



## INDAGINI GEOFISICHE ANAS – ANNO 2015

Impresa esecutrice: **PROGEO s.r.l.**

# INDAGINI GEOFISICHE

## Relazione tecnica

### **PROGEO S.r.l.**

*Indagini geofisiche*  
Via Talete 10/8  
41122 Fodi  
tel. 0543 723580  
fax. 0543 721426



Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2008 n° 26194.



## INDICE

<b>1. INDICAZIONI GENERALI.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ELABORATI CARTOGRAFICI .....</b>	<b>4</b>
<b>3. ATTREZZATURE TECNICHE .....</b>	<b>4</b>
<b>4. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA.....</b>	<b>6</b>
4.1. MODALITA' OPERATIVE	6
4.2. ELABORAZIONE DATI	8
<b>6. RISULTANZE .....</b>	<b>12</b>

# ANAS

DIREZIONE CENTRALE PROGETTAZIONE

## PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO E MESSA IN SICUREZZA DELLA S.S.131 "CARLO FELICE", DAL KM 159+290 AL KM 209+500, CON RISOLUZIONE DEI NODI CRITICI

### INDAGINI GEOFISICHE

#### 1. INDICAZIONI GENERALI

A seguito di incarico dell'ANAS – Direzione Centrale Progettazione, si sono eseguite indagini geofisiche finalizzate a fornire informazioni sulle consistenze e sulle deformabilità dei materiali relativamente ad alcuni settori per il progetto definitivo e messa in sicurezza della S.S. "Carlo Felice" dal km 159+290 al km 209+500.

Lungo questa tratta l'indagine sismica si è focalizzata in corrispondenza dello Svincolo di Cossoine (LS3 – LS4 - S15\_DH), dello Svincolo al Km 190 (LS5 – LS6 - S17\_DH), del Viadotto su SP124 (S13\_DH), e dello Svincolo Bonorva nord (LS7).

Come da incarico l'indagine si è sviluppata effettuando:

n° 5 sezioni sismiche ad onde di compressione e taglio:

Sez. LS3: n° stazioni 24	interdistanza stazioni 2.5 m	lunghezza: 57.50 m
Sez. LS4: n° stazioni 24	interdistanza stazioni 2.5 m	lunghezza: 57.50 m
Sez. LS5: n° stazioni 24	interdistanza stazioni 2.5 m	lunghezza: 57.50 m
Sez. LS6: n° stazioni 24	interdistanza stazioni 2.5 m	lunghezza: 57.50 m
Sez. LS7: n° stazioni 24	interdistanza stazioni 5 m	lunghezza: 115.00 m

Per un complessivo di 345.00 m

n° 3 Down Hole

S13_DH	lunghezza prova 35.00 m
S15_DH	lunghezza prova 35.00 m
S17_DH	lunghezza prova 36.00 m

Per un complessivo di 106.00 m

Le sezioni geofisiche sono state acquisite in copertura "full fold" cioè con l'array interamente posizionato sul terreno.

Questo ha permesso di ottenere sezioni complete sull'intero tratto in una unica fase di acquisizione senza le problematiche connesse all'unione di più elementi che deriva dall'utilizzo di meno sensori.

Le sezioni sismiche sono state effettuate acquisendo onde di compressione P e di taglio Sh con shot polarizzato mediamente ogni 3-4 stazioni.

In riferimento allo stralcio progettuale in esame si riportano la documentazione relativa alla stesa sismica LS7, ubicata in corrispondenza dello svincolo di Bonorva Nord.



Stendimento sismico LS7

## 2. ELABORATI CARTOGRAFICI

Allegato alla presente relazione tecnica è riportato l'elaborato cartografico costituito da:

Fig. 3                    Planimetria indagini geofisiche Sez LS7

## 3. ATTREZZATURE TECNICHE

Sono state utilizzate le seguenti strumentazioni e software

### Tomografia sismica

Sismografi	n° 1 Geometrics Geode da 24 canali;
Ricevitori	n° 24 geofoni verticali da 40 Hz e 24 geofoni orizzontali da 14 Hz specifici per le onde di taglio.
Energizzazione	Shot mediante mazza strumentata da 10 Kg per onde di compressione e di taglio polarizzate.
Software	SEISVIEW ( <a href="#">Progeo srl</a> ) per analisi dei sismogrammi; SRA ( <a href="#">Progeo srl</a> ) per analisi tomografica in velocità.

### Rilievo topografico

Strumentazione    GPS differenziale Trimble.

## SISMOMETRO PER ACQUISIZIONE DATI

Modello: GEOMETRICS ES-3000 GEODE



December 6, 2001

# 01

San Jose, California, USA

## EC DECLARATION OF CONFORMITY

We, Geometrics, Inc.  
Geometrics Europe  
2190 Fortune Dr.  
San Jose, CA 95131 USA  
Ph: (408) 954-0522  
FAX: (408) 954-0902

Declare under our sole responsibility that our seismograph StrataVisor models NZC, NZII/0, NZII/8 through NZII/64, ES-3000, and Geode models to which this declaration relates are in conformity with the following standards as these units operate from batteries under 15VDC:

EN 55011: 1998, A1:1999, EN50082-2: 1995, ENV 50140: 1994, ENV 50141: 1994,  
EN 61000-4-2 : 1995, EN 61000-4-4 : 1995

per the provisions of the **Electromagnetic Compatibility Directive 89/336/EEC** of May 1989 as Amended by **92/31/EEC** of 28 April 1992 and **93/68-EEC, Article 5** of 22 July 1993.

The authorized representative located within the Community is:

Geometrics Europe  
Christopher Leech  
Manor Farm Cottage  
Galley Lane  
Great Brickhill  
Bucks.MK17 9AB, U.K.  
ph: +44 1525 261874  
FAX: +44 1525 261867



Mark Prouty, President,  
San Jose, CA, USA



## 4. PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA

### 4.1. MODALITA' OPERATIVE

#### 4.1.1. Generalità

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

L'analisi della velocità di propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo, longitudinali ( $V_p$ ) e/o trasversali ( $V_s$ ), ottenuta conoscendo la distanza shot-ricevitore ed il relativo tempo di arrivo dell'impulso sismico ( $\text{velocità}=\text{spazio}/\text{tempo}$ ), consente di rilevare in sintesi le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni, poiché i valori di  $V_p$  e/o  $V_s$  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 intorno 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.

#### **4.1.2. Sorgente di energia**

Per la generazione delle onde sismiche di compressione e taglio è stato utilizzato un sistema “leggero”, vista l’acclività della pendice, che è rappresentato da un maglio da 8 Kg strumentato con sensori che impatta su una piastra in metallo per le onde di compressione e su una trave, premuta sul terreno, per quelle di taglio con polarizzazione Sh oppure con shot inclinato per la generazione di onde accoppiate Sv.

#### **4.1.3. Apparato di ricezione**

Sono stati utilizzati geofoni da 40 Hz con asse strumentale verticale per ricezione onde P e da 12 Hz con asse strumentale orizzontale per la ricezione delle onde S, posizionati sul terreno ad intervalli variabili in funzione del dettaglio richiesto (2.5 m) 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.

#### **4.1.4. 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.

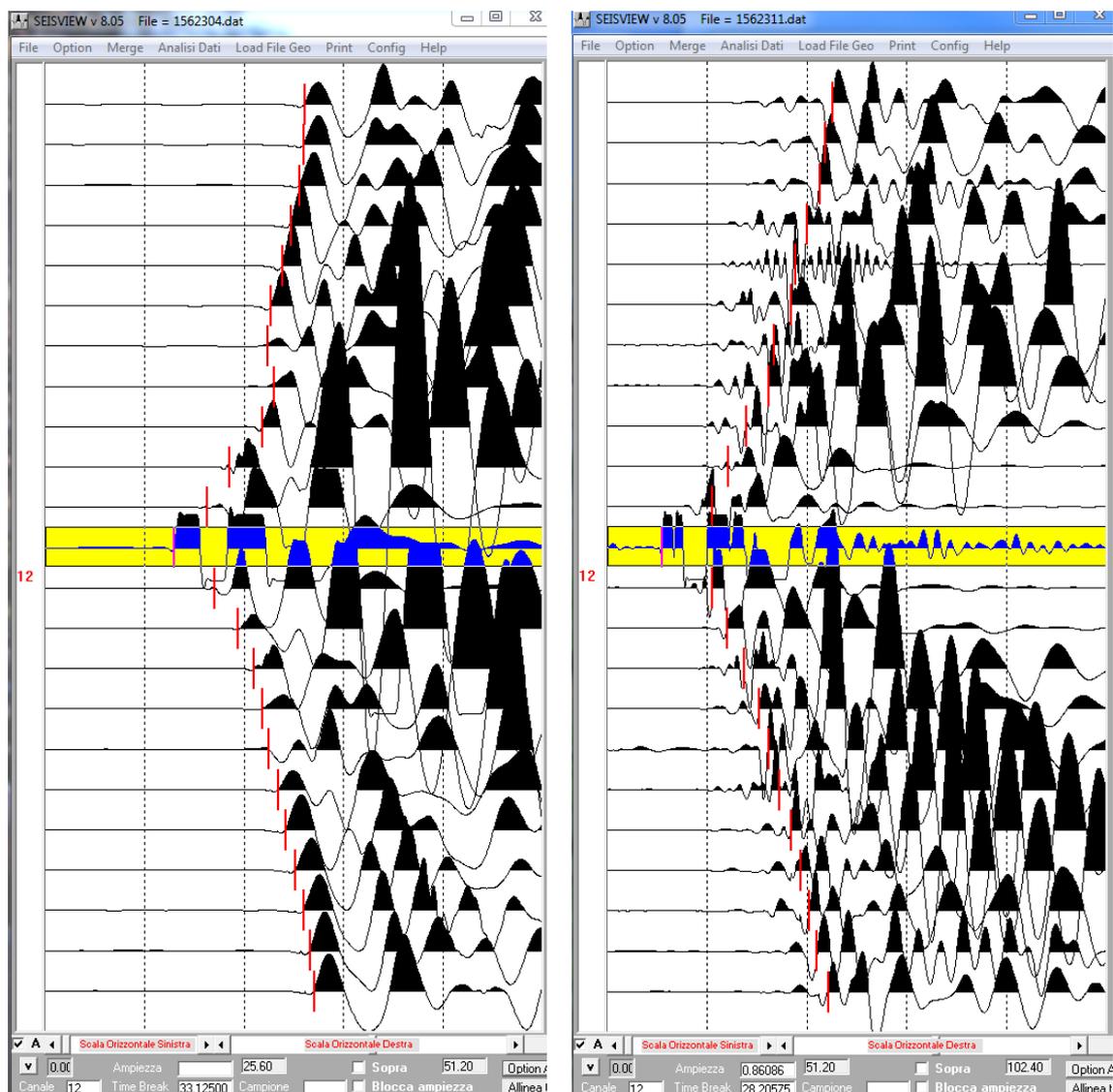
Eseguito il posizionamento dei geofoni sul terreno, collegati questi tramite morsetti bipolari al cavo elettrico e quest’ultimo al sistema di registrazione, verificati i segnali via radio tra apparato di energizzazione e di ricezione, sono stati realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i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

#### **4.1.5. 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, sono stati registrati nel supporto magnetico (computer) al quale sono collegati in serie i Geodi utilizzati.



Esempio di records acquisiti sezione LS3 da 24 stazioni, con shot sul geofono 12.  
 Onde di compressione P con tempo di acquisizione di 0-250 sec (a sinistra)  
 ed onde di taglio disaccoppiate Sh con tempo di acquisizione di 0-500 sec (a destra)

## 4.2. ELABORAZIONE DATI

### 4.2.1. Elaborazione sismogrammi (preprocessing)

#### a) Traduzione tracce sismiche

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>).

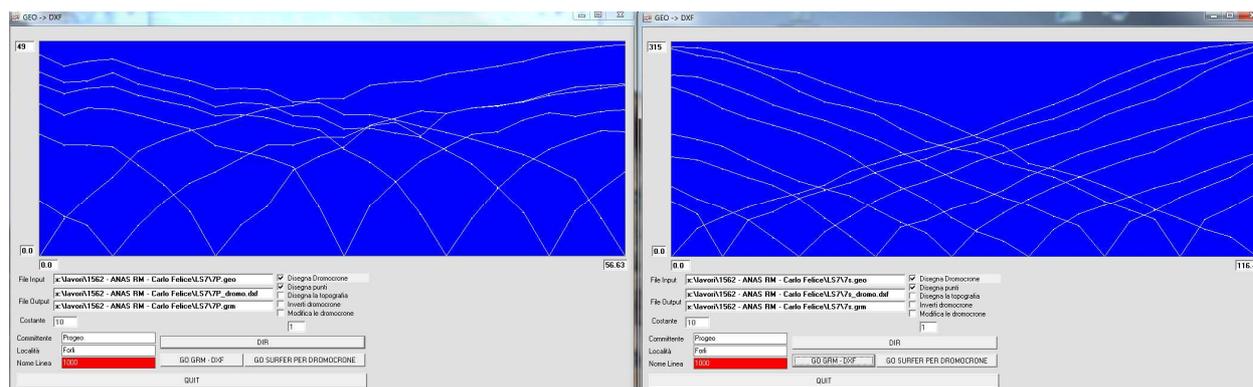
#### b) Analisi dei first break peak (F.B.P.)

Di seguito è stata fatta all'elaboratore col programma **Seisview**<sup>®</sup> la ricerca su ciascuna traccia di ogni sismogramma del primo arrivo (F.B.P. first break peak) dell'onda di taglio (S).

Di ogni file di dati acquisito in campagna è stato quindi creato un nuovo file con i tempi di arrivo (in millisec) degli F.B.P.; tutti i file F.B.P. relativi ad una singola sezione sismica sono stati riuniti in un unico file di dati (con programma originale **Graf-Dxf**®).

Tali dati possono essere graficizzati per ottenere la rappresentazione delle Diagrafie Tempi- distanze (Dromocrone) della sezione sismica.

I dati in formato numerico sono invece stati inseriti (opportunamente tradotti per poter essere analizzati dagli specifici programmi elaborativi) nel programma originale **S.R.A.**® (Seismic Refraction Analysis) per l'elaborazione tomografica.



Dromocrone sezione LS 7 (a sinistra le onde di compressione, a destra quelle di taglio)

#### 4.2.2. Processing in velocità

L'elaborazione delle sezioni mediante analisi tomografica viene effettuata sia per avere un maggior dettaglio in termini di 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.

##### a) 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.

##### b) Ray tracing e definizione dei parametri di calcolo

Il file di dati di ciascuna sezione sismica precedentemente ottenuto, è stato per questo inserito nel programma di calcolo **S.R.A.**® (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.

La profondità d'indagine è funzione della lunghezza dello stendimento, di quella dei "tiri" di registrazione degli impulsi sismici e della velocità del materiale investigato dai raggi sismici.

La geometria d'investigazione dei raggi sismici mediante elaborazione tomografica consente infatti il raggiungimento di profondità massime al centro della sezione (la figura geometrica della sezione sismica è assimilabile a quella di un trapezio con la base maggiore in superficie) di circa 1/5 della lunghezza dell'allineamento in superficie considerando che questo sia stato interamente coperto da un estremo all'altro dal "tiro" sismico.

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.

### c) 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 partecellari, 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.

La rappresentazione tomografica delle sezioni geofisiche avviene mediante software (Surfer della Golden Software - Colorado) con il quale i valori dei parametri geofisici vengono espressi mediante contour line e campitura di colore.

#### 4.2.5. Analisi del gradiente geotomografico

Per localizzare i principali livelli di consistenza si è sviluppata l'analisi del gradiente geosismico il quale consiste in un'analisi matematica (*processing di gradiente*) allo scopo di rintracciare i luoghi ove il parametro elastico tomografico subisce significativi incrementi in brevi tratti.

E' in questi luoghi, i quali non necessariamente coincidono per un'area ad un unico valore, ove la probabilità di individuare una interfaccia significativa è maggiormente elevata.

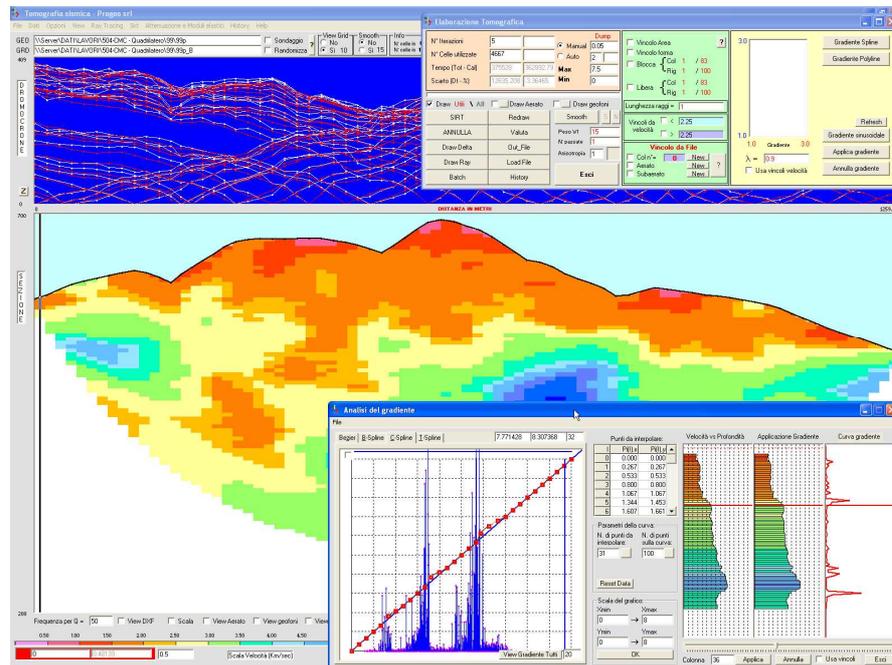
Per la determinazione ed individuazione quindi di tali orizzonti è stato applicato sui dati tomografici un algoritmo statistico il quale valuta la variazione del parametro tomografico (ad es. Velocità, Attenuazione) in termini di gradiente verticolaterale.

E' evidente che se i parametri geofisici non variano arealmente oppure variano di poco il gradiente è pressoché nullo o molto basso, laddove invece si presentano variazioni verticolaterali importanti il gradiente si presenta con i massimi valori.

E' in tali tratti quindi che è possibile localizzare passaggi significativi e suddividere il sottosuolo in "strati" di consistenza differenziata ed inoltre, nel caso in cui sia possibile una taratura mediante sondaggi geomeccanici, effettuare anche una correlazione litologica.

Di seguito viene presentata una immagine a monitor del software di elaborazione tomografica relativamente ad un momento della valutazione del gradiente.

L'esempio di processing di gradiente riporta le varie schermate ottenibili dal programma di calcolo in fase elaborativa: dall'alto in basso si osservano i dati di input -dromocrone-, la sezione sismostratigrafica con differenziazione cromatica del parametro considerato, log parametrici e diagrafie lungo tratti di sezione prestabiliti nei quali sono marcati i "top" del gradiente parametrico (al quale o ai quali corrisponderà in sezione tomografica una o più isolinee differenziate di contour line e cromatismi di diversa tonalità).



Esempio di "Processing di Gradiente" (immagine di repertorio)

## 6. RISULTANZE

In coda alla relazione è riportata la planimetria del sito indagato a cui segue la sezione sismica tomografica in onde Compressione, Taglio e relativi Parametri Elastici (Coefficiente di Poisson, Modulo di taglio, Modulo Elasticità, Modulo Compressibilità).

Nella sezione tomografica sono riportati i dati di velocità delle onde di compressione e di taglio mediante isolinee e falsi colori mantenendo fisso il range della scala cromatica.

Sulla sezione sono visibili lungo il profilo topografico le posizioni dei sensori che trovano riscontro anche sulla planimetria ed eventualmente i sondaggi presenti.

### Svincolo Bonorva nord

In questo tratto è stata realizzata la sezione sismica 7 la quale presenta parametri mediamente ridotti indice di un materiale probabilmente granulare a ridotto addensamento.

Sul lato meridionale della sezione (fine sezione L7) appare un elemento a maggiore velocità ( $V_p \sim 1.40$  km/sec e  $V_s \sim 0.54$  km/sec dalle analisi di gradiente) che potrebbe appartenere alla formazione più rigida sottostante.

L'aspetto della sezione indica la possibile presenza di una forma morfologica sepolta (paleoalveo) nel quale si ritrovano i parametri elastici più ridotti ( $V_p < 1.0$  e  $V_s < 0.35$  km/sec) con uno spessore che giunge ad oltre 10 m.

Per quanto riguarda l'analisi di dettaglio in ottica progettuale si rimanda alle singole sezioni e tavole.

### PROGEO

Dott. Maurizio Furani

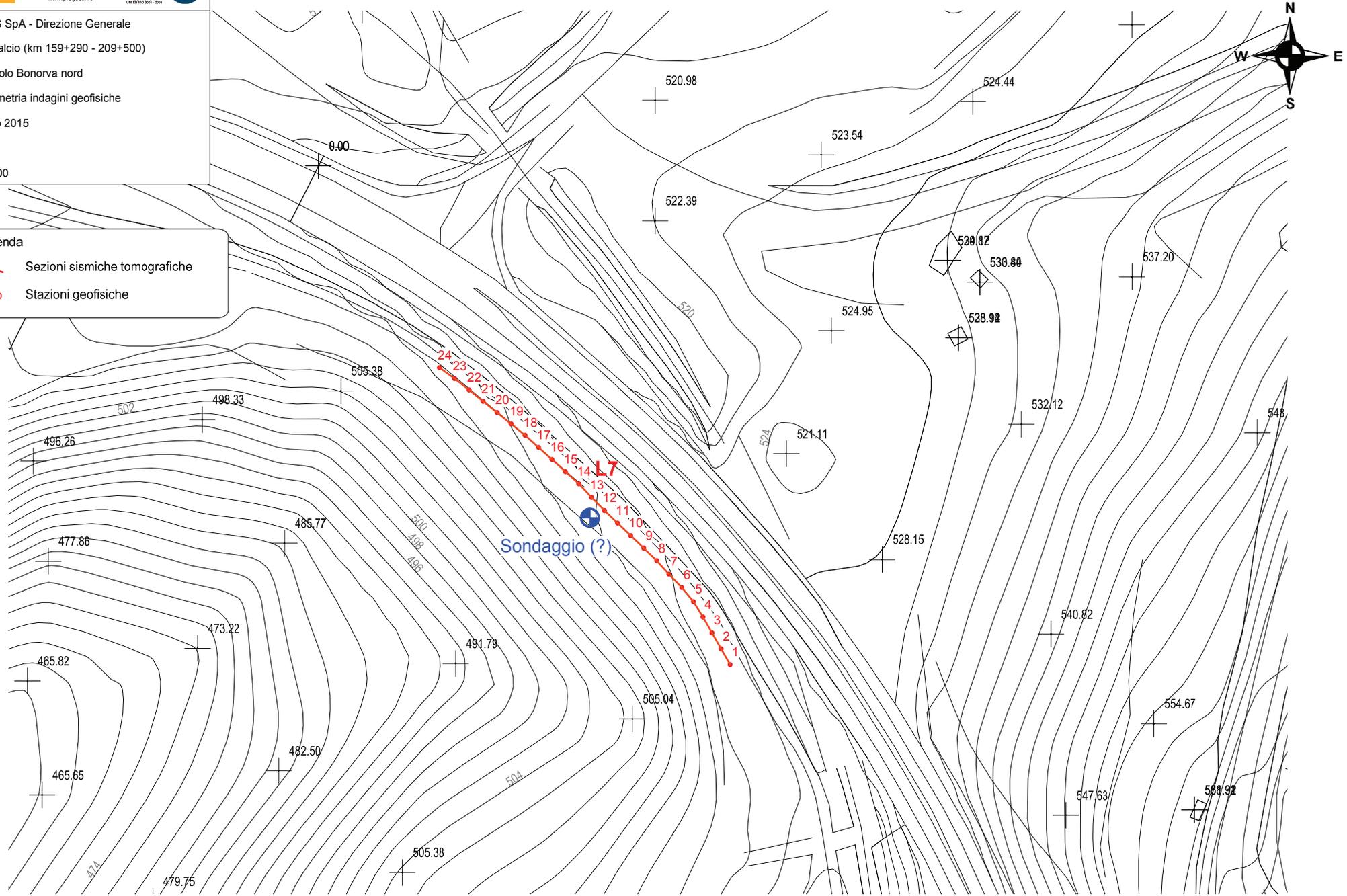


Hanno collaborato:  
Dott. Gabriele Pulelli  
Dott. Andrea Fabbri  
Dott. Stefano Tomidei

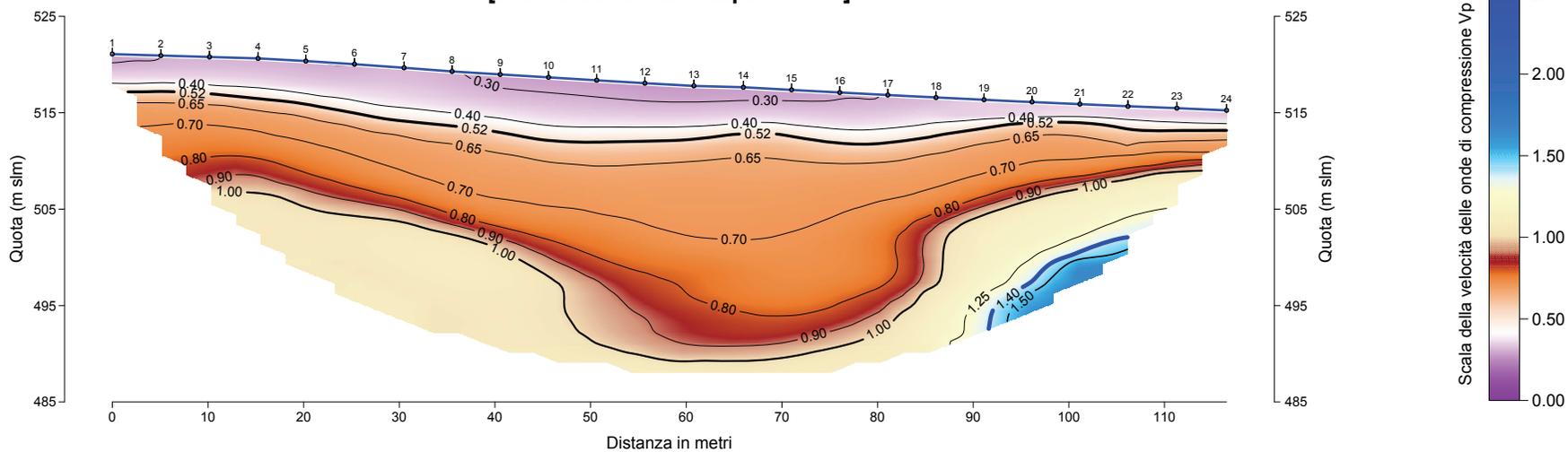
Cliente: ANAS SpA - Direzione Generale  
 Lavoro: 2° stralcio (km 159+290 - 209+500)  
 Sito: Svincolo Bonorva nord  
 Titolo: Planimetria indagini geofisiche  
 Data: Luglio 2015  
 Figura: 3  
 Scala: 1: 1000

**Legenda**

-  Sezioni sismiche tomografiche
-  Stazioni geofisiche



### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Velocità onde di compressione]



### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Velocità onde di taglio]

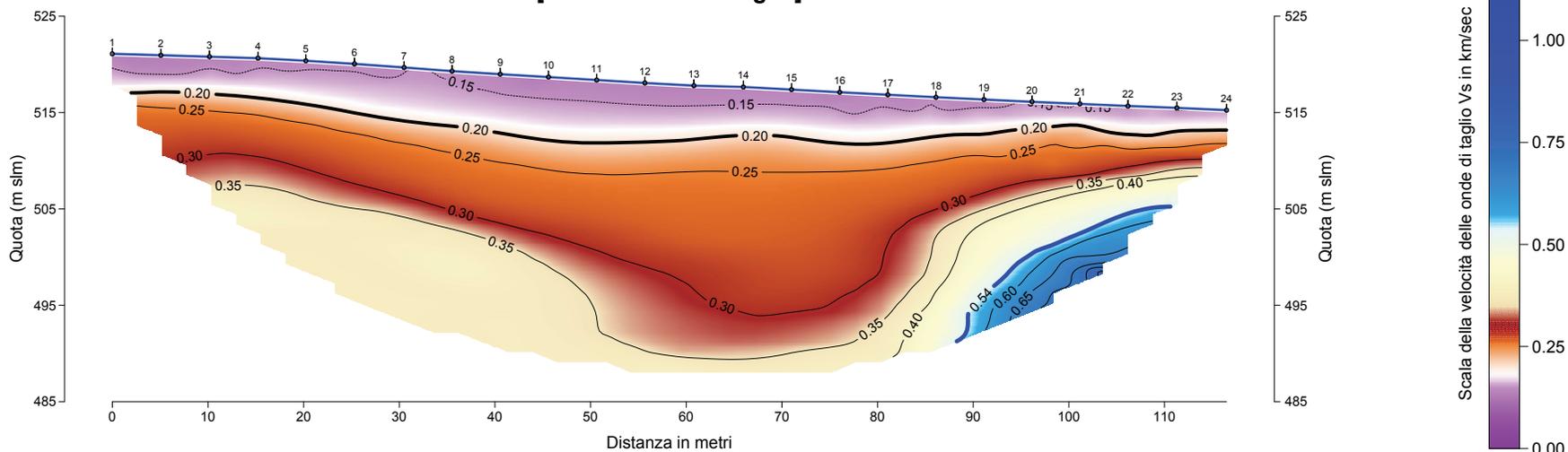
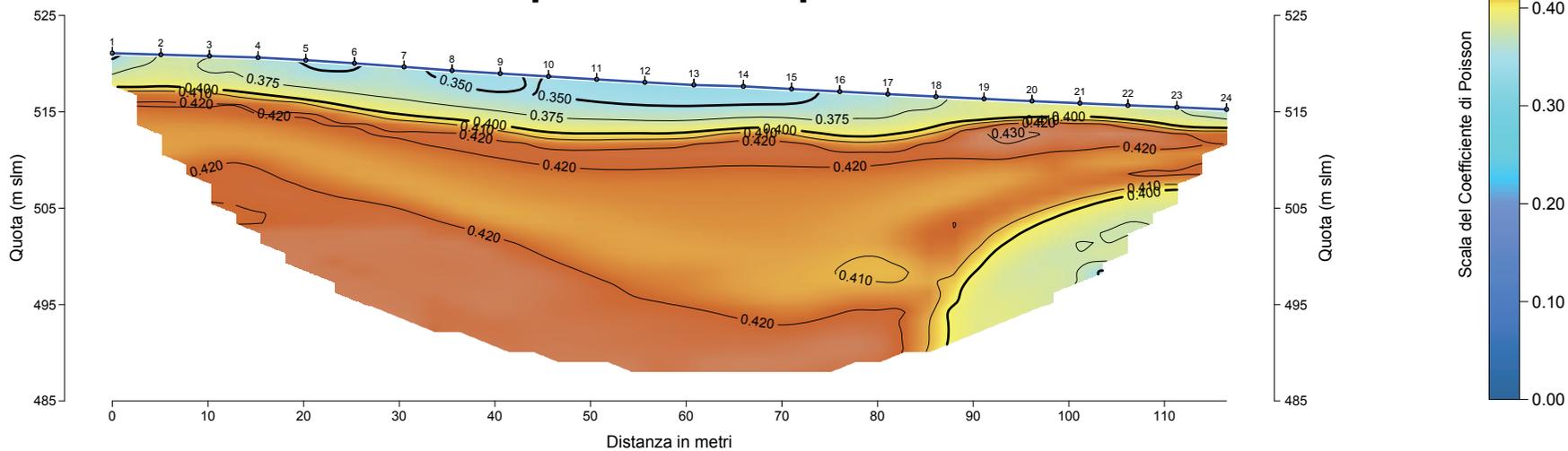


Fig. 16

Scale 1 : 500

### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Coefficiente di Poisson]



### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Modulo di Taglio G°]

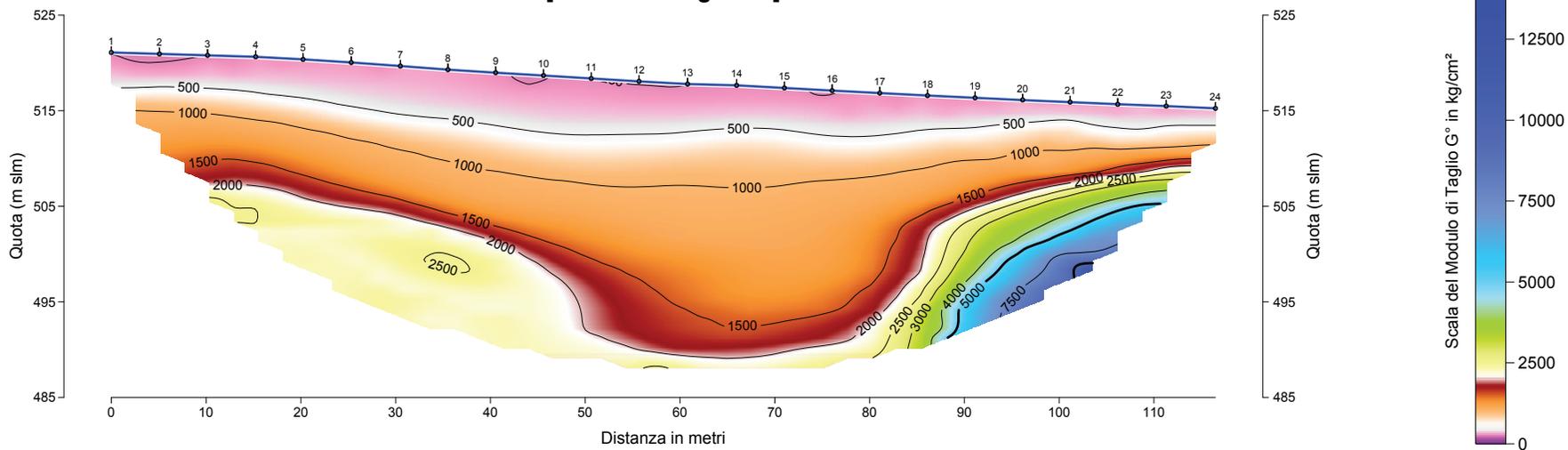
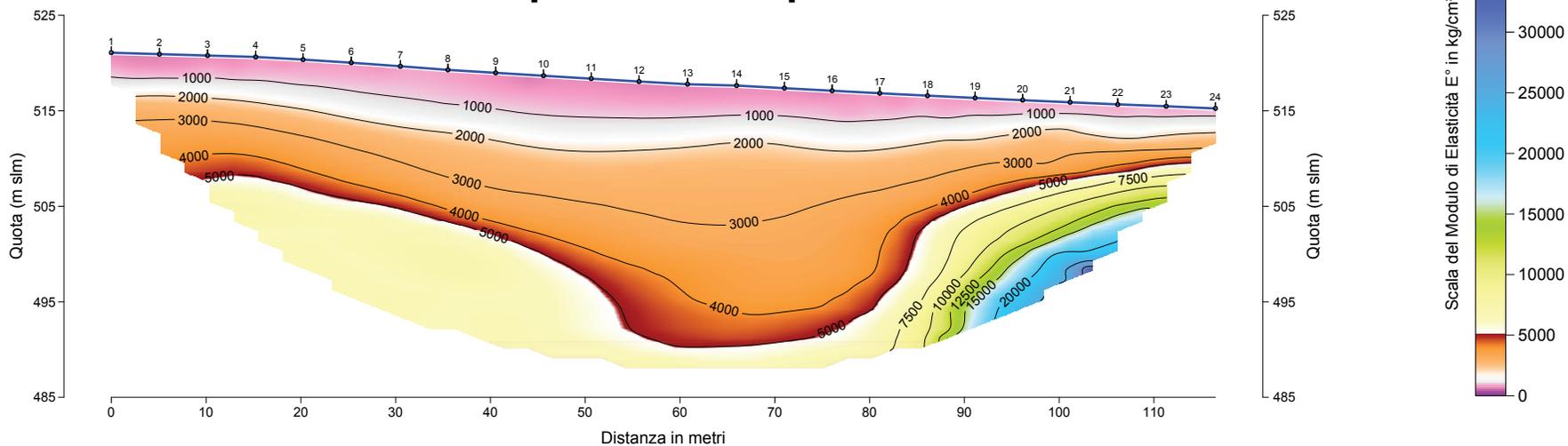


Fig. 17

Scale 1 : 500

### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Modulo di Elasticità $E^\circ$ ]



### SEZIONE SISMICA TOMOGRAFICA 7 [Modulo di Compressibilità $K^\circ$ ]

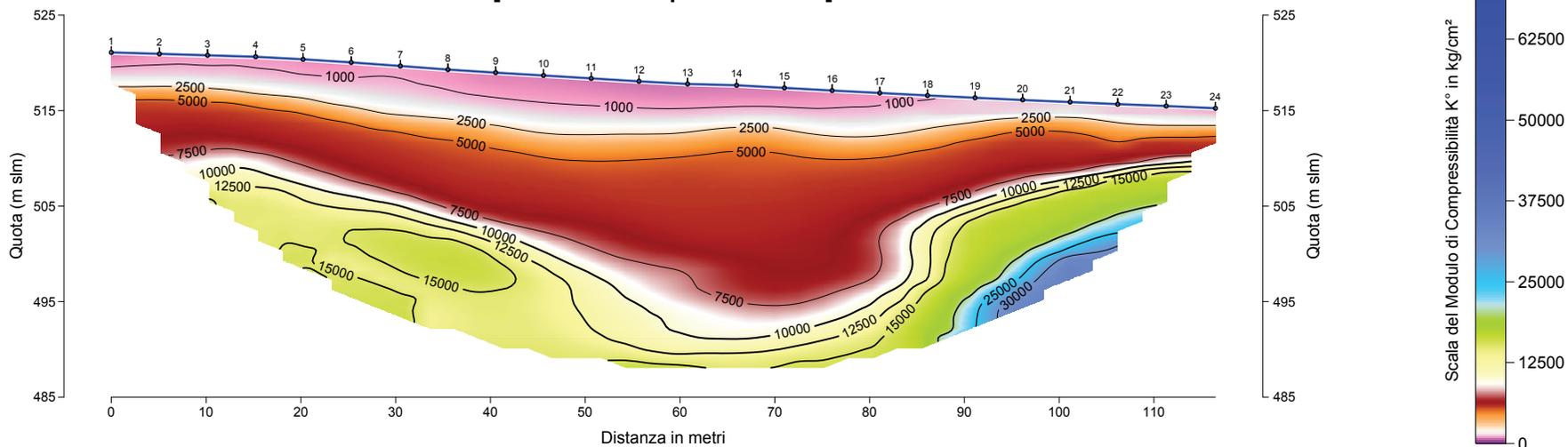


Fig. 18

Scale 1 : 500

## INDAGINI GEOFISICHE ANAS – ANNO 2017

Impresa esecutrice: **GEOSERVICE s.a.s.**

# PROSPEZIONE GEOFISICA CON LA TECNICA DELLA SISMICA A RIFRAZIONE

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
<b>R1</b>	--	24/04/2017	28/04/2017	A.Carcangiu

Oggetto:	Scala Plottaggio	CTB
<b>RELAZIONE TECNICA SULLE INDAGINI</b>	1.1	--

**Committente: Ditta Angius Antonello**  
Via Italia, n° 09134 - Cagliari (CA)  
P.I. 01985230927

**Cantiere: S.S. 131 e S.P. 125 Bonorva**  
Comune di Bonorva (SS)

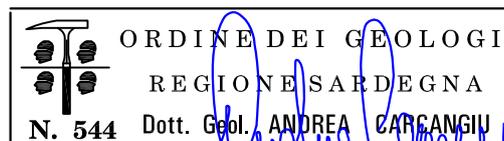


## GEOSERVICE s.a.s.

Indagini e prospezioni geoelettriche e sismiche  
Sede: Casa Spadaccino - Loc. Su loi, km 13+400, SS 195  
Sulcitana, 09012 Torre degli Ulivi Capoterra (CA)  
Sede legale: Via E. D'Arborea, 16 - 09010 Villa San Pietro (CA)  
Tel. 070907429 - 3474032606; Fax: 1782206528;  
P.IVA/C.F.: 03008730925 - R.E.A.: 239536 di Cagliari  
mail: [info@geoservicesardegna.com](mailto:info@geoservicesardegna.com) ;  
PEC: [geoservice.sas@pec.it](mailto:geoservice.sas@pec.it)  
[www.geoservicesardegna.com](http://www.geoservicesardegna.com)  
L'Amministratore

Il consulente

Dott. Geol. Andrea Carcangiu



## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DELL'AREA OGGETTO D'INDAGINE</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMMA E UBICAZIONE DELLE INDAGINI SVOLTE</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>SISMICA A RIFRAZIONE</b>	<b>8</b>
4.1	TECNICA E PARAMETRI UTILIZZATI	8
4.2	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	8
4.3	ELABORAZIONE DEI DATI	9
<b>5</b>	<b>VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>SONDAGGI GEOGNOSTICI</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>INTERPRETAZIONE DEI DATI</b>	<b>16</b>
9.1	BASI SISMICHE BS1-BS2-BS3 (CFR. TAVOLE A-B-C E TAVOLA 2)	16
9.1	BASI SISMICHE BS5-BS6 (CFR. TAVOLE D-E E TAVOLA 3)	17
<b>9</b>	<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</b>	<b>18</b>

## **ELENCO TAVOLE E ALLEGATI GRAFICI**

### **PLANIMETRIE UBICAZIONE INDAGINI**

- Tavola 1. Planimetria generale indagini geofisiche e geognostiche - Scala 1:4.000
- Tavola 2. Planimetria ubicazione indagini geofisiche – Basi sismiche BS1-BS2-BS3 - Scala 1:1.000
- Tavola 3. Planimetria ubicazione indagini geofisiche – Basi sismiche BS5-BS6 - Scala 1:1.000

### **SEZIONI GEOFISICHE DI SISMICA A RIFRAZIONE**

- Tavola A. Sezione di sismica a rifrazione BS1 in onde P ed S
- Tavola B. Sezione di sismica a rifrazione BS2 in onde P ed S
- Tavola C. Sezione di sismica a rifrazione BS3 in onde P ed S
- Tavola D. Sezione di sismica a rifrazione BS5 in onde P ed S
- Tavola E. Sezione di sismica a rifrazione BS6 in onde P ed S

## **1 INTRODUZIONE**

Su incarico conferito dalla ditta Angius Antonello per conto di Anas SpA, si redige la Relazione inerente la descrizione dei risultati di una prospezione geofisica eseguita con la tecnica della sismica a rifrazione realizzata nell'ambito della progettazione di "S.S. 131 di Carlo felice - Adeguamento e messa in sicurezza della SS 131 - Risoluzione dei nodi critici - 1° stralcio dal km 158+000 al km 162+700 nel comune di Bonorva (SS).

Le prospezioni fanno parte integrante delle indagini geognostiche relative al suddetto progetto e nel loro complesso comprendono sondaggi geognostici a carotaggio continuo, prove di laboratorio sulle terre e sulle rocce oltre che le prospezioni geofisiche oggetto della presente relazione.

Lo scopo delle indagini è quello di ottenere la ricostruzione litostratigrafica del terreno e le sue caratteristiche sismiche.

A tale scopo è stata impiegata la tecnica della sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica sia in onde di compressione (P) che di taglio (S). L'indagine consiste nella registrazione dei tempi di primo arrivo delle onde di compressione (P) e di taglio (S), create allo scopo tramite opportuna energizzazione, e rifratte dalle superfici che costituiscono contrasti di impedenza del sottosuolo, permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, e le caratteristiche geotecniche del terreno investigato.

La metodologia di studio risulta articolata dalle seguenti fasi:

- studio preliminare dell'assetto litostratigrafico, geomorfologico e idrogeologico dell'area;
- valutazione della configurazione geometrica e della relativa ubicazione degli stendimenti ritenuta più adeguata in funzione dello scopo dell'indagine, della risoluzione richiesta, delle profondità da investigare e dell'accessibilità dei luoghi;
- acquisizione dei dati di campagna e loro successiva elaborazione ed interpretazione.

Fanno parte integrante della presente relazione illustrativa i seguenti elaborati:

### **PLANIMETRIE UBICAZIONE INDAGINI**

- Tavola 1. Quadro d'unione indagini geofisiche - Scala 1:4.000
- Tavola 2. Planimetria ubicazione indagini – Basi sismiche BS1-BS2-BS3 - Scala 1:1.000
- Tavola 3. Planimetria ubicazione indagini - – Basi sismiche BS5-BS6 - Scala 1:1.000

### **SEZIONI GEOFISICHE DI SISMICA A RIFRAZIONE**

- Tavola A. Sezione di sismica a rifrazione BS1 in onde P ed S
- Tavola B. Sezione di sismica a rifrazione BS2 in onde P ed S
- Tavola C. Sezione di sismica a rifrazione BS3 in onde P ed S
- Tavola D. Sezione di sismica a rifrazione BS5 in onde P ed S
- Tavola E. Sezione di sismica a rifrazione BS6 in onde P ed S

## 2 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DELL'AREA OGGETTO D'INDAGINE

L'area oggetto d'indagine ricade nella Sardegna centro - settentrionale nel territorio comunale di Bonorva. Si riportano le caratteristiche geologiche tratte dalla Relazione Geologica del progetto definitivo.

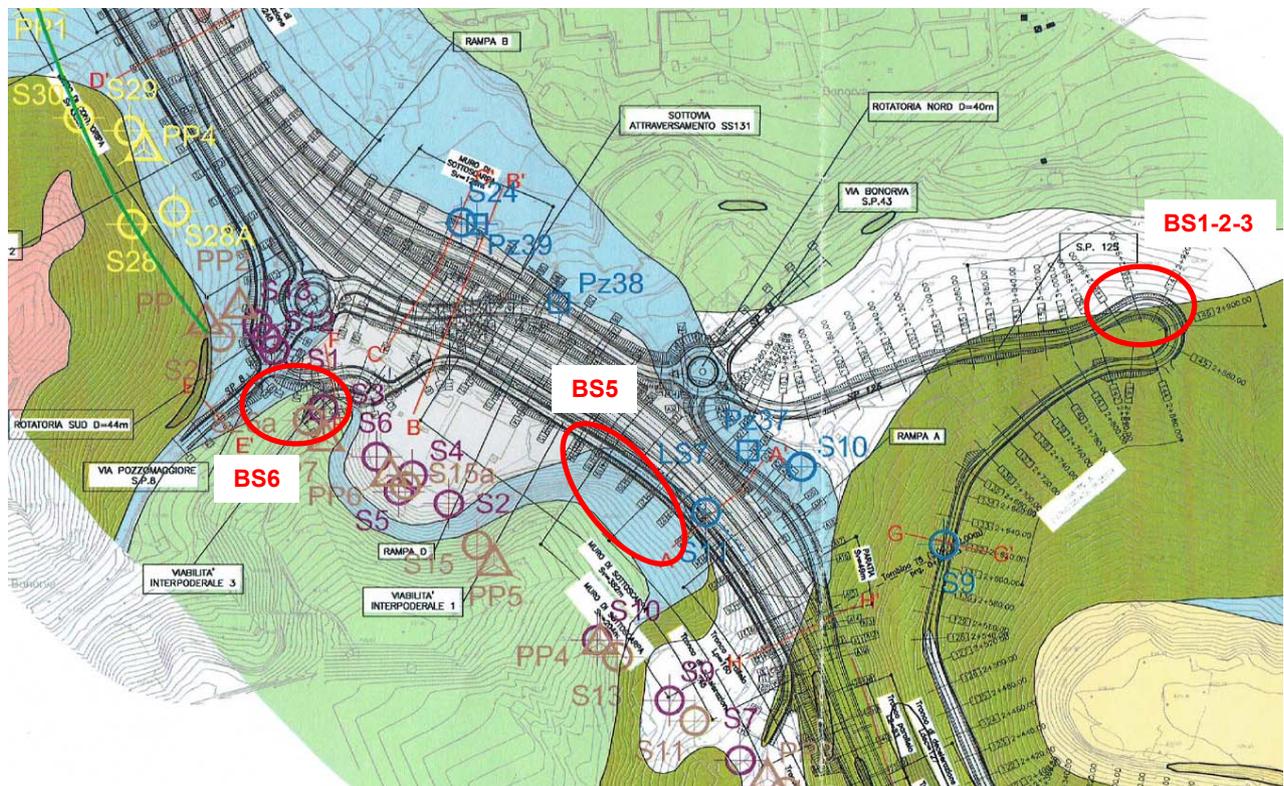
Lo svincolo di Bonorva nord è situato su un'ampia sella morfologica, allungata in direzione SE-NW ad una quota media di circa 510 m e strutturata nei depositi calcarenitici litoidi, di colore bianco e grigio, da compatti a mediamente fratturati (Successione sedimentaria oligo-miocenica del Lugudoro-Sassarese - Formazione di Mores). In corrispondenza del sottopasso di attraversamento della SS.131, il modello geologico di riferimento è rappresentato dalla presenza di siltiti e marne compatte appartenenti alla Formazione di Mores in facies siltitica, che, ad una quota di circa 505 m slm, in continuità stratigrafica, passano inferiormente ad arenarie e calcareniti della medesima Formazione ma in facies calcarenitica.

La porzione della zona centrale della valle morfologica, è stata oggetto di riempimento con materiale costituito da materiale di riporto eterogeneo e incoerente costituente il rilevato stradale e materiali di cava.

La S.P.125 attraversa, nel tratto iniziale nei pressi dello Svincolo di Bonorva sud, un altopiano, posto a quota 650 m circa, costituito dalla parte più settentrionale dell'Altopiano di Campeda e caratterizzata dai depositi basaltici appartenenti alla Subunità di Campeda (Basalti della Campeda-Planargia). Più a nord la S.P. 125, in mezzacosta, attraversa longitudinalmente un versante esposto a sud con pendenze piuttosto elevate, strutturato nei depositi siltitici, marnosi e arenacei, di colore grigio e giallastro, da teneri a compatti e lapidei, alternati a livelli calcareo-marnosi, litoidi. (Successione sedimentaria oligo-miocenica del Lugudoro-Sassarese - Formazione di Mores in facies siltitica).

Nella **figura 1** si riporta lo stralcio della Carta geologica di progetto e la relativa legenda.

**Figura 1.** Stralcio carta geologica di progetto con ubicazione delle indagini geofisiche eseguite (in rosso)



## LEGENDA

### DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE



**Depositi antropici**

Materiali di riporto eterogeneo e incoerente costituente il rilevato stradale e ferroviario e materiali di cava.



**Coltre eluvio-colluviale indifferenziata**

Clasti eterometrici di natura calcarea, marnosa e basaltica, immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti e arricchiti in frazione organica.

### BASALTI DEL LOGUDORO



**Basalti del Logudoro**

Basalto litoide, di colore vinaccia e grigio, con aspetto vacuolare, da compatto a molto fratturato. Le fratture si presentano variamente orientate, fortemente alterate, con frequenti fenomeni di argillificazione (*Basalti del Logudoro - Subunità di Serrestene*). BURDIGLIANO

### BASALTI DELLA CAMPEDA - PLANARGIA



**Basalti di Campeda**

Basalto e andesite basaltica litoide, di colore grigio, con aspetto vacuolare, da mediamente a molto fratturata. Le fratture hanno un'inclinazione variabile da suborizzontale a circa 30° e si presentano fortemente alterate, con frequenti fenomeni di argillificazione (*Basalti della Campeda-Planargia - Subunità di Campeda*). PLIOCENE

### SUCCESSIONE SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENICA DEL LOGUDORO - SASSARESE



**Coltre eluvio-colluviale della facies siltacea sottostante**

Limf. sabbioso-argillosi e sabbie limose derivati dall'alterazione dei depositi marnosi sottostanti, sciolti e debolmente addensati, di colore marrone e bruno rossastro, con immersi clasti calcarei e marnosi centimetrici e decimetrici, intercalati a livelli di suolo.



**Formazione di Mores in facies siltacea**

Siltiti, marne argillose e arenacee, di colore grigio e giallastro, da tenere a compatte e lapidee, alternate a livelli calcarei marnosi litoidei di spessore decimetrico. La parte litoide presenta fratture con inclinazione di 80° e frequenti striature nerastre e giallastre. Nella parte bassa passano a arenarie marnose e calcarenite sabbiose, a grana medio-grossolana, addensate e compatte, di colore bianco, grigio e rossastro (*Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese - Formazione di Mores*).



**Formazione di Mores in facies calcarenitica**

Calcareniti e calcari bioclastici di colore bianco e grigio, da compatti a mediamente fratturati e alterati con patine di ossidazione rossastra. Le fratture si presentano con inclinazione da 80° a subverticale (*Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese - Formazione di Mores*).

## 3 PROGRAMMA E UBICAZIONE DELLE INDAGINI SVOLTE

Le indagini eseguite i giorni 23 e 24 marzo 2017 sono state articolate secondo il seguente programma di attività:

1. Esecuzione di n° 5 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e onde S, (distinti dalla sigla "BS")
2. Rilievo topografico dei punti di ubicazione dei geofoni e delle energizzazioni, tramite stazione totale e GPS differenziale

L'ubicazione degli stendimenti è indicata nelle planimetrie delle Tavole 1-2-3, mentre nelle tavole A-B-C-D-E sono rappresentate le relative sezioni sismiche.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, la direzione di esecuzione (da geofono iniziale a quello finale) e la loro lunghezza complessiva

In funzione delle specifiche ANAS della logistica dei luoghi e degli spazi disponibili, gli stendimenti di sismica sono stati realizzati con un numero di geofoni compreso tra 10 e 16 e spaziatura pari a 5 metri, che è stata ridotta a 3 m per la base sismica BS6.

**Tabella 1.** Quadro riassuntivo delle indagini svolte e caratteristiche geometriche

Num progr	Stendimenti	Direzione	Intervallo Geofoni [m]	Lunghezza totale [m]
1	BS1	O-E	5	100
2	BS2	SSE-NNO	5	50
3	BS3	SE-NO	5	62
4	BS5	NO-SE	5	67
5	BS6	NO-SE	3	42
TOTALE				321

**Foto 1.** Panoramica area di indagine - stendimento BS1



**Foto 2.** Panoramica area di indagine - stendimento BS5



Foto 3. Panoramica area di indagine - stendimento BS6

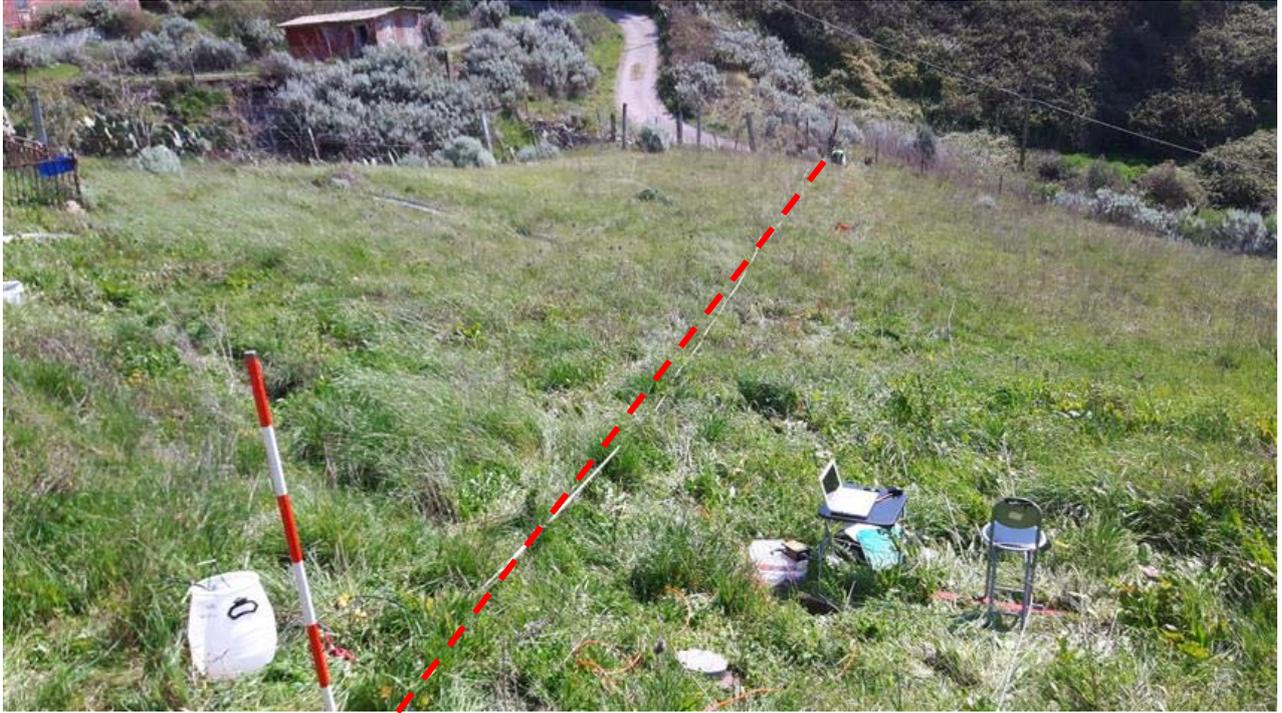


Foto 4. Particolare geofono orizzontale



## 4 SISMICA A RIFRAZIONE

### 4.1 Tecnica e parametri utilizzati

In ambito d'indagini indirette l'esplorazione geofisica di sismica a rifrazione risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica inferiore.

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

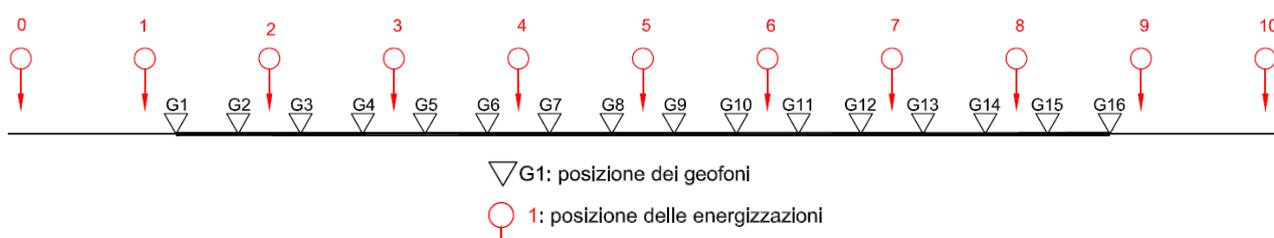
Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati.

Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. E' comunque generalmente considerato che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto.

La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutato in circa il 25/30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite da 6 a 11 energizzazioni-shot al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica come meglio specificato negli schemi di seguito rappresentati.

**Schema 1.** Schema geometrico delle acquisizioni di sismica a rifrazione



### 4.2 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, ci siamo avvalsi di una strumentazione di acquisizione DoReMi, prodotto dalla SARA electronic instruments, con frequenza di campionamento 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della SARA electronics con frequenza propria di 10 Hz. Il numero di canali è risultato variabile in funzione della logistica dei luoghi e degli spazi disponibili, così come descritto nei paragrafi precedenti.

Per l'energizzazione delle onde P ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

Per la generazione delle onde S, considerata la difficile accessibilità dei luoghi, talora caratterizzati da versanti di elevate pendenze e/o da folta vegetazione, oltre che della classica trave in legno (accessibile solo in pochi punti) è stata impiegata una lama infissa nel terreno sulle quali veniva fatto impattare con direzione orizzontale un martello di 5 o 10 Kg di peso.

I punti di interesse (geofoni e shot) sono stati rilevati con GPS in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e tale informazione è stata poi utilizzata in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

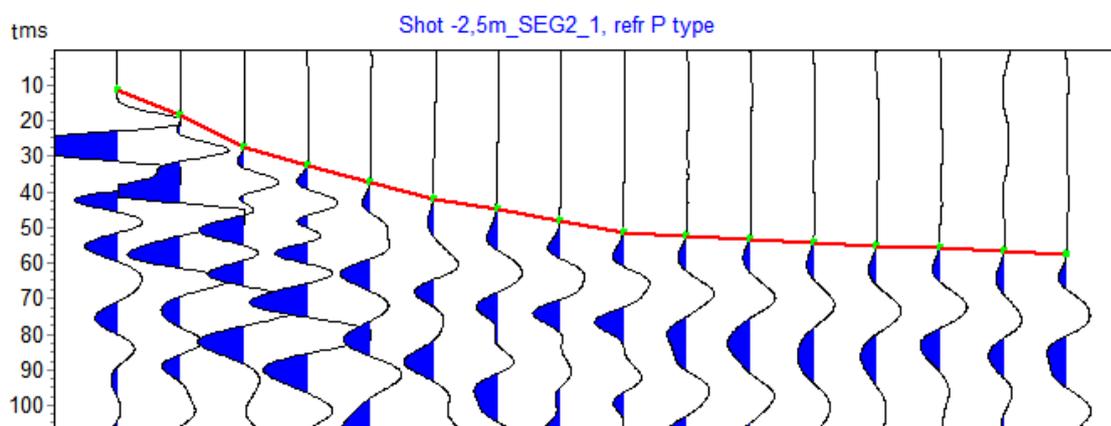
### 4.3 Elaborazione dei dati

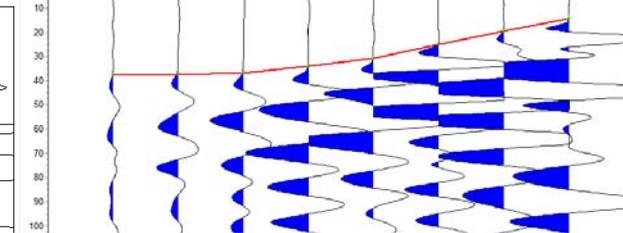
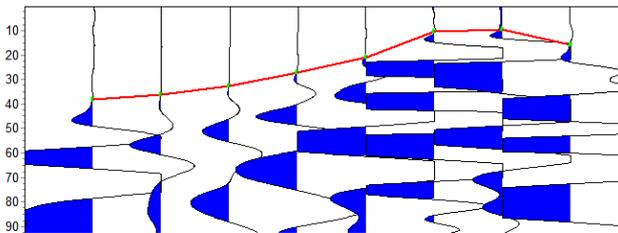
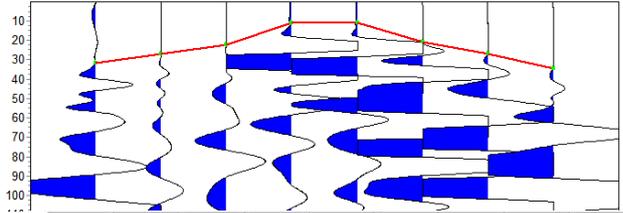
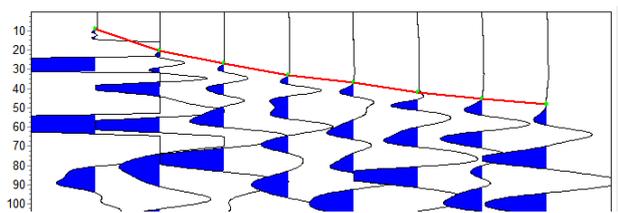
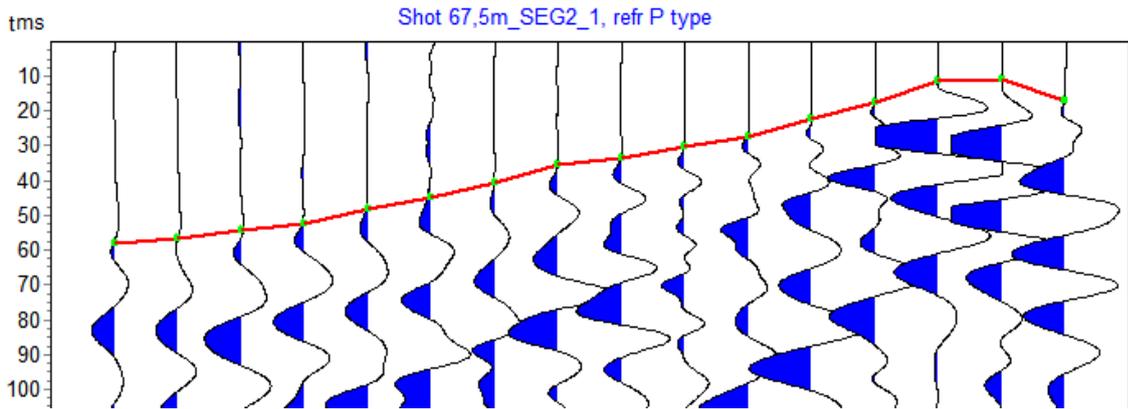
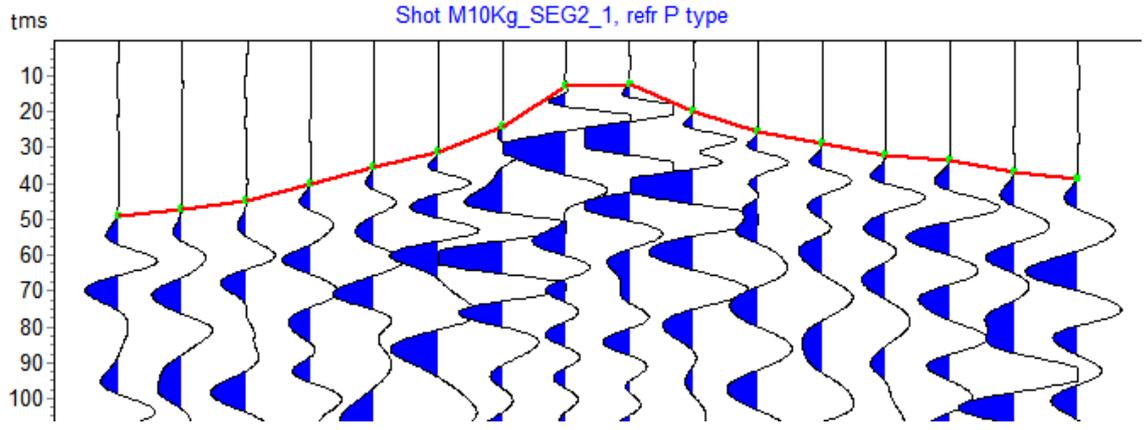
I dati del rilevamento sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche compressionali (onde P) e di taglio (onde S), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi).

La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare.

In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software ZondST2D di Alex Kaminsky e il software Pickwin e Plotrefa della OYO. Entrambi i metodi permettono il superamento dei limiti imposti a livello geometrico dagli strati con inversione di velocità sismica. Di fatto lo sviluppo numerico vede la ricerca dei percorsi dei raggi sismici nello spessore sottostante la stesa sismica, individuando quei tratti a velocità uguale (o comunque contenuta in intervalli preordinati); una successiva campitura del grigliato di celle costruito al di sotto della base sismica permette una rappresentazione grafica che rende meglio leggibile le valutazioni che, per la gran mole di calcoli richiesti in fase di sviluppo del modello numerico, può essere affrontato solo mediante elaboratore elettronico.





## 5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nel seguente tabella si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete).

Litotipi	Vp [m/s] min-max	Vs [m/s] min-max
<b>TERRENI E ACQUA</b>		
Alluvioni	400 - 2000	200 - 800
Sabbia asciutta	200 - 1000	80 - 400
Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione)	600 - 2300	250 - 450
Sabbia siltosa	600 - 1900	200 - 600
Sabbia e ghiaia	300 - 1800	300 - 600
Limo	650 - 1250	240 - 480
Argilla	1000 - 2500	300 - 600
Argilla sabbiosa	600 - 2500	200 - 450
Acqua	1450 - 1500	0
<b>ROCCE SEDIMENTARIE</b>		
Argillite	2100 - 4400	550 - 2100
Arenaria	2000 - 6000	950 - 3100
Arenaria fratturate	800 - 2100	360 - 950
Calcarea	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcarea fratturato	750 - 1500	330 - 1000
Calcarenite	1400 - 4400	800 - 2500
Calcarenite fratturata	600 - 1300	330 - 800
Marna	1500 - 2000	300 - 500
<b>ROCCE IGNEE</b>		
Basalto	1800 - 5000	1000 - 3000
Basalto fratturato	950 - 1350	480 - 700
Granitoidi	1600 - 5000	900 - 3000
Granitoidi fratturati	1000 - 1750	500 - 900
Piroclastite coerente	750 - 2500	350 - 1100
Piroclastite incoerente	350 - 1000	160 - 450

In particolare si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ( $S_r = 100\%$ ) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio (S).

## 6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_p$ ,  $V_s$  e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche eseguite:

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

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

### Determinazione del modulo di Young statico $E_s$

Per la determinazione del modulo di Young statico  $E_s$  dal modulo dinamico  $E_d$  si applica la nota relazione proposta da Rzhnevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm<sup>2</sup>:

$$E_{\text{stat}} = \frac{E_{\text{din}}^{0.97}}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{\text{stat}} = E_{\text{din}} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni da luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

### Correlazioni con $N_{\text{spt}}$ e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi ( $N_{\text{spt}}$ ) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con  $N_{\text{spt}} = (V_s / \alpha)^\beta$  con i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

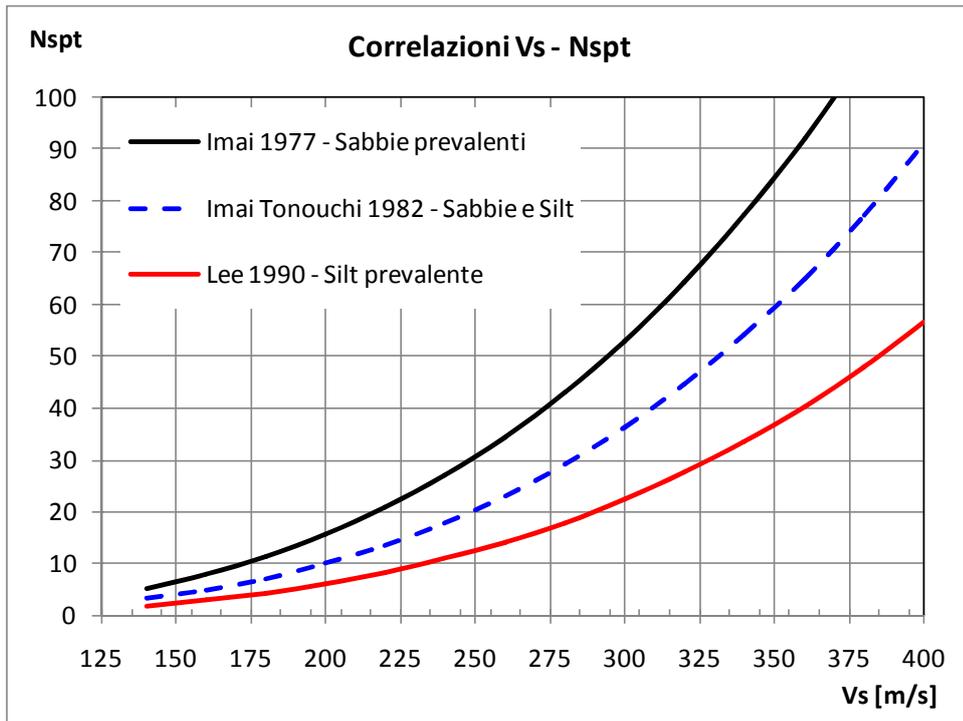
A tale scopo si utilizzano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano il sito in esame:

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \quad \text{valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1982)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \quad \text{valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{114,43} \right)^{3,226} \quad \text{valida per terreni prevalentemente fini - Lee (1990)}$$

Dove:  $N_{\text{spt}}$  = numero di colpi del Penetrometro Standard e  $V_s$  = Velocità delle onde di taglio



Nota il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

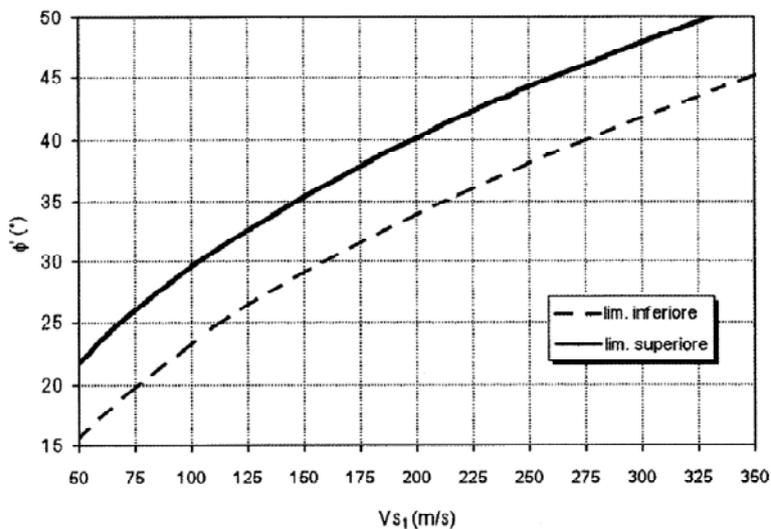
Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio $\phi$	Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson & Thornburn, $\phi = 0,28 \text{ Nspt} + 27,2$ Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, $\phi = 0,30 \text{ Nspt} + 27$
Modulo di deformazione E (o di Young)	D'Appolonia et Alii. $E \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 7,71 \text{ Nspt} + 191$

**Correlazione diretta tra velocità Vs e angolo di resistenza al taglio (terreni incoerenti)**

Correlazione di Uzielli et al (2013) e Mayne (2014) che permette di stimare il range dei valori di picco della resistenza al taglio tramite la Vs normalizzata rispetto alla pressione litostatica:

Limite superiore  $\phi' = 3,9 \text{ Vs}_1^{0,44}$

Limite inferiore  $\phi' = 3,9 \text{ Vs}_1^{0,44} - 0,62$



Vs1:  $Vs * (p_a/\sigma'_{v0})^{0,25}$  velocità delle onde sismiche normalizzata ad una tensione efficace  $p_a=100\text{kPa}$ ;  
in pratica oltre i 7/10 m dal p.c. la Vs1 è inferiore di circa il 12-15 % della Vs

**Correlazione diretta tra velocità Vs e coesione non drenata (terreni coesivi)**

La stima della coesione non drenata è stata effettuata per correlazione diretta con le Vs, impiegando differenti relazioni che portano comunque a risultati simili:

$Cu = (Vs/23)^{2.105}$  Dickenson (1990)

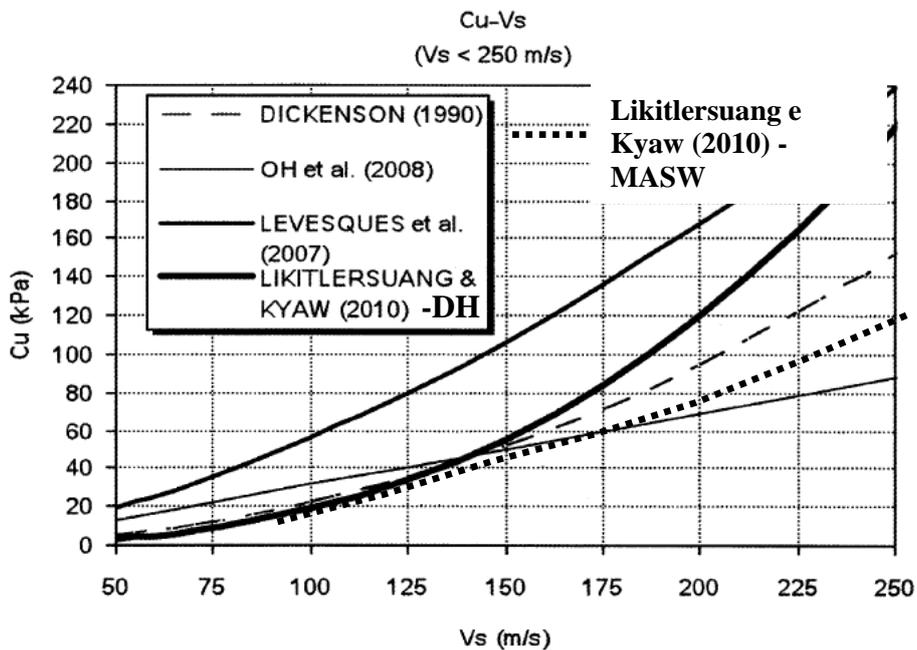
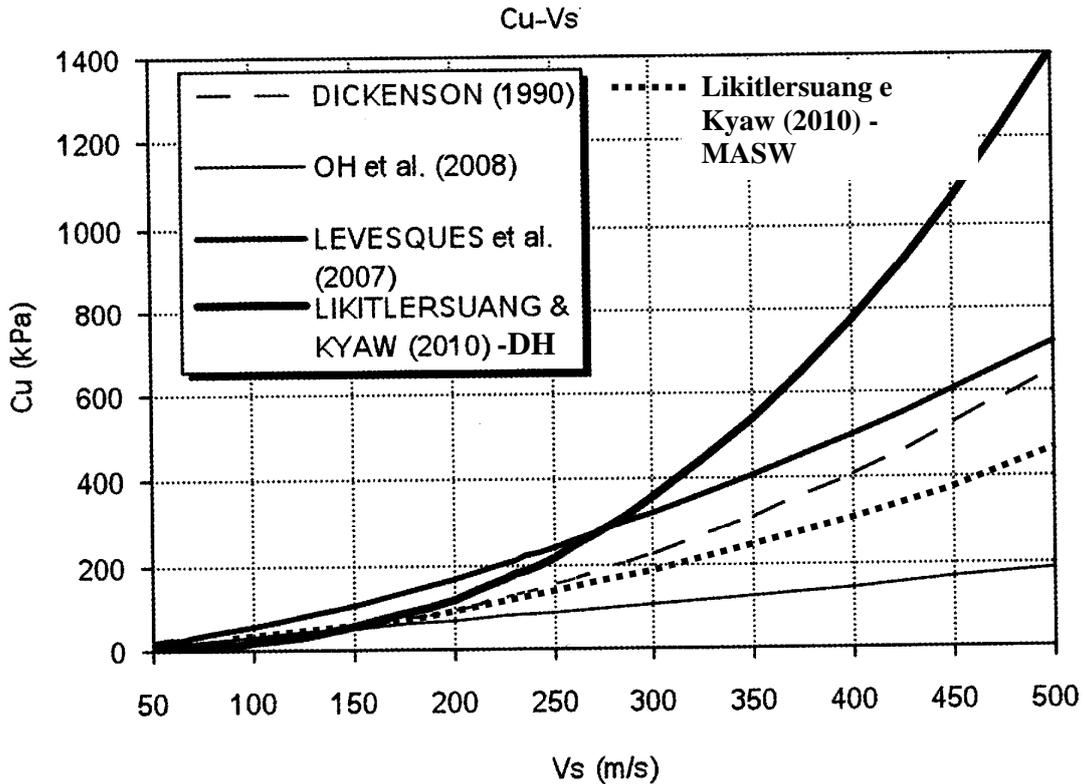
$Cu = (Vs-17,5)/2.63$  Oh et al. (2008)

$Cu = (Vs/7,93)^{1,587}$  Levesques et al. (2007)

$Cu = 100x(Vs/228)^{1,961}$  Likitlersuang e Kyaw (2010) valida con i valori di Vs misurati tramite MASW

$Cu = 100x(Vs/187)^{1,961}$  Likitlersuang e Kyaw (2010) valida con i valori di Vs misurati tramite Down Hole (DH)

Nei seguenti grafici si riportano le suddette correlazioni, rispettivamente negli intervalli di Vs=50-500 m/s e 50-250 m/s; la relazione di Levesques, in genere sovrastima la Cu.



## 7 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Nell'area oggetto d'indagine sono stati realizzati N° 5 sondaggi a carotaggio cge dove possibile sono stati utilizzati come dati di "taratura" delle indagini geofisiche. Si riportano di seguito le stratigrafie semplificate di ciascun sondaggio rimandando all'elaborato specifico per i dettagli.

### Sondaggio S1 (quota 545,07 m slm)

da 0,0 a 4,8 m: Terreni di riporto (Spt: 12 a 1,5m; 54 a 3,0m; 70 a 4,5m)

da 4,8 a 9,0m: Coltre superficiale alterato e fratturato del substrato lapideo (Spt: Rif a 6,7 m)

da 9,0 a 13 m: Calcarenite marnosa integra (RQD=100%)

da 13 a 30 m: Arenaria microconglomeratica grigia (RQD=100%)

### Sondaggio S2 (quota 511,09 m slm)

da 0,0 a 4,0 m: Terreni di riporto (Spt: 23 a 1,0m; 14 a 3,0m; 70 a 4,5m)

da 4,0 a 9,0m: Coltre superficiale alterato e fratturato del substrato lapideo (calcareniti)

da 9,0 a 15 m: Arenaria microconglomeratica (RQD=100%)

### Sondaggio S3 (quota 521,75 m slm)

da 0,0 a 6,5 m: Terr. Riporto + Ghiaia, sabbia, ciottoli e blocchi in matrice fine (Spt: 7 a 1,5 e 3m ; 10 a 5,0m; R a 7m)

da 6,5 a 7,0m: Coltre superficiale alterato e fratturato del substrato lapideo (Spt: Rif a 6,7 m)

da 7,0 a 9,5 m: Calcarenite marnosa fratturata (RQD=50%)

da 9,5 a 11 m: Calcarenite marnosa fratturata (RQD=70%)

da 11 a 19 m: Calcarenite marnosa poco fratturata (RQD=80%)

### Sondaggio S4 (quota 512,91 m slm)

da 0,0 a 7,0 m: Terr. Riporto + Ghiaia, sabbia ciottoli e blocchi in matrice fine (Spt: 10 a 1,5m; 7 a 3,5m; 11 a 6,5m)

da 7,0 a 10,5 m: Calcarenite da integra a poco fratturata fratturata (RQD=85%)

da 10,5 a 25,0 m: Microconglomerato arenaceo, poco fratturato, con livelli debolmente cementati (RQD=90%)

### Sondaggio S5 (quota 516,92 m slm)

da 0,0 a 5,0 m: Terreno di Riporto costituito da sabbia fine limosa con clasti (Spt: 9 a 1,5m; 21 a 3m ; 31 a 4,5m)

da 5,0 a 10,5 m: Ghiaia costituita da clasti di vulcanite spigolosi (Spt: 33 a 6,2m; R a 9m ;

da 10,5 a 20,0 m: Sabbia limoso-argillosa, con clasti di vulcanite, asciutta (Spt: 22 a 18m)

da 20,0 a 25,0 m: Sabbia limoso-argillosa, con clasti di vulcanite, con alcuni livelletti cementati marroncina (Spt: 31 a 22m)

da 25,0 a 27,0 m: Coltre superficiale del substrato lapideo: calcarenite marnosa, totalmente fratturata,

## 8 INTERPRETAZIONE DEI DATI

Si riportano di seguito gli elementi identificati nelle sezioni sismiche elaborate, nelle quali si è cercato di tenere un range di velocità  $V_p$  e  $V_s$  simile per tutte le sezioni in modo da evidenziare le differenti tipologie di terreni incontrati.

Sulla base delle velocità misurate, dei dati bibliografici e di quelli di lavori eseguiti su litologie simili nonché sui dati dei sondaggi geognostici, in tutte le sezioni tomografiche sono stati definiti i seguenti sismostrati:

- A - Sismostrato A: unità delle terre
- B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate
- C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate

La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi.

Nelle descrizioni che seguono le profondità sono riferite al piano di campagna e per direzione dello stendimento si intende l'orientamento geografico formato dalla linea che unisce il geofono iniziale con quello finale, che nelle planimetrie delle **Tavole 2 e 3** è stato indicato con una freccia.

### 9.1 Basi Sismiche BS1-BS2-BS3 (cfr. Tavole A-B-C e Tavola 2)

In questo settore sono state eseguite n° 3 basi sismiche distinte dalla sigla BS1, BS2 e BS3. L'area si caratterizza per la presenza del substrato costituito dalla formazione di Mores in facies calcarenitica, mentre nella porzione superficiale è presente la coltre eluvio-colluviale, costituita da limi sabbioso-argillosi e sabbie marine derivanti dall'alterazione dei depositi sottostanti.

Lungo lo stendimento **BS1** possono essere rilevati i seguenti sismostrati:

- Sismostrato A: rappresentativo della coltre superficiale per spessori compresi tra 4 e 7 m circa, e velocità  $V_p$  tra 500 e 1000 m/s e  $V_s$  tra 250 e 600 m/s.
- Sismostrato B: rappresentativo dell'unità delle rocce fratturate caratterizzato da velocità  $V_p$  medie di 1500 m/s e  $V_s$  medie di 750 m/s
- Sismostrato C: rappresentativo del substrato lapideo integro/poco fratturato caratterizzato da  $V_p > 1800$  m/s e  $V_s > 900$  m/s

In corrispondenza dalla parte iniziale della sezione, tra le progressive 10 e 40 m si rileva una riduzione di velocità maggiormente enfatizzata nel grafico delle onde P, probabilmente legata alla presenza della vallecola impostata su una linea di minore resistenza del substrato.

Le sezioni **BS2** e **BS3** sono state realizzate in direzione circa perpendicolare alla BS1 e riportano i medesimi sismostrati della base sismica BS1 con velocità comparabili.

Nella sezione **BS2** la coltre presenta uno spessore circa costante pari a circa 5-6 m riducendosi nella parte finale della linea sismica, dove il substrato litoide/poco fratturato tende a risalire.

Nella sezione **BS3** la coltre presenta uno spessore di circa 4-5 m per quasi tutta la sua lunghezza, e dopo la scarpata aumenta sino a 8 m circa.

### 9.1 Basi Sismiche BS5-BS6 (cfr. Tavole D-E e Tavola 3)

La linea sismica BS5 è stata realizzata parallelamente all'asse della ss 131, in corrispondenza della spalla della valle morfologica oggetto di riempimento di materiale di riporto. Anche in questo caso il substrato è costituito dalla *Formazione di Mores*.

Lungo lo stendimento **BS5** si evidenzia la presenza del materiale di riporto e terreni della copertura (A) caratterizzato da velocità  $V_p$  comprese tra 400 e 700 m/s e  $V_s$  tra 250 e e 400 m/s, che presenta uno spessore crescente da NW verso SE, così come il substrato roccioso fratturato (B) e quello integro/poco fratturato (C) tendono ad immergersi in direzione sud-est. Il sismostrato B nella parte iniziale della sezione è sub-affiorante.

La base sismica **BS6** è stata realizzata lungo un versante costituito da terreni naturali costituiti da una coltre eluvio-colluviale che poggia sul substrato della formazione di Mores, ed è ubicato all'incirca lungo la linea di massima pendenza. Le sezioni sismiche mettono in luce un assetto sismo-stratigrafico piuttosto regolare, con la copertura caratterizzata da uno spessore di circa 2-3 m e velocità  $V_p$  comprese tra 400 e 700 m/s e  $V_s$  tra 250 e e 400 m/s. Segue, a profondità comprese tra 4,5 e 6 m dal p.c, il substrato roccioso inizialmente fratturato (B) e poi integro/poco fratturato..

#### Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella tabella che segue si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_p$ ,  $V_s$  e densità (stimata) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Sismostrato	Prof/zona	Densità $\gamma$	CT*	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_s$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
		[Kg/m <sup>3</sup> ]		[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
A	media	1 800		750	300	0,40	451	54	167	794
B	tetto	2 000	0,50	1 100	550	0,33	1 618	810	608	1 618
B	media	2 100	0,80	1 500	750	0,33	3 148	1.900	1 177	3 148
C	tetto	2 300	0,90	2 000	1 000	0,33	6 129	5.500	2 305	6 129

\*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

## 9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione geofisica attraverso l'impiego della tecnica della sismica a rifrazione con elaborazione tomografica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche.

In particolare, in tutti gli stendimenti realizzati è stato possibile individuare i diversi rifrattori associabili alle differenti formazioni di cui si compongono i terreni che caratterizzano l'area d'indagine.

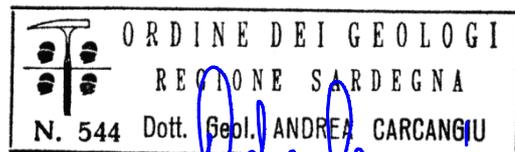
Lungo tutti gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_p$  e  $V_s$  crescente con la profondità, e possono essere rilevati i seguenti sismostrati:

- Sismostrato A: rappresentativo della coltre superficiale per spessori compresi tra 0,5 e 8 m circa, e velocità  $V_p$  tra 500 e 1000 m/s e  $V_s$  tra 250 e 600 m/s.
- Sismostrato B: rappresentativo dell'unità delle rocce fratturate caratterizzato da velocità  $V_p$  medie di 1500 m/s e  $V_s$  medie di 750 m/s
- Sismostrato C: rappresentativo del substrato lapideo integro/poco fratturato caratterizzato da  $V_p > 1800$  m/s e  $V_s > 900$  m/s

I dati derivati dall'indagine sismica si correlano abbastanza bene con quelli diretti ottenuti dalle prove penetrometriche dinamiche e possono essere perfezionati in funzione delle caratteristiche litologiche in termini di frazioni granulometriche.

Cagliari, li 24 aprile 2017

Il consulente  
Dott. Geol. Andrea Carcangiu



# TAVOLA 1 - PLANIMETRIA GENERALE INDAGINI GEOFISICHE E GEOGNOSTICHE

(Base cartografica: Rilievo Aerofotogrammetrico)

## LEGENDA INDAGINI GEOFISICHE E GEOGNOSTICHE

**BS1** Sismica a rifrazione

**S1\_PE** Sondaggi geognostici



Scala 1:4.000



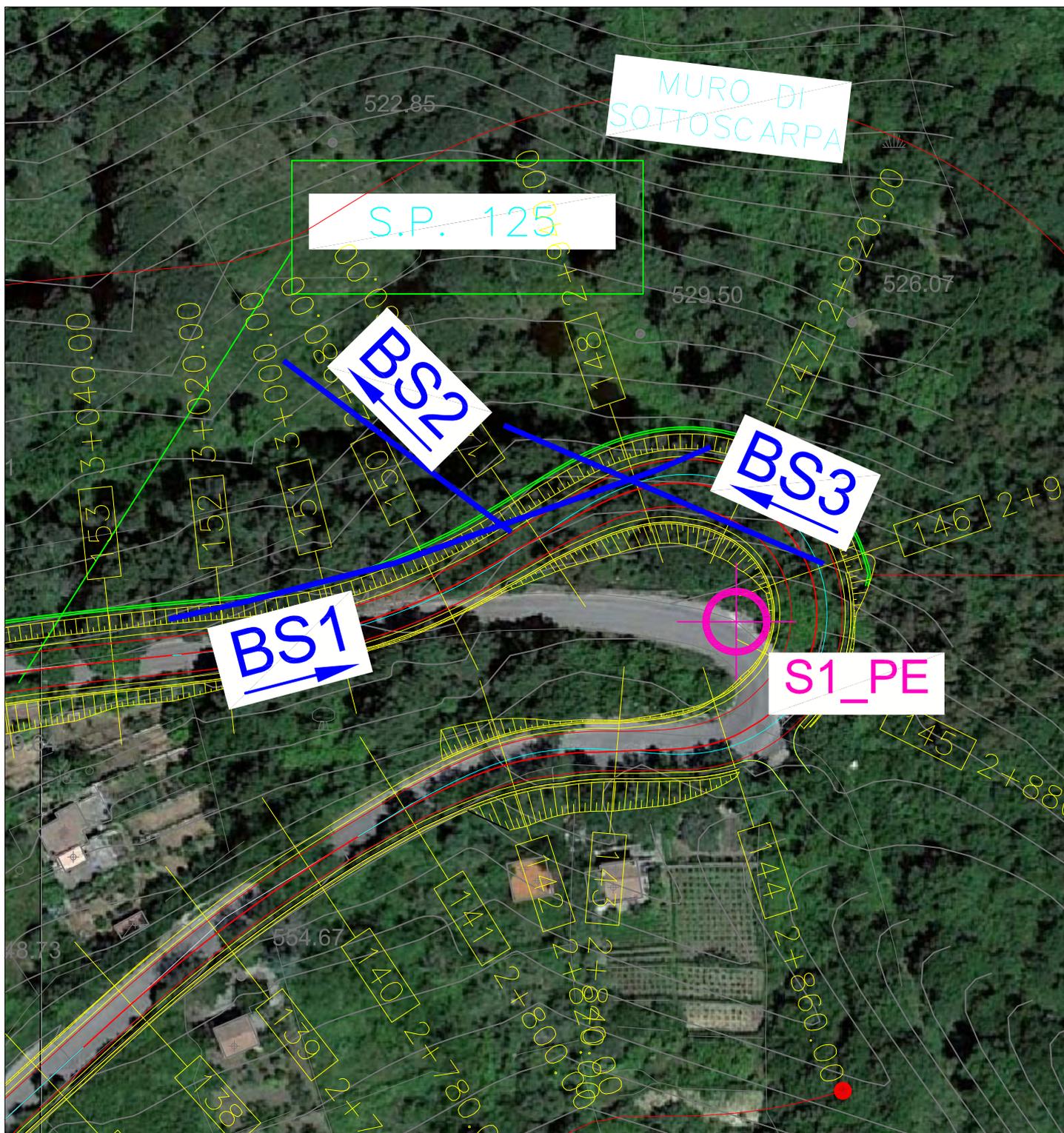
# TAVOLA 2 - Tratto S.P. 125

(Base cartografica: Rilievo Aerofogrammetrico-Fotoaerea Google Earth e Planimetria di progetto )

## LEGENDA INDAGINI GEOFISICHE E GEOGNOSTICHE

**BS1** Sismica a rifrazione e direzione di esecuzione dal primo all'ultimo geofono

**S1\_PE** Sondaggi geognostici



Scala 1:1.000



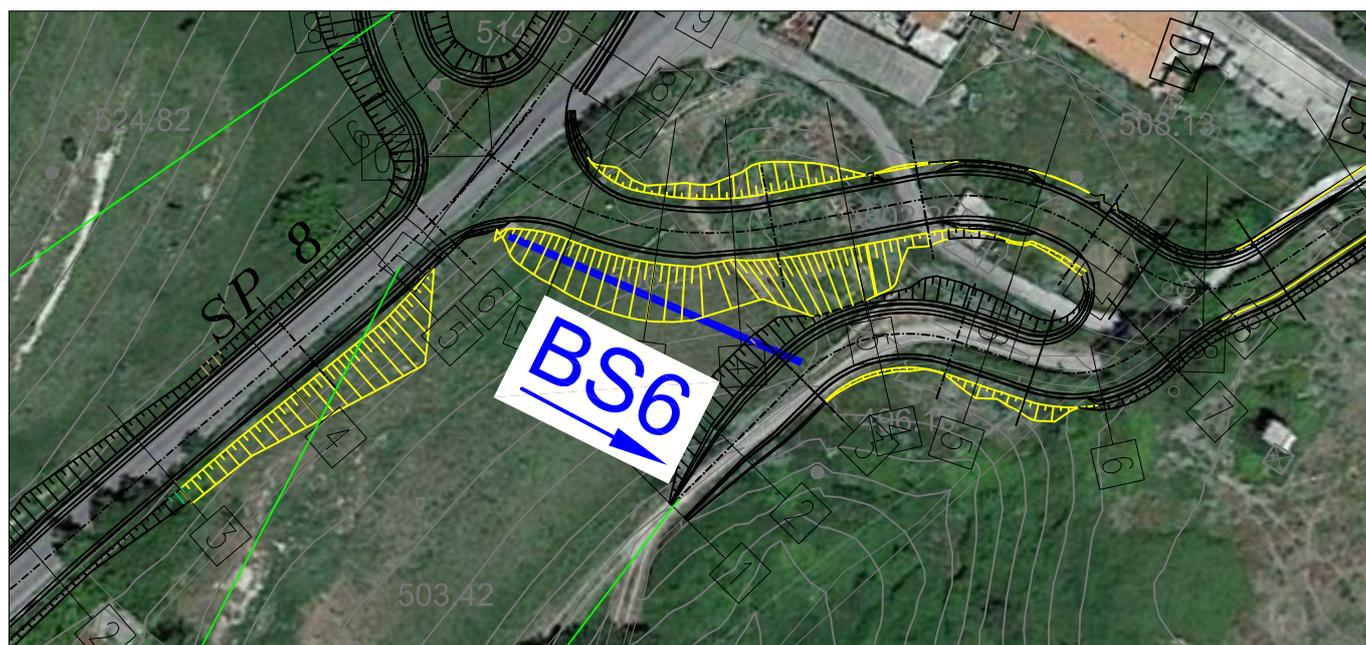
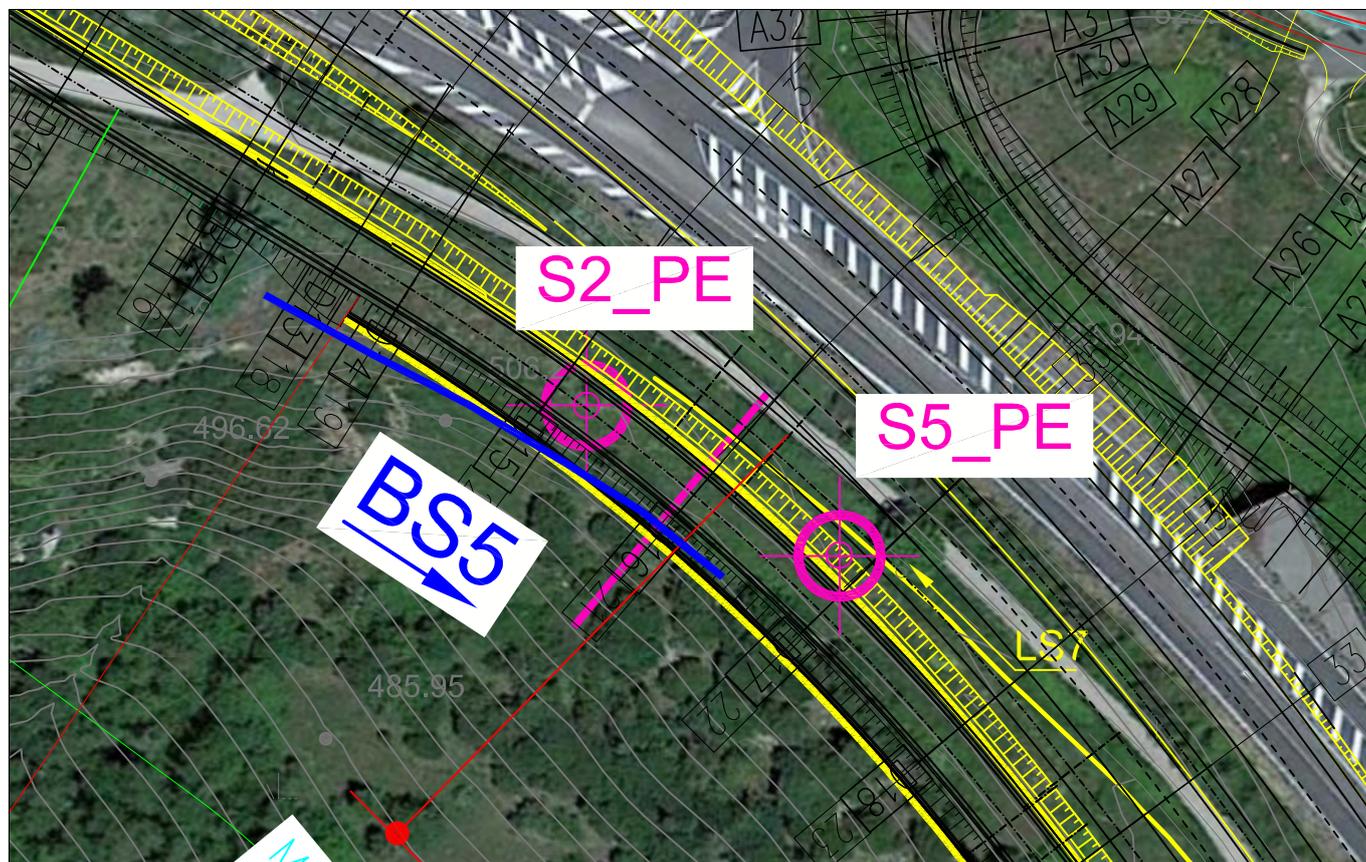
# TAVOLA 3 - Tratto S.P. 125

(Base cartografica: Rilievo Aerofotogrammetrico-Fotoaerea Google Earth e Planimetria di progetto )

## LEGENDA INDAGINI GEOFISICHE E GEOGNOSTICHE

**BS1** Sismica a rifrazione e direzione di esecuzione dal primo all'ultimo geofono

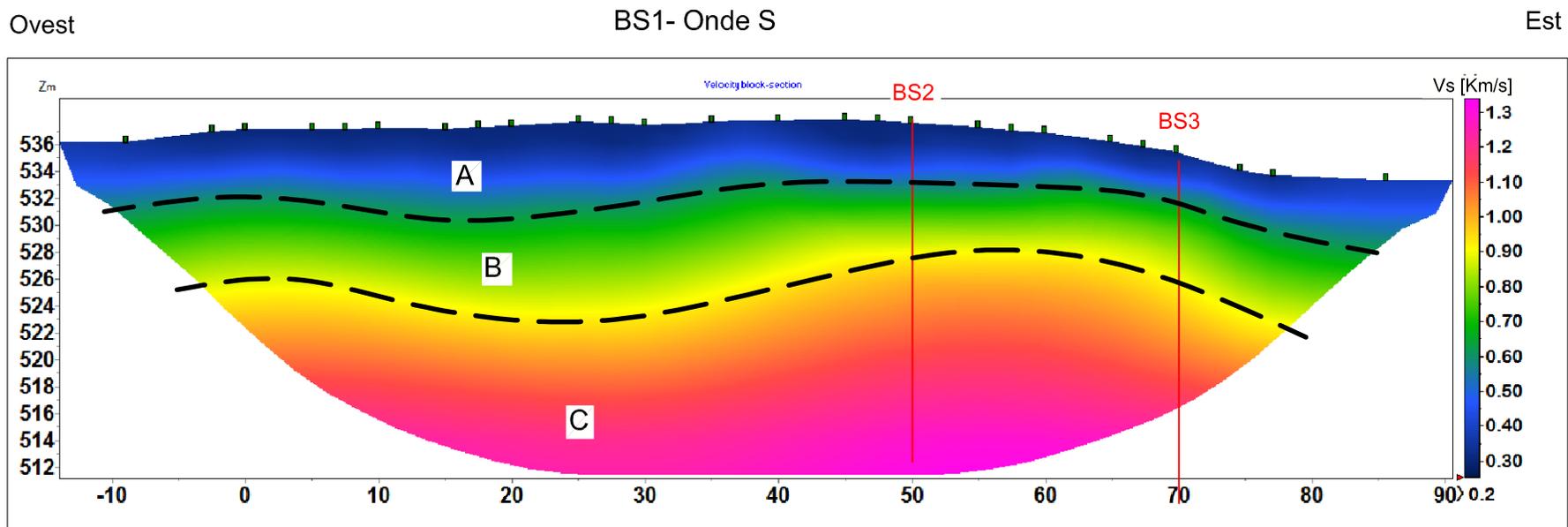
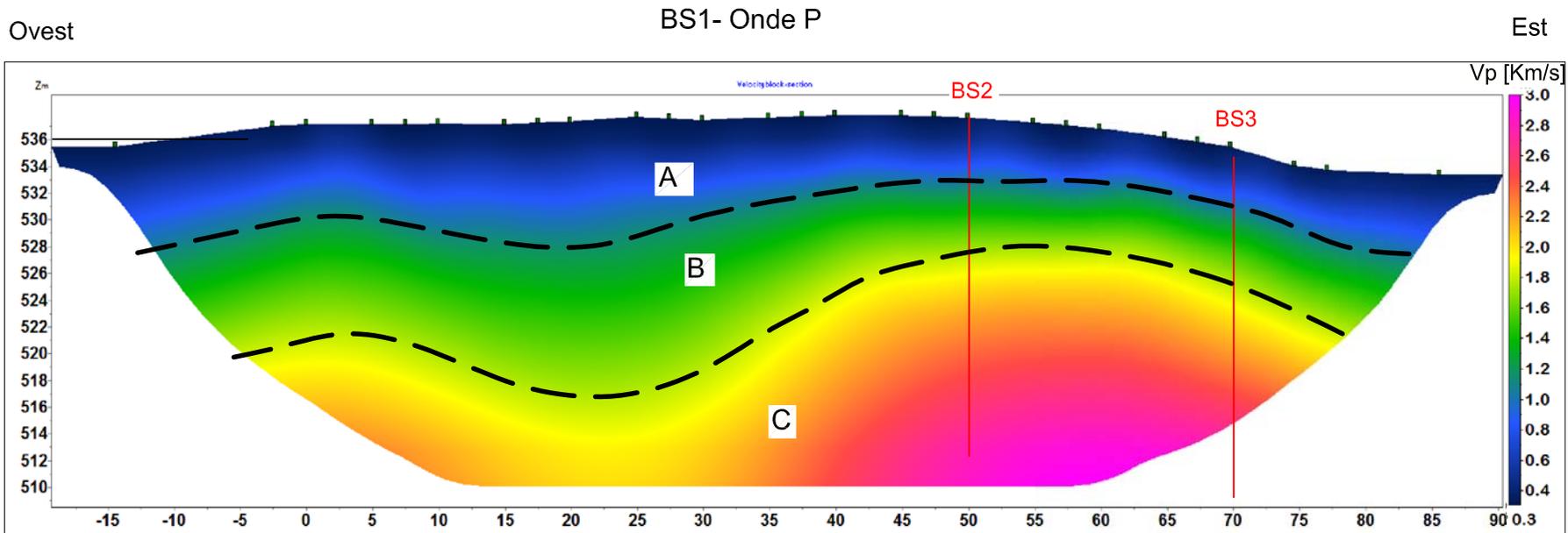
**S1\_PE** Sondaggi geognostici



Scala 1:1.000

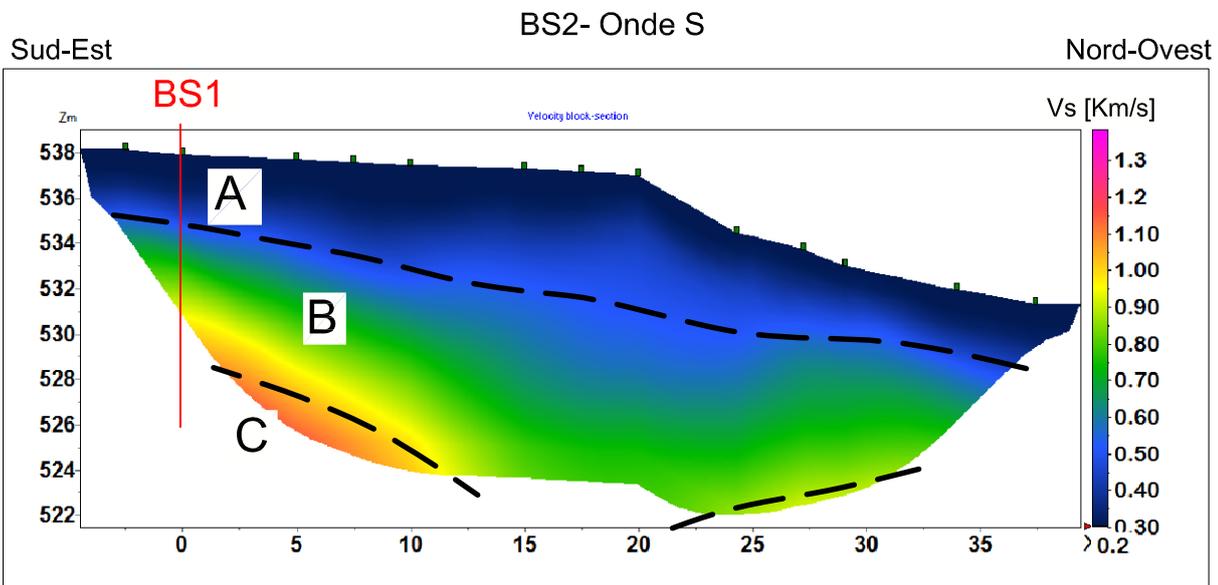
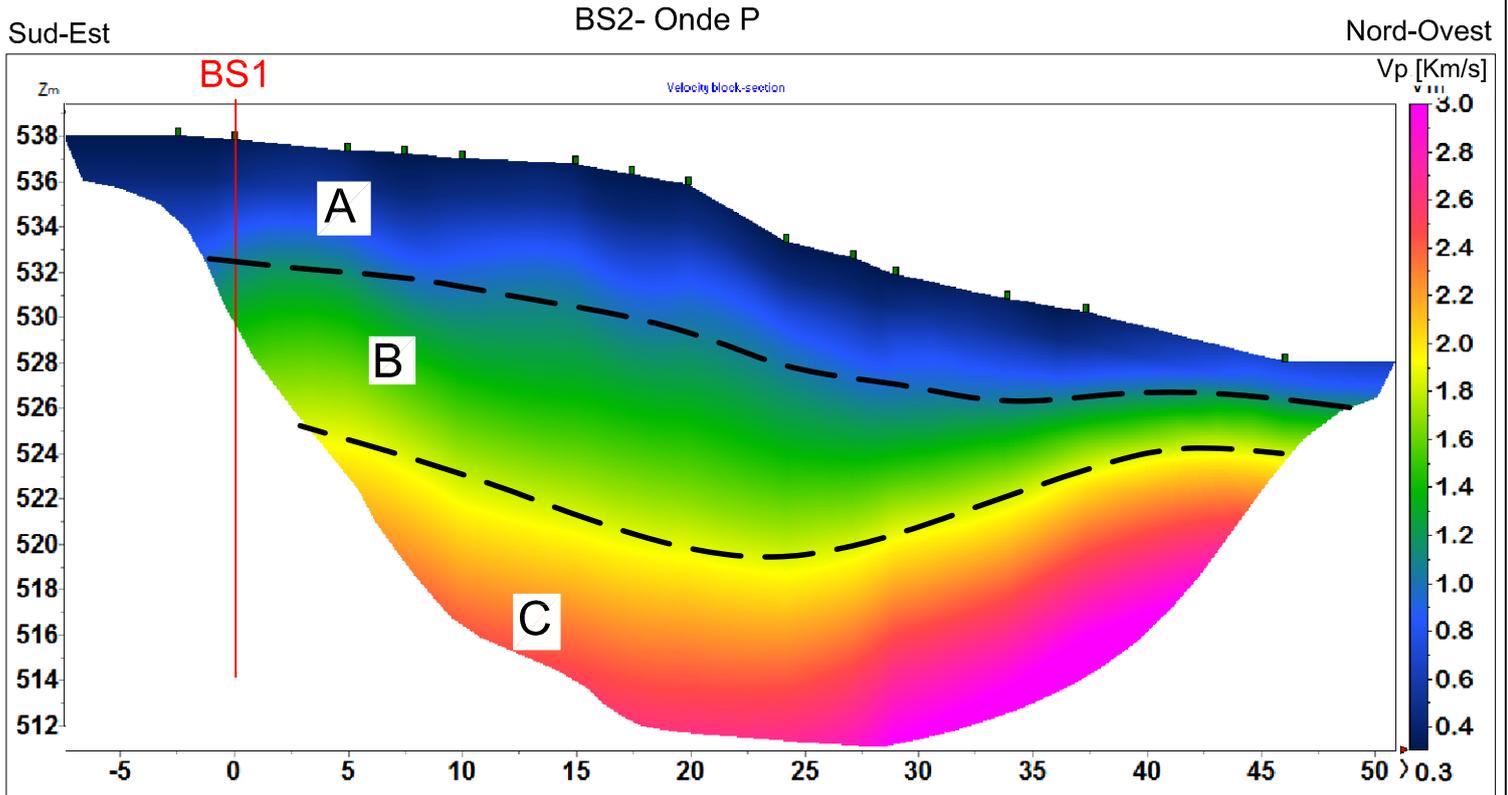


**TAVOLA A**  
Base sismica BS1 - Scala 1:500



**LEGENDA**  
 A - Sismostrato A: unità delle terre;  
 B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate  
 C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate  
 Nota: La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi

**TAVOLA B**  
Base sismica BS2 - Scala grafica



**LEGENDA**

A - Sismostrato A: unità delle terre

B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate

C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate

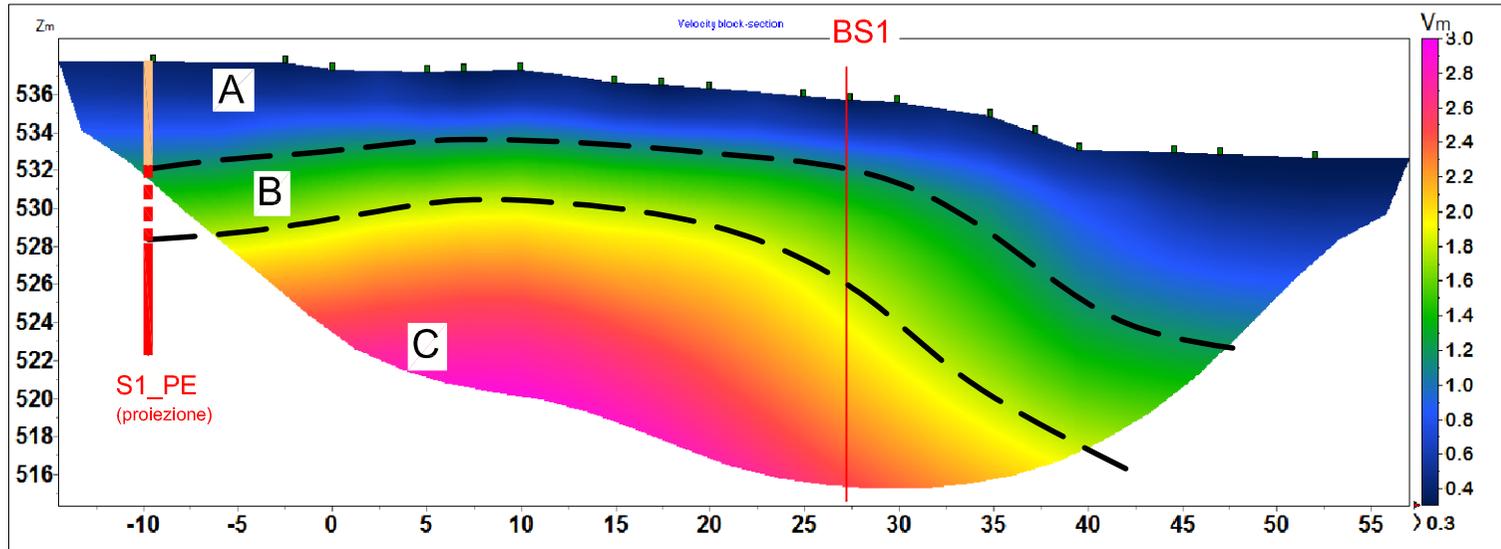
Nota: La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi

**TAVOLA C**  
Base sismica BS3 - Scala 1:400

Est-Sud-Est

BS3- Onde P

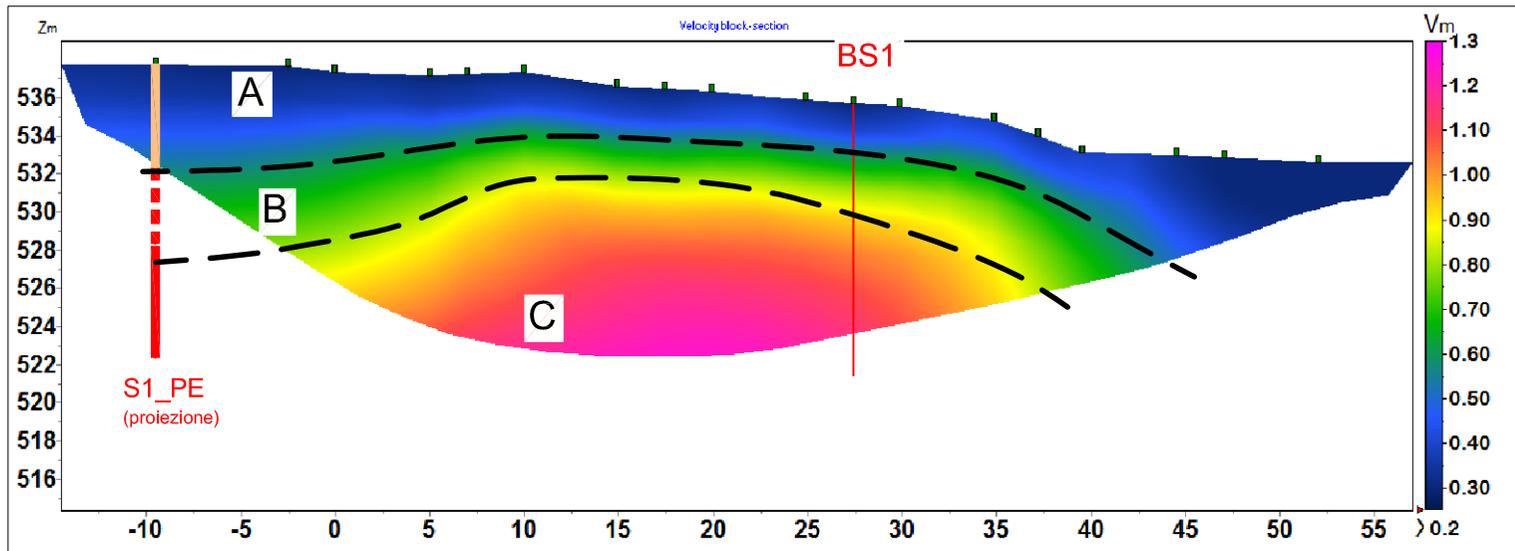
Nord-Nord-Ovest



Est-Sud-Est

BS3- Onde S

Nord-Nord-Ovest



**LEGENDA**

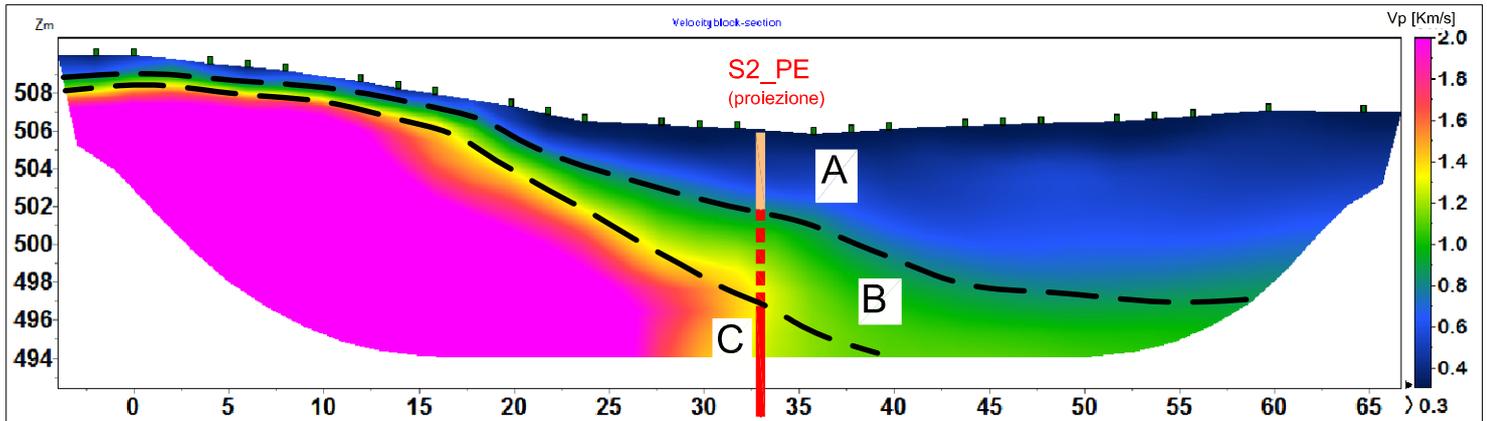
- A - Sismostrato A: unità delle terre;
  - B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate
  - C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate
- Nota: La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi

**TAVOLA D**  
Base sismica BS5 - Scala 1:400

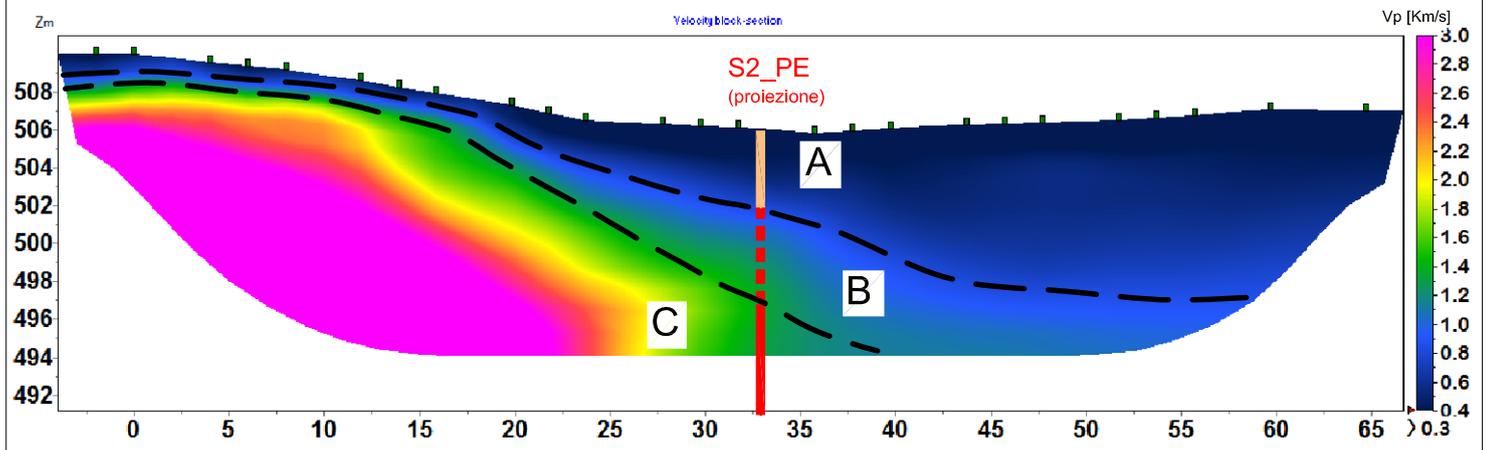
Nord-Ovest

BS5- Onde P (intervallo velocità 0.4-2.0 Km/s)

Sud-Est



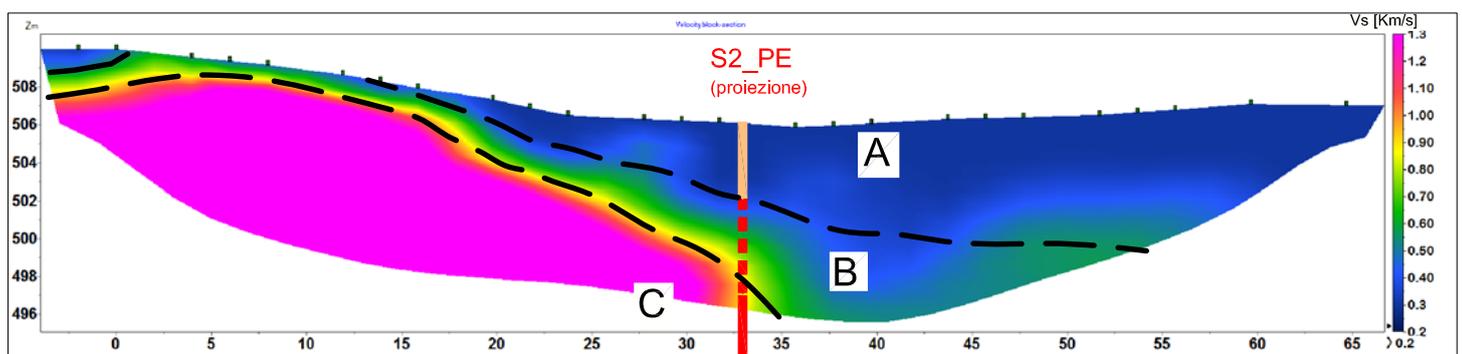
BS5- Onde P (intervallo velocità 0.4-3.0 Km/s)



BS5- Onde S

Nord-Ovest

Sud-Est



**LEGENDA**

A - Sismostrato A: unità delle terre

B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate

C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate

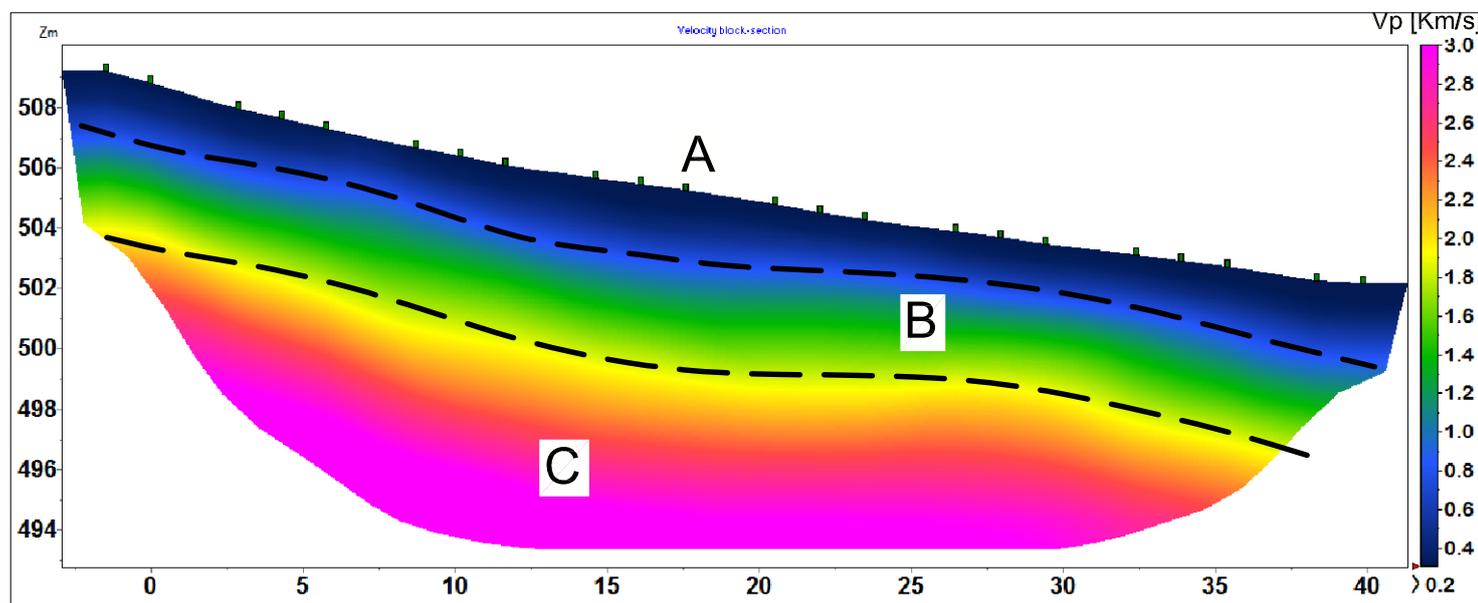
Nota: La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi

**TAVOLA E**  
Base sismica BS6 - Scala 1:250

BS6- Onde P

Nord-Ovest

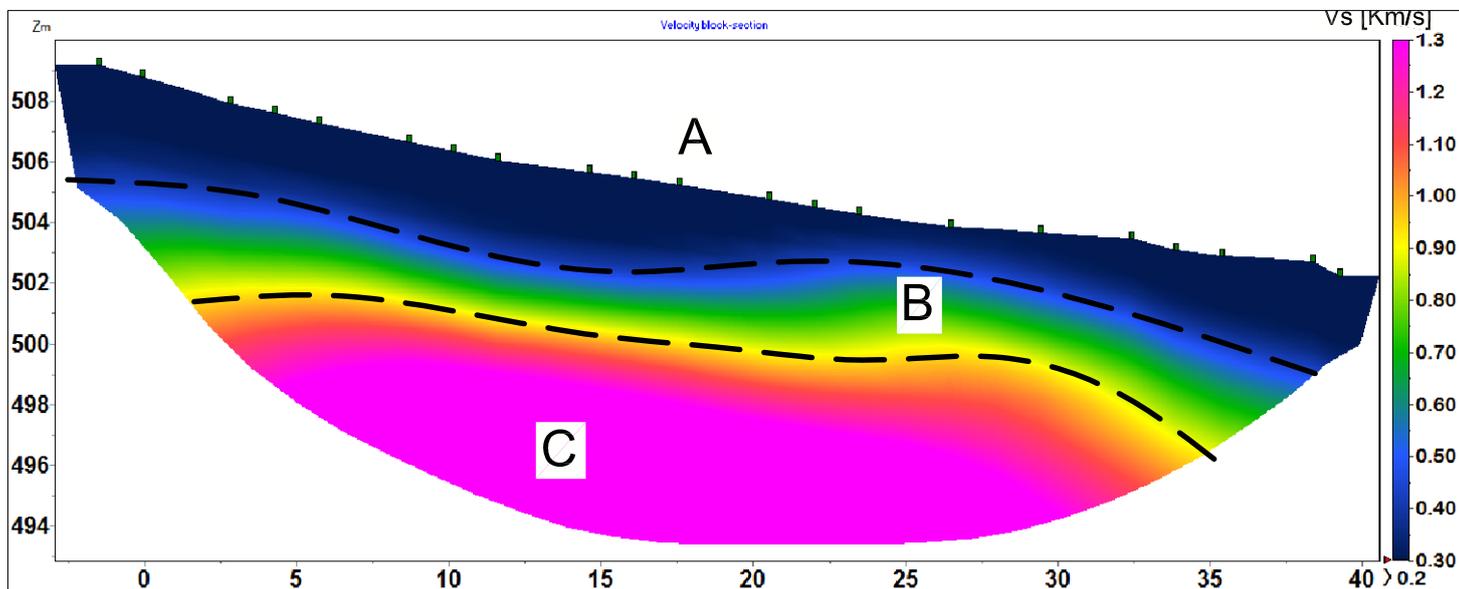
Sud-Est



BS6- Onde S

Nord-Ovest

Sud-Est



**LEGENDA**

A - Sismostrato A: unità delle terre

B - Sismostrato B: unità delle rocce fratturate

C - Sismostrato C: unità delle rocce lapidee integre/poco fratturate

Nota: La delimitazione dei sismostrati ha un valore indicativo e potrà presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi