

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE

PROGETTO DEFINITIVO

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA

VARIANTE DI BONORVA

INTEGRAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

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

RR0H 04 D 69 IG GE0005 002 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	P. Chiara	Febbraio 2018	F.M. Carli	Febbraio 2018	T. Paoletti	Febbraio 2018	F. Marchese Febbraio 2018

ITALFERR S.p.A.
Dot. Geologo Francesco Marchese
Rep. UO GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE
Ordine Geologi Lazio n. 179 ES

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
1.1	PREMESSA E SCOPI DELL'INDAGINE GEOFISICA.....	3
2.	METODOLOGIE IMPIEGATE.....	4
2.1	INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA	4
2.1.1	Configurazione delle misure ed elaborazione dati	4
3.	RISULTATI	6
3.1	RISULTATI DELLA LINEA TOMOGRAFICA SISMICA S9_TER BONORVA (SS)	6
4.	BIBLIOGRAFIA.....	8
5.	ALL. GRAFICO N. 1 – INDAGINE SISMICA S9_TER BONORVA (SS).....	9

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa e scopi dell'indagine geofisica

La presente relazione illustra i risultati della campagna di prospezioni geofisiche non invasive condotte, secondo le modalità previste nelle specifiche tecniche Italferr, ad integrazione delle indagini e degli elaborati presentati nel documento ITALFERR RR0H04D69IGGE0005001A, eseguite per la Variante di Bonorva (SS) nell'ambito del Progetto Definitivo di Velocizzazione della Linea San Gavino – Sassari – Olbia e presentate.

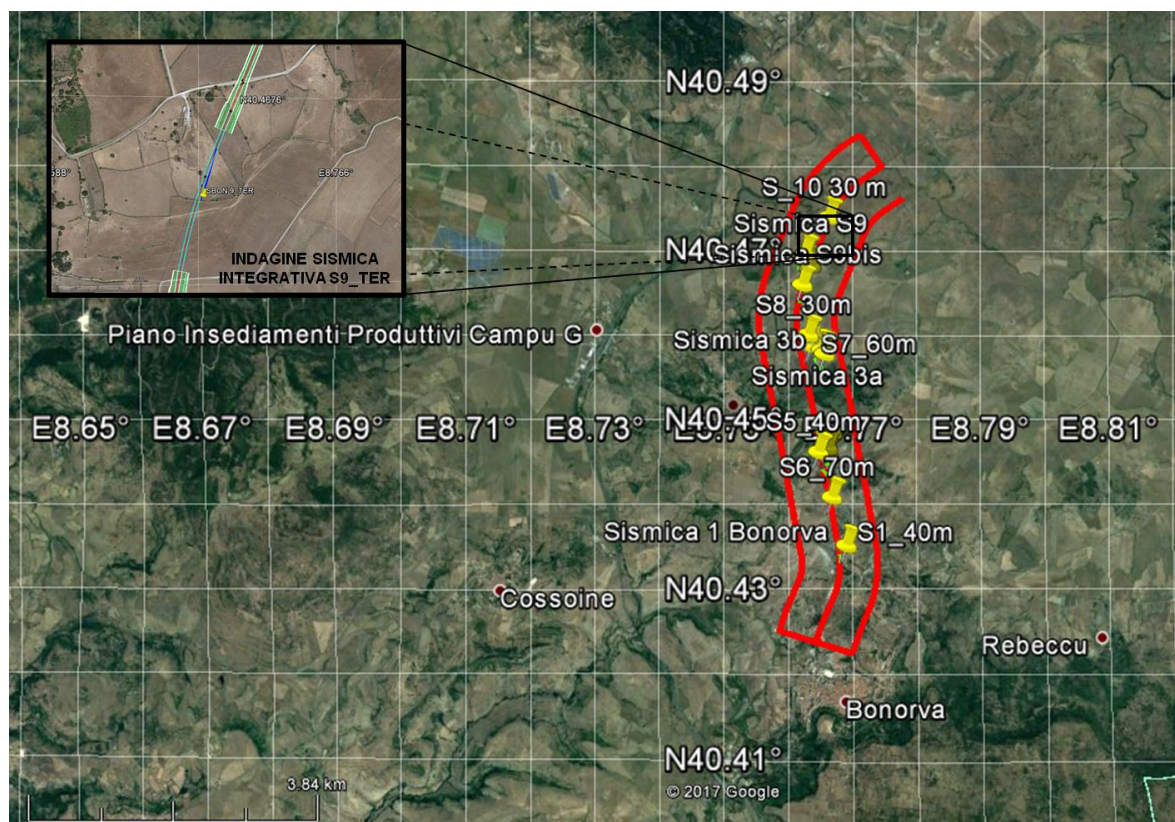


Figura 1: Posizioni delle indagini a Rifrazione Tomografica nella zona di Bonorva (SS) con particolare del profilo sismico integrativo S9_TER

Tale integrazione consiste nell'esecuzione di un ulteriore profilo sismico a rifrazione con interpretazione tomografica, denominato SBON_9 TER, la cui ubicazione è riportata nella foto aerea di Figura 1, anch'esso impiegato al fine di definire, nei limiti delle metodologie impiegate, gli spessori dei terreni di copertura e ricostruire l'andamento del substrato. In particolare, per quest'ultimo, attraverso le variazioni complesse di velocità di propagazione delle onde P ed SH, si è cercato di individuare le porzioni fratturate da quelle con buona probabilità integre e compatte.

I risultati delle tomografie sismiche sono raccolti nell'Allegato 1 alla presente Relazione.

Per quanto concerne la strumentazione utilizzata ed il principio del metodo si

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA					
	VARIANTE DI BONORVA					
INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RR0H	04 D 69	IG	GE0005 002	A	4 di 12

rimanda agli elaborati già contenuti nel documento Italferr RR0H04D69IGGE0005001A, già citato in precedenza.

2. METODOLOGIE IMPIEGATE

2.1 INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA

2.1.1 Configurazione delle misure ed elaborazione dati

Per l'esecuzione del profilo sismico sono stati utilizzati due cavi sismici multiconduttori a 24 “takeouts” ciascuno, impiegati simultaneamente per ottenere una base da 48 stazioni (geofoni).

Lungo la base sismica i dati sono stati acquisiti su 10 postazioni di energizzazione, interne allo stendimento, e per ognuna di esse sono state ottenute molteplici registrazioni al fine di ottimizzare il segnale in risposta da impiegare nel procedimento di elaborazione tomografico.

Per il processing dei dati è stato utilizzato il Software RAYFRACT (nella versione più aggiornata 3.35) della Intelligent Resources Inc. (Canada), creato per l'elaborazione di dati tomografici sismici a rifrazione, realizzabili sia con acquisizioni per onde di compressione P che di taglio SH, per scopi geologici, geotecnico-ingegneristici, ambientali, nonché per l'esplorazione nel campo delle georisorse.

Il software citato consente la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche, al fine di caratterizzarne gli orizzonti presenti in termini sismo-stratigrafici.

Lo schema di interpretazione utilizzato nel presente lavoro è basato sulla creazione di un modello iniziale ottenuto mediante interpretazione con una tecnica sofisticata di processo dei tempi di primo arrivo basata sui metodi dei “Volumi di Fresnel” (Watanabe 1999) al fine di elaborare un primo modello di partenza con una tecnica del Gradiente “smooth” 1D o alternativamente attraverso il metodo Delta t-v (Gebrande and Miller 1985), al fine di migliorare il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala, stabilizzando la soluzione dell'algoritmo d'iterazione, a partire dal modello sopraccitato; il codice di calcolo per la modellazione tomografica, utilizza, nell'algoritmo d'inversione, un “raytracing” con raggi curvilinei e metodi di calcolo ai minimi quadrati.

In generale, il tempo di percorrenza di un'onda sismica lungo un percorso S attraverso un mezzo bidimensionale (2D) può essere scritto come

$$t = \int_S u[\mathbf{r}(x, y)] \quad (2)$$

dove $u(r)$ è il campo delle lentezze (l'inverso delle velocità) e r è il vettore posizione. Discretizzando il campo di lentezze $u(r)$ con m celle equidimensionali ognuna caratterizzata da una lentezza costante u_k ($k=1, 2, \dots, m$) la dromocrona i -esima delle n disponibili può essere scritta come

$$t_i = \sum_{k=1}^m l_{ik} \cdot u_k \quad (3)$$

dove l_{ik} rappresenta la porzione dell' i -esima dromocrona nella cella k -esima.

Considerando tutte le dromocrone disponibili si ottiene il seguente sistema

$$\mathbf{t} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

dove \mathbf{t} è il vettore dei dati sperimentali (tempi di primo arrivo letti sui sismogrammi), \mathbf{M} è la matrice rettangolare contenente le porzioni dei percorsi nelle varie celle, \mathbf{u} è il vettore delle lentezze (incognite del problema). Il problema inverso da risolvere è pertanto

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{M}}^{-1} \cdot \mathbf{t} \quad (5)$$

dove $\tilde{\mathbf{M}}^{-1}$ è la matrice inversa generalizzata. Poiché i percorsi sismici dipendono dalle lentezze, la matrice \mathbf{M} dipende anche dalle lentezze e quindi il problema inverso (5) è un problema non-lineare che deve essere risolto iterativamente partendo da una soluzione iniziale (modello di partenza). L'equazione da considerare è pertanto la seguente

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{t} \quad (5)$$

dove $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t} - \mathbf{t}(\mathbf{u}_0)$ è la differenza tra i tempi sperimentali e i tempi calcolati per il modello di lentezze iniziale \mathbf{u}_0 ; $\Delta \mathbf{u}$ è la perturbazione del modello iniziale; e \mathbf{J} è la matrice jacobiana contenente le derivate parziali delle dromocrone rispetto alle lentezze nelle celle $\frac{\partial t_i}{\partial u_k}$.

Poiché il problema è parzialmente sovradeterminato (per alcune celle si hanno molti percorsi) e parzialmente sottodeterminato (per alcune celle non è disponibile nessun percorso) esso è stato risolto con la tecnica dei minimi quadrati smorzati, cioè è stata minimizzata con la seguente funzione errore

$$\varphi = \|\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{t}\|^2 + \lambda \|\mathbf{L}_2 \mathbf{u}\|^2 \quad (6)$$

dove λ è il fattore di smorzamento e la matrice \mathbf{L}_2 è una matrice derivata seconda (operatore laplaciano) che forza la soluzione verso la soluzione più regolare possibile

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA					
	VARIANTE DI BONORVA					
INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RR0H	04 D 69	IG	GE0005 002	A	6 di 12

(smoothest solution).

L'affinamento della soluzione è stato quindi ottimizzato attraverso un processo tomografico di inversione basato sul metodo WET (Wavepath Eikonal Traveltime inversion: Theory, 1993, Geophysics, Volume 58, Issue 9, pp. 1314-1323), spinto fino a 100 iterazioni per ottimizzarne il risultato finale e risolvere al meglio le zone con inversioni di velocità.

I risultati grafici che rappresentano la distribuzione delle velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s) nei terreni indagati, sono visualizzati nell'Allegato grafico con campiture a colori caratterizzate da una scala cromatica, rappresentativa della dinamica dei valori di velocità incontrati (espressi in m/s, metri al secondo). Tale rappresentazione consente di identificare aree omogenee (medesimo comportamento cromatico) in termini sismo-stratigrafici. Queste zone di isovalori, di V_p per le onde di compressione, e di V_s , per quelle di taglio, sono correlabili ad ammassi di materiale con caratteristiche affini.

3. RISULTATI

3.1 Risultati della Linea tomografica sismica S9_TER Bonorva (SS)

Nella Tavola 1 dell'Allegato grafico 1 è riportata l'ubicazione delle sezioni sismiche a rifrazione tomografica S9Ter, per onde P e SH, ad integrazione del complesso di indagini realizzate per la Variante di Bonorva.

La linea Sismica S9_TER citata, è stata eseguita a 48 canali con passo intergeofonico di 2,5 m, in posizione circa parallela al tracciato ferroviario (si veda la precedente Figura 1 e la Tavola 2 dell'allegato grafico); per mezzo di essa i terreni sono stati investigati fino ad una profondità massima di circa 18 m a mezzo delle onde di compressione e fino a circa 30-35 m dal piano campagna con le onde di taglio.

Le superficie di separazione tra i vari sismostrati sono rappresentate lungo le sezioni a mezzo di linee tratteggiate color magenta. Nel caso in oggetto, sulla sezione tomografica ottenuta per le onde di taglio, si evidenzia anche l'isolinea 800 m/s, essendo un'interfaccia di interesse in relazione alle NTC vigenti.

Lungo la sezione S9_TER (come evidenziato in Tavola 3), sono individuati n. 3 sismostrati.

Dall'esame congiunto delle sezioni ottenute, sia per onde di compressione che per onde di taglio, si denota in entrambe una buona corrispondenza nell'andamento dei sismostrati, oltre al dettaglio reciproco sulla ricostruzione delle discontinuità laterali del substrato lapideo.

Il primo sismostrato, associabile alla coltre superficiale, presenta uno spessore massimo di circa 2-3 m tra l'inizio della sezione e la progressiva 12 m; tende ad assottigliarsi lievemente tra le progressive 12 m e 30 m e prosegue con uno spessore costante di circa 2 m fino a fine sezione. Al suo interno le onde di



VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA

VARIANTE DI BONORVA

INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0H	04 D 69	IG	GE0005 002	A	7 di 12

compressione e di taglio si propagano, rispettivamente, con velocità comprese negli intervalli 400/450÷800/1.000 m/s e 250/300÷450 m/s rispettivamente.

Segue in profondità il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità delle onde P ed SH piuttosto elevate. Le onde compressionali si propagano con velocità comprese tra i 800-1.000 m/s ed i 1.800 m/s, mentre le onde di taglio mostrano valori compresi tra 400 m/s e 800 m/s.

Lo spessore massimo del secondo sismostrato si attesta intorno ai 5 m, ad inizio sezione e diminuisce con lievi irregolarità fino alla progressiva 42 m. Nella parte rimanente della sezione lo spessore medio del sismostrato scende a valori di circa 2-2,5 m nella sezione onde P, mentre nelle onde SH, l'interfaccia 800 m/s tende gradatamente ad approfondirsi.

Nella parte profonda della sezione, nel terzo sismostrato, all'interno del lapideo consistente, le velocità delle onde di compressione sono generalmente maggiori di 1.800-2000 m/s.

Lungo entrambe le sezioni per onde P e SH, si denota la presenza di una importante zona di discontinuità laterale tra le progressive 65-85 m. Tra le progressive 92 m e 102 m i valori di velocità delle onde P raggiungono un massimo superiore ai 2.600 m/s. All'interno del terzo sismostrato le velocità delle onde di taglio sono maggiori di 800 m/s ed il massimo viene raggiunto anche in questo caso nella parte finale della sezione, tra le progressive 80 m e 100 m. La sezione Onde SH, infine, tra le progressive 65-85 m, consente di ricostruire la geometria della discontinuità laterale sopra evidenziata; ancora, sia ad inizio che a fine sezione, si evidenzia la presenza di variazioni verticali dovute ad inversioni di velocità.

Sia la discontinuità laterale che le inversioni di velocità individuate nel lapideo, possono essere attribuite agli effetti di processi di natura geologico-strutturale.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA					
	VARIANTE DI BONORVA					
INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RR0H	04 D 69	IG	GE0005 002	A	8 di 12

4. BIBLIOGRAFIA

- Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the Shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, 665–666.
- Ben-Menahem A. E SINGH S.J., 1981. *Seismic Waves and Sources*, Springer-Verlag, New York.
- Burnham, G. F. and Hawke, P. J., Smart solution to a sticky problem: in-mine clay mapping using high-resolution geophysics. (In Press).
- Cavinato, G. P., Di Luzio, E., Moscatelli, M., Vallone, R., Averardi, M., Valente, A., and Papale, S. [2006] The new Col di Tenda tunnel between Italy and France: Integrated geological investigations and geophysical prospections for preliminary studies on the Italian side. *Engineering Geology* 88, 90-109.
- Coffeen, J.A., 1978. "Seismic exploration fundamentals". Pubb. Co.;
- James W. Daniel, Convergence of the Conjugate Gradient Method with Computationally Convenient Modifications, *Numerische Mathematik* 10 (1967),125–131.
- H. Gebrande and H. Miller 1985. Refraktionsseismik (in German). In: F. Bender (Editor), *Angewandte Geowissenschaften II. Ferdinand Enke*, Stuttgart; pp.226-260. ISBN 3-432-91021-5
- Kim, D.S., Bang, E.S., Kim, W.C., "Evaluation of Various Downhole Data Reduction Methods for Obtaining Reliable Vs Profiles," *Geo-technical Testing Journal*, ASTM, Vol. 27, No. 6, November 2004, pp. 1-13.
- Mcmechan G.A., Yedlin M.J., 1981, Analysis of dispersive wave by wave field transformation, *Geophysics*, 46, 869-874;
- Milton B. Dobrin, Carl H. Savit, 1988, *Introduction to Geophysical Prospecting*, fourth Edition, McGraw-Hill International Editions e R.E. Goodman, 1989, *Introduction to Rock Mechanics*, second Edition, John Wiley & Sons.
- Ganerød, G. V., Rønning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Holmøy, K., Nilsen, B., and Braathen, A. [2006] Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 65, 231-243.
- John m. Reynolds, (1997). "An introduction to applied and environmental geophysics", pp. 415-488, Wiley, England.
- Gerard T. Schuster* and Aksel Quintus-Bosz, *Wavepath Eikonal Traveltime inversion: Theory*, 1993, *Geophysics*, Volume 58, Issue 9, pp. 1314-1323.



VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA SAN GAVINO – SASSARI – OLBIA

VARIANTE DI BONORVA

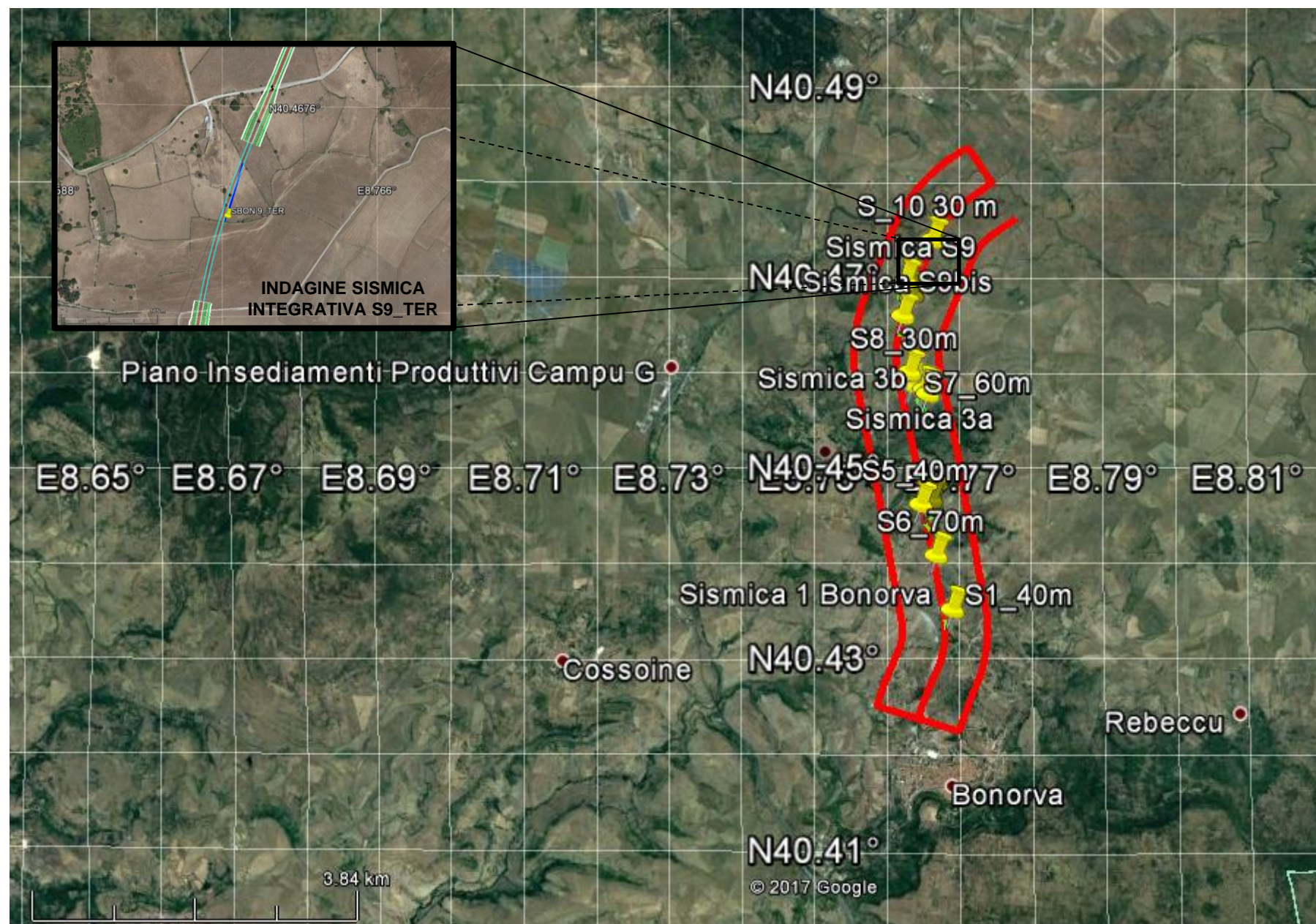
INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0H	04 D 69	IG	GE0005 002	A	9 di 12

5. ALL. GRAFICO N. 1 – INDAGINE SISMICA S9_TER BONORVA (SS)

INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA NELL'AREA DI BONORVA

UBICAZIONE DELLE INDAGINI



TAVOLA

1

OGGETTO

UBICAZIONE
INDAGINI SISMICHE
RIFRAZIONE
TOMOGRAFICA
PER ONDE P E SH

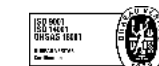
Progetto Definitivo

VELOCIZZAZIONE
LINEA SAN GAVINO –
SASSARI – OLBIA

VARIANTE DI
BONORVA



SOING
STRUTTURE & AMBIENTE



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara

INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE TOMOGRAFICA SISMICA S9_TER BONORVA

Ubicazione Indagine

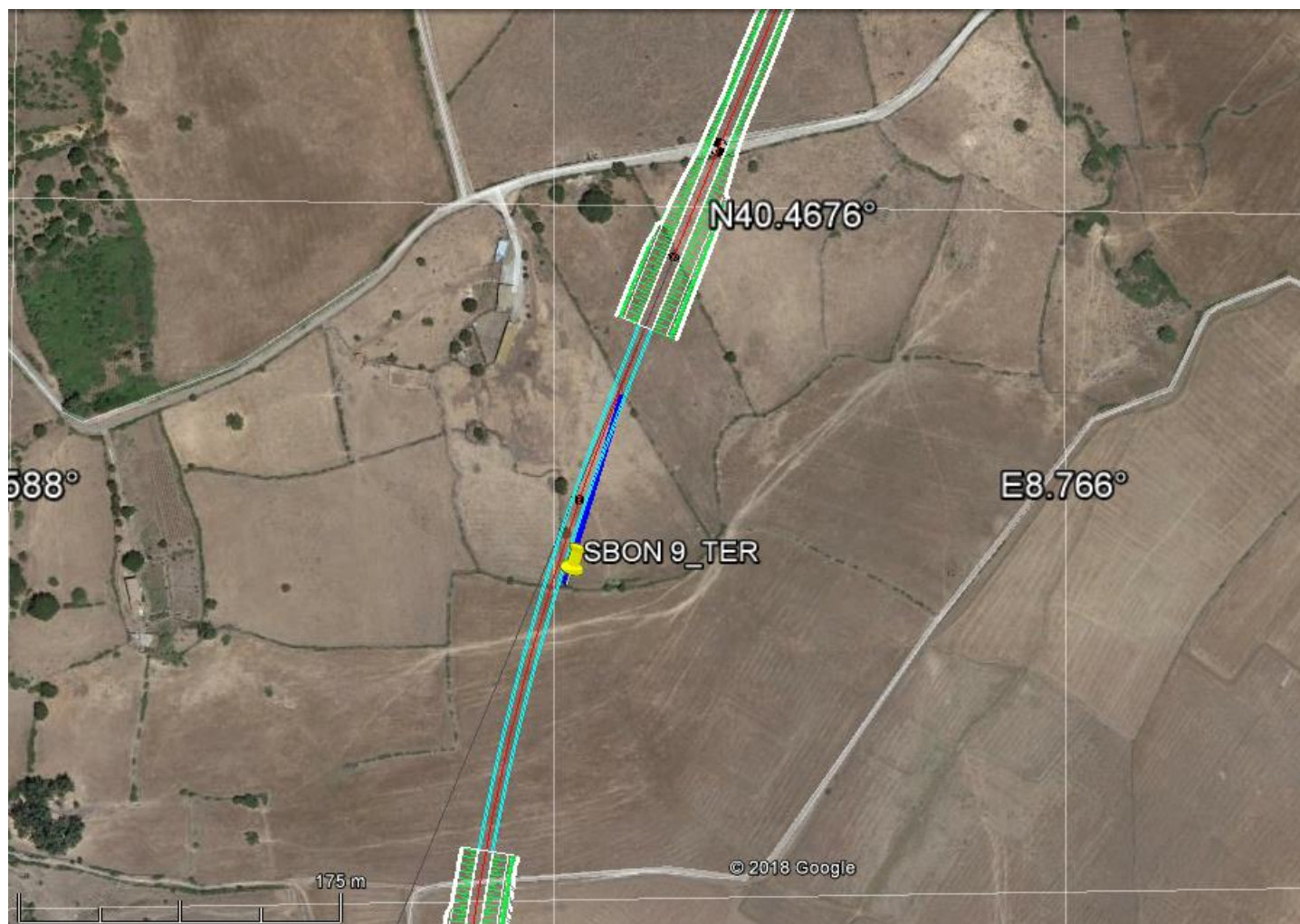


Immagine Area Indagine: geofoni G1-G24 del profilo



Immagine Area Indagine: geofoni G25-G48 del profilo

TAVOLA

2

OGGETTO

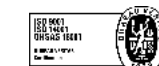
Indagine sismica a rifrazione tomografica
SISMICA S9_TER
BONORVA

Progetto Definitivo

VELOCIZZAZIONE
LINEA SAN GAVINO
- SASSARI - OLBIA



SOING
STRUTTURE & AMBIENTE



Per la
**SOING Strutture e
Ambiente srl**

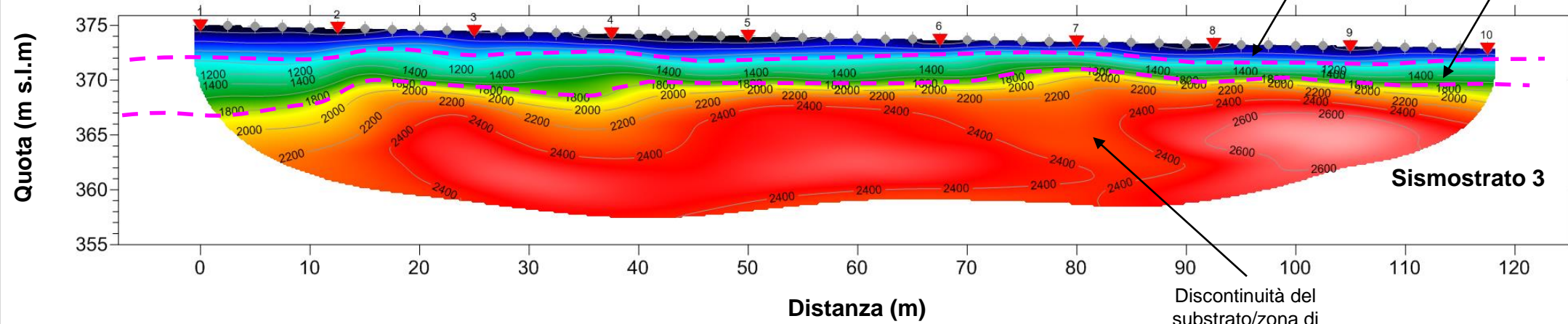
ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

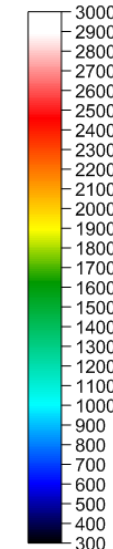
APPROV. P. Chiara

SISMICA S9_TER BONORVA

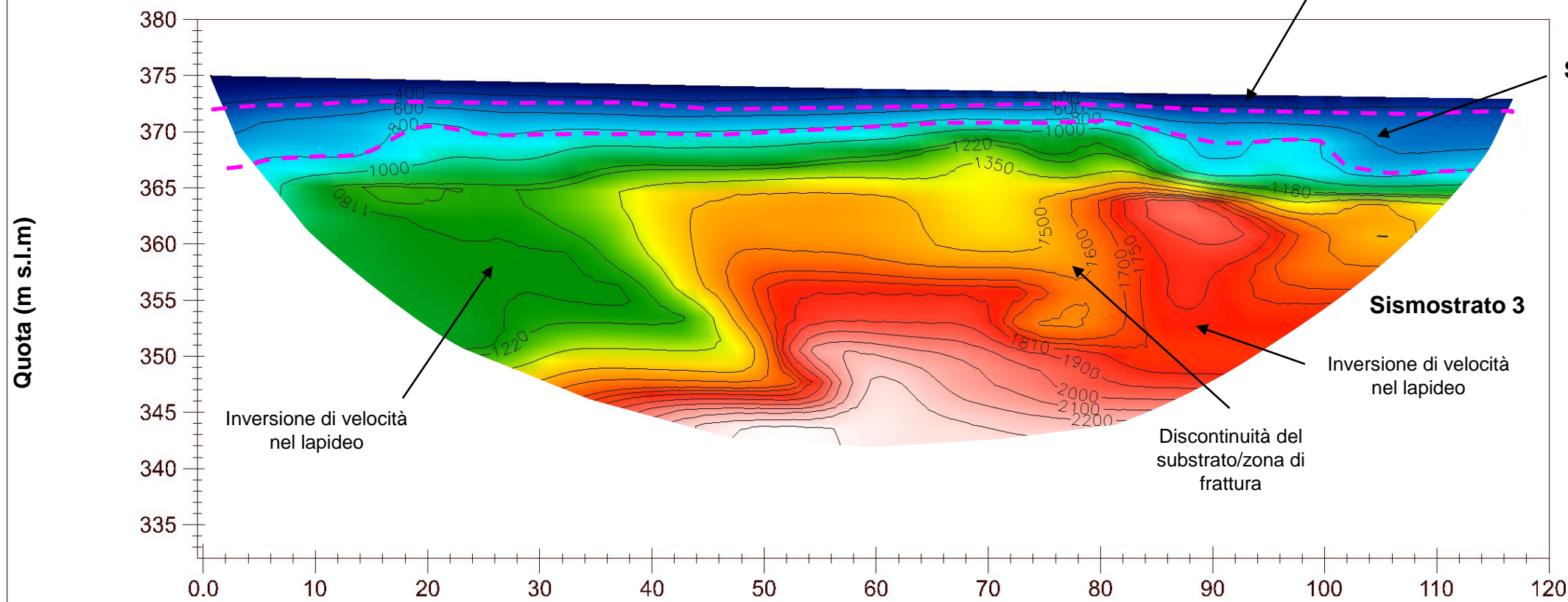
Sezione Onde P



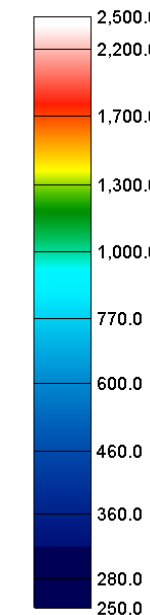
Scala di velocità
Onde P (m/s)



Sezione Onde SH



Scala di velocità
Onde SH (m/s)



TAVOLA

3

OGGETTO

Indagine sismica a rifrazione tomografica
SISMICA S9_TER BONORVA

Progetto Definitivo

VELOCIZZAZIONE
LINEA SAN GAVINO
- SASSARI - OLBIA

VARIANTE DI
BONORVA

Interfaccia tra
sismostrati

Scala della sezione
1 cm = 5 m



SOING
STRUTTURE & AMBIENTE



**Per la
SOING Strutture e
Ambiente srl**

ELAB G. Luciani

VERIFICA A. Morelli

APPROV. P. Chiara