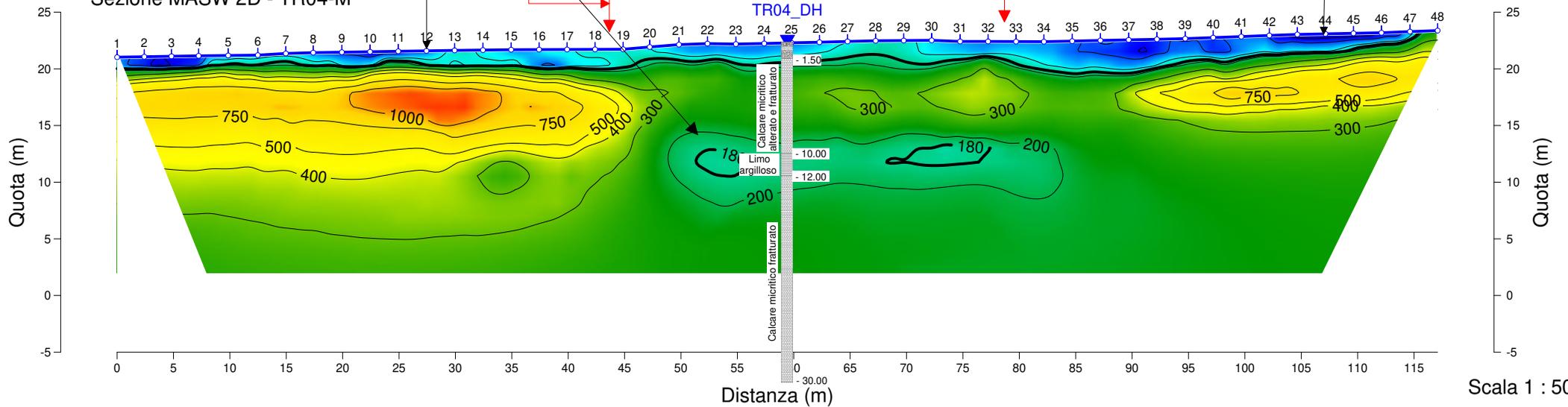
Sezione MASW 2D - TR04-M



### SEZIONE ELETTRICA TR04-ERT2 [Configurazione Wenner-Schlumberger]

Sezione a riflessione TR04\_rifl

Sezione MASW 2D - TR04-M

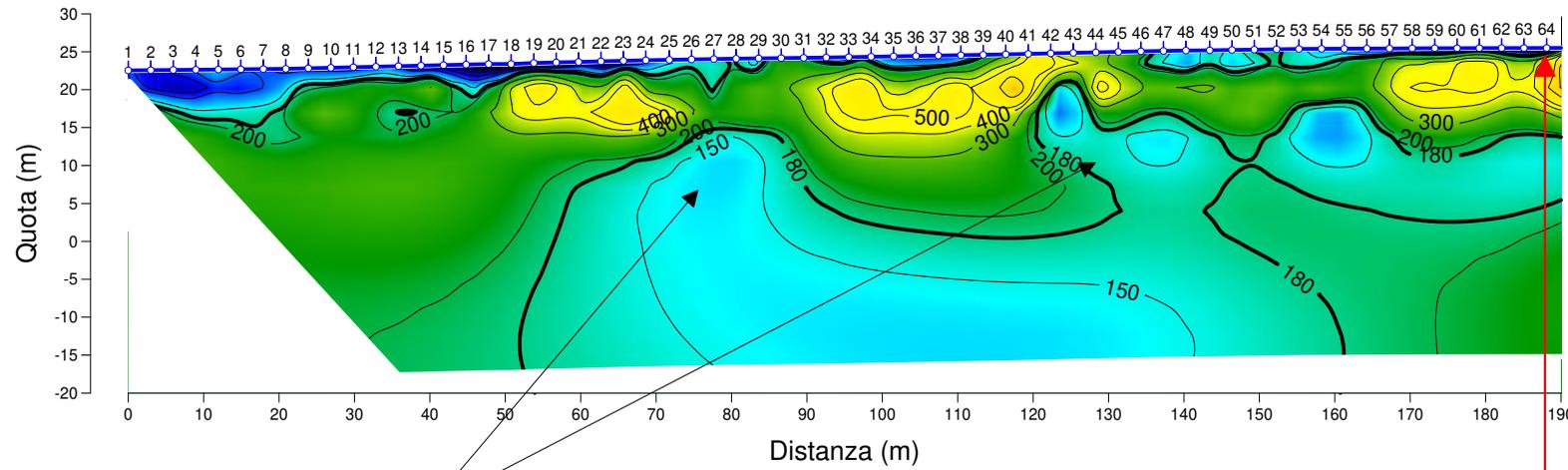


Scala 1 : 500

Allegato 14

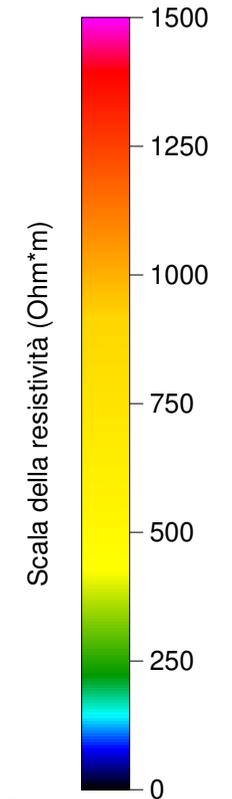
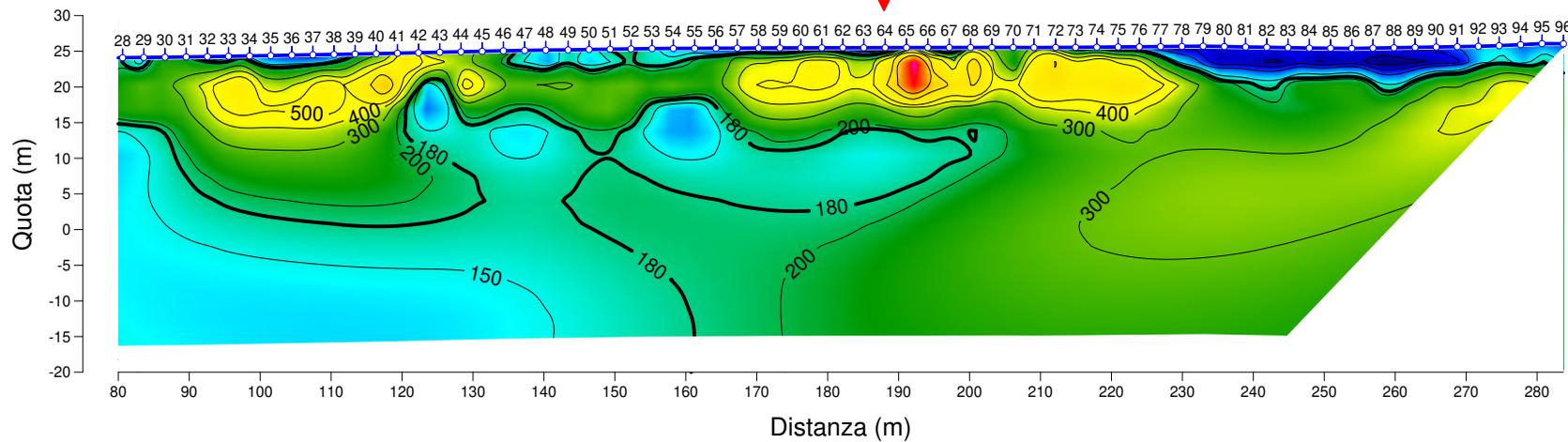


### SEZIONE ELETTRICA TE03 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



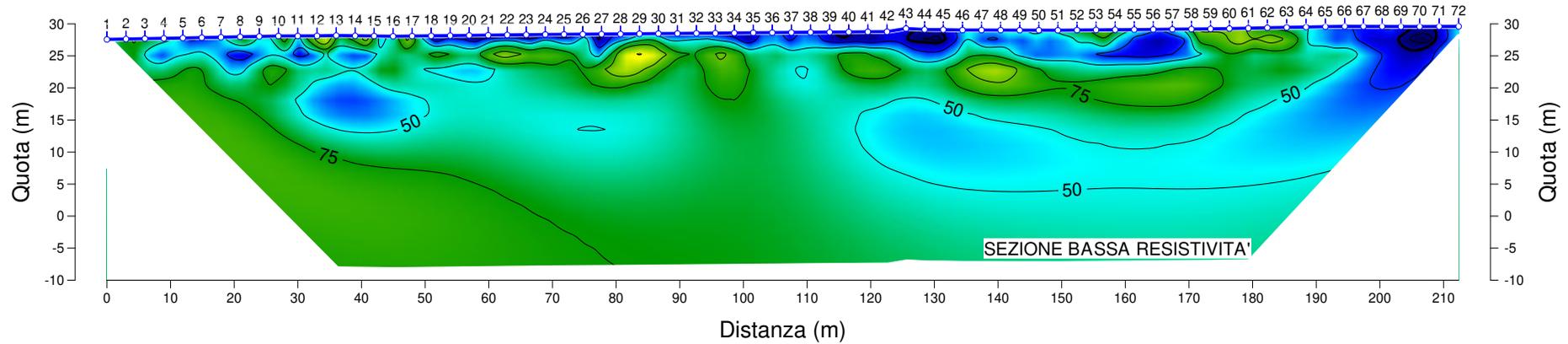
ANOMALIE

### SEZIONE ELETTRICA TE03 [Configurazione Dipolo-Dipolo]

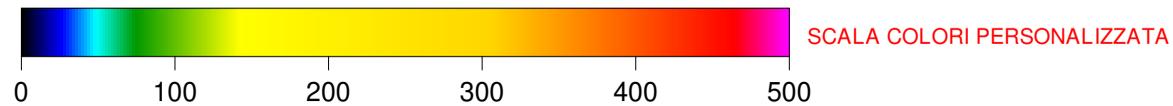




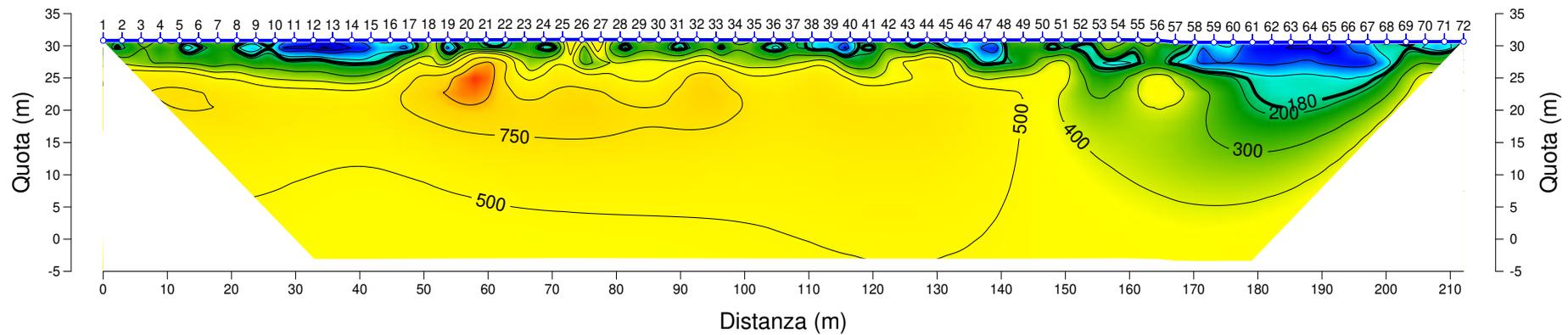
### SEZIONE ELETTRICA TE04 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



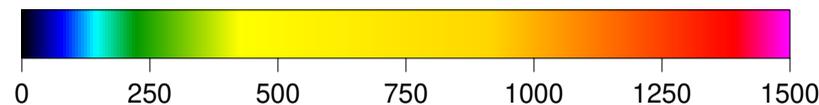
Scala della resistività (Ohm\*m)



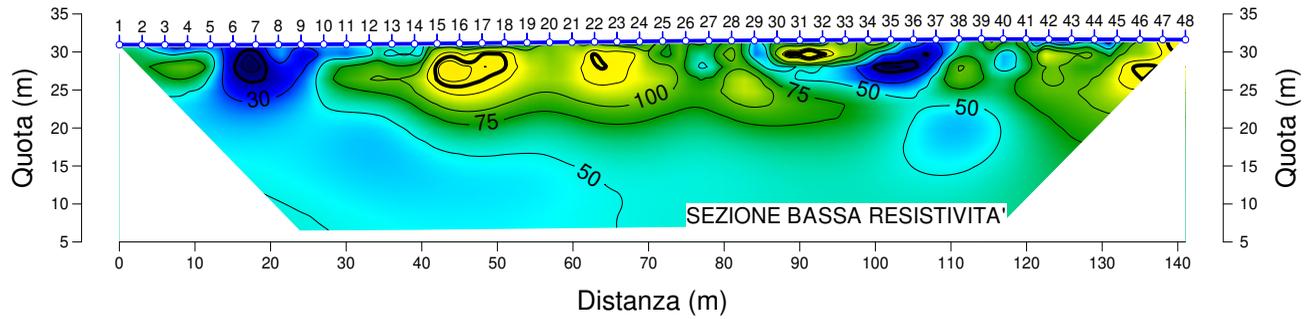
### SEZIONE ELETTRICA TE05 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



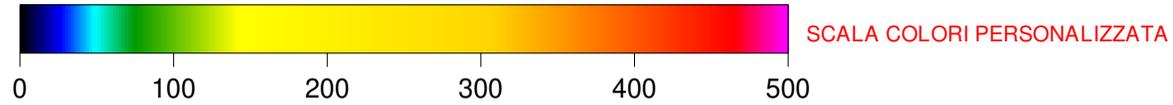
Scala della resistività (Ohm\*m)



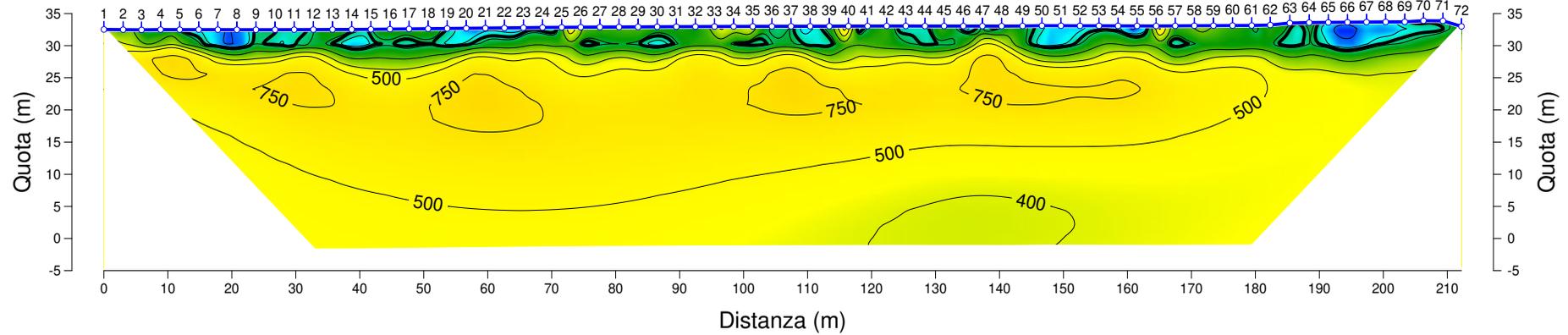
### SEZIONE ELETTRICA TE06 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



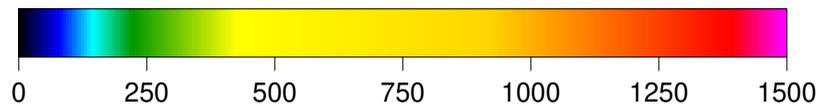
Scala della resistività (Ohm\*m)



### SEZIONE ELETTRICA TE07 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



Scala della resistività (Ohm\*m)

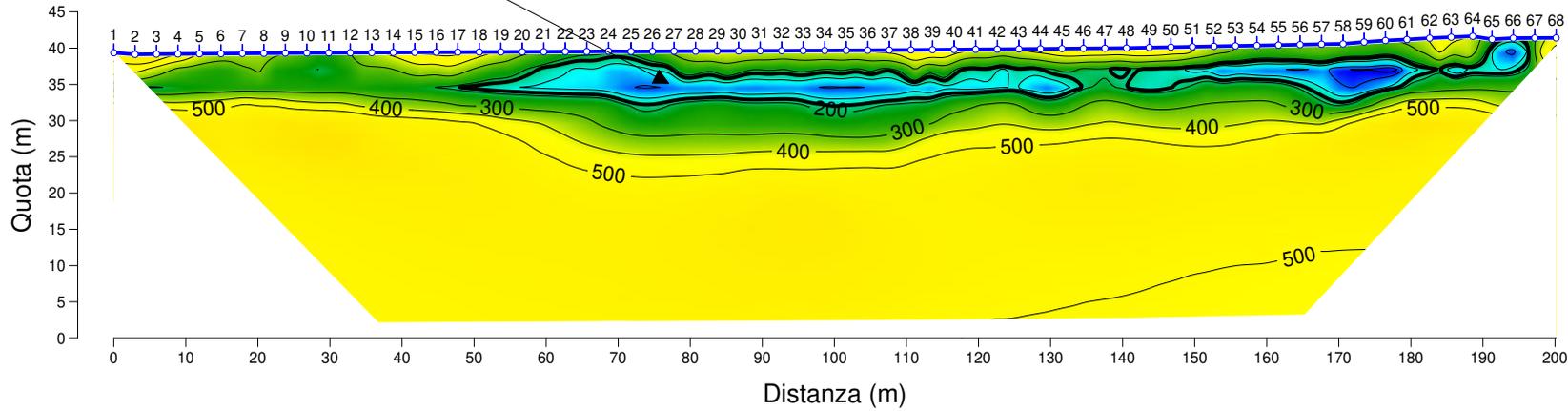


Scala 1 : 1000

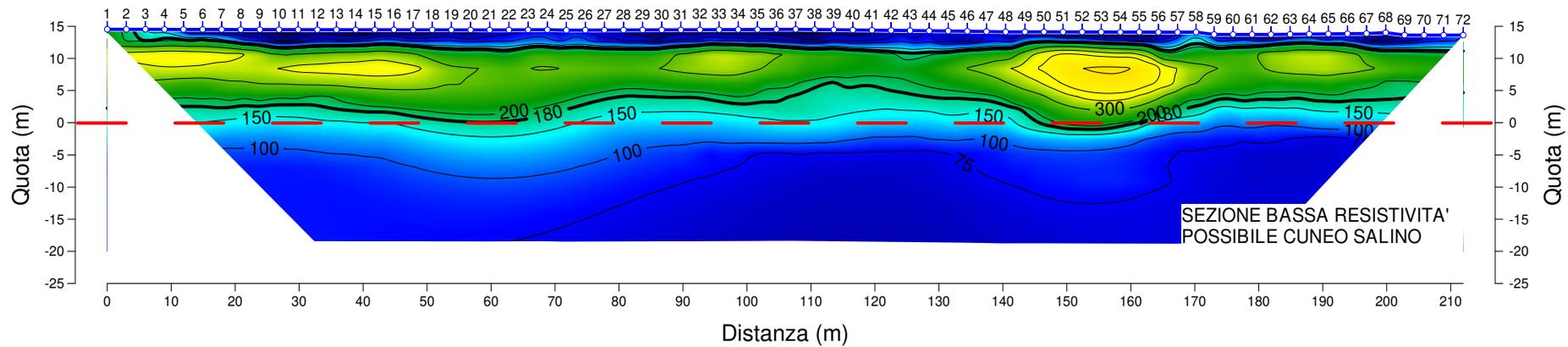
Allegato 17

ANOMALIA FASCIA BASSA RESISTIVITA'

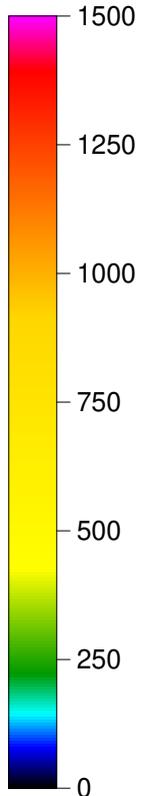
### SEZIONE ELETTRICA TE08 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



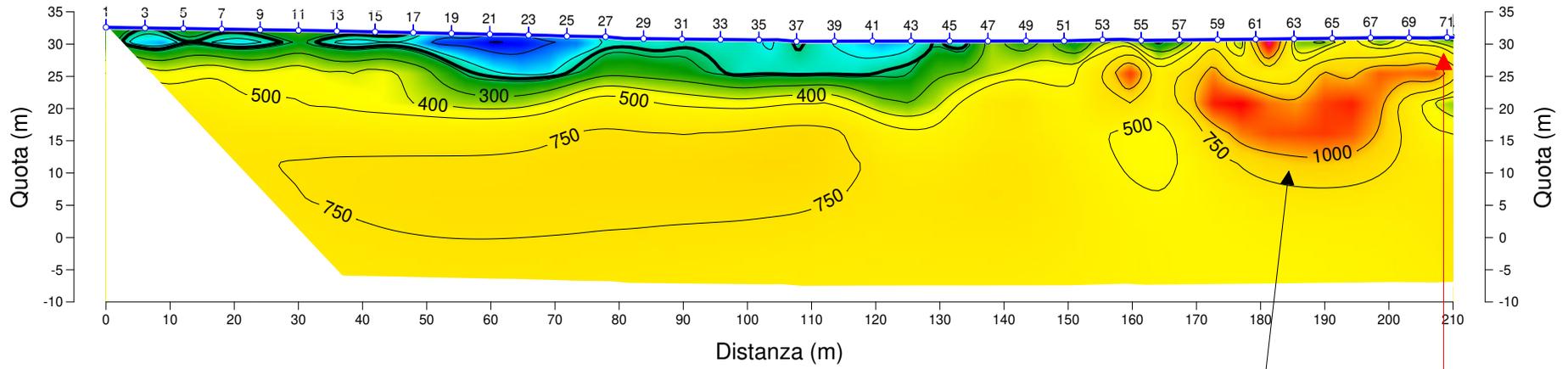
### SEZIONE ELETTRICA TE10 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



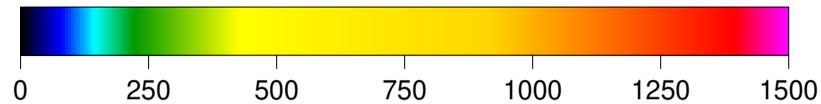
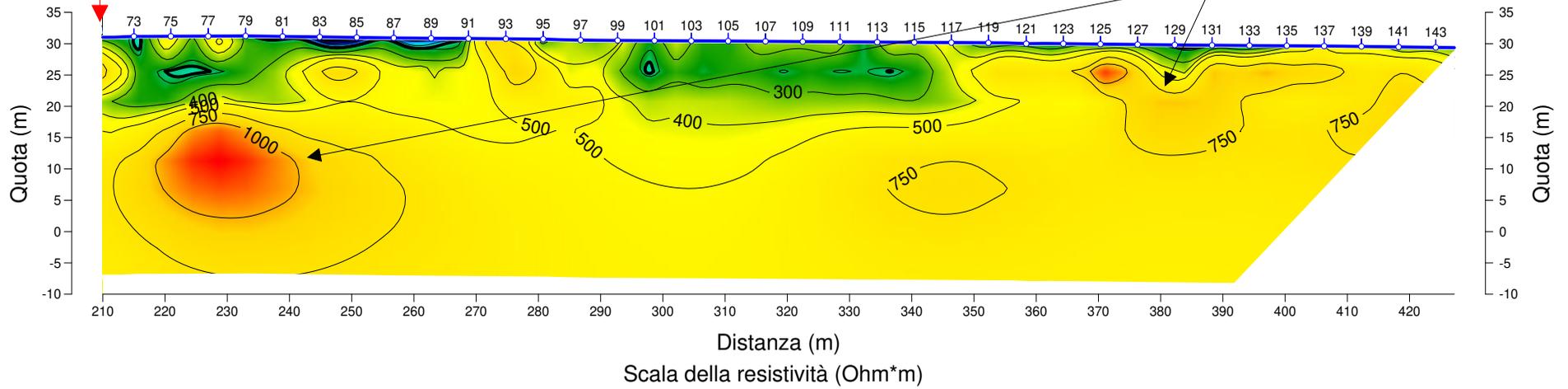
Scala della resistività (Ohm\*m)

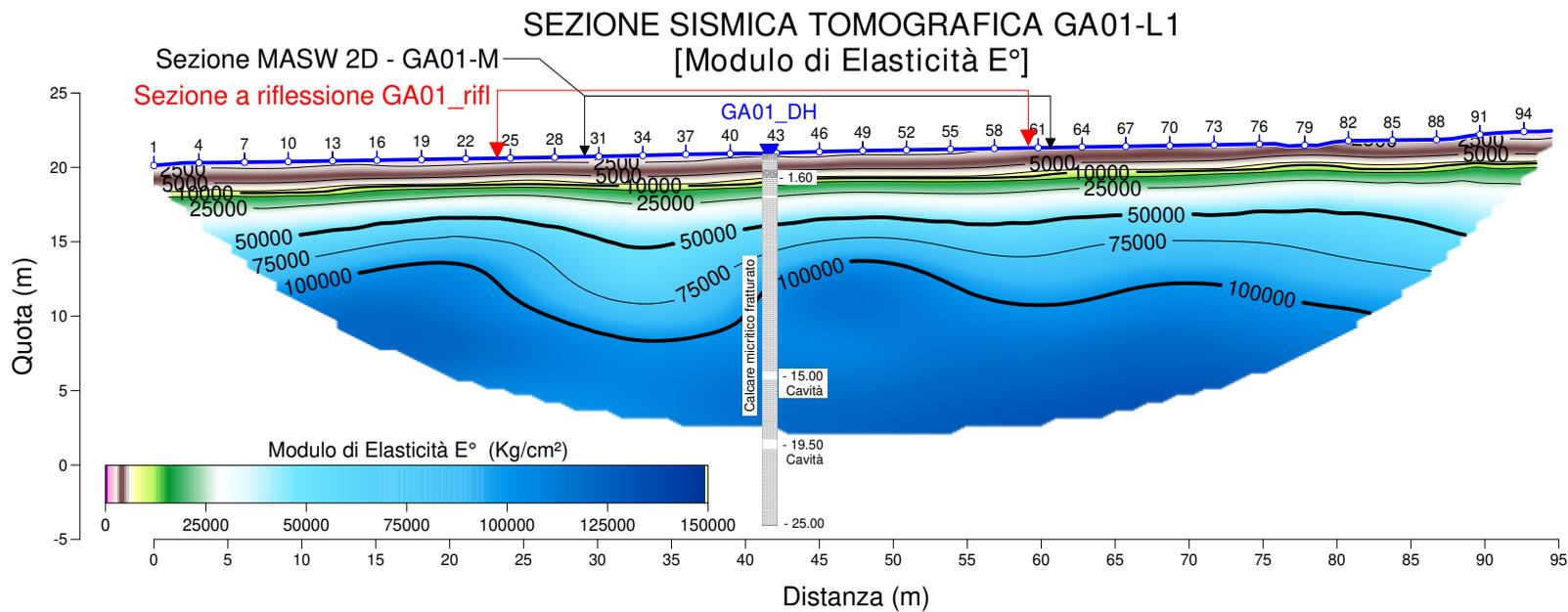
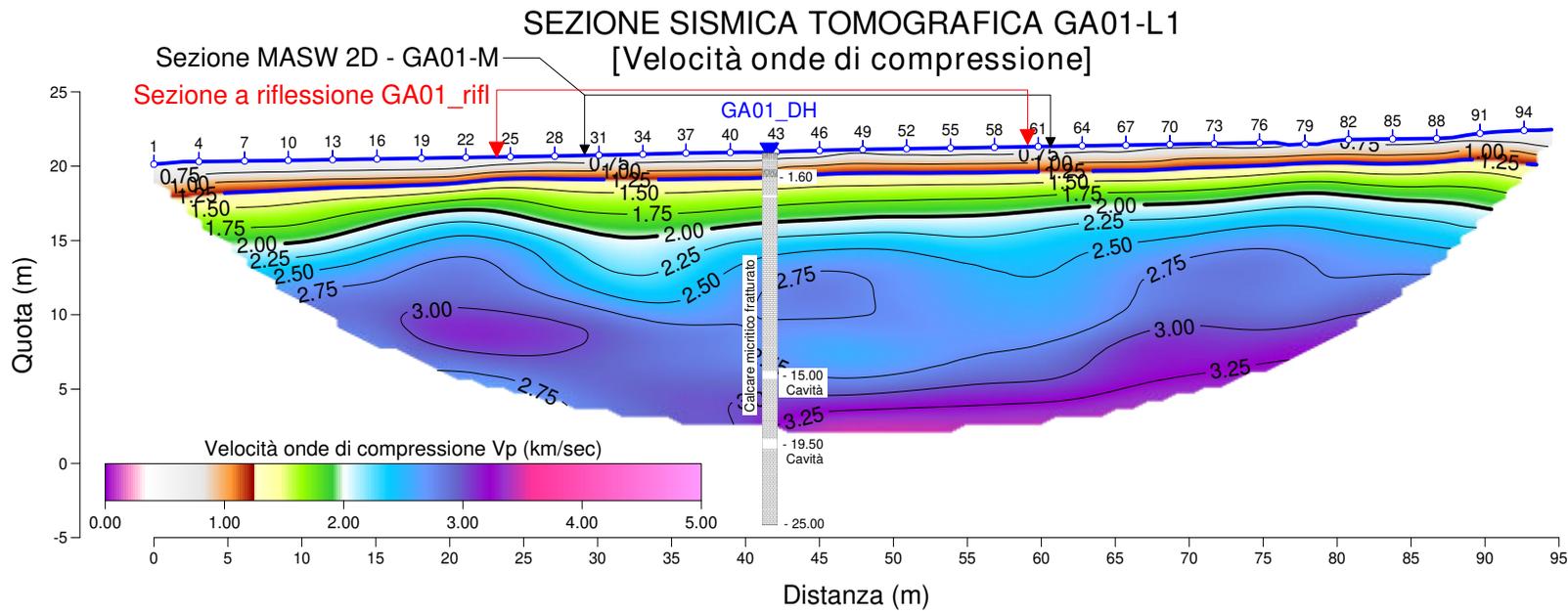


### SEZIONE ELETTRICA TE09 [Configurazione Dipolo-Dipolo]

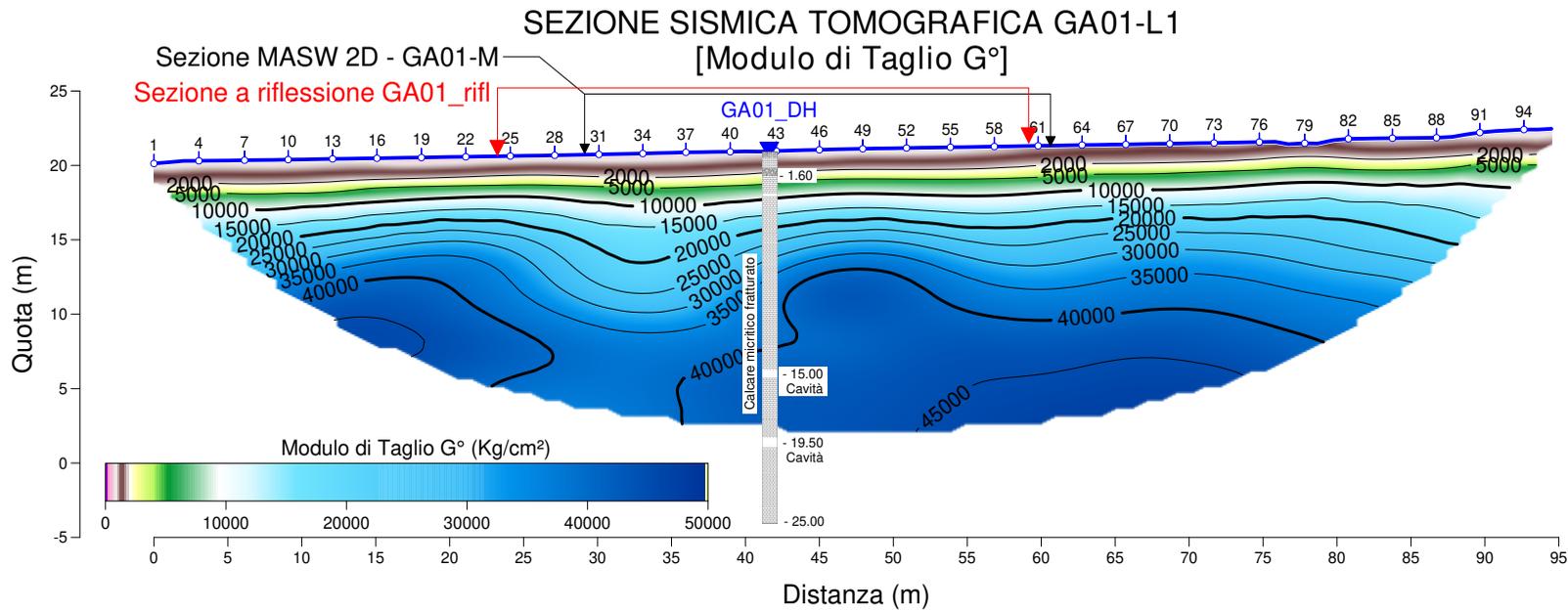
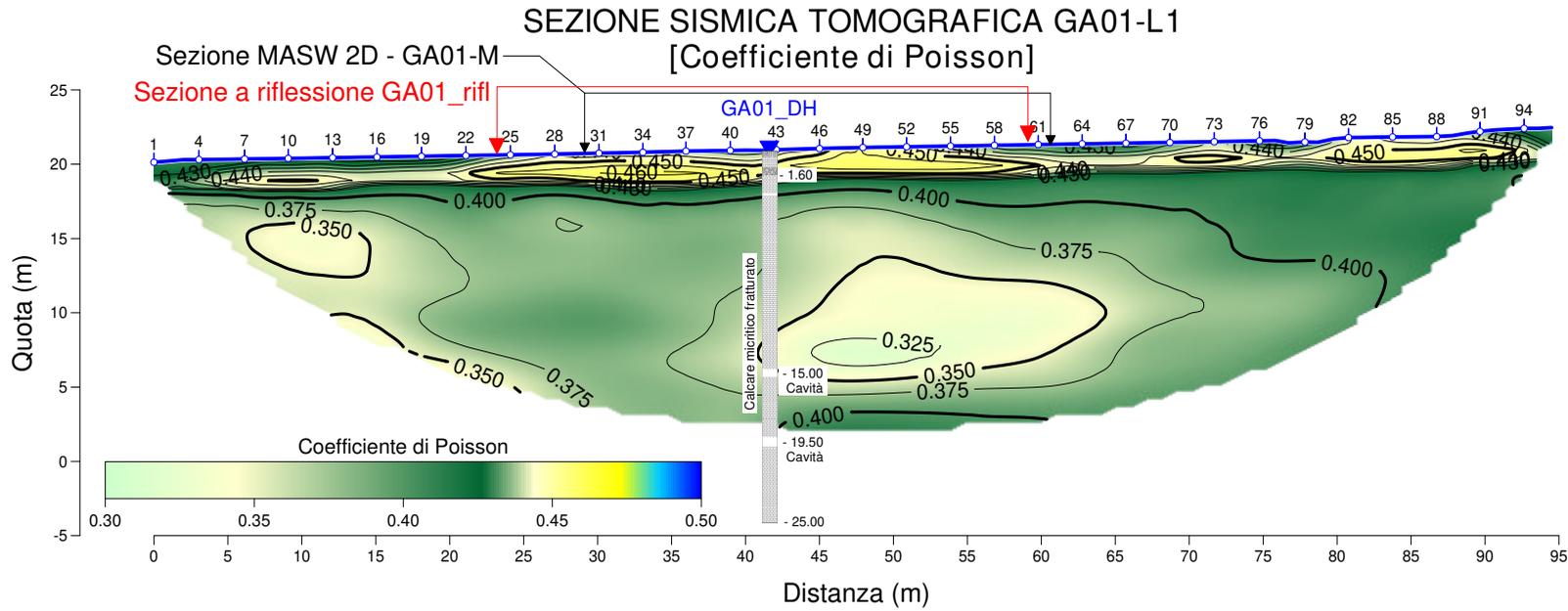


### SEZIONE ELETTRICA TE09 [Configurazione Dipolo-Dipolo]



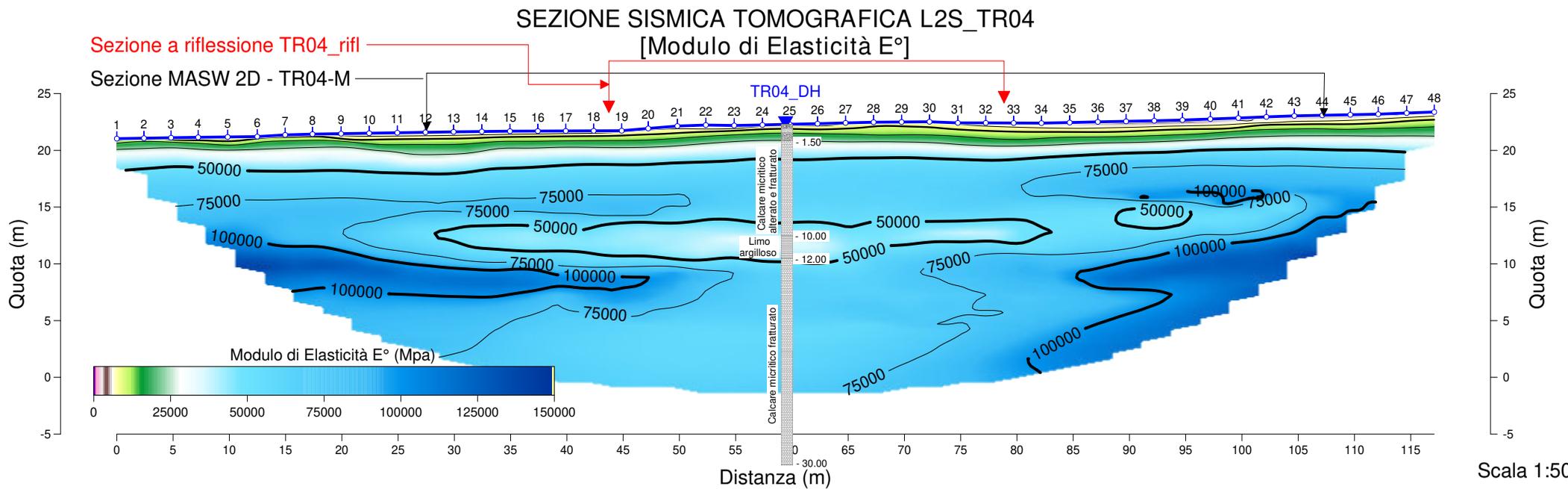
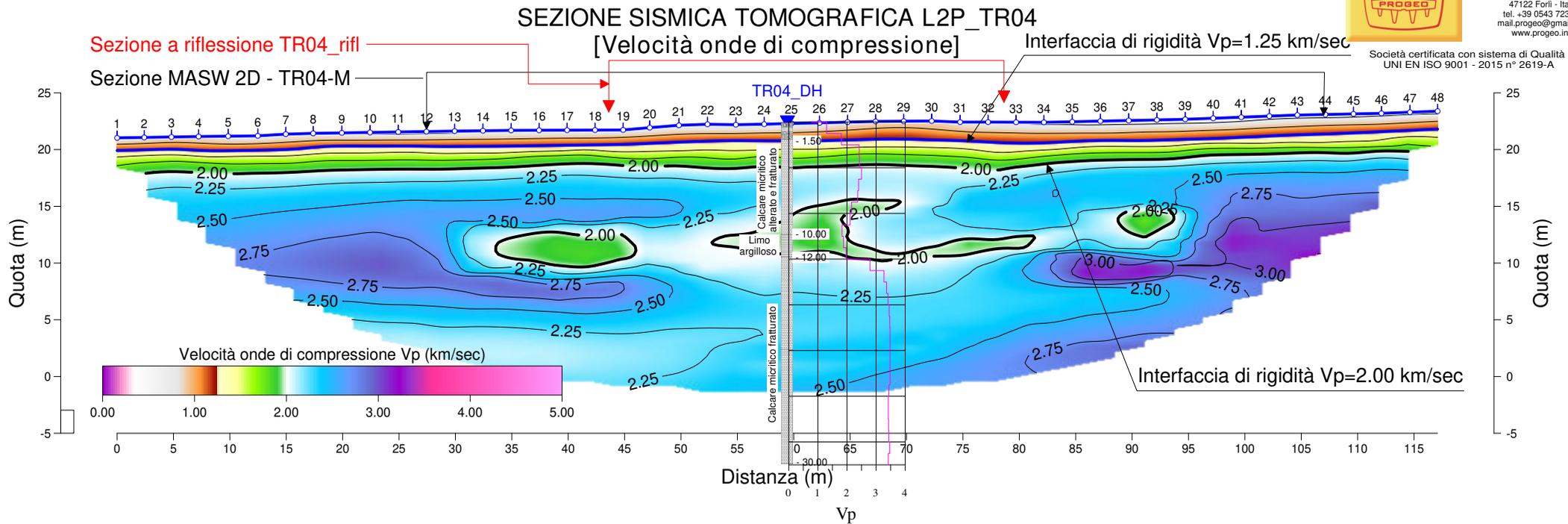








Società certificata con sistema di Qualità  
UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A



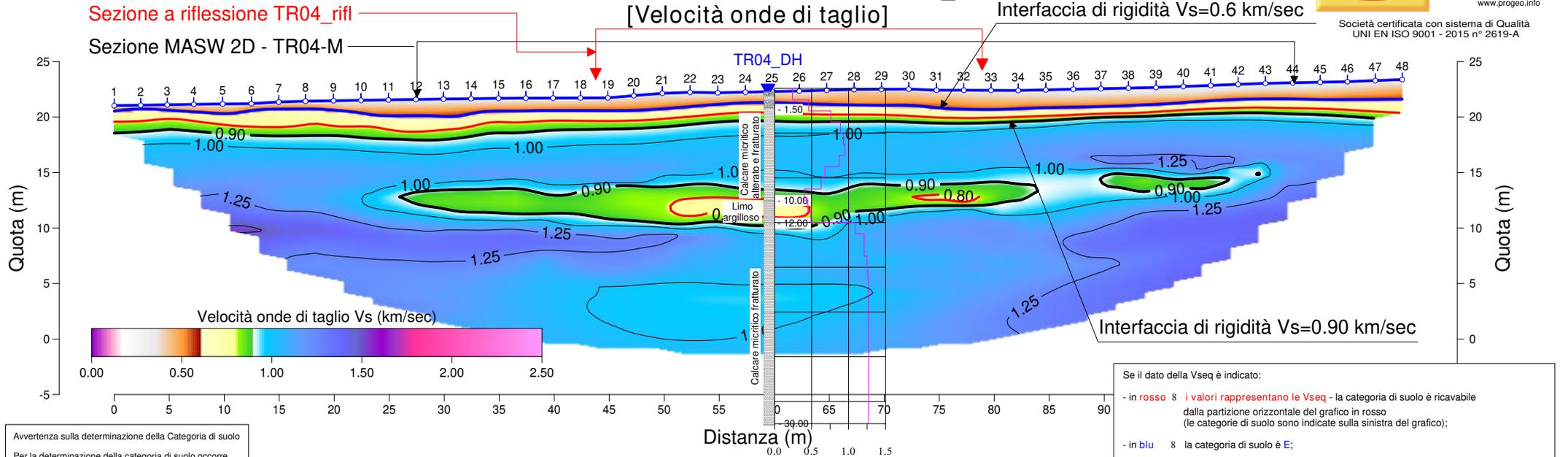
Scala 1:500

Allegato 23



Società certificata con sistema di Qualità  
UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

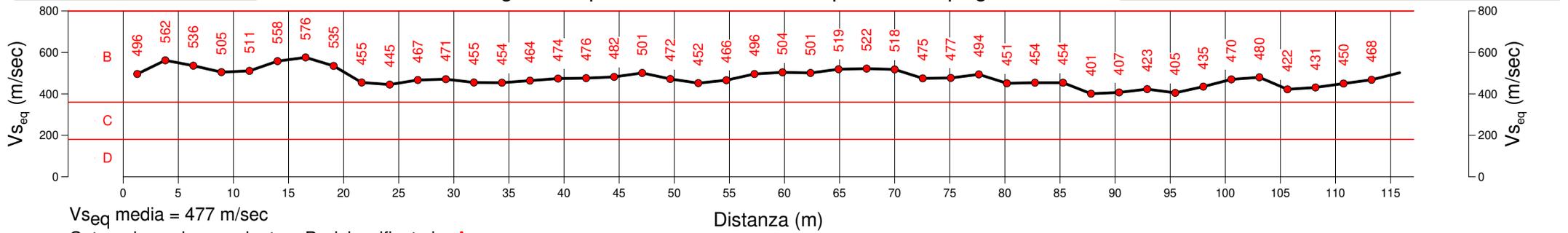
### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA L2S\_TR04 [Velocità onde di taglio]



**Avvertenza sulla determinazione della Categoria di suolo**  
Per la determinazione della categoria di suolo occorre verificare se la profondità dell'interfaccia Vs=800 m/sec è inferiore a 30 m e se la Vseq < 360 m/sec. Nel qual caso la categoria di suolo diviene E.

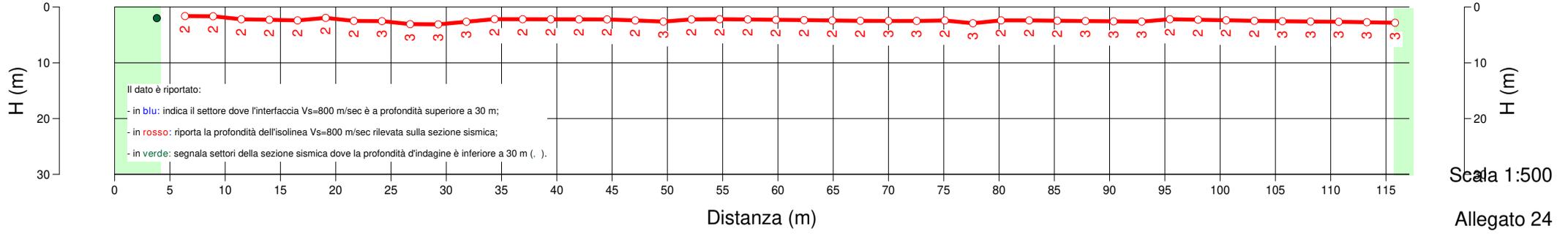
Se il dato della Vseq è indicato:  
- in rosso i valori rappresentano le Vseq - la categoria di suolo è ricavabile dalla partizione orizzontale del grafico in rosso (le categorie di suolo sono indicate sulla sinistra del grafico);  
- in blu la categoria di suolo è E;  
- in verde dato non conforme in quanto si fa riferimento alle Vsh calcolate per una profondità della sezione sismica, su quella verticale, inferiore a 30 m.

### Log Vseq - quota di riferimento al piano campagna

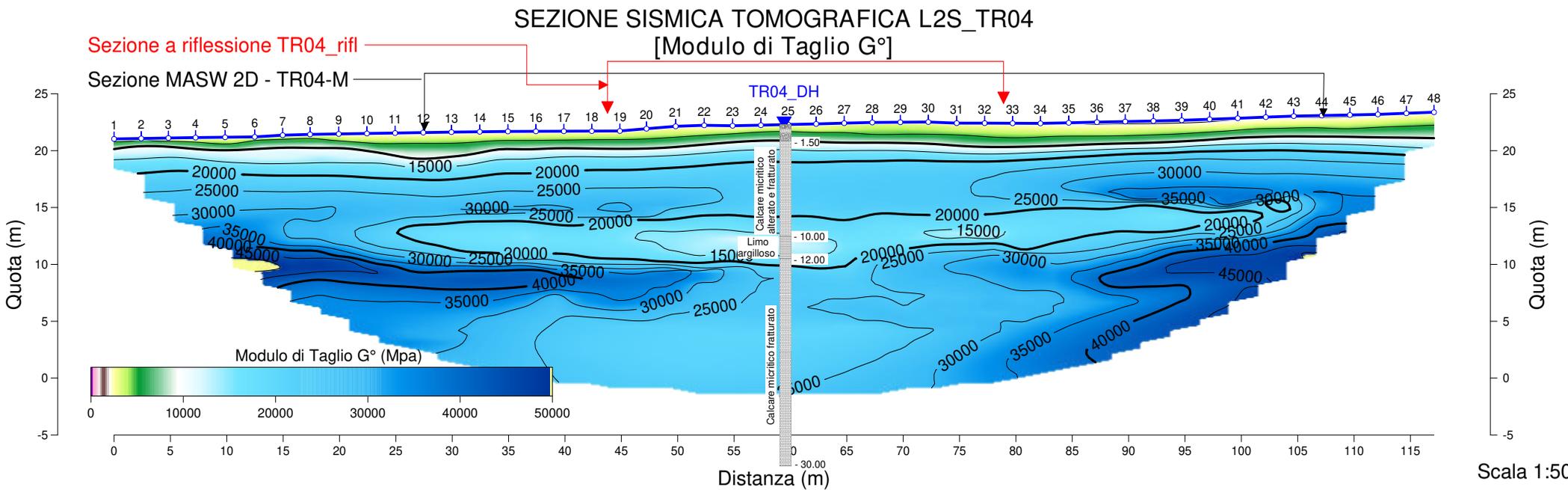
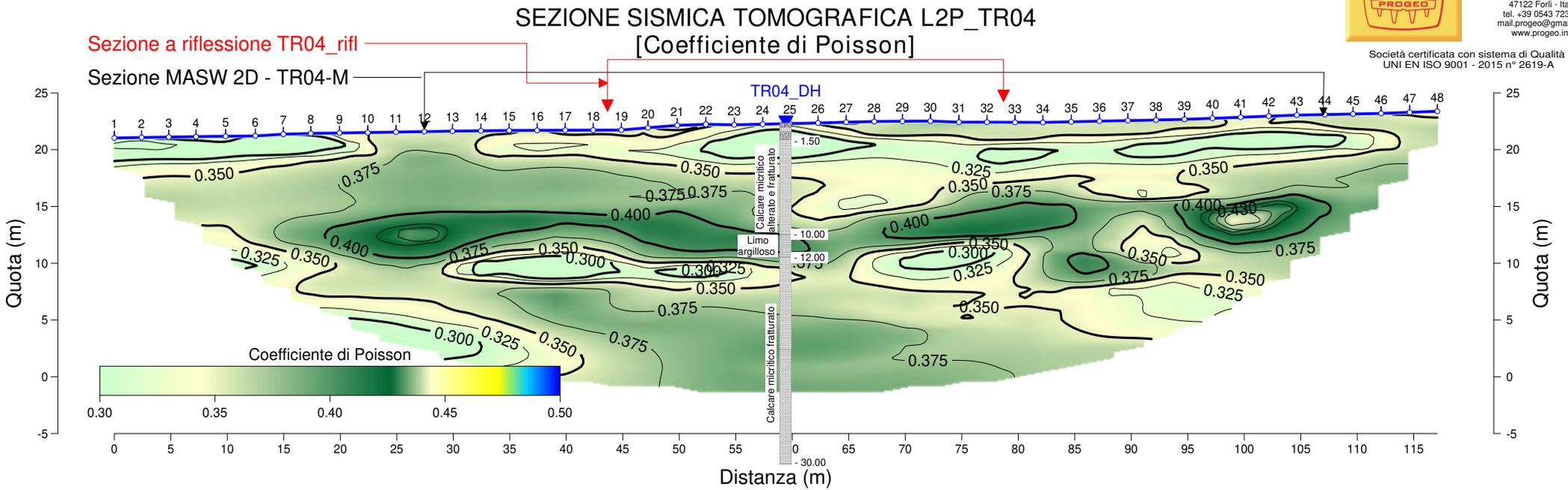


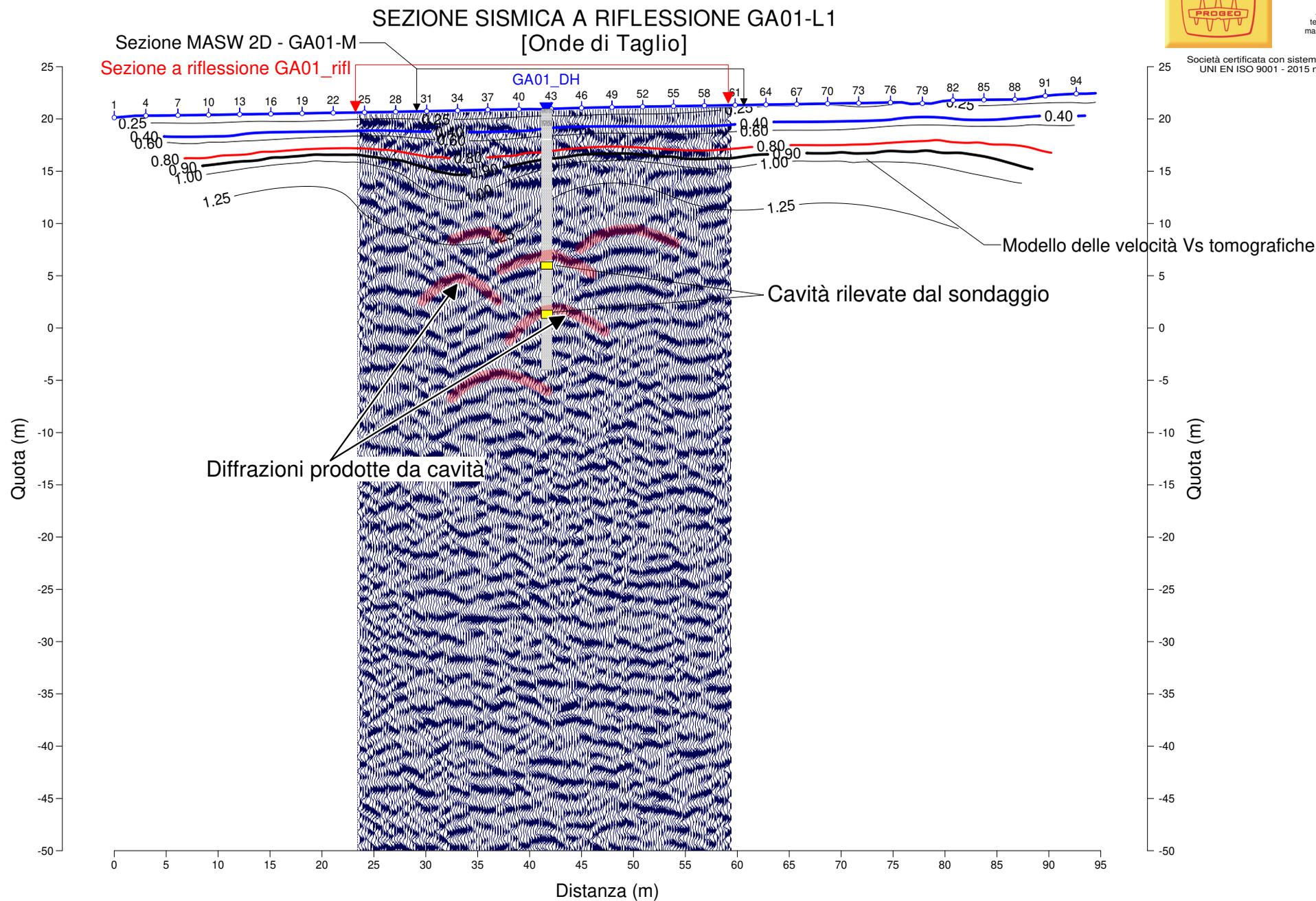
Vseq media = 477 m/sec  
Categoria suolo prevalente = B riclassificato in A  
(suolo con Vs < 800 m/sec e spessore inferiore a 3 m)

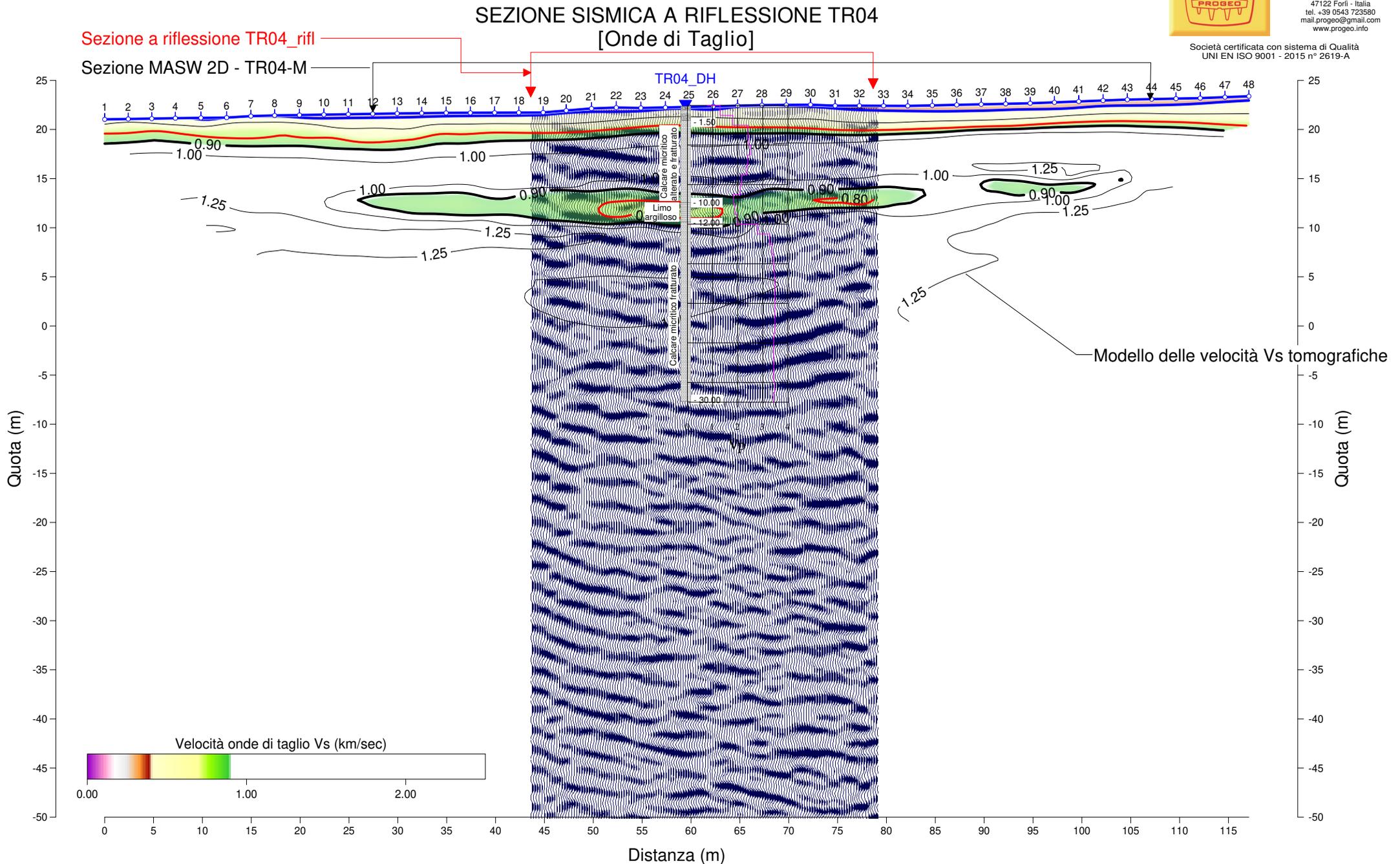
### Analisi degli spessori per il calcolo della Vseq

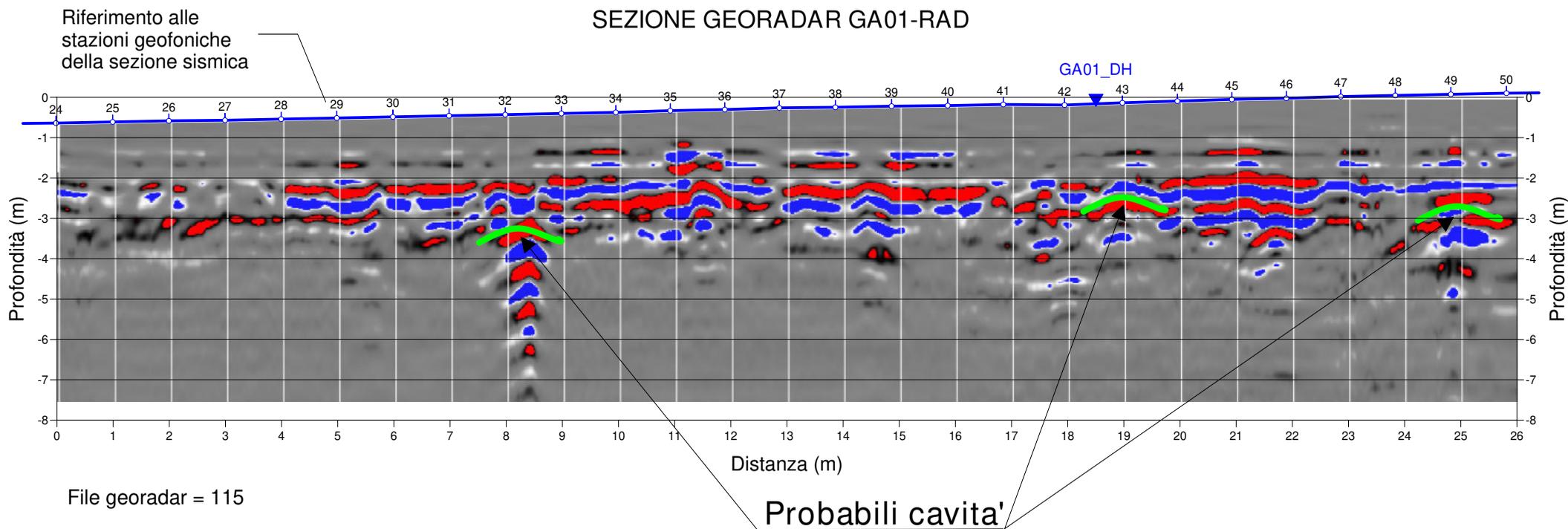


Il dato è riportato:  
- in blu: indica il settore dove l'interfaccia Vs=800 m/sec è a profondità superiore a 30 m;  
- in rosso: riporta la profondità dell'isolinia Vs=800 m/sec rilevata sulla sezione sismica;  
- in verde: segnala settori della sezione sismica dove la profondità d'indagine è inferiore a 30 m ( ).







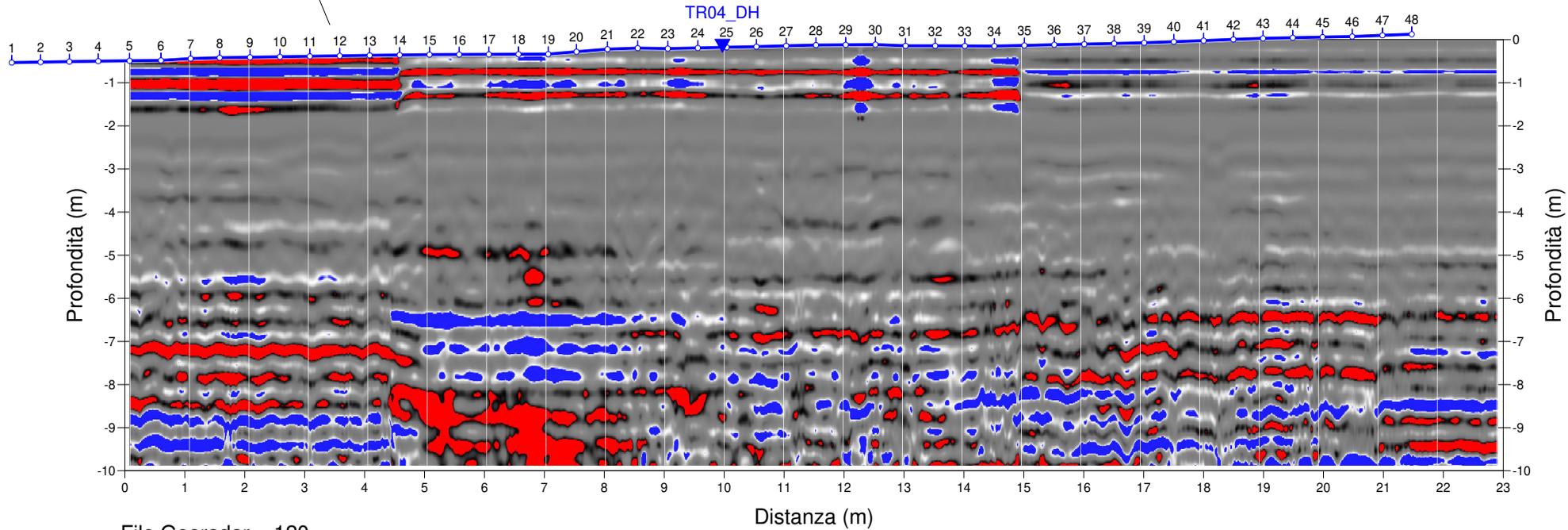




Riferimento alle  
stazioni geofoniche  
della sezione sismica

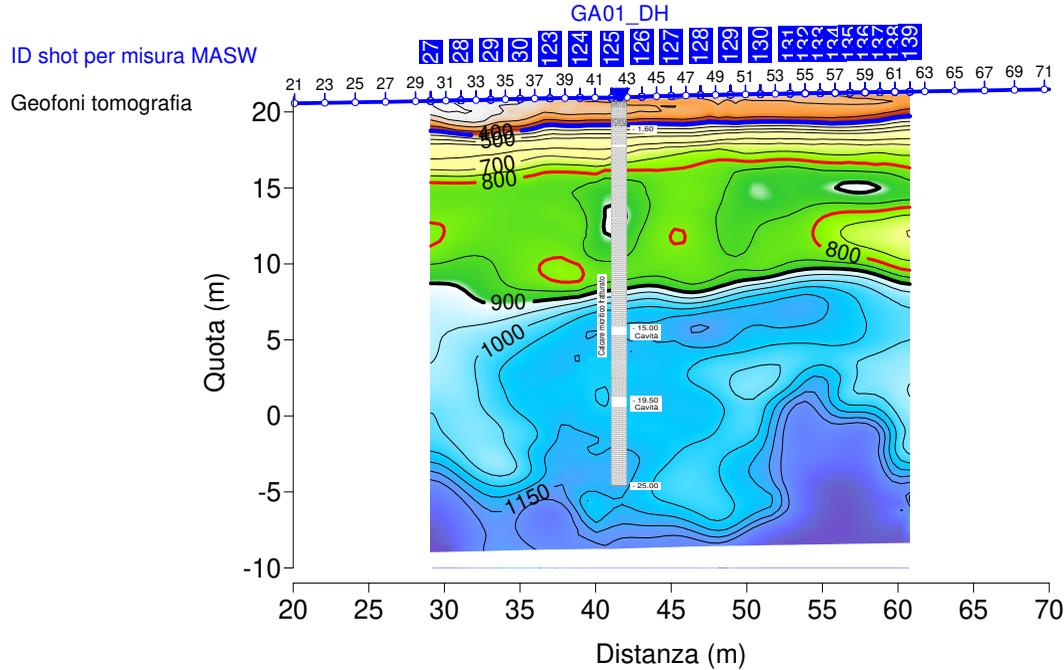
### SEZIONE GEORADAR TR04

TR04\_DH

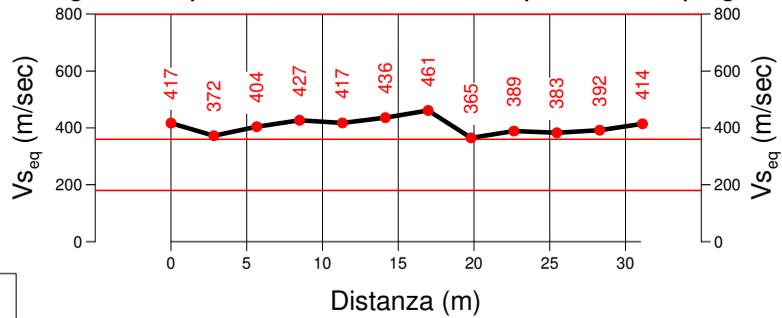


File Georadar = 120

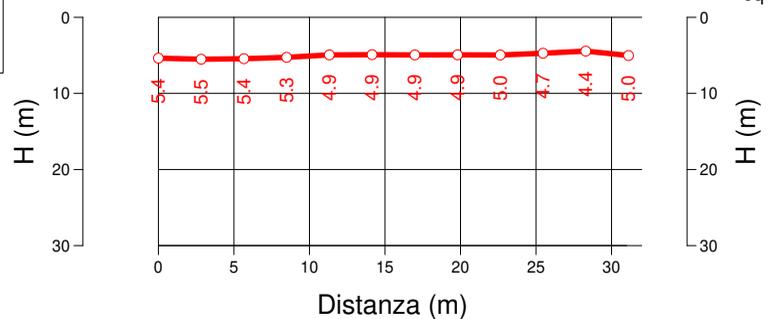
# SEZIONE GA01-MAS (MASW 2D) [Velocità onde di taglio]



## Log $V_{seq}$ - quota di riferimento al piano campagna



## Analisi degli spessori per il calcolo della $V_{seq}$



**Avvertenza sulla determinazione della Categoria di suolo**

Per la determinazione della categoria di suolo occorre verificare se la profondità dell'interfaccia  $V_s=800$  m/sec è inferiore a 30 m e se la  $V_{seq}<360$  m/sec. Nel qual caso la categoria di suolo diviene **E**

**Se il dato della  $V_{seq}$  è indicato:**

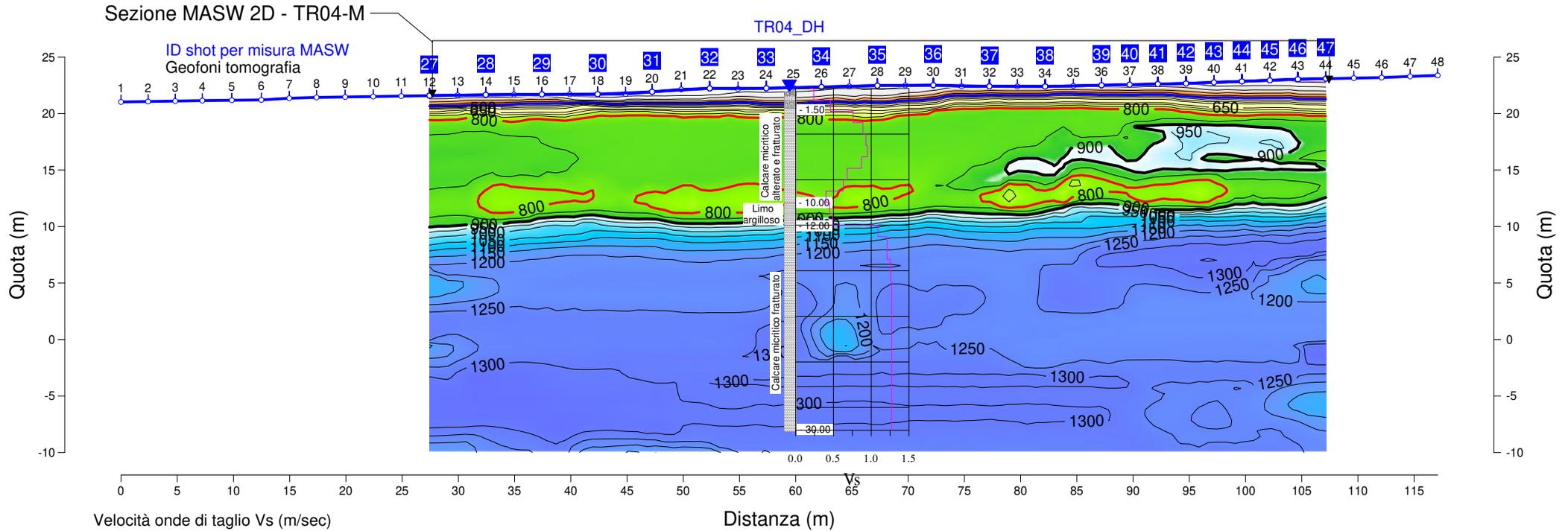
- in rosso  $\delta$  i valori rappresentano le  $V_{seq}$  - la categoria di suolo è ricavabile dalla partizione orizzontale del grafico in rosso (le categorie di suolo sono indicate sulla sinistra del grafico);

- in blu  $\delta$  la categoria di suolo è **E**;

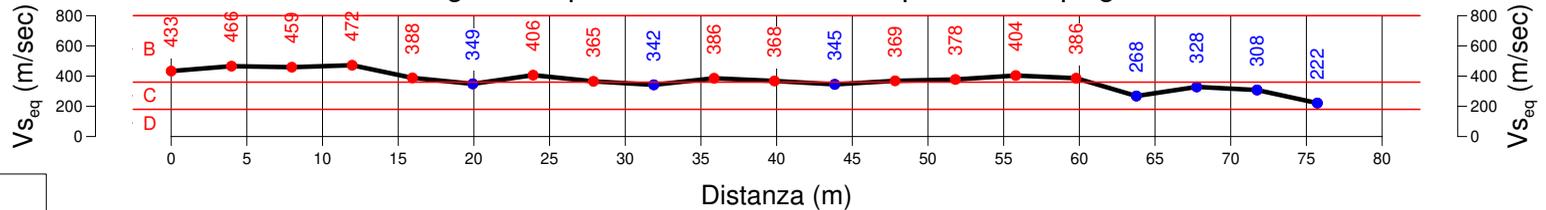
- in verde  $\delta$  dato non conforme in quanto si fa riferimento alle  $V_{sh}$  calcolate per una profondità della sezione sismica, su quella verticale, inferiore a 30 m.



## SEZIONE TRA04-MAS (MASW 2D) [Velocità onde di taglio]



### Log $V_{seq}$ - quota di riferimento al piano campagna



**Avvertenza sulla determinazione della Categoria di suolo**

Per la determinazione della categoria di suolo occorre verificare se la profondità dell'interfaccia  $V_s=800$  m/sec è inferiore a 30 m e se la  $V_{seq}<360$  m/sec. Nel qual caso la categoria di suolo diviene **E**

**Se il dato della  $V_{seq}$  è indicato:**

- in rosso  $\otimes$  i valori rappresentano le  $V_{seq}$  - la categoria di suolo è ricavabile dalla partizione orizzontale del grafico in rosso (le categorie di suolo sono indicate sulla sinistra del grafico);

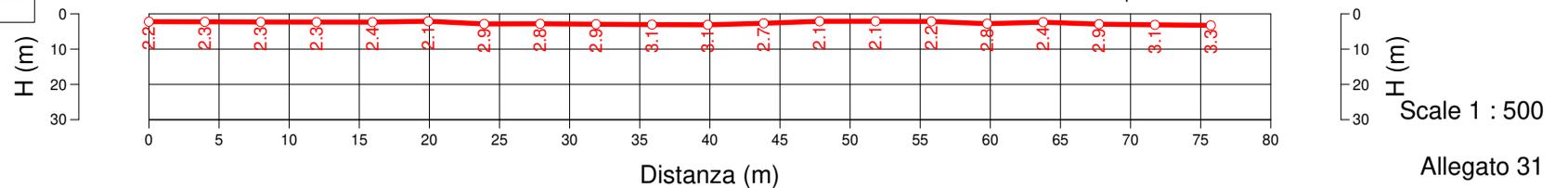
- in blu  $\otimes$  la categoria di suolo è **E**;

- in verde  $\otimes$  dato non conforme in quanto si fa riferimento alle  $V_{sh}$  calcolate per una profondità della sezione sismica, su quella verticale, inferiore a 30 m.

$V_{seq}$  media = 477 m/sec

Categoria suolo prevalente = **B** riclassificato in **A**  
(suolo con  $V_s=800$  m/sec spessore inferiore a 3 m)

### Analisi degli spessori per il calcolo della $V_{seq}$

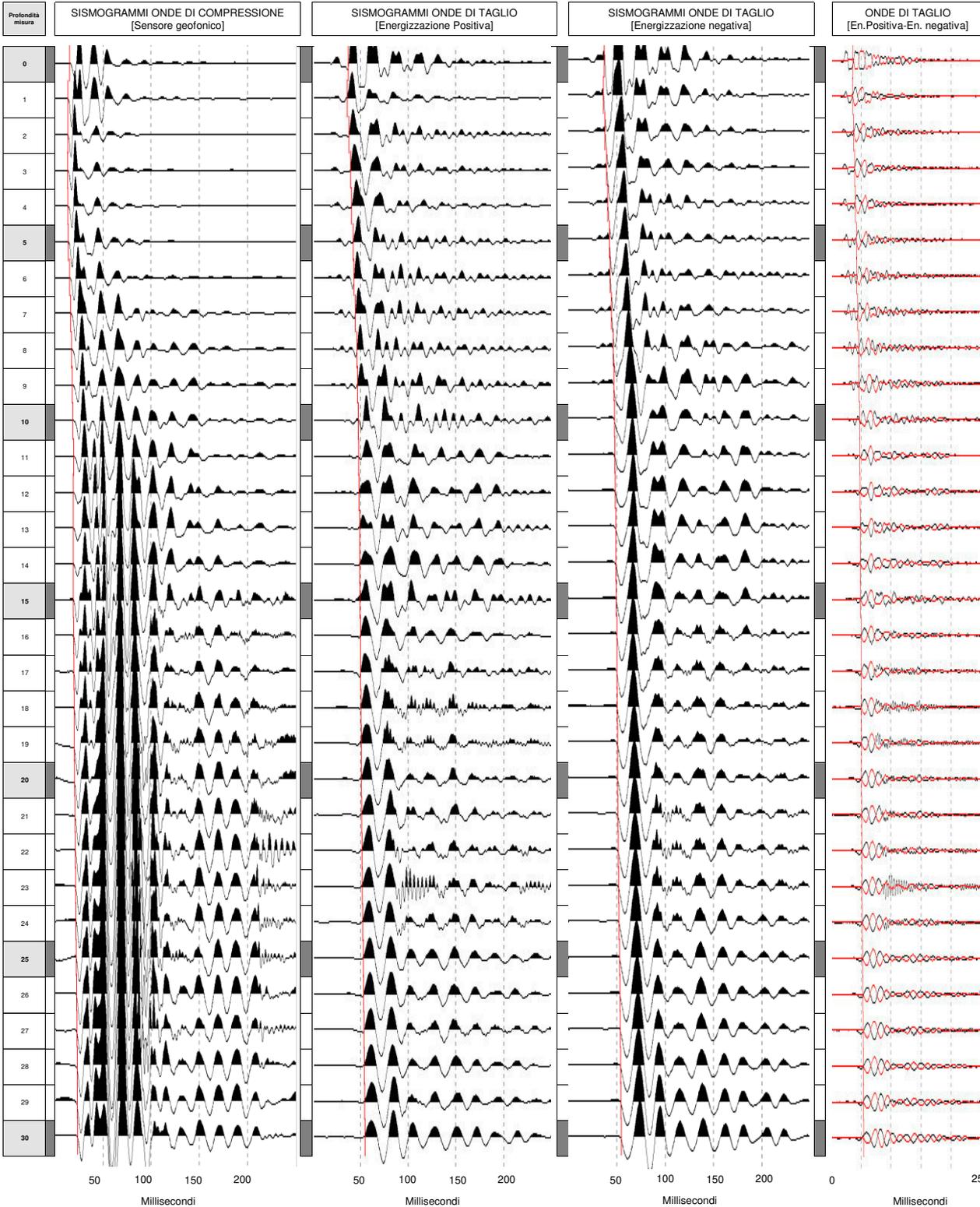


**COMMITTENTE**  
**DOWN HOLE**  
**Località - Progetto**  
**Data acquisizione**

**ITALFERR**  
**TR 04**  
**Bari**  
**16 Dicembre 2020**

**SISMOGRAMMI**  
 Misura eseguita con sonda 3d costituita da due gruppi di sensori, con orientamento tridirezionale, a distanza di 1 m  
**Distanza bocca foro - shot = 1.8 m**

Sulla medesima immagine sono riportati i sismogrammi relativi ai sensori verticali per le onde di compressione e orizzontali per le onde di taglio, posti ad una interdistanza di 1 m.



**STRATIGRAFIA**

Da 0.00 a 1.50 m  
 Riperto  
 Limo debolmente argilloso  
 sabbioso sciolto.

Da 1.50 m a 9.80 m  
 Calcare micreo bianco, a  
 struttura compatta, a luoghi  
 vacuolare, alterazione da  
 media a intensa, grado  
 di durezza ISRM: R2-R3 (da  
 debole a mediamente  
 resistente), fratturato, con  
 fratture da molto ravvicinate  
 a ravvicinate, sub-verticali, da  
 piano a irregolari, aperte, con  
 limo argilloso residuo di  
 riempimento e patine di  
 ossidazione rossastre sulle  
 superfici di rottura.  
 La discontinuità di  
 stratificazione (giunti)  
 si presentano sub-orizzontali,  
 la centometriche a  
 decimetriche, a luoghi con  
 patine di ossidazione  
 rossastre.  
 A luoghi il livello si presenta  
 fratturato a causa  
 dell'elevata fratturazione.

Da 9.80 m a 11.80 m  
 Limo argilloso, debolmente  
 umido, coesivo.

Da 11.80 m a 30.00 m  
 Calcare micreo bianco, a  
 struttura compatta, a luoghi  
 vacuolare, alterazione da  
 media a intensa, grado  
 di durezza ISRM: R2-R3 (da  
 debole a mediamente  
 resistente), fratturato, con  
 fratture da molto ravvicinate  
 a ravvicinate, sub-verticali, da  
 piano a irregolari, aperte, con  
 limo argilloso residuo di  
 riempimento e patine di  
 ossidazione rossastre sulle  
 superfici di rottura.  
 La discontinuità di  
 stratificazione (giunti)  
 si presentano sub-orizzontali,  
 la centometriche a  
 decimetriche, a luoghi con  
 patine di ossidazione  
 rossastre.  
 A luoghi il livello si presenta  
 fratturato a causa  
 dell'elevata fratturazione.

Fig. 32

<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>TR 04</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Bari</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
Progressivo
Distanza bocca foro - shot = 1.8 m



Falda = n.r.

Profondità misura	Tempi		Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	v	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²
	Onde p msec	Onde s msec							
0	2.91	6.00	0.78	0.19	0.47	1.64	1844	629	9302
1	2.49	5.28	1.30	0.24	0.48	1.73	3026	1021	28274
2	2.40	6.93	1.81	0.46	0.47	2.03	12677	4323	62337
3	3.00	8.53	2.42	0.76	0.45	2.31	39468	13656	119730
4	3.58	9.76	2.43	0.89	0.42	2.41	55791	19623	118565
5	3.98	11.35	2.50	0.93	0.42	2.43	60587	21330	126519
6	5.20	12.80	2.40	0.95	0.41	2.44	63642	22629	113071
7	6.30	14.03	2.37	0.87	0.42	2.39	52041	18288	112373
8	7.49	15.49	2.16	0.68	0.45	2.25	30430	10528	92643
9	8.08	17.03	2.11	0.63	0.45	2.20	25731	8865	88057
10	8.68	19.06	1.83	0.40	0.47	1.97	9662	3276	63181
11	9.51	19.66	1.88	0.45	0.47	2.03	12383	4214	67221
12	9.14	18.56	1.97	0.49	0.47	2.07	14738	5022	74838
13	9.14	18.07	2.79	1.09	0.41	2.53	85943	30470	159701
14	8.92	18.06	3.27	1.21	0.42	2.59	109320	38467	230519
15	9.14	18.54	3.36	1.21	0.43	2.60	111125	38987	247517
16	9.39	19.03	3.41	1.25	0.42	2.62	118951	41814	255378
17	9.66	19.15	3.45	1.26	0.42	2.62	120749	42434	260706
18	10.00	19.53	3.47	1.27	0.42	2.63	123057	43260	263941
19	10.28	19.78	3.48	1.27	0.42	2.63	122299	42958	266387
20	10.52	20.03	3.48	1.27	0.42	2.63	123123	43256	267159
21	10.88	20.26	3.48	1.27	0.42	2.63	123696	43467	267284
22	11.25	20.64	3.48	1.27	0.42	2.63	123489	43390	267322
23	11.62	20.99	3.48	1.27	0.42	2.63	123764	43493	267271
24	11.99	21.41	3.44	1.27	0.42	2.63	123271	43390	258424
25	12.32	21.97	3.42	1.27	0.42	2.63	123411	43467	255811
26	12.61	22.33	3.42	1.27	0.42	2.63	122998	43314	255770
27	12.85	22.82	3.43	1.27	0.42	2.63	123360	43441	256486
28	13.10	23.16	3.44	1.27	0.42	2.63	123347	43416	258697
29	13.34	23.56	3.47	1.27	0.42	2.63	123490	43416	264458
30	13.48	23.92	3.42	1.27	0.42	2.63	123219	43390	256350

STRATIGRAFIA	PARAMETRI INTERVALLARI MEDI						
	Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	v	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²
Da 0.00 a 1.50 m Riponto Lim. debolmente argilloso sabbioso scuro.	1.04	0.22	0.47	1.69	2435	825	18788
Da 1.50 m a 9.80 m Calcere micropor. biancastro, a struttura compatta, a luoghi vascolari, alterazione da media a intensa, grado di durizia (MSE) 10-13 (da debole a mediamente resistente), fratturato, con fratture da molto ravvicinate a ravvicinate, sub-verticali, da piana a irregolari, aperte, con limo argilloso rossastro di riempimento e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. La discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, la centimetriche a decimetriche, a luoghi con patine di ossidazione rossastre. A luoghi il livello si presenta frantumato a causa dell'elevata fratturazione.	2.27	0.77	0.43	2.31	42546	14905	104162
Da 9.80 m a 11.80 m Lim. argilloso, debolmente umido, rossastro.	1.86	0.43	0.47	2.00	11022	3745	65201
Da 11.80 m a 30.00 m Calcere micropor. biancastro, a struttura compatta, a luoghi vascolari, alterazione da media a intensa, grado di durizia (MSE) 10-13 (da debole a mediamente resistente), fratturato, con fratture da molto ravvicinate a ravvicinate, sub-verticali, da piana a irregolari, aperte, con limo argilloso rossastro di riempimento e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. La discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, la centimetriche a decimetriche, a luoghi con patine di ossidazione rossastre. A luoghi il livello si presenta frantumato a causa dell'elevata fratturazione.	3.32	1.21	0.42	2.59	113860	40045	243896

STIMA DEGLI ERRORI											
Vp (km/sec)			Vs (km/sec)			ε					
min	media	max	min	media	max						
0.66	0.78	0.89	0.117	0.19	0.19	0.20	0.004				
1.30	1.30	1.30	0.000	0.24	0.24	0.24	0.004				
1.70	1.81	1.93	0.117	0.45	0.46	0.46	0.009				
2.33	2.42	2.51	0.090	0.73	0.76	0.78	0.025				
2.33	2.43	2.53	0.101	0.88	0.89	0.91	0.012				
2.40	2.50	2.61	0.101	0.92	0.93	0.93	0.008				
2.30	2.40	2.50	0.101	0.92	0.95	0.99	0.031				
2.32	2.37	2.44	0.064	0.84	0.87	0.90	0.030				
2.04	2.16	2.27	0.117	0.65	0.68	0.70	0.025				
1.99	2.11	2.22	0.117	0.62	0.63	0.64	0.008				
1.79	1.83	1.91	0.059	0.38	0.40	0.43	0.026				
1.81	1.88	1.93	0.061	0.43	0.45	0.47	0.019				
1.93	1.97	2.02	0.047	0.47	0.49	0.51	0.018				
2.76	2.79	2.82	0.033	1.01	1.09	1.15	0.069				
3.15	3.27	3.39	0.117	1.16	1.21	1.24	0.039				
3.25	3.36	3.49	0.117	1.19	1.21	1.23	0.018				
3.30	3.41	3.54	0.117	1.19	1.25	1.29	0.051				
3.33	3.45	3.57	0.117	1.21	1.26	1.29	0.044				
3.35	3.47	3.59	0.117	1.22	1.27	1.31	0.044				
3.37	3.48	3.60	0.117	1.22	1.27	1.30	0.037				
3.37	3.48	3.60	0.117	1.23	1.27	1.30	0.036				
3.37	3.48	3.61	0.117	1.23	1.27	1.30	0.038				
3.37	3.48	3.61	0.117	1.23	1.27	1.30	0.036				
3.37	3.48	3.61	0.117	1.23	1.27	1.30	0.038				
3.37	3.44	3.47	0.052	1.23	1.27	1.30	0.037				
3.37	3.42	3.47	0.051	1.23	1.27	1.30	0.038				
3.37	3.42	3.47	0.051	1.23	1.27	1.30	0.038				
3.37	3.43	3.47	0.051	1.23	1.27	1.30	0.040				
3.37	3.44	3.47	0.052	1.23	1.27	1.30	0.039				
3.37	3.47	3.57	0.101	1.23	1.27	1.30	0.037				
3.36	3.42	3.47	0.051	1.23	1.27	1.30	0.037				

Legenda parametri dinamici			
<b>Tp</b>	Tempi onde di compres: millisecondi	<b>γ</b>	Peso di volume T/m³
<b>Ts</b>	Tempi onde di taglio millisecondi	<b>Edin</b>	Modulo di Elasticità dinamico Kg/cm
<b>Vp</b>	Velocità onde di compres Km/sec	<b>Gdin</b>	Modulo di Taglio dinamico Kg/cm
<b>Vs</b>	Velocità onde di taglio Km/sec	<b>Kdin</b>	Modulo di Compressibilità dinamico Kg/cm
<b>v</b>	Coefficiente di Poisson	<b>ε</b>	Campioni di laboratorio

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI  
(NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI - D.M. del 17 gennaio 2018)

$$V_{S_{eq}} = \frac{H}{\sum_{i=1,II} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

Quota Vs=800 m/sec = **3** m  
Vs,eq = **312** m/sec  
G<sub>s,eq</sub> = **2230** Kg/cm²

**CATEGORIA SUOLO = A**

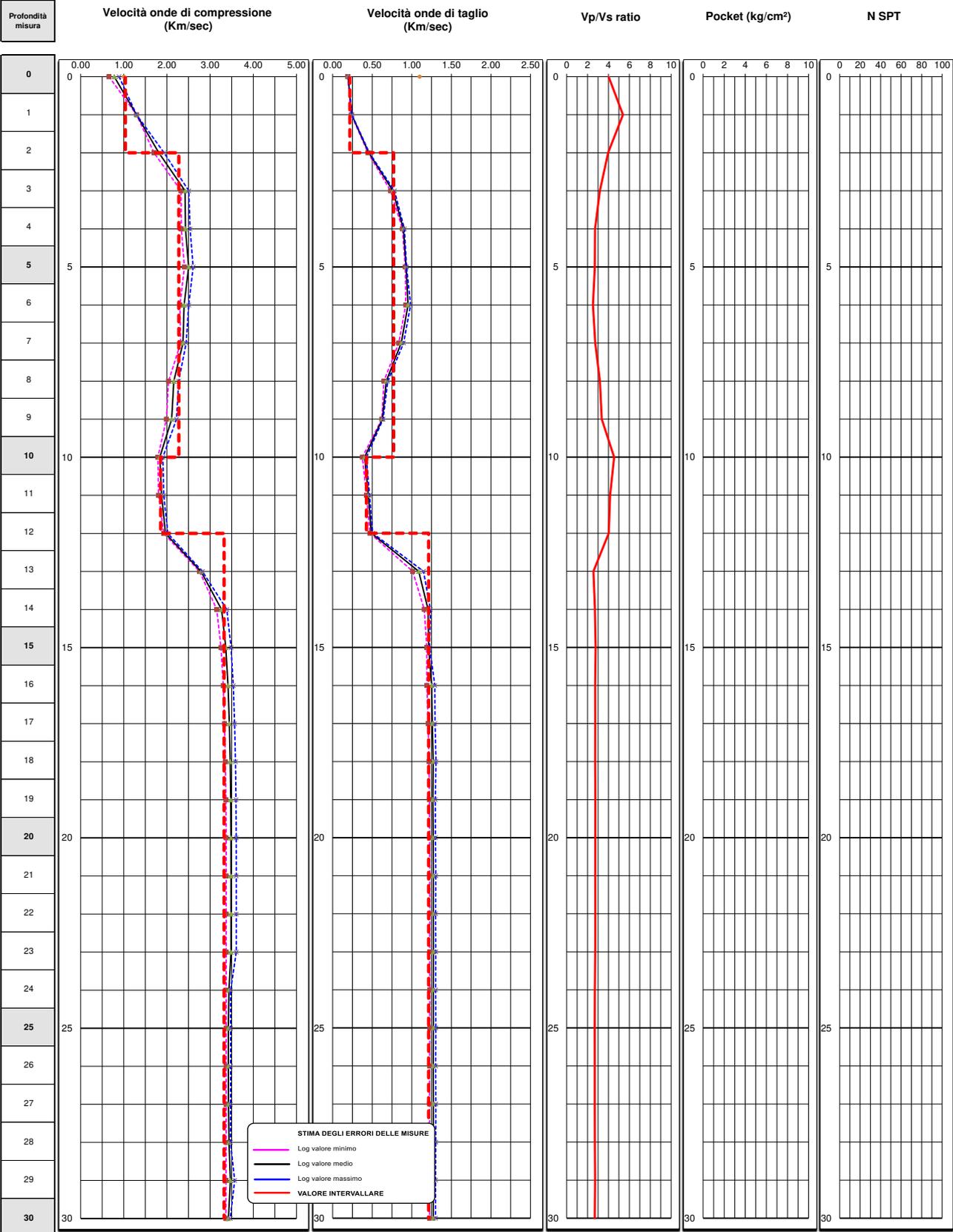
<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>TR 04</b>
<b>Bari</b>
<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 1.8 m</b>



**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 1.50 m  
Ripporto  
Limo debolmente argilloso  
sabbioso sciutto.

Da 1.50 m a 9.80 m  
Calcare micritico biancastro, a  
struttura compatta, a luoghi  
vacuolare, alterazione da  
media a intensa, grado  
di durezza ISRM: R2-R3 (da  
debole a mediamente  
resistente), fratturato, con  
fratture da molto ravvicinate  
a ravvicinate, sub-verticali, da  
piane a irregolari, aperte, con  
limo argilloso rossastro di  
riempimento e patine di  
ossidazione rossastre sulle  
superfici di rottura.  
Le discontinuità di  
stratificazione (giunti)  
si presentano sub-orizzontali,  
la centimetriche a  
decimetriche, a luoghi con  
patine di ossidazione  
rossastre.  
A luoghi il livello si presenta  
frantumato a causa  
dell'elevata fratturazione.

Da 9.80 m a 11.80 m  
Limo argilloso, debolmente  
umido, rossastro.

Da 11.80 m a 30.00 m  
Calcare micritico biancastro, a  
struttura compatta, a luoghi  
vacuolare, alterazione da  
media a intensa, grado  
di durezza ISRM: R2-R3 (da  
debole a mediamente  
resistente), fratturato, con  
fratture da molto ravvicinate  
a ravvicinate, sub-verticali, da  
piane a irregolari, aperte, con  
limo argilloso rossastro di  
riempimento e patine di  
ossidazione rossastre sulle  
superfici di rottura.  
Le discontinuità di  
stratificazione (giunti)  
si presentano sub-orizzontali,  
la centimetriche a  
decimetriche, a luoghi con  
patine di ossidazione  
rossastre.  
A luoghi il livello si presenta  
frantumato a causa  
dell'elevata fratturazione.

Fig. 34

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>TR 04</b>
<b>Bari</b>
<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 1.8 m</b>



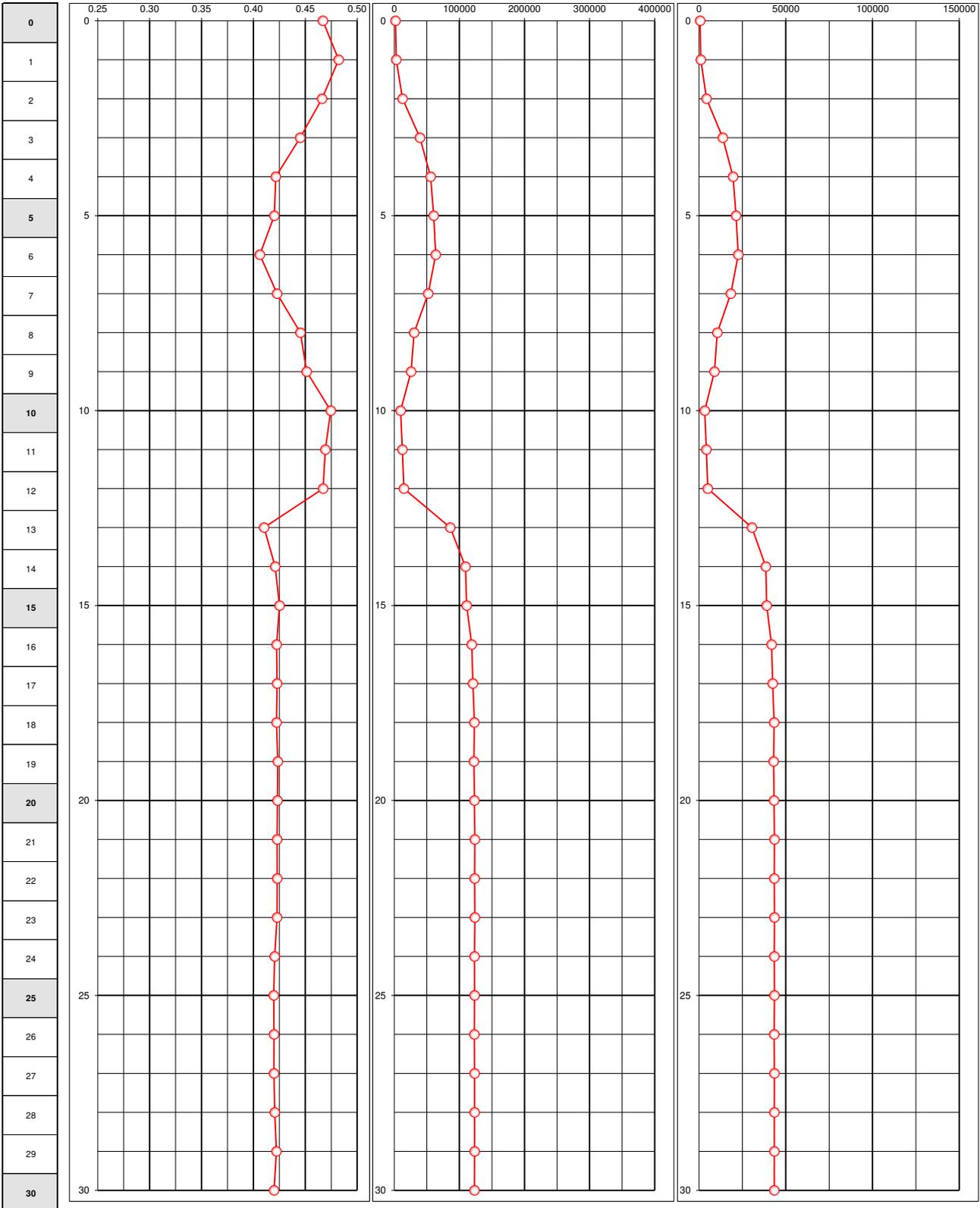
**Stratigrafia sintetica**

<b>Profondità misura</b>
--------------------------

**Coefficiente di Poisson**

**Modulo di Elasticità E° (kg/cm²)**

**Modulo di Taglio G° (kg/cm²)**



Da 0.00 a 1.50 m  
Ripporto  
Limo debole argilloso sabbioso scuro.

Da 1.50 m a 9.80 m  
Calcare micritico biancastro, a struttura compatta, a luoghi vacuolare, alterazione da media a intensa, grado di durezza ISRM: R2-R3 (da debole a mediamente resistente), fratturato, con fratture da molto ravvicinate a ravvicinate, sub-verticali, da piano a irregolari, aperte, con limo argilloso rossastro di riempimento e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, la centimetriche a decimetriche, a luoghi con patine di ossidazione rossastre. A luoghi il livello si presenta frantumato a causa dell'elevata fratturazione.

Da 9.80 m a 11.80 m  
Limo argilloso, debole umido, rossastro.

Da 11.80 m a 30.00 m  
Calcare micritico biancastro, a struttura compatta, a luoghi vacuolare, alterazione da media a intensa, grado di durezza ISRM: R2-R3 (da debole a mediamente resistente), fratturato, con fratture da molto ravvicinate a ravvicinate, sub-verticali, da piano a irregolari, aperte, con limo argilloso rossastro di riempimento e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, la centimetriche a decimetriche, a luoghi con patine di ossidazione rossastre. A luoghi il livello si presenta frantumato a causa dell'elevata fratturazione.

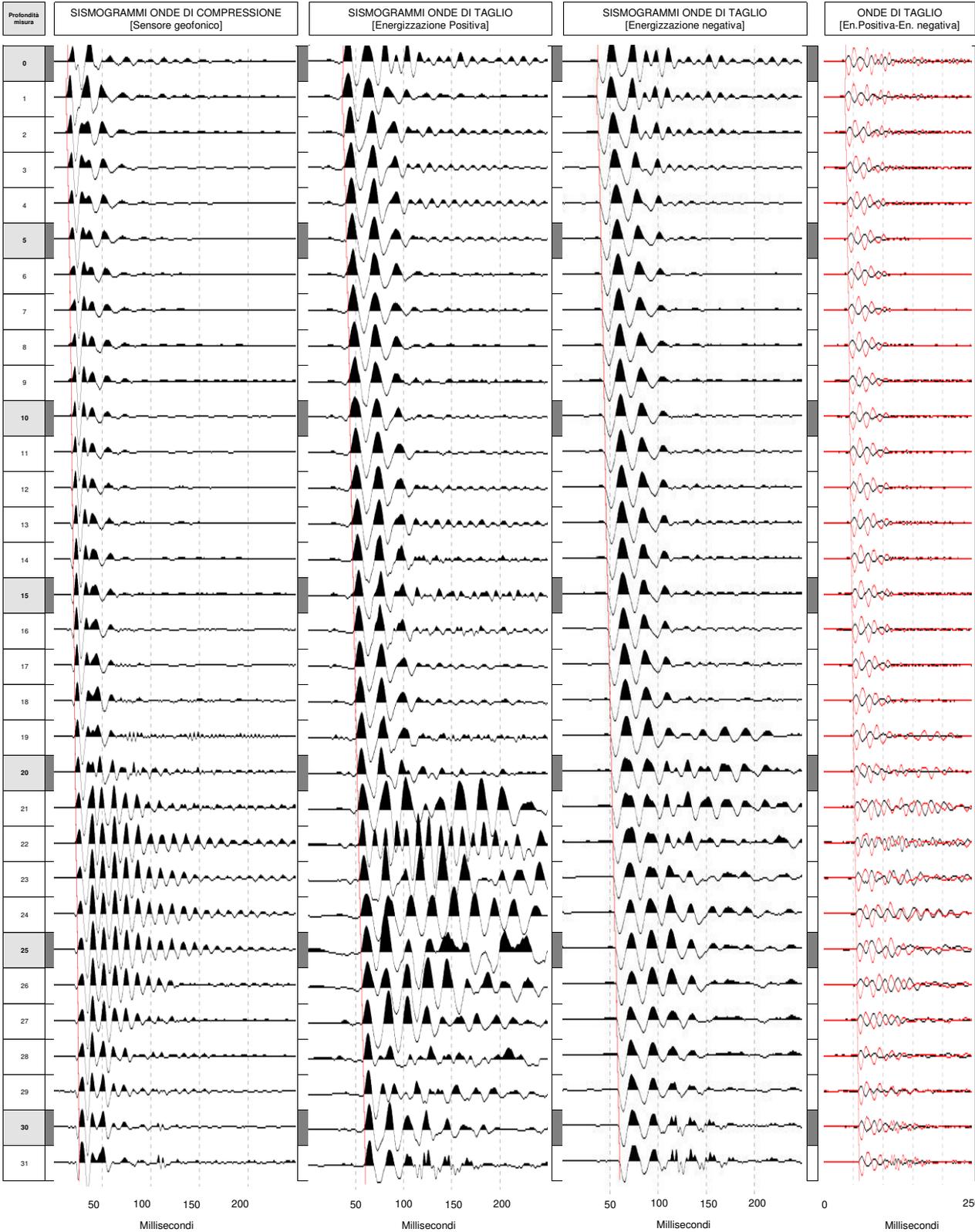
Fig. 35

**COMMITTENTE**  
**DOWN HOLE**  
**Località - Progetto**  
**Data acquisizione**

**ITALFERR**  
**GA 03**  
**Bari**  
**17 Dicembre 2020**

**SISMOGRAMMI**  
 Misura eseguita con sonda 3d costituita da due gruppi di sensori, con orientamento tridirezionale, a distanza di 1 m  
**Distanza bocca foro - shot = 2 m**

Sulla medesima immagine sono riportati i sismogrammi relativi ai sensori verticali per le onde di compressione e orizzontali per le onde di taglio, posti ad una interdistanza di 1 m.



**STRATIGRAFIA**

Da 0,00 a 0,90 m  
 Riperto

Da 0,90 m a 2,60 m  
 Calcarenite (biocstrutta fino a 1,40m) alterata dalle operazioni di prelievo e carteggio, che assume l'aspetto di una ghiaia eterometrica.

Da 2,60 m a 30,00 m  
 Calcare micreo bianco, a struttura di compatta a debolmente vacuolare con rare striole violacee, da debolmente a moderatamente alterato; grado di durezza ISRM: R2-R3 (roccia debolmente resistente), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a dissecazione, da 10° a sub-verticali, irregolari, aperte, con fimo agglottato occasionale di riempimento (da 3,50m a 3,80m e 23,50m a 23,80m) e patine di ossidazione rosse sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetriche.

Da 25,00m a 28,80m presenti livelli da centimetri a decimetrici in cui la struttura si presenta da biocstrutta a strombolica. Presenti cavità da 23,80m a 22,50m (con rinvenuta di acqua durante la perforazione) e da 23,80m a 22,50m.

Fig. 36

<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>GA 03</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Bari</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>17 Dicembre 2020</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2 m</b>



Falda = n.r.

Profondità misura	Tempi		Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	ν	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²
	Onde p msec	Onde s msec							
0	2.00	5.71	0.85	0.21	0.47	1.67	2170	739	11197
1	0.65	4.88	1.18	0.27	0.47	1.79	4063	1380	23716
2	1.40	6.39	1.42	0.42	0.45	1.99	10421	3590	35918
3	2.21	7.34	1.73	0.70	0.40	2.27	32115	11460	54164
4	2.92	8.26	2.07	0.85	0.40	2.37	48788	17440	80281
5	3.56	9.01	2.10	0.94	0.37	2.44	60686	22097	79751
6	4.11	9.76	2.10	1.00	0.35	2.47	68291	25229	77643
7	4.71	10.63	2.11	1.03	0.34	2.49	72963	27184	76972
8	5.32	11.69	2.41	1.06	0.38	2.51	79944	28992	109875
9	5.66	12.13	2.43	1.05	0.38	2.51	78619	28393	113405
10	5.93	12.76	2.43	1.06	0.38	2.51	79185	28625	112946
11	6.38	13.38	2.43	1.06	0.38	2.51	79200	28625	113233
12	6.69	14.09	2.44	1.06	0.38	2.51	79276	28625	114639
13	7.26	14.63	2.47	1.06	0.39	2.51	79472	28625	118444
14	7.58	15.51	2.51	1.06	0.39	2.51	79711	28625	123413
15	8.06	16.19	2.56	1.06	0.40	2.51	80465	28819	128997
16	8.43	16.88	2.61	1.08	0.40	2.52	83333	29813	135623
17	8.96	17.76	2.61	1.12	0.39	2.55	90676	32688	133719
18	9.21	18.39	2.67	1.14	0.39	2.55	93479	33648	140460
19	9.45	19.13	2.71	1.14	0.39	2.56	95193	34202	146393
20	9.86	20.01	2.74	1.15	0.39	2.56	96811	34761	150105
21	10.25	20.90	2.75	1.16	0.39	2.57	98598	35436	151032
22	10.62	21.73	2.64	1.15	0.38	2.56	95728	34630	135399
23	11.02	22.45	2.59	1.09	0.39	2.53	85716	30783	132575
24	11.71	23.26	2.65	1.12	0.39	2.55	90746	32606	139452
25	12.06	24.42	2.81	1.15	0.40	2.56	96651	34536	159913
26	12.23	25.23	2.86	1.18	0.40	2.58	102026	36492	166597
27	12.54	25.69	2.86	1.18	0.40	2.58	102389	36633	166501
28	12.83	26.52	2.92	1.18	0.40	2.58	102453	36523	175272
29	13.19	27.26	2.88	1.18	0.40	2.58	101794	36366	168920
30	13.55	27.88	2.86	1.17	0.40	2.57	100947	36085	166116
31	13.78	28.63	2.87	1.16	0.40	2.57	99606	35542	168129

**STRATIGRAFIA**

Da 0.00 a 0.50 m  
limo argilloso, sciolto.

Da 3.60 m a 30.00 m  
Calcare micistico-biancastro, a struttura da compatta a spongiosa, alterazione da debole a media, a luoghi intensa, grado di durezza ISRM: R2-R3 (da debole a mediamente resistente), fratturato, con fratture moderatamente ravvicinate, da 60° a sub-verticali, da piano a ondulate, aperte, con patine di ossidazione ruggine sulle superfici di rottura e argilla limosa rissicata di riempimento. Le discontinuità di stratificazione (giunte) si presentano sub-orizzontali, decimetriche.

Da 7.30m-8.30m, 17.10m-17.50m, 24.50m-24.70m, 25.60m-26.00m  
struttura vacuolare (bassa velocità) forti a causa del carsismo. Presenti resti di bivivi.

PARAMETRI INTERVALLARI MEDI										
Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	ν	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²				
0.85	0.21	0.47	1.67	2170	739	11197				
1.30	0.35	0.46	1.89	7242	2485	29817				
2.55	1.08	0.39	2.52	84650	30465	128964				

STIMA DEGLI ERRORI												
Vp (km/sec)			Vs (km/sec)									
min	media	max	min	media	max							
0.81	0.85	0.87	0.207	0.20	0.21	0.21	0.005					
1.17	1.18	1.20	0.016	0.27	0.27	0.29	0.012					
1.32	1.42	1.49	0.085	0.40	0.42	0.45	0.021					
1.68	1.73	1.81	0.068	0.67	0.70	0.76	0.046					
1.97	2.07	2.12	0.078	0.81	0.85	0.90	0.044					
2.07	2.10	2.13	0.031	0.90	0.94	1.00	0.049					
2.08	2.10	2.11	0.014	0.96	1.00	1.06	0.047					
2.09	2.11	2.13	0.023	1.01	1.03	1.07	0.029					
2.34	2.41	2.48	0.069	1.04	1.06	1.09	0.025					
2.38	2.43	2.48	0.050	1.04	1.05	1.07	0.016					
2.37	2.43	2.48	0.052	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.37	2.43	2.48	0.051	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.39	2.44	2.48	0.041	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.46	2.47	2.49	0.014	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.48	2.51	2.54	0.031	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.50	2.56	2.62	0.062	1.05	1.06	1.07	0.011					
2.55	2.61	2.69	0.067	1.06	1.08	1.09	0.017					
2.56	2.61	2.69	0.065	1.11	1.12	1.13	0.011					
2.61	2.67	2.74	0.065	1.11	1.14	1.16	0.023					
2.66	2.71	2.78	0.064	1.12	1.14	1.17	0.026					
2.69	2.74	2.81	0.064	1.13	1.15	1.19	0.029					
2.69	2.75	2.83	0.069	1.13	1.16	1.20	0.035					
2.63	2.64	2.64	0.006	1.14	1.15	1.16	0.011					
2.56	2.59	2.63	0.034	1.08	1.09	1.11	0.011					
2.64	2.65	2.67	0.014	1.11	1.12	1.13	0.011					
2.78	2.81	2.84	0.033	1.14	1.15	1.16	0.011					
2.80	2.86	2.94	0.067	1.14	1.18	1.22	0.039					
2.80	2.86	2.94	0.067	1.15	1.18	1.22	0.039					
2.86	2.92	3.00	0.069	1.14	1.18	1.22	0.040					
2.81	2.88	2.91	0.051	1.14	1.18	1.22	0.039					
2.83	2.86	2.91	0.043	1.14	1.17	1.22	0.039					
2.83	2.87	2.90	0.033	1.13	1.16	1.21	0.036					

Legenda parametri dinamici			
<b>Tp</b>	Tempi onde di compres: millisecondi	<b>γ</b>	Peso di volume T/m³
<b>Ts</b>	Tempi onde di taglio millisecondi	<b>Edin</b>	Modulo di Elasticità dinamico Kg/cm
<b>Vp</b>	Velocità onde di compres Km/sec	<b>Gdin</b>	Modulo di Taglio dinamico Kg/cm
<b>Vs</b>	Velocità onde di taglio Km/sec	<b>Kdin</b>	Modulo di Compressibilità dinamico Kg/cm
<b>ν</b>	Coefficiente di Poisson	<b>1</b>	Campioni di laboratorio

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI - D.M. del 17 gennaio 2018)

$$V_{S_{eq}} = \frac{H}{\sum_{i=1, H} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

Quota Vs=800 m/sec = **4** m

V<sub>S,eq</sub> = **327** m/sec

G<sub>0,eq</sub> = **2399** Kg/cm²

**CATEGORIA SUOLO = E**

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

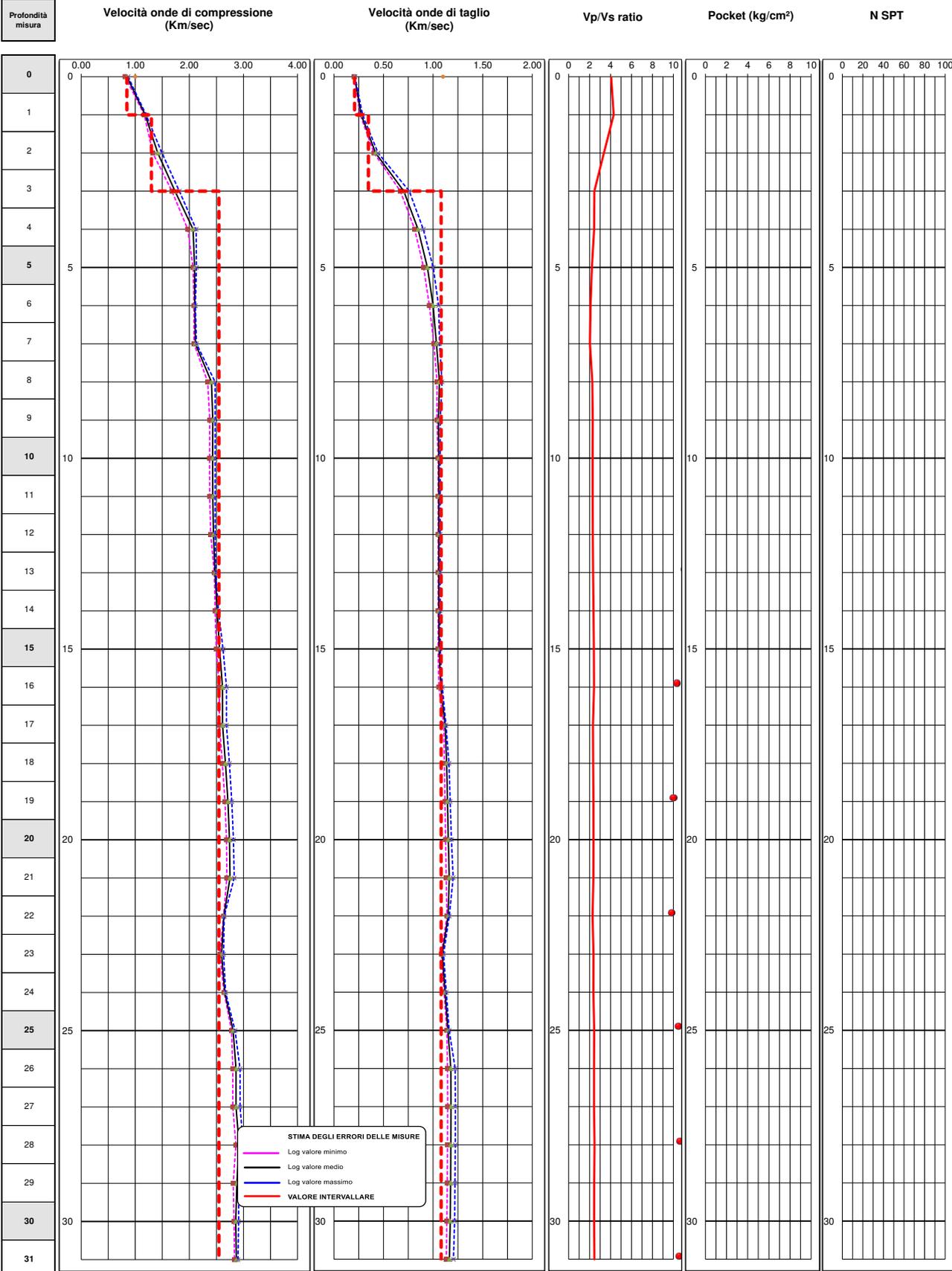
<b>ITALFERR</b>
<b>GA 03</b>
<b>Bari</b>
<b>17 Dicembre 2020</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2 m</b>



PROGEO s.r.l.  
 Via Roma 108  
 00187 Roma  
 Tel. 06.47.77.00.00  
 Fax 06.47.72.48.00  
 www.progeo.it

**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 0.90 m  
Ripporto

Da 0.90 m a 2.60 m  
Calcarenrite (biocostruita fino a 1.40m) alterata dalle operazioni di prescavo e coraggio, che assume l'aspetto di una ghiaia

Da 2.60 m a 30.00 m  
Calcare micritico biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rare stiloliti violacee, da debolmente a mediamente alterato, grado di durezza (SRM: R2-R3 (rocce debolmente resistenti), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distanziate, da 70° a sub-verticali, irregolari, aperte, con limo argilloso ocraaceo di riempimento (da 2.50m-3.80m e 23.05m-23.20m) e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetrici. Da 26.00m-28.80m presenti livelli da centimetrici a decimetrici in cui la struttura si presenta da biocostruita a stromatolitica. Presenti cavità da 21.80m-22.00m (con rinvenuta di acqua durante la perforazione) e da 22.30m-22.60m.

Fig. 38

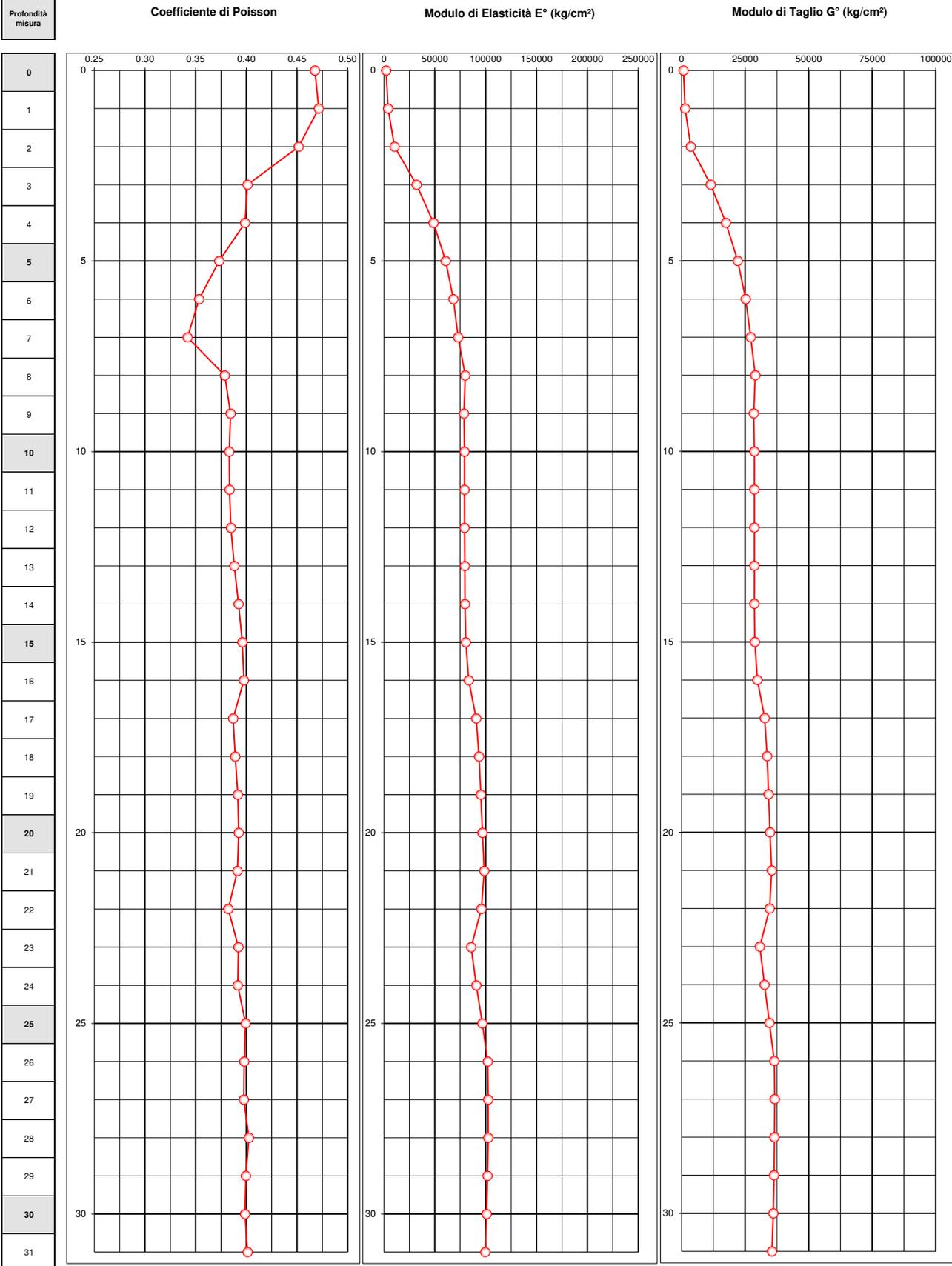
<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>GA 03</b>
<b>Bari</b>
<b>17 Dicembre 2020</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2 m</b>



**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 0.90 m  
Riperto

Da 0.90 m a 2.60 m  
Calcarenite (biocostruita fino a 1.40m) alterata dalle operazioni di prescavo e carotaggio, che assume l'aspetto di una ghiaia

Da 2.60 m a 30.00 m  
Calcare micritico biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rare stiloliti violacee, da debolmente a mediamente alterato, grado di durezza ISRM: R2-R3 (roccia debolmente resistente), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distanziate, da 70° a sub-verticali, irregolari, aperte, con limo argilloso ocreo di riempimento (da 3.50m+3.80m e 23.05m+23.20m) e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura.

Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetrici.

Da 26.00m+28.80m presenti livelli da centimetrici a decimetrici in cui la struttura si presenta da biocostruita a stromatolitica.

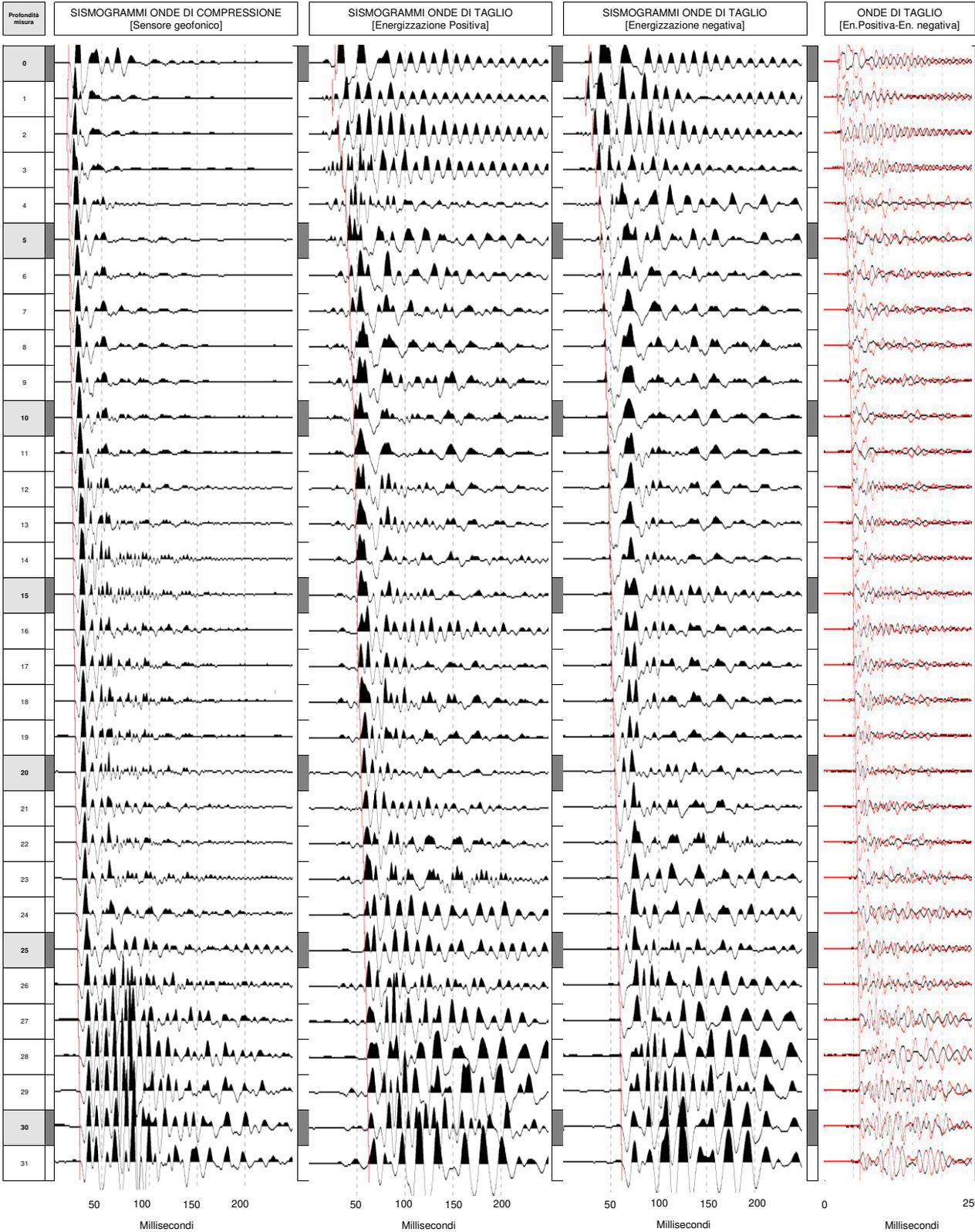
Presenti cavità da 21.80m+22.00m (con rinvenuta di acqua durante la perforazione) e da 22.30m+22.60m.

Fig. 39

<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>GA 05</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Bari</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>SISMOGRAMMI</b>
Misura eseguita con sonda 3d costituita da due gruppi di sensori, con orientamento tridirezionale, a distanza di 1 m
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.1 m</b>

Sulla medesima immagine sono riportati i sismogrammi relativi ai sensori verticali per le onde di compressione e orizzontali per le onde di taglio, posti ad una interdistanza di 1 m.



**STRATIGRAFIA**

Da 0.00 a 0.90 m  
Ripetto

Da 0.90 m a 2.60 m  
Calcarene (bioclastica fino a 1.40m alterata dalle operazioni di prelievo e coraggio, che assume l'aspetto di una ghiaia eterometrica.

Da 2.60 m a 30.00 m  
Calcare micriteo biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rare striati violacei, da debolmente a moderatamente alterato; grado di durezza ISRM: R2-R3 (roccia debolmente resistente), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distaccate, da 10° a sub-verticali, irregolari, aperte, con fimo agglutino occasionale di riempimento (da 3.50m a 3.80m e 23.50m a 23.80m) e patine di ossidazione rosastre sulle superfici di rottura.  
Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetriche.  
Da 25.00m a 28.80m presenti livelli da centimetri a decimetrici in cui la struttura si presenta da bioclastica a eterometrica.  
Presenti cavità da 23.80m a 22.50m (con rinvenuta di acqua durante la perforazione) e da 23.80m a 22.50m.

Fig. 40

<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>GA 05</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Bari</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.1 m</b>



Falda = n.r.

Profondità misura	Tempi		Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	ν	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²
	Onde p msec	Onde s msec							
0	3.50	10.50	0.85	0.20	0.47	1.66	2078	707	11180
1	2.34	8.58	1.18	0.28	0.47	1.80	4137	1406	23735
2	1.97	12.90	1.42	0.42	0.45	1.99	10156	3495	35924
3	2.80	16.27	1.92	0.72	0.42	2.28	34174	12051	69400
4	3.59	20.60	2.11	0.85	0.40	2.38	49660	17708	84635
5	4.14	22.52	2.14	0.95	0.38	2.44	61345	22244	84415
6	4.61	23.64	2.15	0.99	0.36	2.47	67482	24730	82918
7	5.04	24.92	2.16	1.01	0.36	2.48	70620	26000	82919
8	5.38	25.24	2.18	0.98	0.37	2.46	66481	24213	87149
9	6.08	26.06	2.20	0.98	0.38	2.46	65878	23907	89863
10	6.55	27.51	2.20	0.99	0.37	2.47	68304	24894	88864
11	7.01	28.23	2.20	1.01	0.37	2.48	69878	25530	88591
12	7.46	29.68	2.21	1.01	0.37	2.48	70652	25815	89503
13	7.92	30.40	2.24	1.01	0.37	2.48	71409	26039	92412
14	8.30	31.61	2.28	1.02	0.38	2.48	72088	26209	96314
15	8.75	32.57	2.32	1.03	0.38	2.49	74093	26903	100428
16	9.15	32.57	2.37	1.05	0.38	2.50	77526	28141	105426
17	9.55	32.57	2.37	1.10	0.36	2.53	84436	30957	103298
18	9.88	33.05	2.42	1.12	0.36	2.54	88088	32280	108290
19	10.13	34.26	2.46	1.13	0.37	2.55	90329	33049	112839
20	10.45	34.98	2.48	1.14	0.37	2.55	91832	33569	115778
21	10.81	35.22	2.49	1.14	0.37	2.56	92802	33934	116633
22	11.32	36.43	2.39	1.12	0.36	2.55	88912	32736	104377
23	11.82	37.39	2.35	1.08	0.37	2.52	82295	30135	101911
24	12.19	37.58	2.40	1.09	0.37	2.53	83844	30581	108224
25	12.66	38.06	2.44	1.08	0.38	2.52	82513	29916	113734
26	13.10	38.38	2.44	1.11	0.37	2.54	87769	32052	111820
27	13.63	39.50	2.41	1.12	0.36	2.55	88769	32597	106919
28	14.07	40.30	2.39	1.12	0.36	2.55	89012	32765	104708
29	14.50	41.27	2.40	1.12	0.36	2.55	88887	32676	105926
30	14.98	42.07	2.40	1.12	0.36	2.54	88251	32393	106728
31	15.31	43.03	2.39	1.11	0.36	2.54	86898	31899	104999

**STRATIGRAFIA**

Da 0.00 a 0.90 m  
Rapporto

Da 0.90 m a 2.60 m  
Calcestruzzo (bocconatura fino a 1.40m) prelevato dalle operazioni di pressavo e caricaggio, che assume l'aspetto di una ghiaia eterometrica.

Da 2.60 m a 38.00 m  
Calcestruzzo biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rete fibrillare visibile, da debolmente a mediamente alterato, grado di durezza ISRM R2-R3 (roccia debolmente indurita), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distanziate, da 70° a sub-verticali, irregolari, aperte, con limo argilloso scrostato di riempimento (da 3.50m a 3.80m e 23.50m a 23.90m) e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. La discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetriche.

Da 38.00m a 28.80m presenti livelli da centimetrici a decimetrici in cui la struttura si presenta da bocconatura a eterometrica. Presenti cavità da 23.50m a 22.50m (con ritenuta di acqua durante la perforazione) e da 22.50m a 22.60m.

PARAMETRI INTERVALLARI MEDI										
Vp Km/sec.	Vs Km/sec.	ν	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²				
0.85	0.20	0.47	1.66	2078	707	11180				
1.30	0.35	0.46	1.89	7147	2451	29829				
2.08	0.88	0.39	2.39	53165	19183	80342				
2.34	1.07	0.37	2.52	80863	29568	101906				

STIMA DEGLI ERRORI												
Vp (km/sec)			Vs (km/sec)									
min	media	max	min	media	max							
0.61	0.85	0.87	0.027	0.20	0.20	0.21						0.005
1.17	1.18	1.20	0.016	0.27	0.28	0.28						0.009
1.32	1.42	1.49	0.085	0.40	0.42	0.44						0.016
1.86	1.92	2.01	0.076	0.67	0.72	0.75						0.039
2.01	2.11	2.17	0.080	0.81	0.85	0.88						0.035
2.11	2.14	2.18	0.032	0.89	0.95	0.99						0.051
2.13	2.15	2.16	0.014	0.94	0.99	1.04						0.051
2.13	2.16	2.18	0.023	0.98	1.01	1.05						0.035
2.12	2.18	2.24	0.062	0.88	0.98	1.05						0.085
2.15	2.20	2.24	0.045	0.90	0.98	1.03						0.065
2.15	2.20	2.24	0.047	0.94	0.99	1.03						0.044
2.15	2.20	2.24	0.046	0.98	1.01	1.03						0.027
2.17	2.21	2.24	0.037	0.99	1.01	1.03						0.020
2.23	2.24	2.25	0.013	1.00	1.01	1.03						0.014
2.24	2.28	2.30	0.028	1.01	1.02	1.03						0.010
2.26	2.32	2.37	0.056	1.02	1.03	1.04						0.009
2.31	2.37	2.43	0.061	1.04	1.05	1.06						0.012
2.31	2.37	2.43	0.059	1.09	1.10	1.11						0.015
2.36	2.42	2.48	0.059	1.09	1.12	1.14						0.024
2.41	2.46	2.52	0.058	1.10	1.13	1.16						0.030
2.43	2.48	2.55	0.058	1.10	1.14	1.16						0.030
2.44	2.49	2.56	0.062	1.11	1.14	1.16						0.024
2.38	2.39	2.39	0.005	1.11	1.12	1.14						0.020
2.32	2.35	2.38	0.031	1.05	1.08	1.14						0.046
2.39	2.40	2.42	0.013	1.05	1.09	1.15						0.047
2.42	2.44	2.48	0.029	1.06	1.08	1.10						0.020
2.39	2.44	2.51	0.057	1.08	1.11	1.13						0.026
2.35	2.41	2.44	0.043	1.08	1.12	1.15						0.035
2.36	2.39	2.44	0.036	1.08	1.12	1.16						0.041
2.37	2.40	2.43	0.028	1.08	1.12	1.16						0.042
2.38	2.40	2.43	0.021	1.07	1.12	1.16						0.041
2.35	2.39	2.41	0.027	1.07	1.11	1.15						0.041

Legenda parametri dinamici			
<b>Tp</b> Tempi onde di compres: millisecondi	<b>γ</b> Peso di volume	T/m³	
<b>Ts</b> Tempi onde di taglio millisecondi	<b>Edin</b> Modulo di Elasticità dinamico	Kg/cm	
<b>Vp</b> Velocità onde di compres Km/sec	<b>Gdin</b> Modulo di Taglio dinamico	Kg/cm	
<b>Vs</b> Velocità onde di taglio Km/sec	<b>Kdin</b> Modulo di Compressibilità dinamico	Kg/cm	
<b>ν</b> Coefficiente di Poisson	<b>1</b> Campioni di laboratorio		

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI - D.M. del 17 gennaio 2018)

Quota Vs=800 m/sec = **4** m

$$V_{S_{eq}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

V<sub>S,eq</sub> = **325** m/sec

G<sub>0,eq</sub> = **2345** Kg/cm²

**CATEGORIA SUOLO = E**

Fig. 41

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

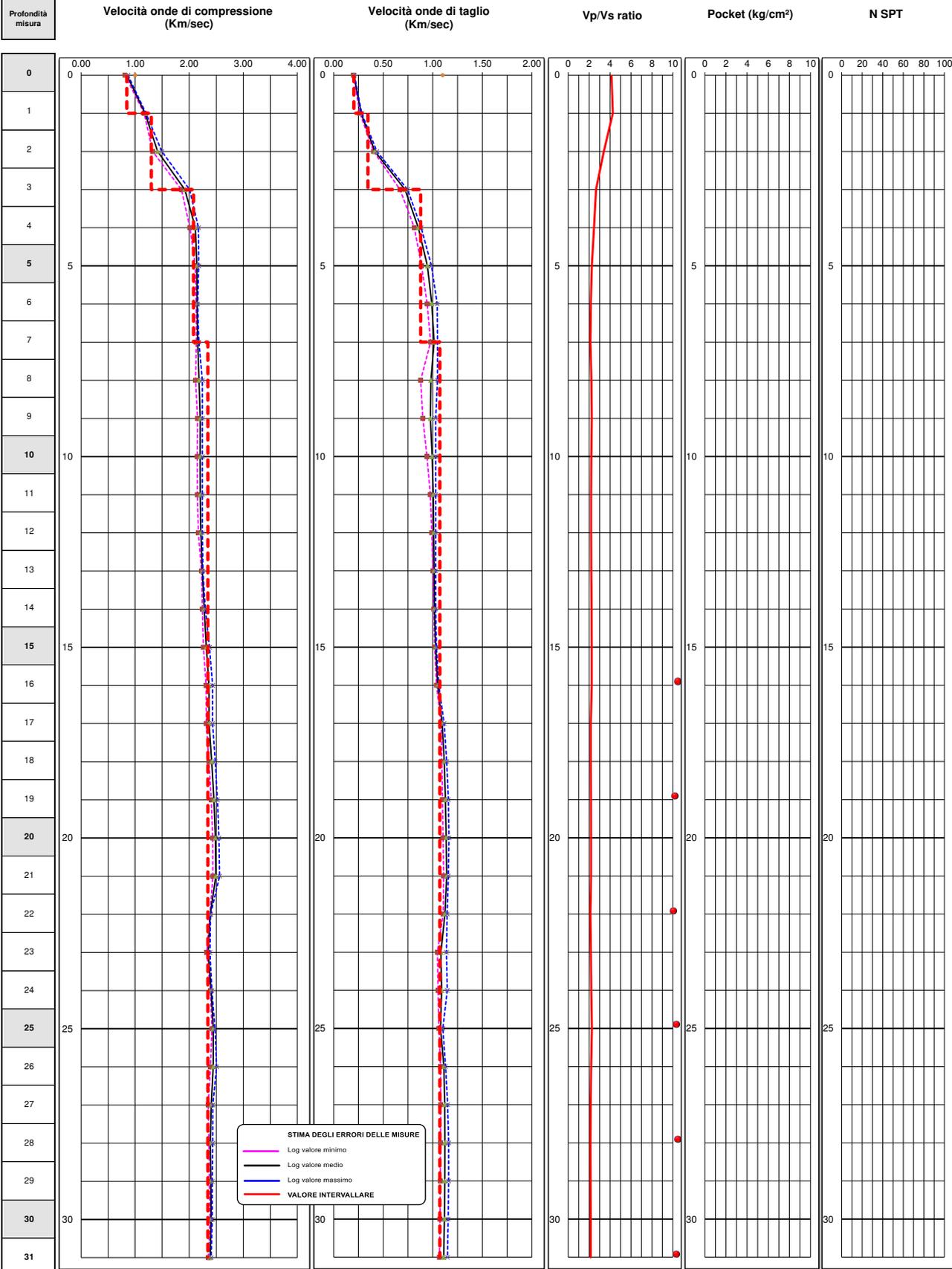
<b>ITALFERR</b>
<b>GA 05</b>
<b>Bari</b>
<b>16 Dicembre 2020</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.1 m</b>



PROGEO s.r.l.  
 Via Roma 108  
 00197 Roma  
 Tel. 06.47.77.00.00  
 Fax 06.47.72.48.00  
 www.progeo.com

**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 0.90 m  
Riporto

Da 0.90 m a 2.60 m  
 Calcarenite (biocstruita fino a 1.40m) alterata dalle operazioni di prescavo e coraggio, che assume l'aspetto di una ghiaia

Da 2.60 m a 30.00 m  
 Calcare micritico biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rare stiloliti violacee, da debolmente a mediamente alterato, grado di durezza (SRM: R2-R3 (rocce debolmente resistenti), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distanziate, da 70° a sub-verticali, irregolari, aperte, con limo argilloso ocraaceo di riempimento (da 2.50m-3.80m e 23.05m-23.20m) e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetrici. Da 26.00m-28.80m presenti livelli da centimetrici a decimetrici in cui la struttura si presenta da biocstruita a stromatolitica. Presenti cavità da 21.80m-22.00m (con rinvenuta di acqua durante la perforazione) e da 22.90m-22.60m.

Fig. 42

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>GA 05</b>
<b>Bari</b>
<b>16 Dicembre 2020</b>

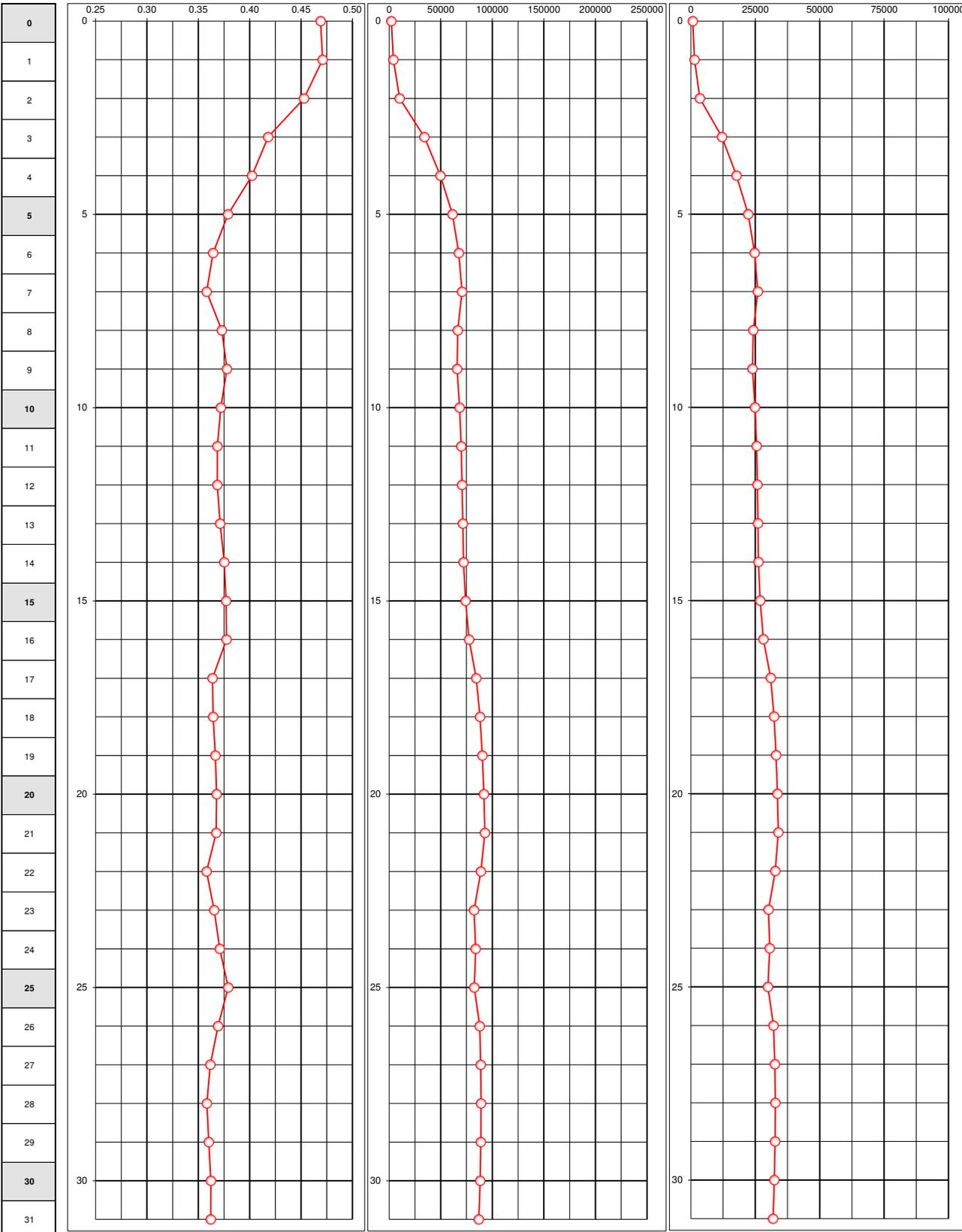
**LOG DEI PARAMETRI ELASTICI**

<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.1 m</b>



**Stratigrafia sintetica**

<b>Profondità misura</b>
--------------------------



Da 0.00 a 0.90 m  
Riperto

Da 0.90 m a 2.60 m  
Calcarente (biocostruita fino a 1.40m) alterata dalle operazioni di prescavo e carotaggio, che assume l'aspetto di una ghiaia

Da 2.60 m a 30.00 m  
Calcare micritico biancastro, a struttura da compatta a debolmente vacuolare con rare stittili violacee, da debolmente a mediamente alterato, grado di durezza ISRM: R2-R3 (roccia debolmente resistente), fratturato, con fratture da moderatamente ravvicinate a distanziate, da 70° a sub-verticali, irregolari, aperte, con limo argilloso ocreo di riempimento (da 3.50m-3.80m e 23.05m-23.20m) e patine di ossidazione rossastre sulle superfici di rottura. Le discontinuità di stratificazione (giunti) si presentano sub-orizzontali, decimetriche. Da 26.00m-28.80m presenti livelli da centimetrici a decimetrici in cui la struttura si presenta da biocostruita a stromatolitica. Presenti cavità da 21.80m-22.00m (con rinvuota di acqua durante la perforazione) e da 22.30m-22.60m.

Fig. 43