



STUDIO GEOLOGICO
Dott. Geol. Giancarlo Nigro
Via Borgo, 48 - 71021 Accadia (FG)
Tel: 329/1578728 Fax: 0881/204889
e-mail: giancarlo.nigro@gmail.com

Oggetto:

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE COSTRUZIONI DI E.R.P. NEL COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO (FG).

Committente:

ARCA CAPITANATA

Elaborato:

STUDIO E INDAGINI GEOLOGICO-GEOTECNICHE



Geologo:
dott. Giancarlo Nigro



0	MAR./15		/	/	/
rev.	data	descrizione	dis.	contr.	appr.



INDICE

1. PREMESSA	1
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO, E GEOMORFOLOGICO	4
3. INQUADRAMENTO SISMO-TETTONICO DELL'AREA.....	9
4. IDROGRAFIA E IDROGEOLOGIA	11
5. INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE	14
6. CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA.....	16
7. INDAGINI GEOFISICHE	20
7.1 INDAGINI SISMICHE.....	20
7.2 INDAGINI GEOELETTRICHE	24
8. AZIONE SISMICA	28
8.1 VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO.....	29
8.2 STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODO DI RITORNO	31
8.3 PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE	32
8.3.1. STIMA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	37
8.4 PERICOLOSITA' SISMICA DI SITO.....	38
9. PORTANZA DEL TERRENO (VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI)	40
10. RICERCA DEL COEFFICIENTE DI SOTTOFONDO K	42
11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	43

APPENDICE

- Verifica Terreno-Fondazione

ALLEGATI

INQUADRAMENTO AREA

- ALLEGATO 1 – INQUADRAMENTO SU COROGRAFIA 1:20.000
- ALLEGATO 2 – INQUADRAMENTO SU ORTOFOTO
- ALLEGATO 3 – INQUADRAMENTO SU STRALCIO DELLA CARTA TECNICA REGIONALE
- ALLEGATO 4 – PLANIMETRIA DI PROGETTO

SONDAGGI GEOGNOSTICI

- ALLEGATO 1 – UBICAZIONE SONDAGGI GEOGNOSTICI
- ALLEGATO 2 – SCHEDE DI SONDAGGIO
- ALLEGATO 3 – DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

- ❖ Relazione geofisica: sismica a rifrazione in onde P ed SH, MASW
- ❖ Relazione geofisica: Geoelettrica 3D



STUDIO E INDAGINI GEOLOGICO-GEOTECNICHE RELATIVI AL PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE COSTRUZIONI DI E.R.P. NEL COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO (FG).

1. PREMESSA

L'ARCA Capitanata intende realizzare il progetto riguardante la *“realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. nel comune di San Giovanni Rotondo (FG)”*, e pertanto ha dato incarico allo scrivente di accertare l'idoneità geologico-tecnica del sito, definire il modello geologico dell'area e il modello geotecnico del sottosuolo allo scopo di orientare le scelte progettuali delle opere da realizzare.

L'indagine sismica, inoltre, ha permesso di determinare i parametri dinamici dei terreni, l'amplificazione sismica locale e la categoria sismica del terreno di fondazione.

Le opere di progetto consisteranno nella realizzazione di n. 3 palazzine aventi dimensioni in pianta di circa 19 m x 12 m circa (V. planimetria di progetto in allegato).

Lo studio è stato condotto in ottemperanza alle seguenti disposizioni legislative:

- Legge 2 febbraio 1974, n. 64
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche;
- D.M. LL. PP. 11 Marzo 1988
DECRETO MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI 11 MARZO 1988
(G.U. 1-6-1988, n. 127 suppl.)
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione;
- CIRC. LL.PP. 24-09-1988
Circolare Ministero Lavori Pubblici, 24 settembre 1988, n. 30483
(Pres. Cons. Superiore - Servizio Tecnico Centrale)
Legge 2 febbraio 1974 n.64, art.1 - D.M. 11 marzo 1988.
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione;
- D.M. 16 Gennaio 1996 (G.U. 5-2-1996, N. 29) *Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche;*
- Circolare 10 Aprile 1997, n. 65/AA.GG.
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" di cui al D.M. 16 gennaio 1996;
- Ordinanza P.C.M. n.3274 del 20/3/2003 – *Criteri generali per la classificazione sismica e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;*
- D.M. 14 Gennaio 2008 (G.U. 4-2-2008, N. 30) *Nuove norme tecniche per le costruzioni.*



- *Norme Tecniche di attuazione del P.A.I.* redatte dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia.

Per l'espletamento dell'incarico ricevuto si è provveduto ad effettuare il sopralluogo preliminare e, successivamente, il rilievo geologico per la ricerca delle eventuali problematiche tecniche e geomorfologiche dell'intero areale.

Lo studio si è quindi articolato attraverso le seguenti fasi:

- sopralluoghi nell'area da indagare;
- rilevamento geologico e geomorfologico;
- esecuzione delle indagini geognostiche, già definite dalla stazione appaltante;
- elaborazione dei dati raccolti e stesura della relazione conclusiva.

Dalla consultazione della cartografia P.A.I. (Piano di Assetto Idrogeologico), redatta dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia, si evince che l'area non è soggetta a pericolosità geomorfologica o idraulica (V. Figura 1).

Tutte le indagini in sito sono state eseguite secondo le *“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”* (AGI, 1977), e sono consistite in:

- n. 3 perforazioni (denominate S1, S2 e S3) ad andamento verticale eseguite a carotaggio continuo con diam. 101 mm e rivestimento diam. 127 mm, spinte fino alla profondità di 10 m dal p.c.; durante la perforazione sono stati prelevati n.9 spezzoni di roccia;
- Indagine geofisica di superficie consistita in:
 - n. 1 profilo sismico con acquisizione onde P ed Sh e analisi sismica con metodo MASW, al fine di definire il valore delle V_{s30} e i parametri dinamici.
 - n.3 prospezioni di geoelettrica 3D (ERT 3D)



Pericolosità e Rischio

Peric. Geomorf.

- media e moderata (PG1)
- elevata (PG2)
- elevata (PG3)

Peric. Idraulica

- bassa (BP)
- media (MP)
- alta (AP)

Rischio

- R1
- R2
- R3
- R4

Cartografia di base

Scala 1: 5000

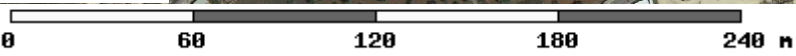


Figura 1



2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Il sito investigato, localizzabile attraverso le coordinate geografiche N 41,704998 E 15,718562 ed avente quota di circa 549 m s.l.m., è ubicato all'interno dell'abitato di San Giovanni Rotondo (FG), all'angolo tra la via soldato A. Massa e la via Di Vagno, e rientra nell'elemento n° 397052 della Carta Tecnica Regionale (V. Fig.2).

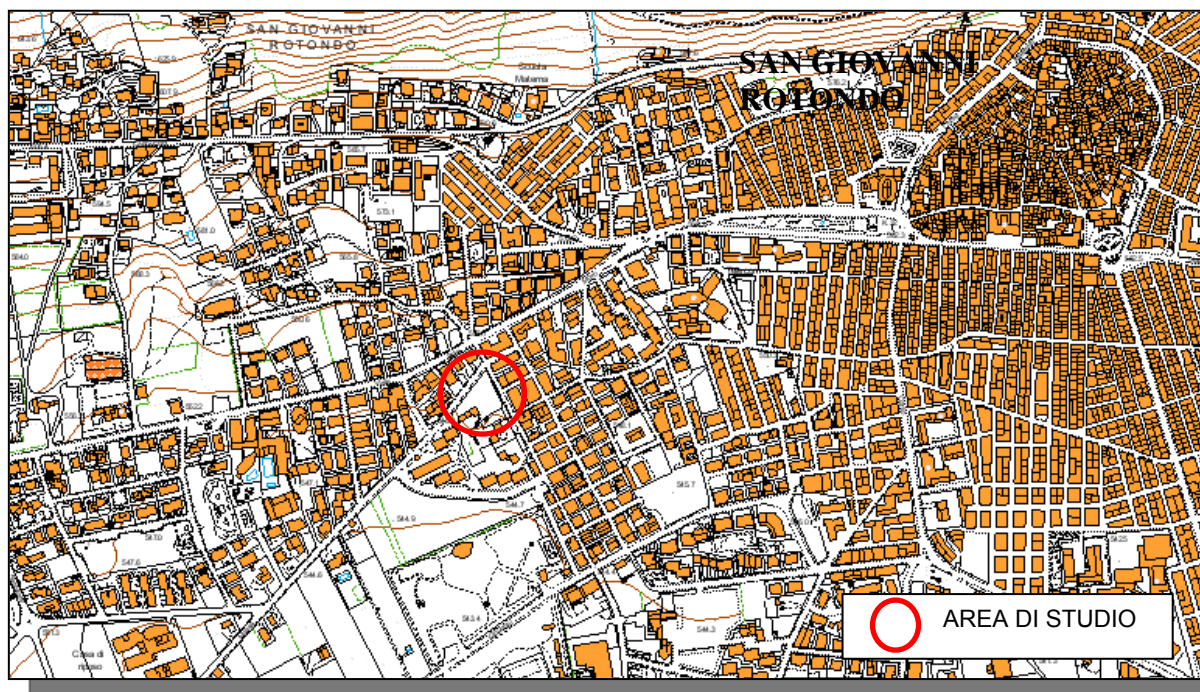


Figura 2: stralcio della Carta Tecnica Regionale

Il comune di San Giovanni Rotondo (FG) è posizionato all'interno del massiccio del Gargano; tale area rappresenta un elemento geografico piuttosto singolare nel contesto regionale pugliese, caratterizzato com'è da una spiccata variabilità di caratteri geologici e geomorfologici e dalla coesistenza di diverse tipologie di paesaggio.

Da un punto di vista geologico e strutturale il promontorio del Gargano è simile all'altopiano delle Murge, dal quale però si differenzia per la maggiore eterogeneità di rocce affioranti e per un diverso assetto morfologico.

Il territorio presenta un assetto paesaggistico caratterizzato dal susseguirsi continuo di superfici terrazzate, altipiani, ripide scarpate, rilievi isolati e profonde depressioni. Le principali evidenze morfologiche presenti nel territorio garganico sono il carsismo e l'azione erosiva del mare lungo le aree costiere. Il carsismo è molto sviluppato nel settore centro-occidentale del Gargano, dove si rinviene la maggior parte delle forme carsiche sia superficiali che sotterranee. Tra le principali forme carsiche, numerose sono le doline e gli inghiottitoi che si manifestano in forme e dimensioni varie (fino ai 110 metri di profondità della dolina "Pozzatina").



Il massiccio garganico rappresenta un elemento morfologico di rilevanza regionale, la cui origine è diversa da quella del Subappennino e del Tavoliere (V. Fig.3).

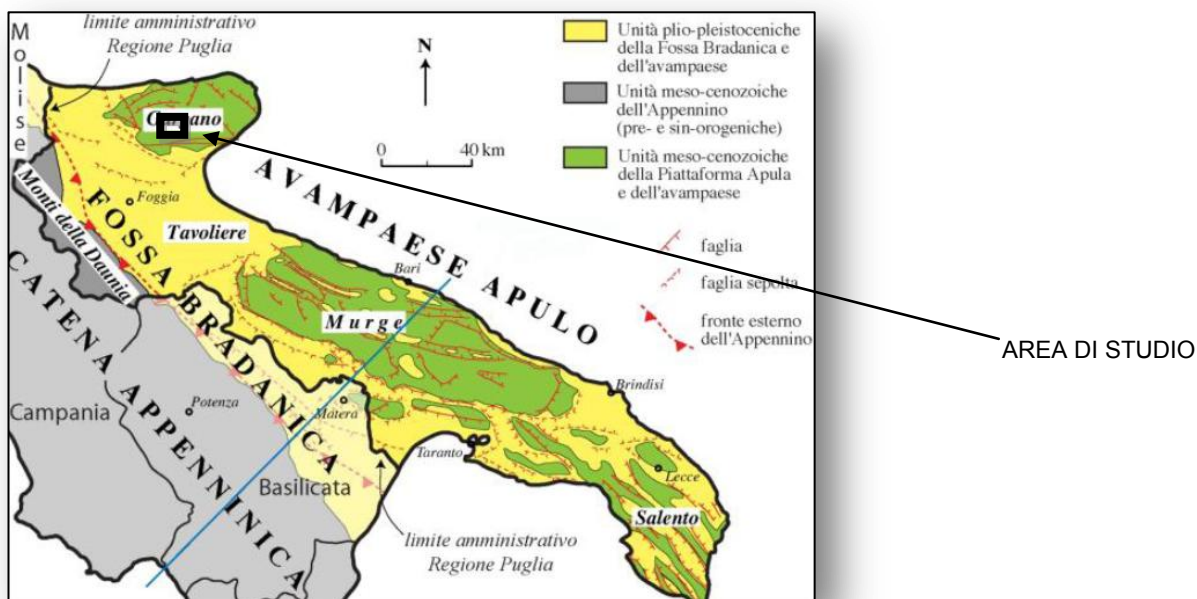


Figura 3: ubicazione dell'area e schema tettonico (da Baldassare G, Gallicchio S. et alii, 2011)

Il Gargano, formato da un basamento calcareo - dolomitico di età Giurassico - Cretacica e da una copertura di sedimentari terziari e quaternari in facies detritico - organogena, si origina infatti per sollevamento di una struttura relativamente stabile, frutto di una sedimentazione "tranquilla" in un mare profondo e, successivamente, in ambiente con caratteristiche più litoranee.

Il Tavoliere rappresenta, invece, una vasta depressione interposta tra la dorsale appenninica e i rilievi dell'avampaese, caratterizzata da affioramenti di depositi continentali terrazzati olocenici, presenti alla quota di pochi metri al di sopra di quella degli alvei attuali e poggianti sulle formazioni argillose marine Plio-Pleistoceniche.

I rilievi dell'Appennino Dauno rappresentano, infine, il settore di catena. Si tratta di una fascia che si sviluppa in senso appenninico nell'estrema parte nord - occidentale della Puglia in cui affiorano essenzialmente formazioni cenozoiche terrigene in facies di flysch, ricoperte limitatamente da depositi clastici Plio - Pleistocenici.

Per quanto attiene alla geologia, le Formazioni affioranti si sono formate in ambiente di piattaforma intracontinentale carbonatico-evaporitica.

Nel Gargano è possibile individuare due zone principali, così come riportato nelle note del Foglio n°156 "San Marco in Lamis" della Carta Geologica d'Italia in scala



1:100.000: una zona occidentale, appartenente alla Piattaforma Apula esterna (Mostardini e Merlini, 1986) in cui si rinvencono depositi in facies di scogliera e retroscogliera, e la zona orientale, ove affiorano sedimenti di avanscogliera (V. Fig.4).

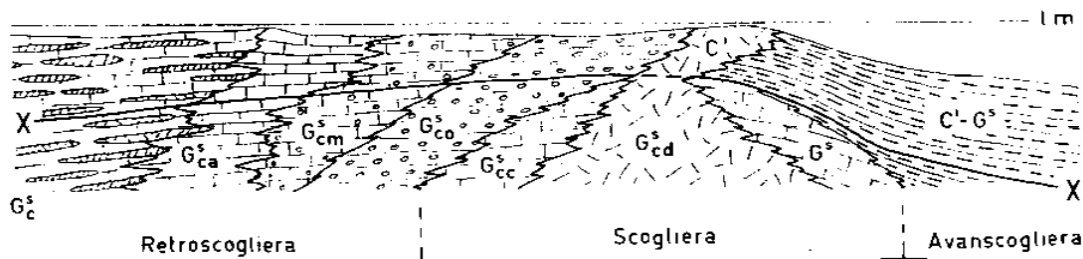


Figura 4: schema dei rapporti tra le Formazioni (da Note del Foglio n°156 della C.G.I.)

Nella settore occidentale (a Nord-Ovest di San Giovanni Rotondo) si rinviene la *Formazione di Sannicandro* (G^s_{ca}), costituita da calcari compatti criptocristallini e microcristallini del Giurassico superiore, di colore bianco-grigiastro o rosato, con stratificazione in banchi o strati, e con intercalazioni di calcari dolomitici e dolomie che, talvolta, risultano prevalenti sui calcari (*Formazione di Monte La Serra* - G^s_c).

Nella porzione più centrale del promontorio si rinviene, invece, la presenza di calcari cristallini e microcristallini, biancastri e rosati del Giurassico superiore – Cretaceo inferiore, con intercalazioni di calcari oolitici riferibili alle *Formazione dei Calcari di San Giovanni Rotondo* (G^s_{cm}), *calcari di Monte Spigno* (G^s_{co}) e *calcari di Monte Pizzuto* (G^s_{cc}). Le ultime due Formazioni mostrano stratificazione netta, mentre i calcari di San Giovanni Rotondo si presentano in strati di potenza variabile da pochi centimetri ad oltre un metro.

I depositi di scogliera sono rappresentati da calcari organogeni compatti, grigi o rosati, con subordinate dolomie cristalline riferibili ai *calcari di Monte Sacro* (G^s_{cd}).

Nella zona di transizione, interposta tra la scogliera ed il mare aperto, affiorano, invece, calcari dolomitici e dolomie grigie del Giurassico superiore - Cretaceo inferiore, con liste e noduli di selce, riferibili alla *Formazione di Cagnano* (G^s), in cui non si riconosce una stratificazione evidente, e alla *Formazione di Iacotenente*.

Nel settore orientale del promontorio affiorano i sedimenti di bacino rappresentati da calcari e calcari marnosi compatti ed a grana fine, bianchi o nocciola, ben stratificati.

Si tratta delle Formazioni note in letteratura come *Maiolica* (Cretaceo inferiore), *Scaglia* (Cretaceo superiore) e *Formazione di Rodi Garganico* (Giurassico superiore – Cretaceo inferiore).

Nella zona meridionale e occidentale del Gargano affiorano, infine, lembi sparsi di calcareniti mioceniche tenere, a granulometria eterogenea, note come *Calcareniti di Apricena*.



Nelle aree topograficamente depresse e nei bacini endoreici si rinvencono depositi sciolti continentali, del Quaternario, rappresentati da *depositi clastici di versante*.

In particolare, il sito oggetto di questo studio si colloca, così come confermato dalla carta geologica riportata in Fig.5, nell'area di affioramento dei *Calcari di San Giovanni Rotondo - G^s_{cm}*.

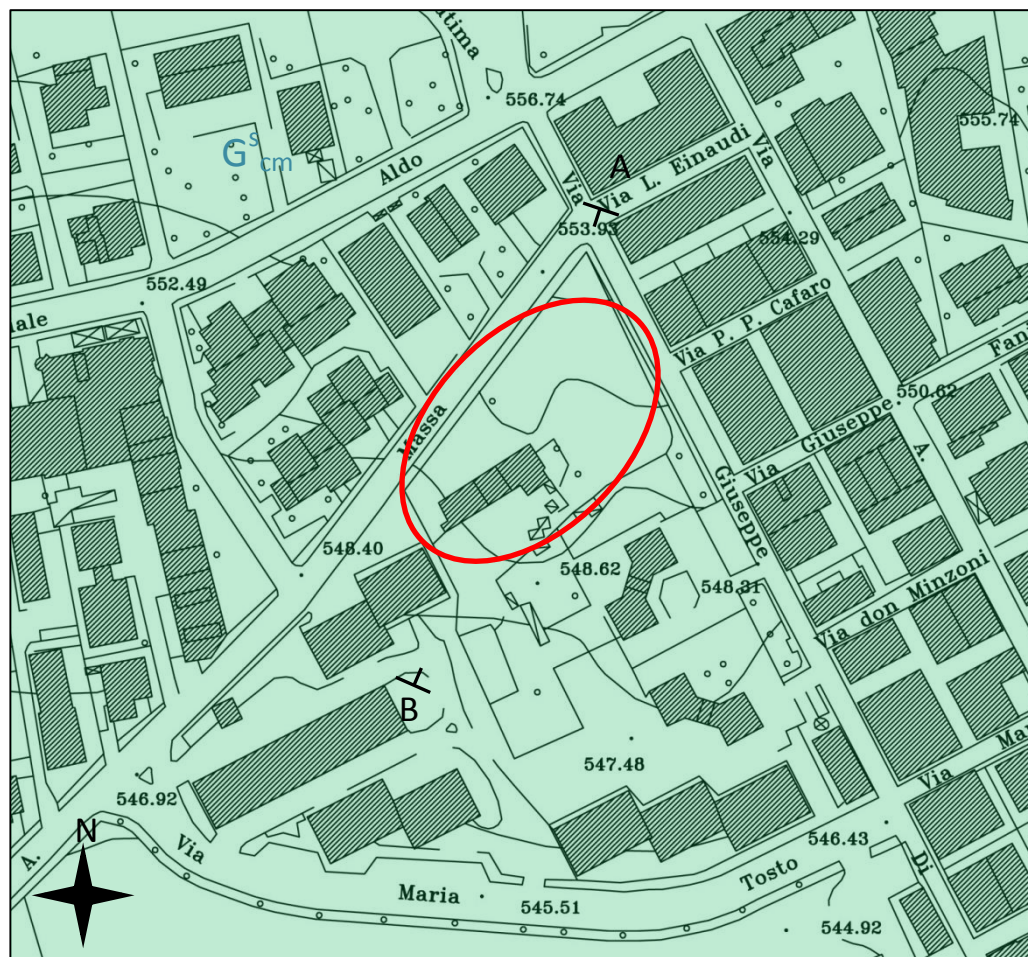


FIGURA 5

(CARTA GEOLOGICA IN SCALA 1:2.000)

LEGENDA



CALCARI DI SAN GIOVANNI ROTONDO (*Malm*)



TRACCIA DI SEZIONE



AREA DI STUDIO



3. INQUADRAMENTO SISMO-TETTONICO DELL'AREA

L'influenza della tettonica sulla morfologia appare evidente su tutto il territorio garganico.

Il settore sud-occidentale del Gargano è caratterizzato dalla presenza in affioramento di unità carbonatiche mesozoiche e cenozoiche deposte in ambienti di piattaforma carbonatica. Il grado di deformazione tettonica di queste unità è relativamente blando eccetto che in corrispondenza di alcune importanti zone di taglio. Tra queste, la più nota è sicuramente faglia di Mattinata, orientata E-O.

Questa faglia, che divide in due il promontorio attraversando il Gargano da Est ad Ovest lungo la Valle Carbonara, è oggetto di un acceso dibattito sia per quanto riguarda la sua evoluzione cinematica che per il suo significato strutturale nel contesto geodinamico regionale dell'Avampaese apulo.

E' comunque comunemente accettato in letteratura che questa struttura mostri indicatori cinematici e caratteristiche morfo-strutturali tipiche di strutture trascorrenti che hanno registrato una complessa evoluzione polifasica.

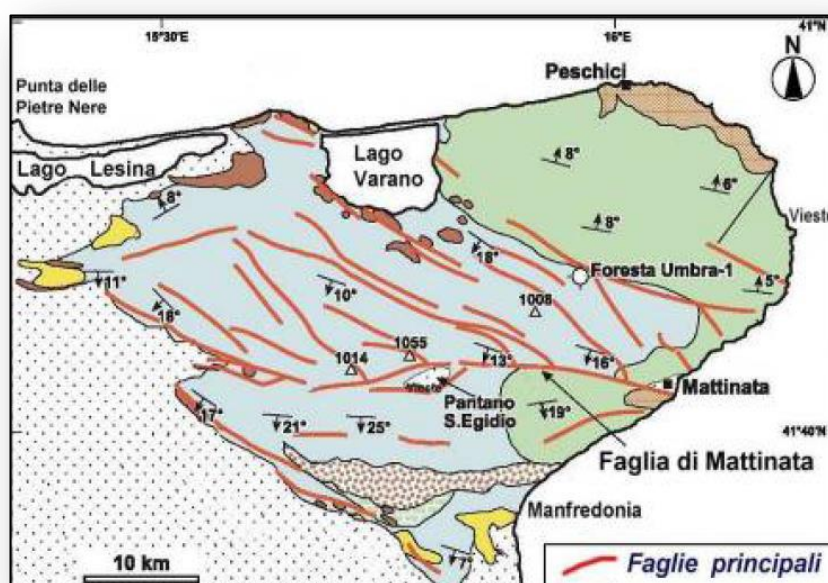


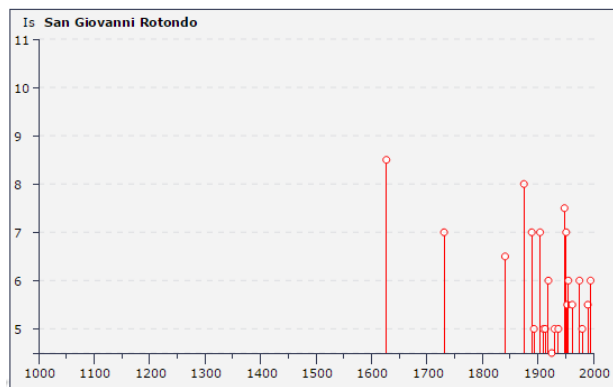
Figura 6: schema tettonico (da Billi. et alii, 2007)

Altre morfostrutture importanti presenti nell'area di studio sono la Faglia di Rignano e la Faglia del Candelaro (che delimita il bordo sud-occidentale del promontorio e sulla quale si è impiantato l'omonimo fiume) orientate rispettivamente E-O e NO-SE, anch'esse con cinematica trascorrente sinistra (SALVINI et alii, 1999; BILLI & SALVINI, 2000). La riattivazione successiva di queste faglie come dirette avrebbe generato le scarpate che bordano a SO il Promontorio del Gargano (BILLI & SALVINI, 2000).



Per quanto si riferisce alla sismicità dell'area essa risente delle perturbazioni dinamiche delle strutture sismogenetiche precedentemente descritte, per cui il comune di San Giovanni Rotondo è stato classificato zona sismica 2 (O.P.C.M 3274 - 20 Marzo 2003), con valore di accelerazione a_g su suolo rigido compreso fra 0,15 e 0,25 g, con probabilità di superamento pari a 10% in 50 anni (O.P.C.M 3519 - 28 aprile 2006).

A testimoniare la sismicità che caratterizza la zona, si riporta il grafico seguente che evidenzia la presenza di ben 30 eventi sismici registrati a San Giovanni Rotondo (FG) nell'intervallo di tempo compreso tra gli anni 1000-2006 (Vedi fig. 7).



Effetti	In occasione del terremoto del:							
Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Area epicentrale	Np	Ix
8-9	1627	07	30	10	50	Gargano	65	10
F	1646	05	31	04	30	Gargano	18	8-10
7	1781	08	20	08		Poggiano	50	9
6-7	1841	02	21			S.MARCO IN LAMIS	13	7-8
8	1875	12	06			S.MARCO IN LAMIS	97	8
7	1889	12	08			APRICENA	122	7
F	1892	06	06			TREMITI	72	7
5	1893	08	10	20	52	Gargano	69	8-9
3	1894	03	25			LESINA	29	7
7	1904	04	08	08	22	GARGANO	32	7
5	1910	06	07	02	04	Irpinia-Basilicata	376	9
5	1913	10	04	18	26	MATESE	205	8
6	1919	10	21	00	24	GARGANO	28	6
4-5	1925	08	25	05	10	GARGANO	14	6
5	1930	07	23	00	08	Irpinia	509	10
5	1937	07	17	17	11	SAN SEVERO	40	7
2	1937	12	15	21	25	CAPITANATA	23	5-6
7-8	1948	08	18	21	12	Puglia settentr.	59	7-8
7	1951	01	16	01	11	GARGANO	73	7
5-6	1953	07	19	18	46	S. GIOVANNI ROTONDO	5	5-6
6	1955	02	09	10	06	MONTE S. ANGELO	31	7-8
5-6	1962	08	21	18	19	Irpinia	214	9
F	1967	12	09	03	09	ADRIATICO MER.	22	5
6	1975	06	19	10	11	MATTINATELLA	15	6
5	1980	11	23	18	34	Irpinia-Basilicata	1317	10
NF	1984	04	29	05	02	GUBBIO/VALFABRICA	709	7
3	1984	05	07	17	49	Appennino abruzzese	912	8
5-6	1990	05	05	07	21	POTENTINO	1374	7-8
3-4	1991	05	26	12	25	POTENTINO	597	7
6	1995	09	30	10	14	GARGANO	145	6

Figura 7: Eventi sismici registrati a San Giovanni Rotondo nel periodo 1000-2006 (da sito web INGV)



4. IDROGRAFIA E IDROGEOLOGIA DELL'AREA

Dal punto idrogeologico, l'area di studio si colloca all'interno dell'acquifero del Gargano caratterizzato, come già riferito, dalla presenza di rocce carbonatiche.

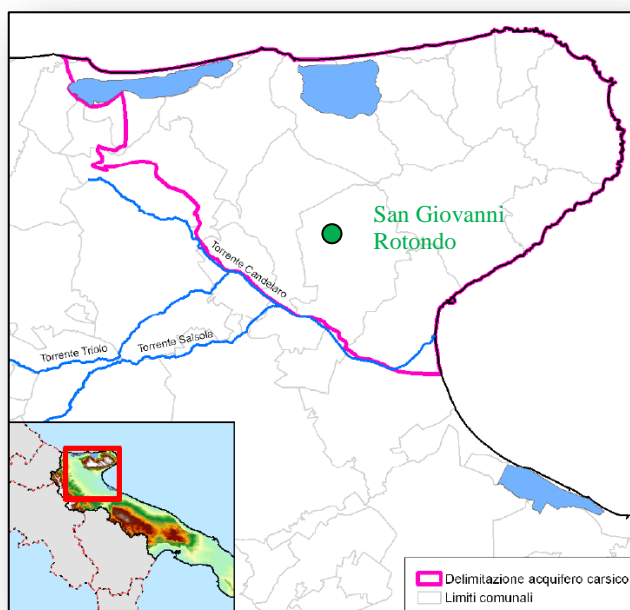


Figura 8: acquifero del Gargano (da P.T.A. Puglia)

Un'importante caratteristica di tali aree è la quasi completa mancanza di idrografia superficiale e l'unica eccezione è rappresentata dalla presenza di incisioni brevi e molto profonde, disegnate principalmente in corrispondenza delle ripide scarpate che bordano il rilievo e che occasionalmente drenano le acque piovane.

Una situazione diversa è quella che si trova nel settore Est del promontorio, dove esiste un reticolo idrografico molto più sviluppato. In quest'area, le rocce calcaree a liste e noduli di selce presentano un carsismo meno sviluppato.

La minore presenza di forme carsiche e inghiottitoi, infatti, determina condizioni favorevoli per un maggiore sviluppo dell'idrografia superficiale. Testimonianza della minore azione del carsismo in questa zona è rappresentata dalla ridotta quantità di cavità sotterranee, più numerose nelle aree interne del promontorio. Tuttavia lungo la costa orientale non mancano grotte prodotte principalmente dall'azione congiunta del dilavamento superficiale e dell'erosione dovuta alle onde.

Il massiccio carbonatico del Gargano è sede di un'importante sistema di circolazione di acque sotterranee, che trovano una via di scorrimento nella fitta rete di canalizzazioni carsiche e di fratture presenti nel sottosuolo. Le acque di pioggia penetrano attraverso le doline e gli inghiottitoi carsici presenti soprattutto negli altopiani centro-occidentali. Solo dopo aver attraversato tortuosamente il massiccio calcareo in profondità



tornano in superficie affiorando in una serie di sorgenti disposte per lo più lungo le coste, sia subaeree che sommerse. Una delle aree dove le sorgenti sono più concentrate è la zona dei grandi laghi; così viene definita quella fascia costiera a Nord del Gargano contraddistinta da due laghi costieri: il Lago di Lesina e il Lago di Varano.

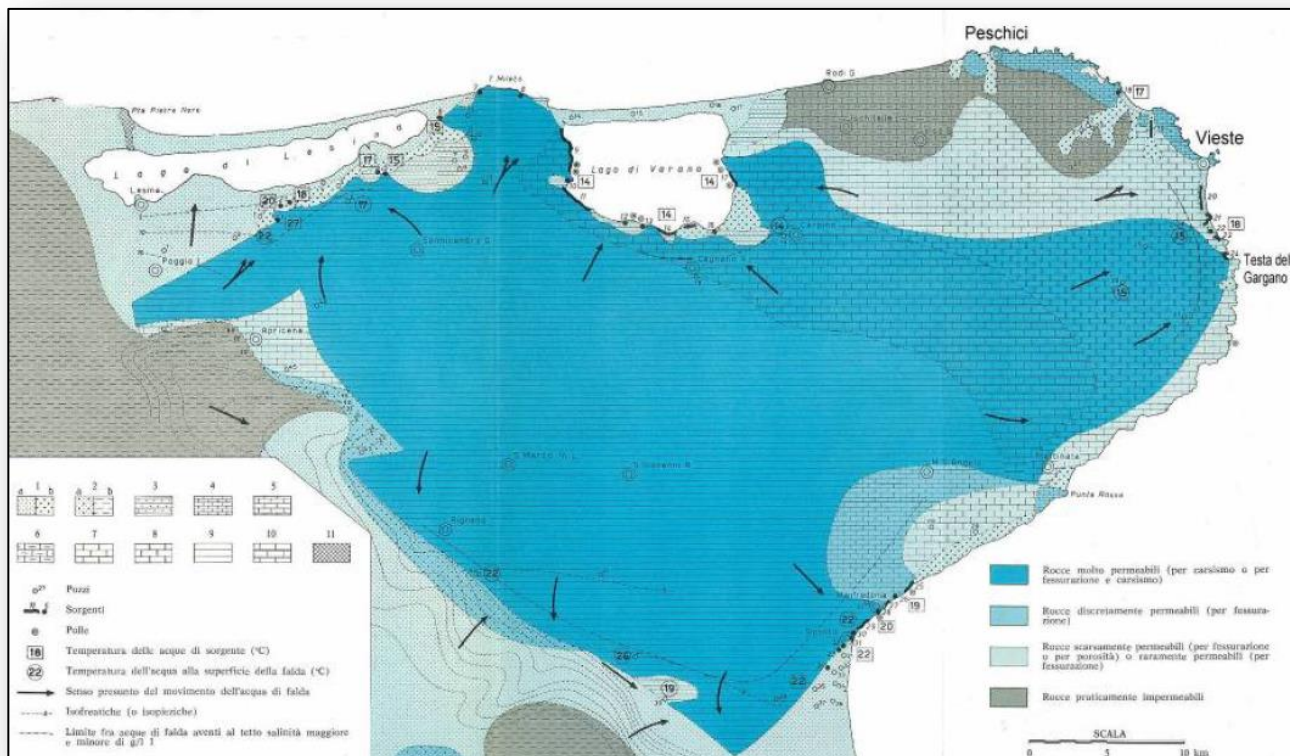


Figura 9: sezione idrogeologica dell'area garganica (da V. Cotecchia, G. Magri, *Idrogeologia del Gargano*)

La Figura 9 rappresenta una sezione idrogeologica orizzontale in corrispondenza del livello del mare e riporta i caratteri litologici (nonostante i limiti tra le varie formazioni geologiche siano solo indicativi) e la permeabilità dei terreni. Tale schema è rappresentativo della situazione delle acque sotterranee alla profondità ove queste effettivamente circolano.

La situazione idrogeologica è, quindi, in stretta relazione con la geologia e la litologia dei terreni interessati, che ne condizionano la permeabilità, per cui per tutta l'area è possibile contraddistinguere due distinti sistemi acquiferi:

- Una *falda principale*, che occupa gran parte del promontorio, che ha come livello di base l'orizzonte marino ed è sostenuta dall'acqua di mare che invade l'entroterra. La sua alimentazione avviene per afflussi meteorici e la sua superficie di fondo è un'interfaccia indefinita e mobile,



- Una falda secondaria, limitata alla zona di Vico-Ischitella, che ha sede nei calcari organogeni e detritici, discretamente permeabili, poggianti sui sottostanti calcari bianchi con selci e con intercalazioni marnose, praticamente impermeabili.

Per quel che concerne la pericolosità idraulica si fa presente, inoltre, che il sito di studio non viene classificato, dalla cartografia P.A.I. redatta dall'AdB della Regione Puglia (V. Figura 1), come soggetto a tale pericolosità.



5. INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOTECNICHE

Gli elementi necessari per la caratterizzazione litostratigrafica, geotecnica e sismica di dettaglio del sito in esame sono stati acquisiti, come accennato in premessa, mediante indagini geognostiche e indagini geofisiche, ubicate così come in Allegato.

Le indagini hanno avuto inizio in data 09/03/2015 e sono terminate in data 16/03/2015.

E' importante precisare che per l'ubicazione delle indagini si è dovuto, per forza di cose, tener conto della presenza di manufatti preesistenti presenti sull'area di progetto.

I sondaggi meccanici sono stati eseguiti a rotazione con il metodo del carotaggio continuo a circolazione di acqua, con la sonda idraulica Casagrande C6, utilizzando il carotiere di diametro Φ 101 mm e tubi di rivestimento Φ 127 mm.

Le carote estratte sono state collocate in apposite cassette catalogatrici, debitamente quotate e fotografate (V. documentazione fotografica in allegato).

Sono state, quindi, redatte le relative schede di sondaggio complete in ogni aspetto e riportate in Allegato.

Le verticali investigate dai sondaggi hanno evidenziato, dall'alto verso il basso, i seguenti litotipi (V. sezione litostratigrafica schematica interpretativa in Fig.10):

- terreno organico di colore marrone scuro costituito dal limo argilloso-sabbioso con inclusi lapidei, rinvenuto fino alla profondità di circa 1,00 m circa dal p.c. Il passaggio con il sottostante deposito calcareo avviene attraverso un deposito di regolite costituito da frammenti di calcari fratturati in matrice organica;
- depositi lapidei costituiti da calcari micritici. I calcari sono intensamente fratturati e degradati e il colore è bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano degradati e, talora, carsificati. Lungo la verticale S1 sono state intercettate cavità e tasche di terra rossa. Tali depositi sono stati rinvenuti fino al termine della perforazione (-10 metri dal p.c.);

In fase di avanzamento della perforazione sono stati prelevati n.9 spezzoni di roccia (le cui profondità di prelievo sono riportate nelle apposite schede di sondaggio in Allegato) sui quali sono state effettuate le opportune determinazioni mediante Point Load Test.



Via G. Di Vagno

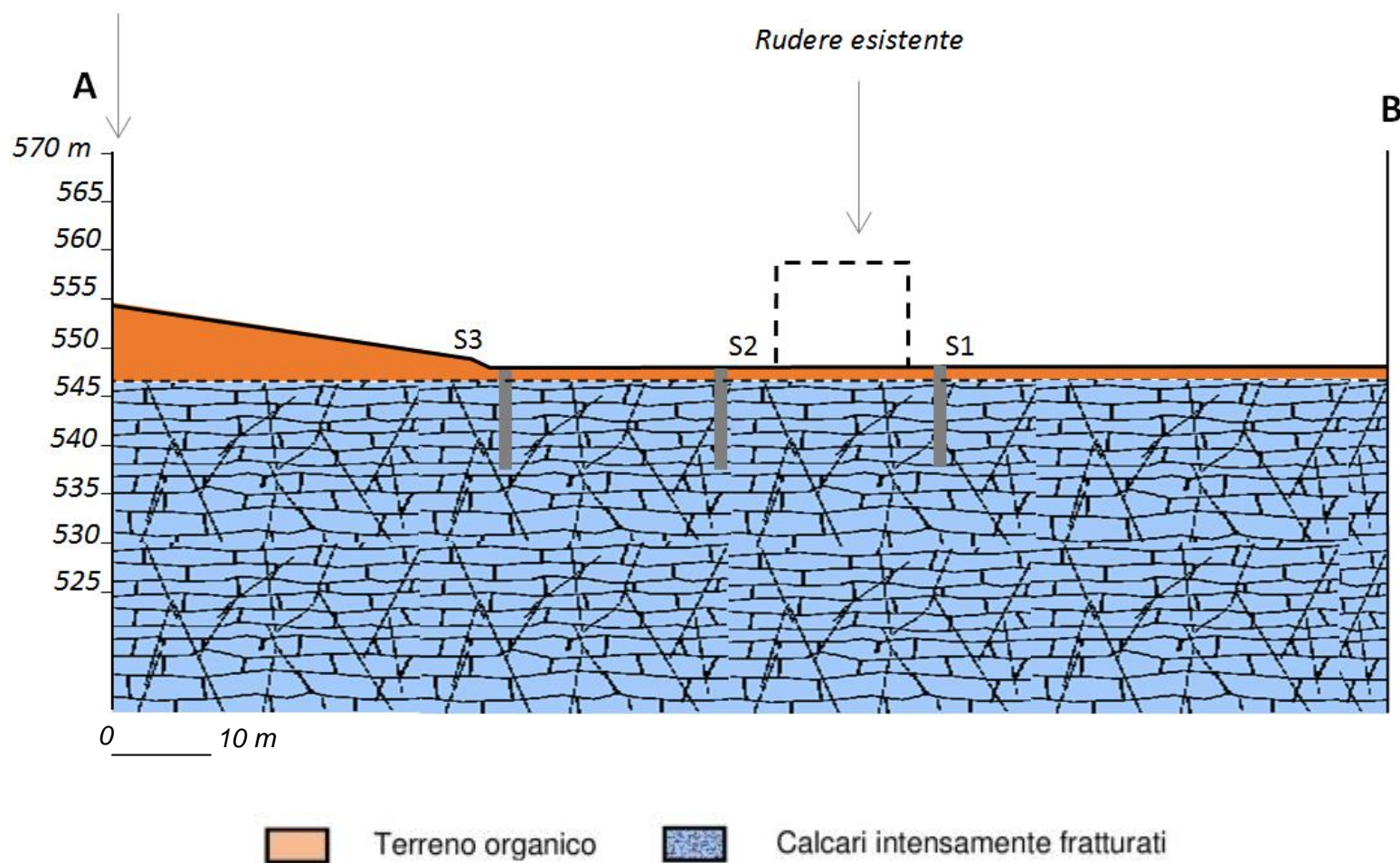


Figura 10: sezione litostratigrafica schematica interpretativa



6. CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E GEOTECNICA

Le indagini eseguite hanno evidenziato l'esistenza di depositi che mostrano caratteristiche areali uniformi riferite alle singole litologie.

La litostratigrafica del sottosuolo investigato, come già riferito, è rappresentata da depositi organici, a prevalente componente limo-argillosa, poggianti su depositi calcarei.

Dall'intero quadro conoscitivo si deduce che il sottosuolo, nella porzione investigata, escludendo il terreno organico superficiale, è rappresentabile da n.1 unità litostratigrafica:

- **Unità litostratigrafica A:** rappresentata da depositi lapidei costituiti da calcari micritici intensamente fratturati e degradati.

Nella determinazione del peso di volume dell'ammasso roccioso rappresentante tale unità, si è tenuto conto delle caratteristiche del materiale roccioso di cui è costituito l'ammasso, sia dei sistemi di giunti e di spaziatura di essi, nonché dal materiale di riempimento degli stessi.

Pertanto il valore medio così attribuito è:

$$\gamma = 23,53 \text{ KN/m}^3$$

Per quanto riguarda la determinazione degli altri parametri dell'ammasso si è fatto riferimento alla procedura proposta da Bieniawsky (di seguito riportata):

Tale procedura applica i principi ed i criteri della meccanica delle rocce e tiene conto di cinque parametri caratteristici:

- I. Resistenza a compressione uniassiale della roccia;
- II. Indice RQD;
- III. Spaziatura dei giunti;
- IV. Condizioni delle discontinuità;
- V. Condizioni idrauliche.

A ciascuno dei suddetti parametri, valutati in modo quantitativo, viene assegnato un indice parziale dalla cui sommatoria si ricava un indice complessivo relativo all'ammasso roccioso Rock Mass Rating (indice RMR).



PARAMETRI	INTERVALLI VALORI				
Resistenza comp. (Kg/cm ^q)	> 2500	1000 - 2500	500 - 1000	250 - 500	0 - 250
R1: valori parametro	15	12	7	4	2
R.Q.D. (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25
R2: valori parametro	20	17	13	8	3
Spaziatura discontinuità (m)	> 2	0.6 - 2	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	< 0.06
R3: valori parametro	20	15	10	8	5
Condizioni discontinuità	Sup. molto rugosa, non alterata disc. chiuse non continue	Sup. rugose poco alterate Disc. poco aperte	Sup. rugose molto alterate Disc. poco aperte	Sup. lisce o riemp. < 5 mm o poco aperte	Riemp. molle o disc. continue aperte
R4: valori parametro	30	25	20	10	0
Condizioni idrauliche	Asciutto	Umido	Bagnato	Stillicidio	Venute d'acqua
R5: valori parametro	15	10	7	4	0
Classi di ammassi rocciosi					
R.M.R corretto	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizioni	Ottimo	Buono	Discreto	Scadente	Pessimo
Coesione (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Angolo di attrito (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Figura 11: Classifica di Bieniawski

Sulla base di tale indice si determina la classe corrispondente a cui appartiene l'ammasso roccioso alla quale, anche se in maniera approssimativa, è possibile attribuire i valori dei principali parametri meccanici. Tale classificazione permette di formulare quindi un giudizio non solo qualitativo, ma anche quantitativo sulle caratteristiche globali di un ammasso roccioso.

Nel caso in esame si ottiene:

Indice	valore	punteggio
Valore medio di Resistenza a compressione uniassiale della roccia (Kg/cm ²)	762,58	7
Indice RQD (%)	< 25	3
Spaziatura dei giunti (m)	<0.06	5



Condizioni delle discontinuità	Super. Lisce o poco aperte	10
Condizioni idrauliche	umido	10
TOTALE		35

Tabella 1

Il valore di R.M.R. corretto, pari a 35, associa l'ammasso roccioso alla classe IV di Bieniawski, definibile come roccia scadente attribuendo ad essa i seguenti parametri geotecnici:

$$\Phi \text{ (angolo d'attrito)} = 15^\circ - 25^\circ$$

$$C \text{ (coesione)} = 100 - 200 \text{ KPa}$$

Il valore del modulo elastico E è stato invece determinato attraverso la formula:

$$E = e^{(4,407 + 0,081 * RMR)} \quad (Iasarevic e Kovacevic, 1996)$$

Da cui risulta:

$$E = 1395,8 \text{ MPa}$$

Dall'insieme dei dati ottenuti, è stato quindi possibile ottenere il seguente modello litostratigrafico e geotecnico dell'area:

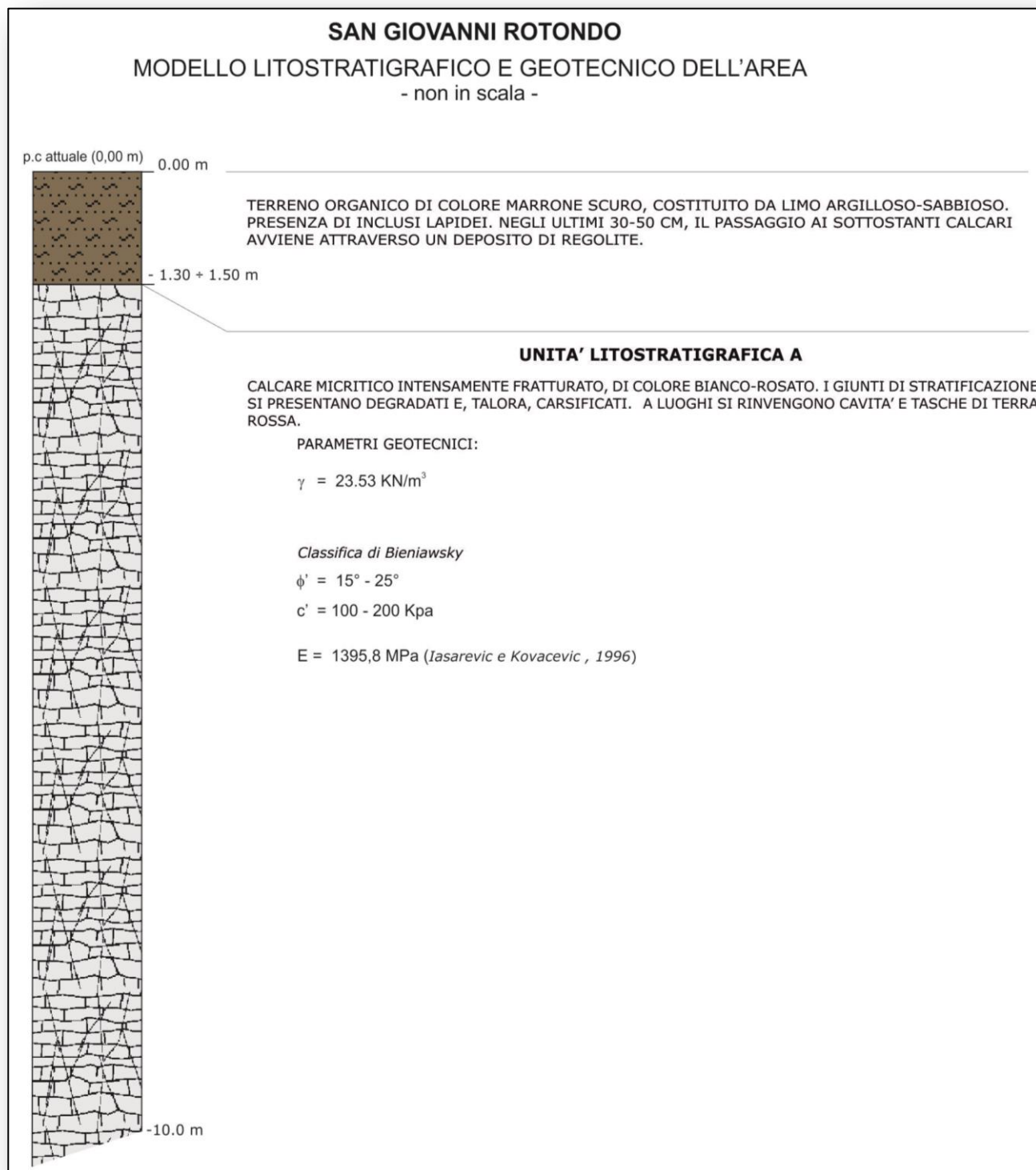


Figura 12



7. INDAGINI GEOFISICHE

Le indagini sismiche, ubicate così come nel fascicolo “*Relazione geofisica*” allegato alla presente relazione, sono state condotte allo scopo di stimare il parametro Vs30 caratteristico dell’area, ovvero la velocità equivalente delle onde sismiche di taglio nei primi 30 m di profondità rispetto alla quota di imposta della fondazione (come prescritto dall’art. 3.2.2 del D.M. 14 gennaio 2008), e di offrire un contributo all’implementazione di un modello geologico - geotecnico dell’area di indagine.

Come già detto in premessa sono stati effettuati:

- n°1 prospezione di sismica a rifrazione in onde P e SH;
- n°1 prospezione MASW (Multichannel analysis of Surface Waves).

Le indagini geoelettriche, invece, sono state eseguite al fine di fornire un contributo all’implementazione di un modello geologico dell’area di indagine con particolare riferimento alla mappatura delle anomalie potenzialmente associabili a cavità.

In particolare sono state eseguite:

- n° 3 misure tomografiche elettriche di tipo ERT 3D (Electrical Resistivity Tomography) per la ricostruzione di block resistivity model a tre dimensioni da cui estrarre piani di resistività a differenti profondità (slice) e isosurface finalizzate all’individuazione ed alla delimitazione spaziale delle anomalie compatibili con la presenza di eventuali cavità.

Si riportano brevemente i risultati ottenuti da queste tipologie d’indagine; maggiori informazioni riguardo i risultati, le teorie e le specifiche alla base delle metodologie sono riportate nelle apposite relazioni in allegato alla presente.

E’ importante precisare che per l’ubicazione delle indagini geofisiche si è dovuto, per forza di cose, tener conto della presenza di manufatti preesistenti insistenti sull’area di progetto. In particolare la tomografia elettrica ERT01 (V. Fig.15) è stata necessariamente traslata di qualche metro più a Sud a causa dell’inaccessibilità degli stessi.

7.1 INDAGINI SISMICHE

SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E SH

L’indagine sismica a rifrazione è consistita nell’esecuzione di n. 1 profilo con acquisizione di onde longitudinali (P) e trasversali (SH), eseguito con 24 geofoni e spaziatura di 2,0 metri.



Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismostratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points) rispetto al profilo, vengono disposti ai suoi estremi (end) ed a distanze variabili entro il profilo stesso (punti di scoppio centrali). In questa occasione sono stati utilizzati 8 shot points..

I dati sismici sono stati acquisiti, quindi, utilizzando un numero di shots piuttosto elevato contribuendo ad incrementare la capacità risolutiva del metodo.

L'indagine suggerisce un sottosuolo costituito, dall'alto verso il basso, da 4 unità sismostratigrafiche che presentano, dal punto di vista della risposta sismica, un assetto pressoché tabulare ad eccezione di locali variazioni.

- L'unità **Us**: si estende per uno spessore variabile tra 0.3 ÷ 1 m e presenta Vp comprese tra 300÷800 m/s e Vs comprese tra 150÷400 m/s
- l'unità **Uc1**: (Vp: 700÷1100 m/s, Vs: 400÷500 m/s) presenta un assetto tabulare con spessore variabile tra 0.3÷1.0 m ed un incremento progressivo di velocità con la profondità;
- l'unità **Uc2**: (Vp: 1100÷2000 m/s, Vs: 500÷1300 m/s) si estende sino ad una profondità di 4,5 m da p.c. a 30m dall'inizio dello stendimento, con un aumento repentino di velocità al bottom dell'unità;
- l'unità **Uc3**; caratterizzata da velocità maggiori di Vp=4000 m/s e Vs=2480 m/s. Questa unità presenta anomalie di velocità tra le progressive 0m÷15m, (visibili soprattutto nella Vp nelle zone A1 e A2 evidenziate nelle figura sottostante) potenzialmente dovute a differenti probabili cause tra le quali: forte aumento di fratturazione locale del litotipo calcareo/probabili cavità riempite di terra rossa/cavità. Queste zone (A1, A2) possiedono una velocità di Vp compresa tra i 1200÷1300m/s

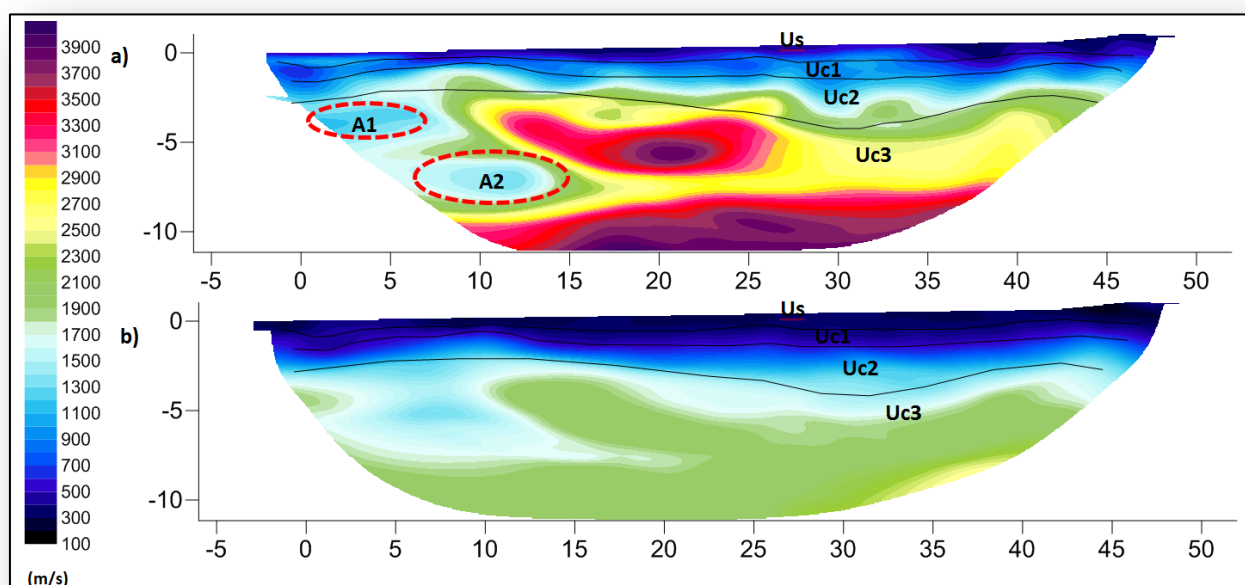


Fig. 13 – sezioni sismostratigrafiche: , a) onde P, b) onde SH



La subunità **Us**, che presenta valori esigui di velocità sismiche, risulta associabile a terreno vegetale misto a blocchi calcarei.

La subunità **Uc1** risulta assimilabile a calcare fratturato al top. La subunità **Uc2** presenta valori assimilabili a litotipo calcareo a medio grado di fratturazione fino alla profondità di 1.5m da p.c. dove risulta caratterizzato da un rapido miglioramento delle proprietà verso il bottom. La subunità **Uc3** evidenzia un netto cambio laterale alla progressiva 15m risultando compatibile con un litotipo calcareo fortemente fratturato e/o con la presenza di cavità riempite di terra rossa o probabilmente parzialmente vuote; lateralmente partendo dai 15m fino alla fine dello stendimento sismico c'è invece un miglioramento delle proprietà tecniche che risultano compatibili con la presenza di calcare a fratturazione media e medio-bassa.

Considerando i risultati ottenuti dall'indagine di sismica a rifrazione in onde P ed SH, effettuata lungo lo stendimento REF01, in termini di distribuzione dei valori di Vp e Vsh, è stato possibile effettuare una stima dei valori dei moduli dinamici caratterizzanti le unità, riassunti nella seguente tabella (Tab 2):

Strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ν -Poisson	E -Young (MPa)	G-Shear (MPa)	K-Bulk (MPa)
Us	300÷800	150÷400	0.40-0.35	200-600	100-250	300-850
Uc1	700÷1100	400÷500	0.36-0.30	800-1000	300-400	1000-2000
Uc2	1100÷2000	500÷1300	0.34-0.32	1500-7000	1000-3000	2500-6000
Uc3	2000÷4000	1400÷2000	0.27-0.32	8000-28000	3000-13000	6500-40000

Tab. 2 - moduli dinamici

SISMICA DI TIPO MASW

L'indagine sismica di tipo MASW, consistita nell'esecuzione di n.1 stendimento, avente lunghezza di 46 metri, suggerisce un sottosuolo assimilabile a quello evidenziato dall'indagine di sismica a rifrazione.

In effetti si riconosce, dall'alto verso il basso, una unità di copertura (Us) dello spessore di circa 0,6 m (con Vs pari a 180 m/s) che poggia, attraverso un contatto netto su di un sismostrato Uc1 spesso circa 8 m (con Vs variabili tra 740÷1130 m/s). Segue un brusco incremento di velocità dovuto alla subunità Uc2, spessa circa 4 m (con Vs pari a 1730 m/s). Chiude la sequenza la subunità Uc3 (con Vs >1320), che va dagli 8,0 ai 22,0 m da p.c., dopo i quali si evidenzia un brusco incremento della velocità (Vs>2100 m/s).

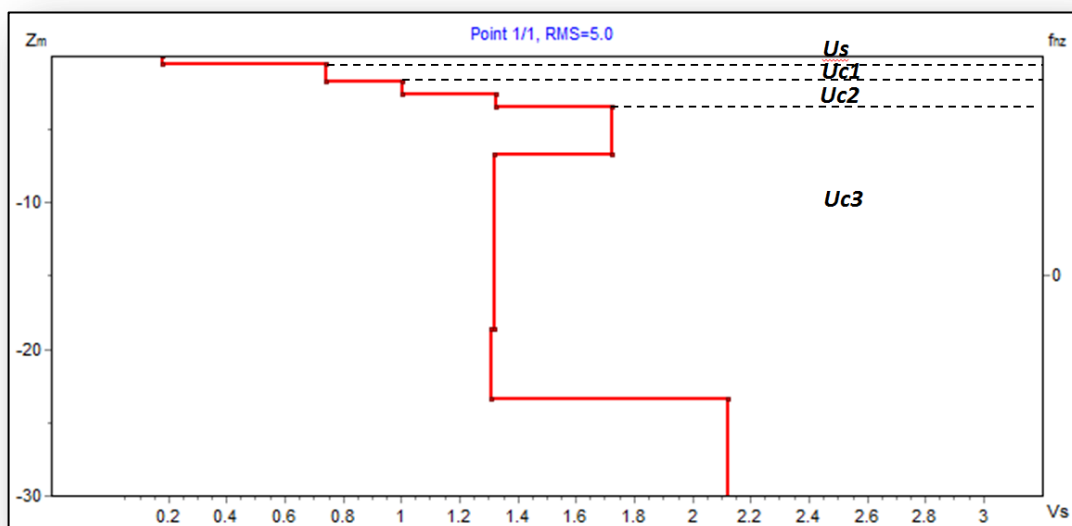


Fig. 14 - Profilo di Vs (Km/s).

Si riporta, di seguito, la tabella riepilogativa dell'andamento delle velocità delle onde S con la profondità, per i sismostrati individuati attraverso l'analisi del modello di inversione.

Strato	Profondità Top (m)	Spessore (m)	Vs (Km/s)
1	0.0	0.6	180
2	0.6	1.8	740
3	1.8	2.6	1001
4	2.6	3.5	1330
5	3.5	6.7	1730
6	6.7	18.6	1320
7	18.6	23.4	1310
8	23.4	-	2120

Tab. 3 - andamento della velocità delle onde (Vs) con la profondità

La velocità equivalente delle onde di taglio V_{s30} è definita dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove:

h_i è lo spessore (in metri) dell'i-esimo strato compreso nei primi 30 m di profondità;

V_{s_i} velocità (in m/s) delle onde di taglio nell'i-esimo strato.



Pertanto, se si considerano i valori della velocità di propagazione delle onde “S”, misurati dal piano campagna, è possibile evidenziare che il valore $V_{s,30}$ è risultato essere pari a circa **1245 m/s** consentendo, per l’area in esame, la definizione di un suolo appartenente alla **categoria A**, come prescritto dalle NTC (D.M. 14/01/2008).

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella – Categorie aggiuntive di sottosuolo.

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Tabella 4 - Categorie di sottosuolo

7.2 INDAGINI GEOELETTRICHE

Le indagini geoelettriche sono state eseguite nell’area compresa tra via Soldato Antonio Massa e via Vagno (V. Fig.15) e sono state suddivise in tre tomografie tridimensionali.

L’acquisizione ha interessato tre aree di 262.5 m² per un totale di 787.5 m², circa 9000 misure quadripolari di resistività e quasi 18 ore di acquisizione.

Le indagini di tipo elettrico sono state condotte utilizzando un’acquisizione elettrotomografica 3D mediante le configurazioni (array) Dipolo-Dipolo (DD), Wenner-Alpha (WA) e Polo-Polo (PP).

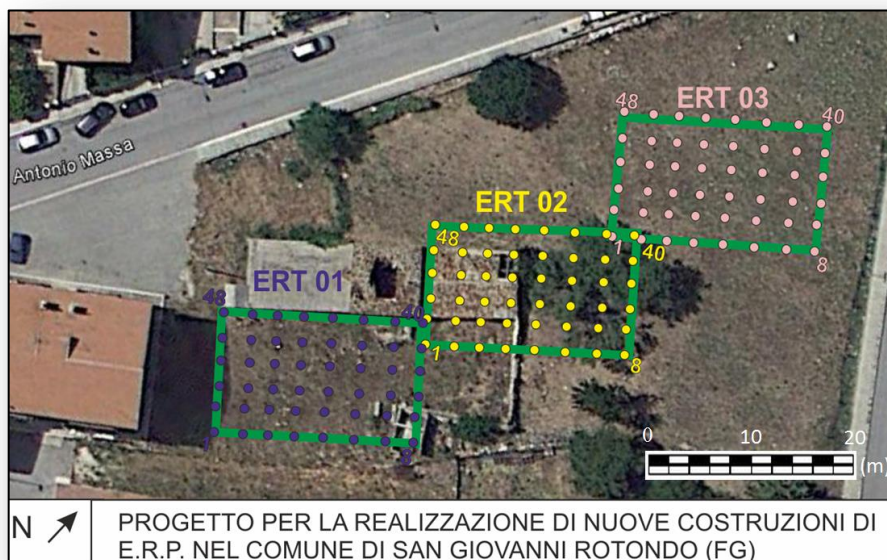


Fig. 15 - ubicazione area di indagine

I 48 elettrodi sono stati posizionati su 6 file parallele, distanziate 2.5 m, comprendenti 8 elettrodi distanziati di 3 metri costituendo una griglia 8x3 a maglia rettangolare. L'acquisizione è stata eseguita sia su quadripoli selezionati lungo le linee che in direzione ortogonale ed obliqua.

I risultati ottenuti possono essere così riassunti:

▪ AREA ERT 03

I dati di resistività, opportunamente invertiti evidenziano un'elettrostratigrafia costituita (V. Fig.16; All. – "Relazione geoelettrica") da un primo orizzonte (Ue1) relativamente conduttivo ($\rho > 150 \Omega \cdot m$) che si estende sino a profondità di 1 metro circa, associabile a terreno vegetale con clasti. Segue un elettrostrato (Ue2) caratterizzato da ρ comprese tra $200 \div 800 \Omega \cdot m$ e spessore pari a circa 2 m, che tende ad aumentare nella zona centrale sino ad un massimo di 4.5 m, riferibile a calcare fortemente fratturato ed alterato.

Chiude la sequenza elettrostratigrafica l'orizzonte Ue3 caratterizzato da ρ comprese tra $700 \div 4000 \Omega \cdot m$ associabile a calcare, caratterizzato da massimi riferibili a porzioni dell'ammasso meno fratturate/alterate e minimi compatibili con la presenza di porzioni altamente fratturate/alterate e/o con terra rossa.

La tomografia elettrica non ha evidenziato zone alto resistenti compatibili con la presenza di cavità.

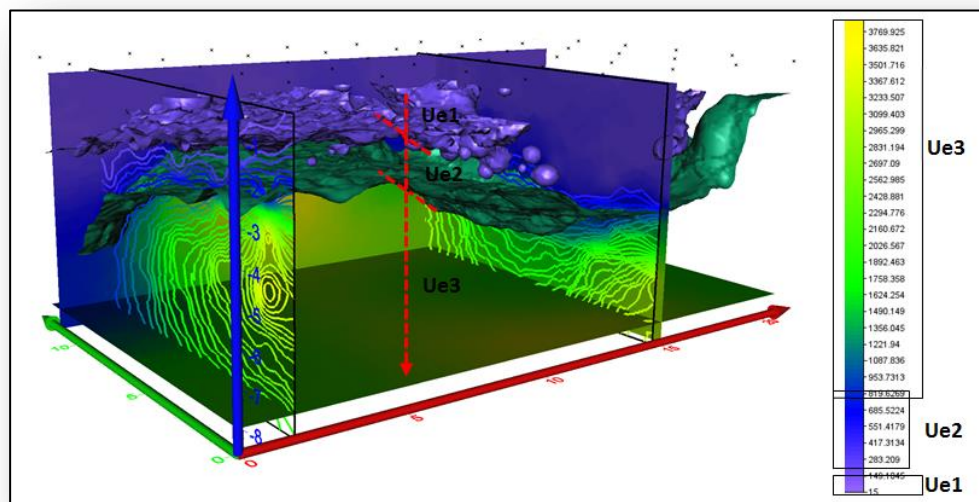


Fig. 16 - Visione prospettica ERT03 con isosuperfici e isolinee

▪ AREA ERT 02

I dati di resistività, opportunamente invertiti, indicano la presenza di anomalie di resistività positive visibili sia qualitativamente attraverso rappresentazioni volumetriche 3D (V. Fig.17), sia attraverso piani orizzontali a varie profondità dal piano campagna (V. depth slice in Allegato "Relazione geoelettrica"). Quest'ultima rappresentazione consente di avere indicazioni geometriche sull'andamento delle anomalie in profondità essendo una proiezione in superficie dell'anomalia stessa (ovvero del corpo che l'ha generata).

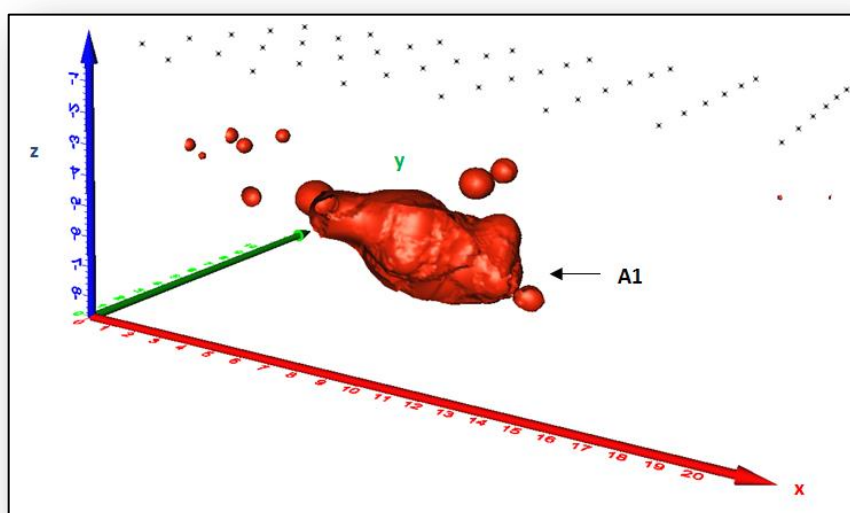


Fig. 17 – ERT02 - Visione prospettica anomalia



In particolare la tomografia ha evidenziato la presenza di un'anomalia principale (A1) con $\rho > 8000 \Omega \cdot m$ che si estende tra le progressive 6÷13 m lungo l'asse x, tra le progressive 0÷2.5 m lungo l'asse y e per profondità comprese tra 3.6÷-5.5 m, associabile ad una cavità priva di materiali di riempimento, unitamente ad alcune anomalie di limitata estensione (V. Fig.17; All.I – “Relazione geoelettrica”).

Inoltre la tomografia conferma l'elettrostratigrafia individuata mediante la ERT03 ad eccezione di una relativa superficializzazione del substrato calcareo nella porzione centrale e della maggiore presenza di elettrozone conduttive ($50 < \rho < 800$) nella porzione al di sotto dei -4 m da p.c., associabili a porzioni del substrato calcareo maggiormente fratturate/alterate e/o con terra rossa.

▪ AREA ERT 01

La tomografia 3D suggerisce una successione elettrostratigrafica del tutto analoga a quella della ERT02, evidenziando la presenza, entro il volume investigato, di due anomalie resistive ($\rho > 8000 \Omega \cdot m$) compatibili con la presenza di cavità (V. Fig.18; “Relazione geoelettrica”).

L'anomalia A2 si diparte dalla zona periferica verso la porzione centrale del volume investigato, per una lunghezza di circa 9 m ed una larghezza massima di 3 m circa e a partire da -3.5 m da p.c. sino ad una profondità compresa tra 5.0 e 5.5 m da p.c.

L'anomalia A3, a partire da 3.2 m sino alle stesse profondità della precedente anomalia, appare isolata e di esigue dimensioni ($< 2 m^3$).

L'assetto elettrostratigrafico risulta del tutto analogo a quello suggerito della ERT02.

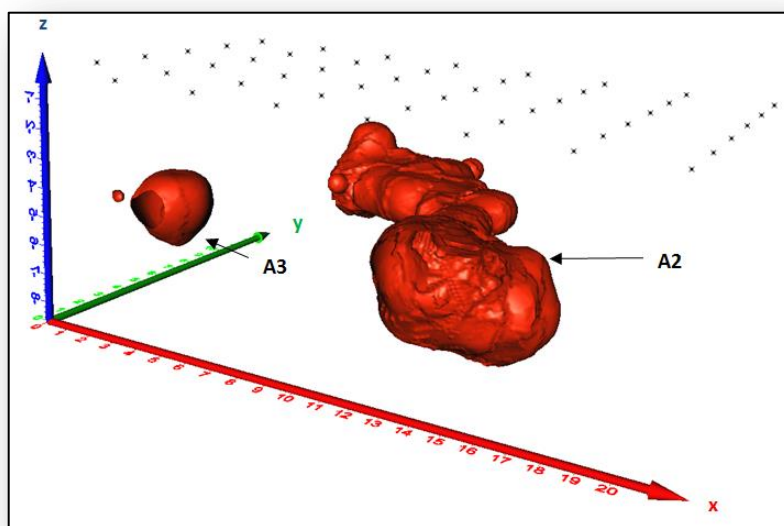


Fig. 18 – ERT01 - Visione prospettica anomalie.



8. AZIONE SISMICA

L'O.P.C.M. 3274 (in vigore dal 23/10/2005) e s.m.i. introduce una nuova classificazione sismica del territorio italiano, in risposta sia alle nuove conoscenze scientifiche in materia sismica, sia al ripetersi di terremoti che hanno interessato anche zone precedentemente non classificate.

Rispetto alle classificazioni precedenti, l'O.P.C.M. 3274 stabilisce una nuova classificazione sismica del territorio nazionale utilizzando e aggiornando la classificazione sismica proposta nel 1998 (in cui il territorio nazionale era suddiviso, attraverso un approccio probabilistico, in tre categorie sismiche a cui si aggiunse una categoria ulteriore per i comuni non classificati).

La nuova classificazione è invece articolata in 4 zone, ciascuna contraddistinta da un diverso valore dell'accelerazione di picco orizzontale (a_g) del suolo di riferimento considerato rigido (suolo di categoria A) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, eliminando di fatto la presenza di aree del territorio classificate come non sismiche: in questo modo, a ciascuna area del territorio nazionale viene attribuito un differente livello di protezione sismica.

Zona	Intervallo di pertinenza della PGA (10% in 50 anni)	A_g max
1	$0,25 < a_g \leq 0,35 \text{ g}$	$0,35 \text{ g}$
2	$0,15 < a_g \leq 0,25 \text{ g}$	$0,25 \text{ g}$
3	$0,05 < a_g \leq 0,15 \text{ g}$	$0,15 \text{ g}$
4	$\leq 0,05 \text{ g}$	$0,05 \text{ g}$

Tabella 5

Secondo questa nuova classificazione sismica del territorio italiano, il Comune di San Giovanni Rotondo (FG) ricade in zona 2 con un'accelerazione orizzontale massima convenzionale (a_g), su suolo di categoria A di 0,25 g, come si evince dalla tabella 5.

Tale classificazione, quindi, non è che il risultato di una semplificazione dei livelli di pericolosità sismica, che deve essere vista come punto di inizio per la realizzazione di studi sismici di maggior dettaglio (microzonazione sismica) allo scopo di aumentare i livelli di protezione sismica.

Le più recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (14/01/2008) hanno introdotto un nuovo elemento metodologico nella stima della pericolosità sismica di base, la quale non risulta più associata alla zona sismica di appartenenza, ma al valore di accelerazione massima orizzontale attesa su base probabilistica in uno specifico sito.

Secondo tali norme, nella realizzazione delle costruzioni, bisogna far riferimento a



degli *stati limite* che possono verificarsi durante un determinato *periodo di riferimento* dell'opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica, che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo la *vita nominale* dell'opera (V_N), che congiuntamente alla *classe d'uso* (C_U), permette di determinare il *periodo di riferimento*;
- una volta determinato il periodo di riferimento e i diversi stati limite da considerare, e una volta definite le relative probabilità di superamento, è possibile stabilire il periodo di ritorno associato a ciascun stato limite;
- a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base** per il sito interessato dalla realizzazione dell'opera.

8.1 VITA NOMINALE, CLASSI D'USO E PERIODO DI RIFERIMENTO

Nelle NTC08 il periodo di riferimento, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \times C_U$$

dove:

V_R = *periodo di riferimento*

V_N = *vita nominale*

C_U = *coefficiente d'uso*

La **vita nominale di un'opera strutturale** V_N , secondo le NTC08, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata e viene definita attraverso tre diversi valori, a seconda dell'importanza dell'opera e perciò delle esigenze di durabilità:

- $V_N \leq 10$ anni per le opere provvisorie, provvisionali e le strutture in fase costruttiva che però abbiano una durata di progetto ≥ 2 anni.
- $V_N \geq 50$ anni per le opere ordinarie, ponti, infrastrutture e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale.



- $V_N \geq 100$ anni per grandi opere, ponti, infrastrutture e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica.

Nel caso in esame, così come definito dal progettista, $V_N = 50$ anni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC08 prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

Classe I: *Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.* $C_U = 0.7$;

Classe II: *Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.* $C_U = 1.0$;

Classe III: *Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.* $C_U = 1.5$;

Classe IV: *Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie, ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.* $C_U = 2.0$;

Nel caso di studio viene presa in considerazione, così come definito dal progettista, la **classe d'uso II** a cui è associato il coefficiente d'uso $C_U = 1,0$.

Una volta ottenuti V_N e C_U , è possibile calcolare il **periodo di riferimento** V_R , che in questo caso vale:

$$V_R = 50 * 1,0 = 50 \text{ anni.}$$



8.2 STATI LIMITE, PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO E PERIODO DI RITORNO

Le NTC08 prendono in considerazione 4 possibili stati limite (SL) individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono stati limite di esercizio (SLE) e due sono stati limite ultimi (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.

Più in particolare le opere e le varie tipologie strutturali devono essere dotate di capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (sicurezza nei confronti di SLE) e di capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e di dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone o comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera (sicurezza nei confronti di SLU).

Gli stati limite di esercizio (SLE) sono:

- Stato Limite di Operatività (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- Stato Limite di Danno (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi (SLU) sono:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.



Ad ogni stato limite è associata una probabilità di superamento P_{VR} (Tabella 6), ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento V_R , si verifichi almeno un evento sismico ($n \geq 1$) di a_g prefissata (a_g = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza $\lambda = 1/T_R$ (T_R = periodo di ritorno).

Stati limite			P_{VR} (%)
Stati limite di esercizio	Stato limite di operatività	SLO	81
	Stato limite di danno	SLD	63
Stati limite ultimi	Stato limite di salvaguardia della vita	SLV	10
	Stato limite di prevenzione del collasso	SLC	5

Tabella 6: Stati limite e rispettive probabilità di superamento (P_{VR}), nel periodo di riferimento (V_R)

Fissati V_R e P_{VR} associati ad ogni stato limite, è possibile calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R , espresso in anni, mediante l'espressione riportata nell'Allegato A delle NTC08:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Tale relazione tra P_{VR} (probabilità) e T_R (statistica) risulta biunivoca poiché utilizza la distribuzione discreta Poissoniana.

Poiché nel caso in esame risulta **$V_R = 50$ anni**, il tempo di ritorno T_R sarà:

Stati limite			T_R (anni)
Stati limite di esercizio	Stato limite di operatività	SLO	30
	Stato limite di danno	SLD	50
Stati limite ultimi	Stato limite di salvaguardia della vita	SLV	475
	Stato limite di prevenzione del collasso	SLC	975

Tabella 7: Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento V_R

8.3 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La pericolosità sismica di base, cioè le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di interesse, nelle NTC2008, per una determinata probabilità di superamento, si può ritenere definita quando vengono designati un'accelerazione orizzontale massima (a_g) ed il



corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione, riferiti ad un suolo rigido di categoria A e ad una superficie topografica orizzontale.

Per poter definire la pericolosità sismica di base, le NTC08 si rifanno ad una procedura basata sui risultati disponibili anche sul sito web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it/> (nella sezione "Mappe interattive della pericolosità sismica").

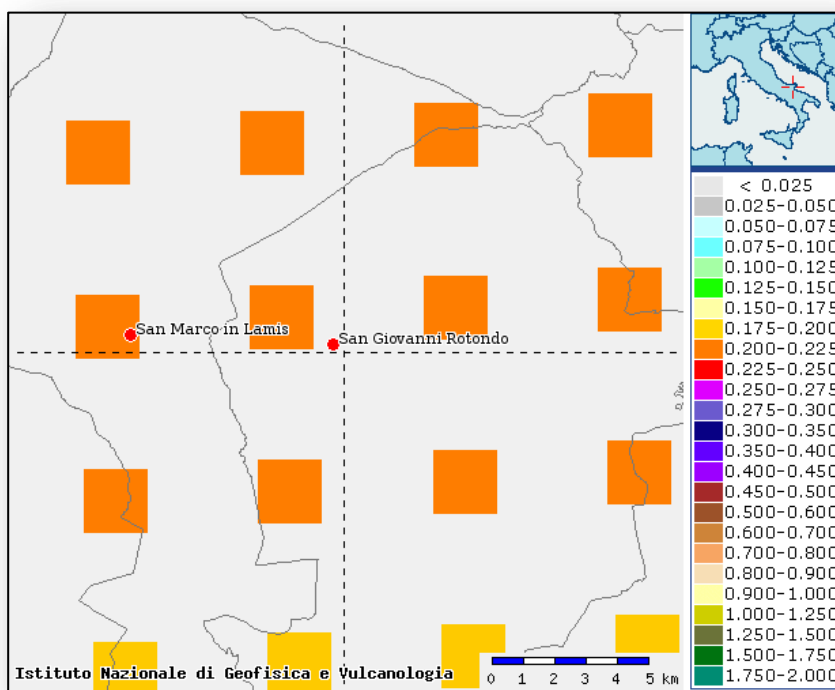


Fig. 19: Mappa della pericolosità sismica per il sito in esame (Ordinanza PCM. n. 3519/2006)

Tale mappa di pericolosità sismica evidenzia l'intervallo di accelerazione per il sito in questione, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi (categoria A, $V_{s30} > 800 \text{ m/sec}$).

Secondo le NTC08, le forme spettrali sono definite per 9 differenti periodi di ritorno TR (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni) a partire dai valori dei seguenti parametri riferiti a terreno rigido orizzontale, cioè valutati in condizioni ideali di sito, definiti nell'Allegato A alle NTC08:

a_g = accelerazione orizzontale massima

F_0 = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

T_C^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I tre parametri si ricavano per il 50° percentile ed attribuendo a:

a_g , il valore previsto dalla pericolosità sismica S1



F_0 e T_C^* i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC08 scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica S1 (il minimo è ottenuto ai minimi quadrati, su valori normalizzati).

I valori di questi parametri vengono forniti in tabella (V. Figura 20), contenuta nell'Allegato B delle NTC08, per i 10751 punti di un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

ID	LON	LAT	$T_R = 30$			$T_R = 50$			$T_R = 72$			$T_R = 101$		
			a_g	F_0	T_C^*	a_g	F_0	T_C^*	a_g	F_0	T_C^*	a_g	F_0	T_C^*
13111	6.5448	45.1340	0.263	2.500	0.180	0.340	2.510	0.210	0.394	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13333	6.5506	45.0850	0.264	2.490	0.180	0.341	2.510	0.210	0.395	2.550	0.220	0.469	2.490	0.240
13555	6.5564	45.0350	0.264	2.500	0.180	0.340	2.510	0.200	0.393	2.550	0.220	0.466	2.500	0.240
13777	6.5621	44.9850	0.263	2.500	0.180	0.338	2.520	0.200	0.391	2.550	0.220	0.462	2.510	0.240
12890	6.6096	45.1880	0.284	2.460	0.190	0.364	2.510	0.210	0.431	2.500	0.220	0.509	2.480	0.240
13112	6.6153	45.1390	0.286	2.460	0.190	0.366	2.510	0.210	0.433	2.500	0.220	0.511	2.480	0.240
13334	6.6210	45.0890	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.434	2.500	0.220	0.511	2.490	0.240
13556	6.6268	45.0390	0.288	2.460	0.190	0.367	2.510	0.210	0.433	2.510	0.220	0.510	2.490	0.240
13778	6.6325	44.9890	0.288	2.460	0.190	0.366	2.520	0.210	0.430	2.510	0.220	0.507	2.500	0.240
14000	6.6383	44.9390	0.286	2.470	0.190	0.363	2.520	0.210	0.426	2.520	0.220	0.502	2.500	0.240
14222	6.6439	44.8890	0.284	2.470	0.190	0.360	2.530	0.210	0.421	2.530	0.220	0.497	2.500	0.240
12891	6.6803	45.1920	0.306	2.430	0.200	0.389	2.500	0.210	0.467	2.470	0.230	0.544	2.490	0.230
10228	6.6826	45.7940	0.283	2.420	0.200	0.364	2.460	0.220	0.430	2.460	0.240	0.505	2.440	0.250
13113	6.6860	45.1430	0.309	2.430	0.200	0.391	2.510	0.210	0.470	2.470	0.230	0.546	2.490	0.230
10450	6.6885	45.7450	0.278	2.440	0.200	0.356	2.480	0.220	0.415	2.500	0.230	0.485	2.470	0.250
13335	6.6915	45.0930	0.310	2.430	0.200	0.392	2.510	0.210	0.470	2.480	0.230	0.546	2.500	0.230
10672	6.6942	45.6950	0.275	2.450	0.200	0.351	2.490	0.210	0.406	2.520	0.230	0.475	2.490	0.250
13557	6.6973	45.0430	0.311	2.440	0.200	0.392	2.520	0.210	0.469	2.480	0.230	0.545	2.500	0.230
13779	6.7029	44.9930	0.310	2.440	0.200	0.391	2.520	0.210	0.467	2.480	0.230	0.543	2.500	0.230

Fig. 20: Stralcio della tabella contenuta nell'Allegato B delle NTC08, che fornisce i 3 parametri di pericolosità sismica, per diversi periodi di ritorno e per ogni nodo del reticolo che viene identificato da un ID e dalle coordinate geografiche.

Qualora la pericolosità sismica del sito sul reticolo di riferimento non consideri il periodo di ritorno T_R corrispondente alla V_R e P_{VR} fissate, il valore del generico parametro p ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione (V. Figura 21), a partire dai dati relativi ai tempi di ritorno previsti nella pericolosità di base, utilizzando la seguente espressione dell'Allegato A alle NTC08:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \times \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) \times \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1}$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (a_g , F_0 , T_C^*) corrispondente al periodo di ritorno T_R desiderato, mentre $p_{1,2}$ è il valore di tale parametro corrispondente al periodo di ritorno $T_{R1,2}$.

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri p possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali



parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando l'espressione dell'Allegato A alle NTC08:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (ag , Fo , TC^*) corrispondente al punto considerato, p_i è il valore di tale parametro nell' i -esimo vertice della maglia elementare contenente il punto in esame e d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo vertice della suddetta maglia.

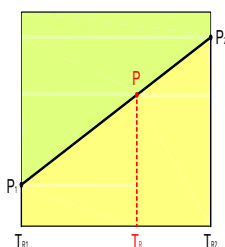


Fig. 21: Interpolazione dei periodi di ritorno, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08.

La procedura per interpolare le coordinate geografiche è schematizzata nella figura 22.

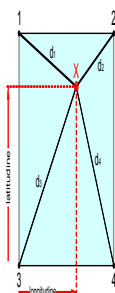


Figura 22: Interpolazione delle coordinate geografiche, per ottenere i parametri di pericolosità sismica, in accordo alla procedura delle NTC08.

Pertanto per poter procedere all'interpolazione delle coordinate geografiche, in accordo alla procedura delle NTC08, bisogna calcolare le distanze che intercorrono tra i 4 punti del reticolo e il punto di interesse. Questo calcolo può essere eseguito approssimativamente utilizzando le formule della trigonometria sferica, che danno la distanza geodetica tra due punti, di cui siano note le coordinate geografiche. Utilizzando quindi il teorema di Eulero, la distanza d tra due punti, di cui siano note latitudine e longitudine, espresse però in radianti, si ottiene dall'espressione seguente:

$$d = R \cdot \arccos[\sin(lat\beta) \cdot \sin(lata) + \cos(lat\beta) \cdot \cos(lata) \cdot \cos(lon\alpha - lon\beta)]$$



dove $R = 6371$ è il raggio medio terrestre in km, mentre $\text{lat}\alpha$, $\text{lon}\alpha$, $\text{lat}\beta$ e $\text{lon}\beta$ sono la latitudine e la longitudine, espresse in radianti, di due punti A e B di cui si vuole calcolare la distanza.

La formula di interpolazione sopra proposta, semplice da usare, presenta però l'inconveniente di condurre a valori di pericolosità lievemente diversi per punti affacciati ma appartenenti a maglie contigue. La modestia delle differenze (scostamenti in termini di PGA dell'ordine di $\pm 0,01g$ ossia della precisione dei dati) a fronte della semplicità d'uso, rende tale stato di cose assolutamente accettabile.

Qualora si vogliano rappresentazioni continue della funzione interpolata, si dovrà ricorrere a metodi di interpolazione più complessi, ad esempio i polinomi di Lagrange.

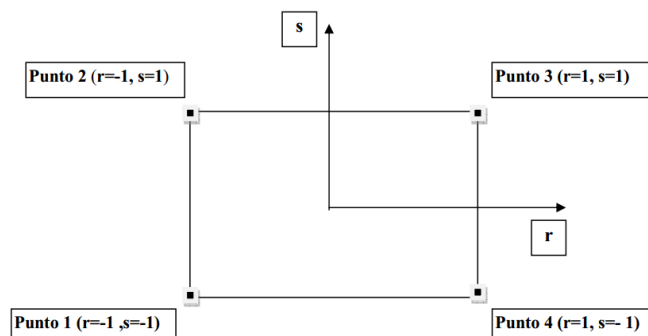


Figura 23: Applicazione dell'interpolazione bilineare.

Definiti i 4 vertici di una generica maglia i polinomi di Lagrange sono così determinati:

$$h_1 = (1 - r)(1 - s)/4$$

$$h_2 = (1 - r)(1 + s)/4$$

$$h_3 = (1 + r)(1 + s)/4$$

$$h_4 = (1 + r)(1 - s)/4$$

Tra le coordinate x, y di un punto generico e le coordinate r, s dello stesso punto valgono le seguenti relazioni:

$$4x = \sum_{i=1}^4 h_i x_i = [(1 - r)(1 - s)x_1 + (1 - r)(1 + s)x_2 + (1 + r)(1 + s)x_3 + (1 + r)(1 - s)x_4]$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 h_i y_i = [(1 - r)(1 - s)y_1 + (1 - r)(1 + s)y_2 + (1 + r)(1 + s)y_3 + (1 + r)(1 - s)y_4]$$

La soluzione del sistema di equazioni non lineari è ottenuta iterativamente e, tramite i valori di r ed s , si determinano i parametri ag , F_0 , Tc^* dall'equazione:

$$4p = \sum_{i=1}^4 h_i p_i = [(1 - r)(1 - s)p_1 + (1 - r)(1 + s)p_2 + (1 + r)(1 + s)p_3 + (1 + r)(1 - s)p_4]$$

Dove p rappresenta il parametro cercato.



8.3.1 STIMA DELLA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE

Descrizione:	Realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P.
Committente:	ARCA Capitanata
Cantiere:	Angolo via Di Vagno - via soldato Massa
Località:	San Giovanni Rotondo (FG)
Operatore:	dott. Giancarlo Nigro
Data:	19/03/2015

Vita nominale (Vn): 50 [anni]
Classe d'uso: II
Coefficiente d'uso (Cu): 1,0
Periodo di riferimento (Vr): 50 [anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLO: 30 [anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLD: 50 [anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLV: 475 [anni]
Periodo di ritorno (Tr) SLC: 975 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Coordinate geografiche del punto

Latitudine (WGS84): 41,7050500 [°]
Longitudine (WGS84): 15,7186200 [°]
Latitudine (ED50): 41,7060200 [°]
Longitudine (ED50): 15,7194700 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito:

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]
1	29226	41,713720	15,700780
2	29227	41,712410	15,767730
3	29449	41,662430	15,765940
4	29448	41,663730	15,699050

Tabella 8

Punto d'indagine

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	30	0,057	2,479	0,277
SLD	50	0,075	2,499	0,288
SLV	475	0,206	2,452	0,330
SLC	975	0,272	2,431	0,341

Tabella 9



8.4 PERICOLOSITA' SISMICA DI SITO

E' noto che le sollecitazioni generate da un terremoto in un sito dipendono dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche, litostratigrafiche e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono. La risposta sismica locale consente di definire le modifiche, sia in amplificazione che in frequenza, che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di categoria A, definito al § 3.2.2 delle NTC 2008).

Pertanto i valori dei parametri sismici precedentemente riportati e riferiti a sottosuoli di categoria A, nel caso in esame vanno modificati per tener conto dei valori ricavati dalle indagini sismiche eseguite.

Sulla base del valore di V_{s30} ottenuto è stato possibile classificare i terreni di studio, così come richiesto dalle NTC (D.M. 14/01/2008), come appartenenti alla **categoria A**.

Viene di seguito riportato il report dello studio di risposta sismica locale relativo all'area interessata dalle opere di progetto.

Tale studio è stato eseguito considerando:

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ : 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta = [10/(5+\xi)]^{(1/2)}$: 1,000

Categoria sottosuolo:

A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m

Categoria topografica:

T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media minore o uguale a 15°.

Sono stati ottenuti, quindi, i seguenti coefficienti sismici:

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
k_h	0,011	0,015	0,062	0,082
k_v	0,006	0,007	0,031	0,041
$A_{max} [m/s^2]$	0,555	0,731	2,020	2,666
Beta	0,200	0,200	0,300	0,300

Tabella 10



Calcolati così come segue:

$$K_h = \beta_s \times (A_{\max}/g)$$

$$K_v = \pm 0,5 \times K_h$$

Con:

β_s coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

A_{\max} accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g accelerazione di gravità.

I valori di β_s sono riportati nella tabella 11:

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Tabella 11: Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa al sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio, definita come:

$$A_{\max} = S_S * S_T * a_g$$

S_S (effetto di amplificazione stratigrafica) ($0,90 \leq S_S \leq 1,80$) è funzione di F_0 (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E).

S_T (effetto di amplificazione topografica), varia con il variare delle quattro categorie topografiche:

$$\mathbf{T1: } S_T = 1,0; \quad \mathbf{T2: } S_T = 1,20; \quad \mathbf{T3: } S_T = 1,2; \quad \mathbf{T4: } S_T = 1,40.$$



9. PORTANZA DEL TERRENO (VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI)

L'insieme dei dati, scaturiti dalle elaborazioni dei risultati delle indagini geognostiche, ha permesso di ottenere il modello di Fig.12 e di effettuare le verifiche di stabilità terreno – fondazione (riportate in Appendice), attraverso le quali è stato possibile ricavare la resistenza di progetto (R_d).

A scopo conoscitivo è stato effettuato il calcolo della portanza del terreno di fondazione nel caso di adozione di fondazioni dirette, precisando che esse esprimono solo una modalità d'uso dell'area e che le scelte tecniche spettano al Progettista, sulla base della conoscenza specifica delle strutture da realizzare e della compatibilità di esse con le sollecitazioni trasmesse in fondazione.

I calcoli della portanza sono stati eseguiti assumendo la fondazione diretta di tipo platea; le caratteristiche fondali e la pressione, uniformemente distribuita, considerata vengono di seguito riportate:

$D = 1,50 \text{ m}$	(profond. d'interramento della fondazione rispetto al piano campagna)
$B = 11,60 \text{ m}$	(larghezza della fondazione)
$L = 19,90 \text{ m}$	(lunghezza della fondazione)
$P = 61,0 \text{ KN/m}^2$	(pressione normale di progetto)

Per le verifiche di stabilità terreno-fondazione è stato preso in esame lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), utilizzando l'approccio 1 combinazione 2 ($A2+M2+R2$)(GEO).

I parametri geotecnici, utilizzati per il calcolo, sono riportati in appendice al presente elaborato.

I valori dei coefficienti parziali dei parametri del terreno assunti nei calcoli sono quelli della Tab. 12:

Parametri	Coeff. parziale M1	Coeff.parziale M2
Angolo di resistenza al taglio ($\text{tg } \varphi'$)	1.00	1.25
Coesione efficace c'	1.00	1.25
Resistenza non drenata c_u	1.00	1.40
Peso di volume γ	1.00	1.00

Tabella 12 - coefficienti parziali dei parametri geotecnici del terreno



Nei calcoli della capacità portante, i cui tabulati sono riportati in **Appendice**, si è fatto uso delle relazioni di Terzaghi e Zienkiewicz (1968).

I risultati delle verifiche sono esposti nella Tabella 13, dalla quale risulta che, allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), il valore della resistenza di progetto R_d è maggiore del valore dell'effetto delle azioni di progetto E_d (assunto per ipotesi pari a 61,0 KN/m²), per cui

$$R_d > E_d$$

Condizioni drenate				
Stato Limite considerato	Approccio	Combinazione	R_d (resistenza di progetto) KN/m ²	
			Terzaghi	Zienkiewicz
SLV	1	A2+M2+R2	8980,68	10549,35

Tab. 13 – Valori della resistenza di progetto del terreno



10. RICERCA DEL COEFFICIENTE DI SOTTOFONDO K

Il coefficiente di sottofondo (o coefficiente di reazione del terreno) è il rapporto tra il carico applicato e il conseguente cedimento e rappresenta una forza esercitata, sul suolo con comportamento elastico alla Winkler, su un'area di 1 cm^2 che provoca l'abbassamento di 1 cm.

Nel calcolo di tale coefficiente occorre ricordare che:

- il suo valore non dipende solo dalle proprietà del terreno ma esso varia con l'intensità del carico;
- K è più piccolo quanto maggiore è la superficie di contatto;
- K diminuisce con la ripetizione del carico;
- K diminuisce in presenza di falda.

Tale coefficiente non è affatto una proprietà intrinseca del terreno, ma dipende da forma e dimensioni della fondazione, dalla distribuzione dei carichi agenti, dalla stratigrafia e dalla composizione fisica del suolo.

Nelle ipotesi di calcolo formulate, il valore di tale coefficiente è stato definito attraverso la formula di *Bowles (1982)* :

$$K = 40 \cdot q_a$$

dove:

F_s = fattore di sicurezza

q_a = pressione ammissibile (di esercizio) sul terreno che può essere calcolata attraverso la formula:

$$q_a = \frac{Q_{ult}}{F_s}$$

Il valore di K così ottenuto è il seguente:

$$K = 646608,8 \text{ KN/m}^3 = 65,93 \text{ Kg/cm}^3$$

Tale valore va comunque rivisto in fase di definizione progettuale, al fine di garantire un'adeguata rigidità al sistema fondale.



11. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dallo studio geologico-tecnico del sito esaminato si ricavano le seguenti considerazioni conclusive.

- Il sito in esame è situato, in area sub-pianeggiante, all'interno dell'abitato di San Giovanni Rotondo (FG) alla quota media di circa 549 m s.l.m. Le sue coordinate geografiche sono:

N 41,704998

E 15,718562

- Dal punto di vista stratigrafico, i termini litologici interessati sono rappresentati da una copertura superficiale, avente lo spessore di circa 1,00 metro, costituita da terreno organico limo-argilloso-sabbioso, poggiante sui depositi calcarei a grana fine, intensamente fratturati e degradati, talora carsificati, attraversati dai sondaggi meccanici spinti fino alla profondità di 10 metri dal p.c. Tali depositi presentano cavità e tasche di terra rossa, così come riscontrato lungo la verticale S1.
Il passaggio tra il deposito organico superficiale e quello calcareo sottostante avviene attraverso uno strato di regolite, costituito da frammenti di calcare frammisti ad abbondante terreno organico;
- L'area interessata dal progetto di realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. non risulta essere soggetta a pericolosità idraulica e/o geomorfologica, così come evidenziato dalla cartografia P.A.I. riportata in Fig. 1;
- Le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso, dedotte mediante la procedura proposta da Bieniawsky, sono riportate nel modello litostratigrafico e geotecnico riportato in Fig.12;
- Si ritiene idoneo l'utilizzo di fondazioni di tipo diretto, con piano di posa posto a profondità non inferiore a 1,5 metri dal p.c., ammorsate e poggianti sul deposito calcareo "fresco", dopo aver superato quindi la porzione più superficiale ed organica e lo strato di regolite. Tale fondazione dovrà essere sufficientemente rigida;
- Si precisa che le verifiche di portanza riportate nella relazione sono indicative, in quanto nei calcoli è necessaria la conoscenza esatta degli scarichi in fondazione.



L'ingegnere strutturista, disponendo di maggiori dati inerenti la struttura, avrà la possibilità di definire con precisione il dimensionamento delle fondazioni, la profondità del piano di posa e il carico ammissibile tenendo in considerazione il modello litostratigrafico e geotecnico riportato in Figura 12;

- Le misure tomografiche elettriche di tipo ERT 3D (Electrical Resistivity Tomography) hanno evidenziato, in corrispondenza delle maglie ERT02 e ERT01 la presenza di anomalie compatibili con cavità carsiche. A tal scopo si dovrà prevedere in fase di scavo un'indagine con fioretatura al di sotto del piano di fondazione. Tali indagini dovranno anche interessare le aree che non è stato possibile indagare a causa della presenza di manufatti preesistenti insistenti sull'area di progetto e le aree interessate dalle due anomalie riscontrate nell'indagine sismica. Eventuali vuoti intercettati vanno riempiti con calcestruzzo;
- Le indagini sismiche eseguite (consistenti in prospezione sismica a rifrazione con acquisizione delle onde P ed Sh e metodologia MASW) hanno confermato, per il sito di studio, i litotipi riscontrati durante le perforazioni. Dalle stesse indagini è stata ricavata la categoria di sottosuolo (secondo le NTC2008) che risulta essere la categoria A (valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s);
- La superficie topografica, quasi pianeggiante, consente di classificare il terreno nella categoria topografica T1;
- Eventuali sacche o strati di terra rossa esistenti in corrispondenza del piano di fondazione dovranno venire asportati ricorrendo, se è il caso, anche a getti di acqua e aria in pressione; tutti i vuoti risultanti dovranno venire riempiti di calcestruzzo;
- in fase di realizzazione degli scavi è necessario adottare tutte le precauzioni e la realizzazione di opere di sostegno per scavi aventi profondità superiore a 1,00 ml, in maniera tale da garantire la sicurezza sul cantiere (D. Lgs. 81/08);
- I valori di A_{max} attesa al sito, per i diversi stati limite, sono:

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
A_{max} [m/s ²]	0,555	0,731	2,020	2,666

ACCADIA, Marzo 2015

Il geologo
Dott. Giancarlo Nigro





APPENDICE

- VERIFICA TERRENO-FONDAZIONE



CALCOLO PORTANZA DI FONDAZIONI SUPERFICIALI

NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Norme tecniche per le Costruzioni 2008

Norme tecniche per le costruzioni D.M. 14 gennaio 2008.

Eurocodice 7

Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.

Eurocodice 8

Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

CARICO LIMITE DI FONDAZIONI SU ROCCIA

Per la valutazione della capacità portante ammissibile delle rocce si deve tener conto di di alcuni parametri significativi quali le caratteristiche geologiche, il tipo di roccia e la sua qualità, misurata con l'RQD. Nella capacità portante delle rocce si utilizzano normalmente fattori di sicurezza molto alti e legati in qualche modo al valore del coefficiente RQD: ad esempio, per una roccia con RQD pari al massimo a 0.75 il fattore di sicurezza varia tra 6 e 10. Per la determinazione della capacità portante di una roccia si possono usare le formule di Terzaghi, usando angolo d'attrito e coesione della roccia, o quelle proposte da **Stagg** e **Zienkiewicz** (1968) in cui i coefficienti della formula della capacità portante valgono:

$$N_q = \tan^6 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$
$$N_c = 5 \tan^4 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$
$$N_\gamma = N_q + 1$$

Con tali coefficienti vanno usati i fattori di forma impiegati nella formula di Terzaghi.

La capacità portante ultima calcolata è comunque funzione del coefficiente RQD secondo la seguente espressione:

$$q' = q_{ult} (RQD)^2$$

Se il carotaggio in roccia non fornisce pezzi intatti (RQD tende a 0), la roccia viene trattata come un terreno stimando al meglio i parametri c e ϕ .

FATTORI CORRETTIVI SISMICI: PAOLUCCI E PECKER

Per tener conto degli effetti inerziali indotti dal sisma sulla determinazione del q_{lim} vengono introdotti i fattori correttivi z :

$$z_q = \left(1 - \frac{k_h}{\tan \phi} \right)^{0,35}$$
$$z_c = 1 - 0,32 \cdot k_h$$
$$z_\gamma = z_q$$



Dove K_h è il coefficiente sismico orizzontale.

Calcolo coefficienti sismici

Le **NTC 2008** calcolano i coefficienti K_h e K_v in dipendenza di vari fattori:

$$K_h = \beta \times (A_{\max}/g)$$

$$K_v = \pm 0,5 \times K_h$$

β = coefficiente di riduzione accelerazione massima attesa al sito;

A_{\max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità;

Tutti i fattori presenti nelle precedenti formule dipendono dall'accelerazione massima attesa sul sito di riferimento rigido e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio.

$$A_{\max} = S_S S_T a_g$$

S_S (effetto di amplificazione stratigrafica): $0.90 \leq S_S \leq 1.80$; è funzione di F_0 (Fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e della categoria di suolo (A, B, C, D, E).

S_T (effetto di amplificazione topografica) per fondazioni in prossimità di pendii.

Il valore di S_T varia con il variare delle quattro categorie topografiche introdotte:

$$T1 (S_T = 1.0) \quad T2 (S_T = 1.20) \quad T3 (S_T = 1.20) \quad T4 (S_T = 1.40).$$

Questi valori sono calcolati come funzione del punto in cui si trova il sito oggetto di analisi. Il parametro di entrata per il calcolo è il tempo di ritorno dell'evento sismico che è valutato come segue:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - PVR)$$

Con V_R vita di riferimento della costruzione e PVR probabilità di superamento, nella vita di riferimento, associata allo stato limite considerato. La vita di riferimento dipende dalla vita nominale della costruzione e dalla classe d'uso della costruzione (in linea con quanto previsto al punto 2.4.3 delle NTC). In ogni caso V_R dovrà essere maggiore o uguale a 35 anni.

Per l'applicazione dell'**Eurocodice 8** (progettazione geotecnica in campo sismico) il coefficiente sismico orizzontale viene così definito:

$$K_h = a_{gR} \cdot \gamma_I \cdot S / (g)$$

a_{gR} : accelerazione di picco di riferimento su suolo rigido affiorante,

γ_I : fattore di importanza,

S : soil factor e dipende dal tipo di terreno (da A ad E).

$$a_g = a_{gR} \cdot \gamma_I$$

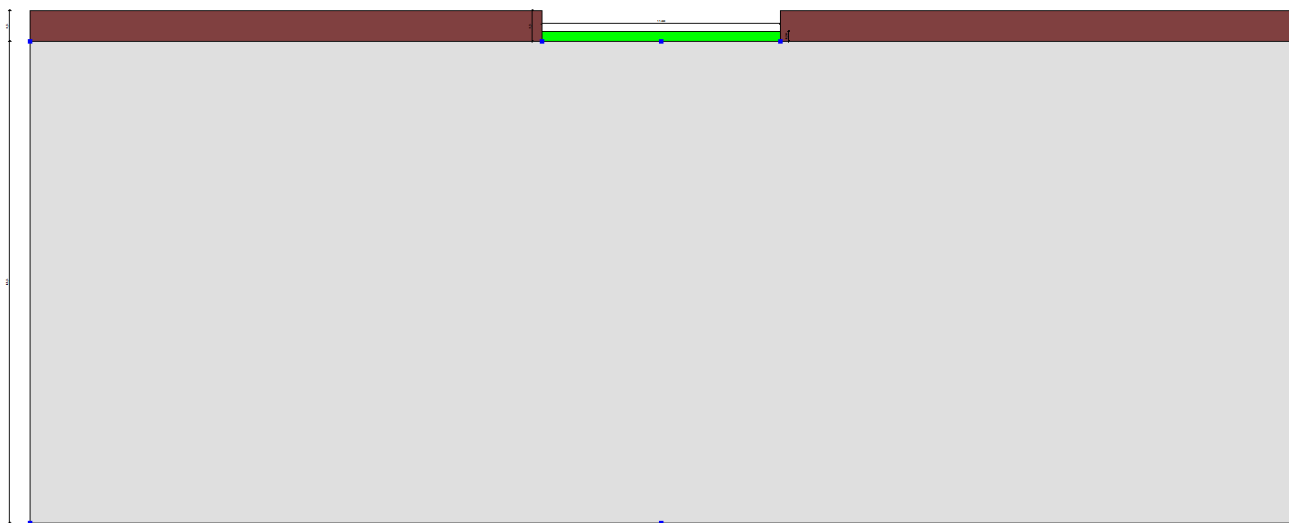
è la "design ground acceleration on type A ground".

Il coefficiente sismico verticale K_v è definito in funzione di K_h , e vale:

$$K_v = \pm 0.5 \cdot K_h$$



DATI GENERALI



Azione sismica	NTC 2008
Larghezza fondazione	11,6 m
Lunghezza fondazione	19,9 m
Profondità piano di posa	1,5 m
Altezza di incastro	1,5 m

SISMA

Accelerazione massima (ag/g)	0,2059
Effetto sismico secondo	NTC(C7.11.5.3.1)
Coefficiente intensità sismico terreno [Khk]	0,062
Coefficiente intensità sismico struttura [Khi]	0,309

STRATIGRAFIA TERRENO

Corr: Parametri con fattore di correzione (TERZAGHI)

DH	Gam	Gams	Fi	c	E	RQD[-]	Ni	Lit.	Desc.
[m]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]				
1,5	17,0	17,0	20,0	15,0	4000,0	0,0	0,4		terreno organico
23,5	23,53	23,53	15,0	100,0	1395800,0	4,0	0,0		calcare fratturato



Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazioni	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A1+M1+R1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Progetto
2	A2+M2+R2	61,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Progetto
3	Sisma	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Progetto
4	S.L.E.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Servizio
5	S.L.D.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Servizio

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef.Rid.Ca pacità portante orizzontale
1	No	1	1	1	1	1	1	1
2	Si	1,25	1,25	1,4	1	1	1,8	1,1
3	No	1,25	1,25	1,4	1	1	1,8	1,1
4	No	1	1	1	1	1	1	1
5	No	1	1	1	1	1	1	1

CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A2+M2+R2

Autore: Terzaghi

Carico limite [Qult] 16165,22 kN/m²
Resistenza di progetto[Rd] 8980,68 kN/m²
Tensione [Ed] 61,0 kN/m²
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed] 265,0
Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)
Costante di Winkler 646608,8 kN/m³



A2+M2+R2

Autore: Zienkiewicz

Fattore [Nq]	3,58
Fattore [Nc]	11,71
Fattore [Ng]	4,58
Fattore forma [Sc]	1,0
Fattore forma [Sg]	1,0

Carico limite	18988,83 kN/m ²
Resistenza di progetto	10549,35 kN/m ²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

Autore: Terzaghi

Fattore [Nq]	3,32
Fattore [Nc]	10,82
Fattore [Ng]	1,72
Fattore forma [Sc]	1,0
Fattore forma [Sg]	1,0

Carico limite	16165,22 kN/m ²
Resistenza di progetto	8980,68 kN/m ²

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

ALLEGATI

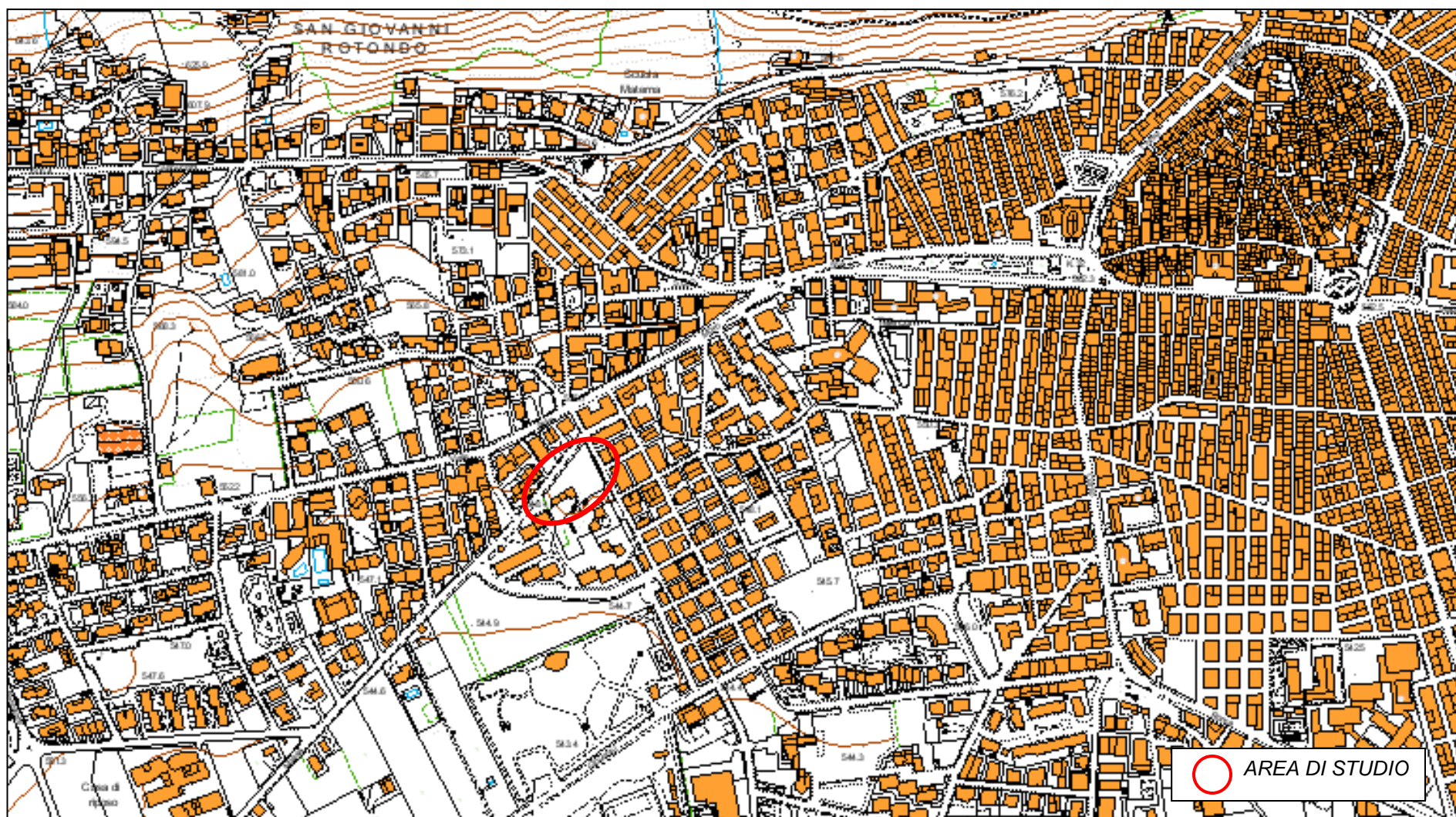
- ALLEGATO 1 – INQUADRAMENTO SU COROGRAFIA 1:20.000
- ALLEGATO 2 – INQUADRAMENTO SU ORTOFOTO
- ALLEGATO 3 – INQUADRAMENTO SU STRALCIO DELLA C.T.R.
- ALLEGATO 4 – PLANIMETRIA DI PROGETTO



INQUADRAMENTO SU ORTOFOTO



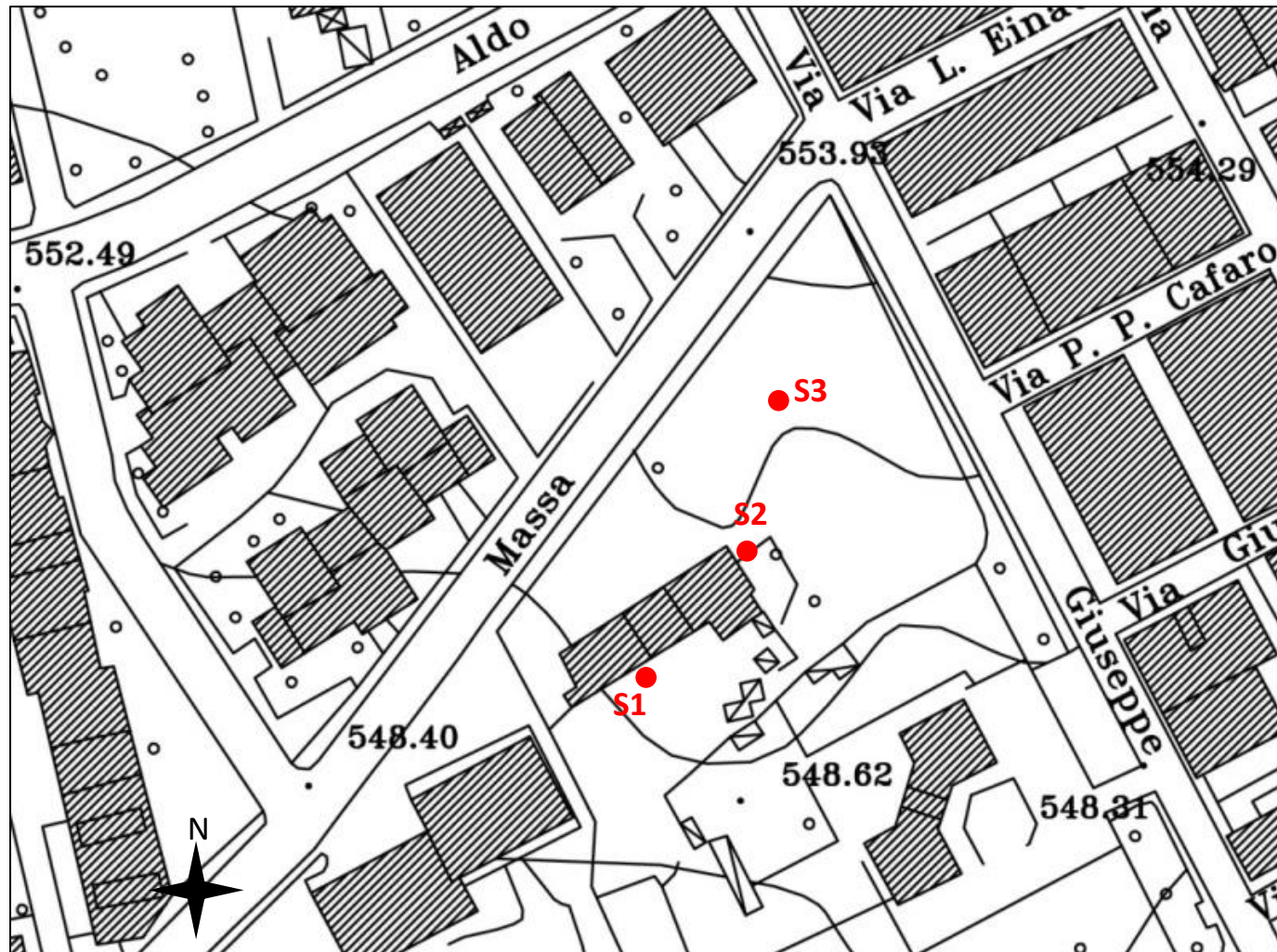
STRALCIO DELLA CARTA TECNICA REGIONALE





SONDAGGI GEOGNOSTICI

- ALLEGATO 1 – UBICAZIONE SONDAGGI GEOGNOSTICI
- ALLEGATO 2 – SCHEDE DI SONDAGGIO
- ALLEGATO 3 – DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



**UBICAZIONE SONDAGGI
GEOGNOSTICI**



SONDAGGI GEOGNOSTICI ESEGUITI

Dott. GIANCARLO NIGRO

Via Borgo, 48 - 71021 Accadia (FG)

Cell. 329/1578728 e-mail: giancarlo.nigro@gmail.com

Committente ARCA Capitanata	Profondità raggiunta 10 m dal p.c.	Quota Ass. P.C.	Certificato n°	Pagina
Operatore Amatore L.	Indagine San Giovanni Rotondo (FG)	Note1		Inizio/Fine Esecuzione 10/03/2015-10/03/2015
Responsabile Dott. Giancarlo Nigro	Sondaggio S1	Tipo Carotaggio carotaggio continuo	Tipo Sonda Casagrande C6	Coordinate X Y 41.704787 15.718428

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Podest Test kg/cmq	Varie Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Catalog.	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o Inclino metro (I)
1		Terreno vegetale di colore marrone scuro costituito da limo argilloso-sabbioso. Presenza di inclusi lapidei.	0.90	%C=100											
		Regolite.	1.30	%C=100											
2		Calcarei micritici molto fratturati di colore bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano carsificati.	2.00	%C=100											
		Sacca di terra rossa	2.25	%C=100											
		Calcarei fortemente fratturati bianco-rosati.	2.70	%C=100											
3		Sacca di terra rossa	3.10	%C=100											
4		Calcarei micritici fortemente fratturati e degradati di colore bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano degradati e, talora, carsificati. Presenza di macrofossili.		%RQD=4 %C=100											
5															
6		Cavità	6.00												
		Calcarei fratturati	6.15												
		Cavità	6.30	%C=100											
			6.40												
7		Calcarei micritici fortemente fratturati e degradati di colore bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano degradati e, talora, carsificati.		%C=100											
8															
9															
10			10.00												

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT

Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande

Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua

Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici

Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa

Carotaggio: carotaggio continuo

Sonda: Casagrande C6

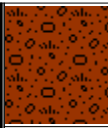
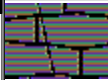







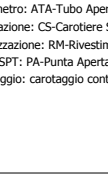
Responsabile

Dott. GIANCARLO NIGRO

Via Borgo, 48 - 71021 Accadia (FG)

Cell. 329/1578728 e-mail: giancarlo.nigro@gmail.com

Committente ARCA Capitanata	Profondità raggiunta 10 m dal p.c.	Quota Ass. P.C.	Certificato n°	Pagina
Operatore Amatore L.	Indagine San Giovanni Rotondo (FG)	Note1	Inizio/Fine Esecuzione 09/03/2015-09/03/2015	
Responsabile Dott. Giancarlo Nigro	Sondaggio S2	Tipo Carotaggio carotaggio continuo	Tipo Sonda Casagrande C6	Coordinate X Y 41.704957 15.718616

Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Class. Catalog.	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o Inclinometro (I)
1		Terreno vegetale di colore marrone scuro costituito da limo argilloso-sabbioso. Presenza di inclusi lapidei.	0.90	% C=100											
2		Regolite.	1.50	% C=100											
3		Calcarei micritici molto fratturati di colore bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano carsificati. Presenza di macrofossili.													
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10			10.00												

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elca Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: carotaggio continuo

Sonda: Casagrande C6

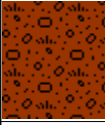


Responsabile

Dott. GIANCARLO NIGRO

Via Borgo, 48 - 71021 Accadia (FG)

Cell. 329/1578728 e-mail: giancarlo.nigro@gmail.com

Committente ARCA Capitanata	Profondità raggiunta 10 m dal p.c.	Quota Ass. P.C.	Certificato n°	Pagina
Operatore Amatore L.	Indagine San Giovanni Rotondo (FG)	Note1	Inizio/Fine Esecuzione 09/03/2015-10/03/2015	
Responsabile Dott. Giancarlo Nigro	Sondaggio S3	Tipo Carotaggio carotaggio continuo	Tipo Sonda Casagrande C6	Coordinate X Y 41.705136 15.718696

Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T. (n° Colpi)	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Carabig.	Falda	Altre prove	Altre prove	Piezometro (P) o Inclino metro (I)
1		Terreno vegetale di colore marrone scuro costituito da limo argilloso-sabbioso. Presenza di inclusi lapidei.	0.90	%C=100											
		Regolite.	1.30	%C=100											
2		Calcarei micritici molto fratturati di colore bianco-rosato. I giunti di stratificazione si presentano carsificati. Presenza di macrofossili.													
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10			10.00												

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: carotaggio continuo

Sonda: Casagrande C6

Responsabile

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

Sondaggio S1



Foto 1-2: Postazione del sondaggio S1



Foto 3: cassetta catalogatrice 0-5 metri



Foto 4: cassetta catalogatrice 5-10 metri

Sondaggio S2



Foto 5-6: Postazione del sondaggio S2



Foto 7: cassetta catalogatrice 0-5 metri



Foto 8: cassetta catalogatrice 5-10 metri

Sondaggio S3



Foto 9-10: Postazione del sondaggio S3



Foto 11: cassetta catalogatrice 0-5 metri



Foto 12: cassetta catalogatrice 5-10 metri

PROVINCIA DI FOGGIA
COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO

COMMITTENTE:

Spett.le
Dott. Geol. Giancarlo Nigro
via Borgo 48 – 71021 Accadia (Fg)

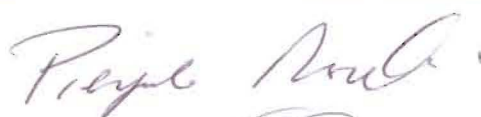
PROGETTO:

Progetto per la realizzazione di nuove
costruzioni di E.R.P. nel comune di San
Giovanni Rotondo(Fg)

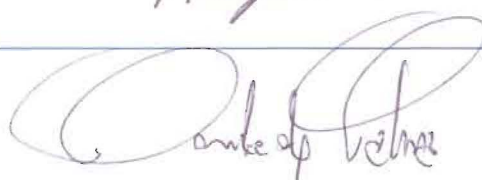
Relazione GEOFISICA

**Indagini Geofisiche di integrazione alla relazione
Geologica:
Sismica a Rifrazione in onde P ed SH, MASW**

Dott. Geol. Pierpaolo Moretti
Ordine dei Geologi della
Regione Puglia n°786



Dott. Davide de Palma
Geofisico



1. Introduzione e normativa di riferimento

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati della campagna di indagine geofisica eseguita nelle date 12-13-14/03/2015 per l'esecuzione di Geoelettrica ERT 3D e del 16/03/2015 per l'esecuzione di indagini sismiche a rifrazione in P ed SH, con l'acquisizione di una MASW per la Vs30; nel comune di San Giovanni Rotondo (FG) per i lavori riguardante il **“PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE COSTRUZIONI DI E.R.P. NEL COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO (FG)”** nei pressi di via soldato Antonio Massa.

Lo studio, come da piano di indagine, ha seguito il seguente sviluppo:

- n°1 prospezione di sismica a rifrazione in onde P ed SH (REF).
- n°1 prospezione Multichannel analysis of Surface Waves (MASW)
- n°3 prospezioni di geoelettrica 3D (ERT 3D)
- Elaborazione dei dati raccolti.

Questo elaborato tiene conto esclusivamente dei risultati riguardanti la sismica a rifrazione e Masw.

Lo scopo dell'indagine, oltre alla stima del parametro Vs30 caratteristico dell'area, ovvero la velocità equivalente delle onde sismiche di taglio nei primi 30 m di profondità rispetto alla quota di imposta della fondazione, come prescritto dall'art. 3.2.2 del D.M. 14 gennaio 2008, è quello di offrire un contributo all'implementazione di un modello geologico - geotecnico dell'area di indagine.

Mediante l'indagine di sismica a rifrazione in onde P ed in onde SH si è potuto caratterizzare la stratigrafia sismica del sottosuolo in termini di spessori e velocità sismiche in onde P (Vp) ed in onde SH (Vsh); è stato inoltre possibile **calcolare sperimentalmente** i moduli dinamici caratterizzanti i litotipi oggetto di studio. L'indagine MASW ha reso possibile la valutazione dei valori di velocità delle onde di taglio mediate sui primi 30 m (Vs30), così come previsto da:

- **D. Min. Infrastrutture 14/01/2008** (Suppl. Ord. alla G.U. 4.2.2008, n. 29 – *Approvazione delle norme tecniche per le costruzioni*).
- **Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 02/02/2009, n. 617 C.S.LL.PP.** (Suppl.Ord. alla G.U. 26.2.2009, n. 47 – *Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008*)

Le indagini sono state condotte seguendo linee guida nazionali ed internazionali:

- **Linee guida per indagini geofisiche A.S.G** (Associazione Società di Geofisica)
- **ASTM D 5777 - 95** (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation).

2. Ubicazione indagini

L'indagine sismica sono state eseguite lungo via Soldato Antonio Massa (vedi fig. 2).

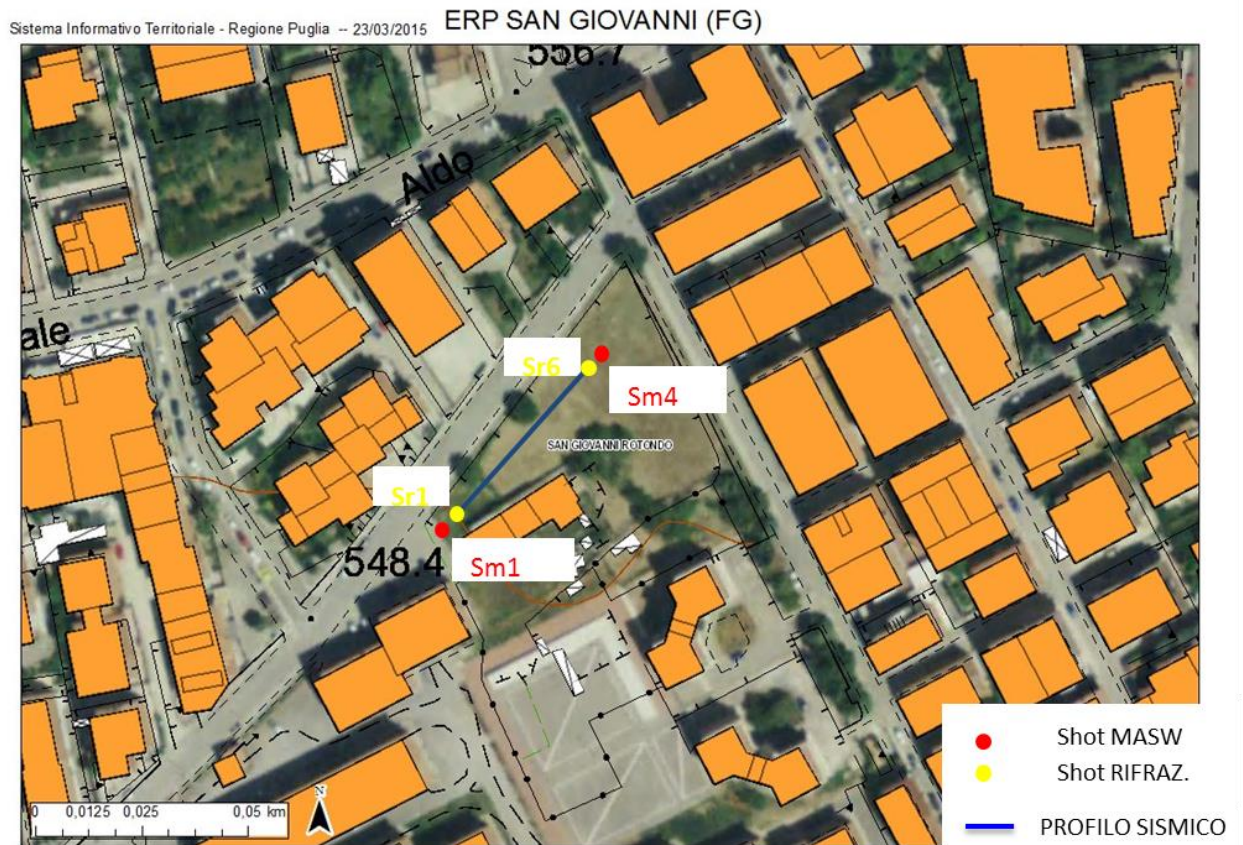


Fig.1 – ubicazione area di indagine (CTR, SIT Puglia).

Per le coordinate relative all'indagine di sismica a rifrazione e MASW si è fatto riferimento al sistema geografico UTM (Tab. I).

	E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	Lunghezza (m)
REF01	559761.62	4617254.65	559795.03	4617292.02	50
MASW01	559757.80	4617250.33	559795.03	4617292.02	54

Tab.I – Coordinate degli estremi dei profili di sismica a rifrazione e MASW. Sistema di riferimento UTM - datum WGS84 - fuso 33T

3. Descrizione dei metodi

3.1 Sismica 2D in onde P ed SH

Le indagini di sismica a rifrazione permettono la ricostruzione delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, le profondità del substrato (entro i limiti di penetrazione del metodo), la verifica di eventuali discontinuità laterali nonché di determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali attraverso la determinazione dei moduli elastici dinamici mediante correlazioni tra i valori di V_p e V_s ed i suddetti parametri. Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della birifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche ed uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde rifratte. Tali onde giungono sulla superficie rifrangente (discontinuità individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse) con un angolo di incidenza critico (legge di Snell) e vengono quindi rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà alla base di tale fenomeno possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche. Sulla superficie da investigare si posizionano i trasduttori verticali sensibili al del moto del suolo (velocimetri o accelerometri) ad una certa distanza dalla sorgente sismica che può essere per la generazione di onde P, una massa battente (diversamente applicata e guidata), un fucile sismico o una carica esplosiva a seconda della lunghezza dello stendimento e della profondità di indagine richiesta. Diversamente per le onde SH si utilizzano trasduttori orizzontali e la sorgente viene generata da una piastra di metallo o legno infissa nel suolo e posta perpendicolarmente alla stesa sismica, questa viene pesantemente battuta ai 2 lati, generando impulsi polarizzati. Nell'indagine sismica a rifrazione i trasduttori situati più vicino alla sorgente rilevano prima l'onda diretta che arriva con velocità legata alle caratteristiche meccaniche dello strato di terreno più superficiale, mentre quelli più lontani rilevano le onde rifratte che viaggiano a velocità più elevata. Conoscendo i tempi di primo arrivo e la distanza geofono-sorgente, tramite l'analisi delle curve dei primi arrivi ad ogni trasduttore (dromocrone) si può determinare la velocità dei vari strati; da qui produrre una stratigrafia sismica da correlare alle formazioni geologiche o discontinuità presenti nella serie investigata nel sottosuolo. I principi sin qui esposti sono validi indipendentemente dal tipo di polarizzazione dell'onda (P o SH). L'indagine di sismica a rifrazione si basa sulla determinazione dei primi arrivi (*First Break Picking*) i quali sottoposti ad un apposito algoritmo di inversione, permette di ricostruire la distribuzione bidimensionale delle velocità sismiche.

3.2 MASW

Il metodo MASW, Multichannel Analysis of Surface Waves, (Park et al., 1999) è una tecnica di indagine che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. La determinazione delle V_s viene ottenuta tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali e correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo. A partire dall'intero campo

d'onda, acquisito in campagna utilizzando un numero variabile di geofoni (di solito 12-24) allineati a spaziatura regolare (similmente a un classico esperimento di sismica a rifrazione), l'obiettivo del metodo è di derivare una curva di dispersione sperimentale velocità di fase – frequenza ($cf-f$), la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare. Dato che le onde superficiali mostrano le ampiezze e le durate maggiori nel dominio spazio-tempo, anche nel dominio frequenza-velocità di fase, i massimi dello spettro saranno relativi alle differenti frequenze con cui si propagano le onde superficiali stesse. Dall'estrazione delle coppie frequenza velocità di fase corrispondenti ai massimi d'intensità dello spettro si deriva la curva di dispersione sperimentale. In realtà, l'interpretazione degli spettri risulta spesso complicata dall'intrecciarsi dei modi superiori rispetto a quello fondamentale e/o alla generazione e propagazione di onde guidate. Per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio è poi necessario procedere alla fase d'inversione della curva di dispersione per ottenere un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo. Un miglioramento nell'individuazione di un modello più accurato può essere ottenuto, come è stato fatto nel presente lavoro, utilizzando, nel processo di inversione, curve relative a più modi di vibrazione

4. Strumentazione utilizzata

4.1 Sismica a rifrazione e MASW

L'attrezzatura utilizzata sia per le indagini di sismica a rifrazione che MASW consta di:

- sistema energizzante per le onde P e Rayleigh :: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente verticalmente su una piastra di alluminio (fig.3a) adagiata opportunamente al suolo, per la generazione prevalente di onde P ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.

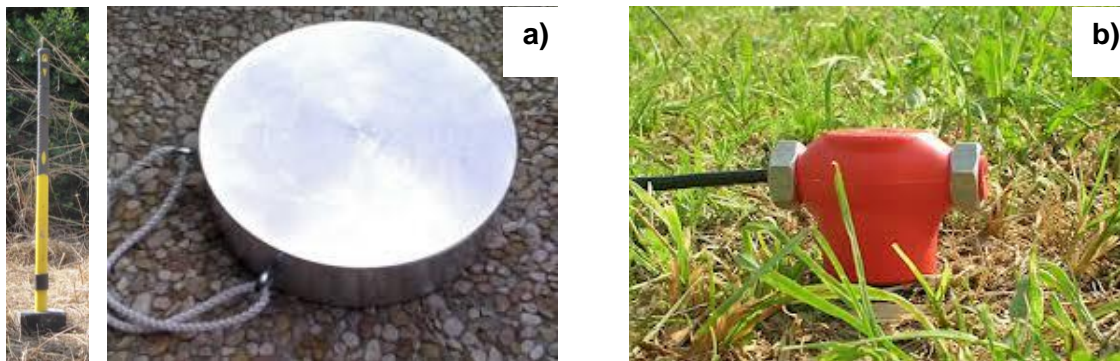


Fig. 2a - Foto del sistema energizzante utilizzato per la generazione onde P e del sistema di ricezione: a), mazza (8 Kg) e piastra di battuta, b) geofoni verticali.

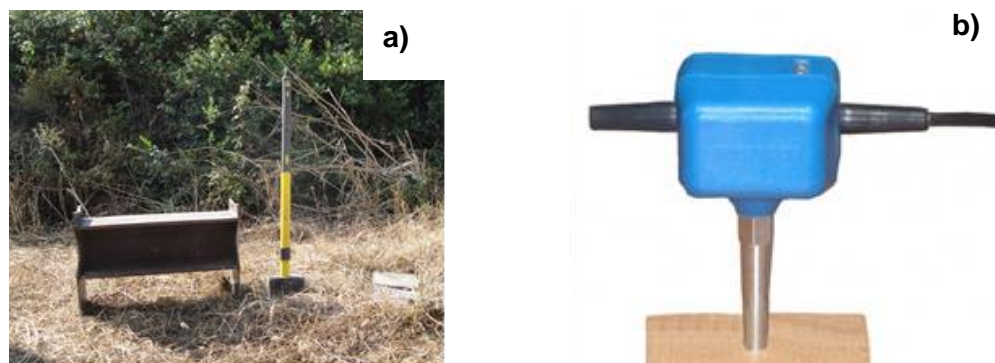


Fig. 2b - Foto del sistema energizzante utilizzato per la generazione di onde SH e del sistema di ricezione: a), mazza (8 Kg) e piastra di battuta, b) geofoni orizzontali.

- sistema energizzante per le onde SH: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 Kg battente orizzontalmente su parallelepipedo in ferro del peso di 70 kg disposto ortogonalmente allo stendimento e parallelamente alla componente di registrazione dei geofoni orizzontali, infisso nel suolo a percussione grazie a 2 asole poste alla estremità che ne hanno favorito l'infissione ed infine gravato dal peso dell'operatore in modo da favorire ulteriormente l'accoppiamento sorgente-suolo. Con questo dispositivo è stato possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con generazione di onde P trascurabile. Le registrazioni vengono effettuate alternativamente su entrambi i lati, mediante massa battente, e sommate con polarità scambiata in modo da migliorare l'individuazione dell'onda di taglio polarizzata orizzontalmente che viene generata.
- sistema di ricezione: per le indagine sono stati utilizzati 24 geofoni verticali (onde P) del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz (fig.3a) e 24 geofoni orizzontali (onde SH) del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 8 Hz (fig.3b).
- trigger: le metodologie utilizzate, in quanto attive, prevedono che l'inizio della registrazione sia individuato mediante un *trigger* il quale consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra. L'impulso generato, inviato al sistema di acquisizione, consente di fissare il tempo zero di riferimento per il calcolo dei tempi di percorso delle onde generate.
- sistema di acquisizione dati: nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a multicanale a conversione digitale. Il modello (M.A.E. A6000SE) tratta di un sistema *combo* che sviluppa ottime performance sia per acquisizione di sismiche che per misure geoelettriche. Tale modello possiede risoluzione di acquisizione pari a 24 bit (Tecnologia Delta Sigma) ed è in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica minima a 24 bit (Tab.III). Esso è collegato a ciascuno dei geofoni in ed al sensore del trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger.

Converters	24 bit resolution, sigma-delta technology
Dynamic range:	144 dB (theoretical)
Maximum distortion	+/-0.0010%
Band width	2Hz-30KHz
Common mode rejection	110 dB at 60 Hz
Diaphony:	-120dB at 20Hz
Noise threshold of the programmable amplifier	27 nV
Trigger precision:	1/30 of the sampling time
Maximum range of inlet signal	+/-5V
Inlet impedance at 1000 samples/second	20MΩ
Amplification levels	0 dB, 6 dB, 12 dB, 18 dB, 24 dB, 30 dB, 36 dB
Anti-alias filter	-3dB
Pre-trigger time	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 50, 100, 200

Tab. II: specifiche tecniche M.A.E. A6000SE (esplorazione

5. Acquisizione

5.1 Sismica a rifrazione in onde P ed SH

Lo stendimento sismico è stato realizzato utilizzando 24 canali d'acquisizione, adottando una distanza intergeofonica pari a 2.0 m. L'acquisizione dei dati sismici è stata condotta secondo la seguente configurazione spazio temporale:

- n° geofoni: 24
- distanza intergeofonica: 2.00 m
- n° 4/9 shot per ogni punto di energizzazione da sottoporre al processo di stacking in fase di processing per ottimizzare il rapporto signal/noise.
- tempo di acquisizione: 0.136 s
- intervallo di campionamento 0,26 μ s.

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismostratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points) rispetto al profilo, vengono disposti ai suoi estremi (end) ed a distanze variabili entro il profilo stesso (punti di scoppio centrali). In questa occasione sono stati utilizzati 8 *shot points*.

- 2 *end-shots* posti rispettivamente a -2 e +48 m rispetto al geofono 1.
- 4 intermedi posti rispettivamente in corrispondenza del 5°, 10°, 15° e 20° geofono.

I dati sismici sono stati acquisiti utilizzando un numero di *shots* piuttosto elevato contribuendo ad incrementare la capacità risolutiva del metodo.

5.2 MASW

L'acquisizione dei dati sismici è stata condotta secondo la seguente configurazione:

- n° geofoni: 24
- distanza intergeofonica di 2.00 m per complessivi 46 m di rilievo
- n° 4 punti di energizzazione distanti -8 m dal I geofono (Sm1), -2 m dal I geofono (Sm2), +2 m (Sm3) dall'ultimo geofono e +8 m dall'ultimo geofono dello stendimento.
- n° 4/8 shot per ogni punto di energizzazione da sottoporre al processo di stacking in fase di processing per ottimizzare il rapporto signal/noise.
- tempo di acquisizione: 2.8 s
- frequenza di campionamento: 4000 Hz

6. ELABORAZIONE

6.1 Sismica in onde p e onde sh

Il processing dei dataset di sismica a rifrazione in onda P ed SH è stato condotto mediante il Software RAYFRAC (Intelligent Resources Inc., Canada), studiato per l'elaborazione di dati relativi ad indagini sismiche eseguite in superficie, realizzate sia con onde P che S, per scopi geotecnico-ingegneristici, ambientali, nonché per l'esplorazione nel campo delle georisorse. Rayfract consente sia la ricostruzione della geometria dei rifrattori con la sismica a rifrazione tradizionale, che la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche.

Il metodo della tomografia sismica è una tecnica di indagine che permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un alto potere risolutivo, in funzione delle modalità di acquisizione, offrendo la possibilità di ricostruire anomalie e discontinuità stratigrafiche anche particolarmente complesse.

Lo schema di processing tomografico 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 “Fronti d’onda” (Brückl 1987; Jones and Jovanovich 1985) e del Plus-minus (Hagedoorn 1959), fondata su una regressione del campo dei tempi di primo arrivo (Brückl 1987). Tale metodo può essere considerato un’ottimizzazione dell’algoritmo del GRM, capace di risolvere l’immagine dei rifrattori con andamenti topografici molto accidentati. A partire dal modello sopraccitato è stato quindi utilizzato il codice di calcolo per la modellazione tomografica che utilizza, nell’algoritmo d’inversione, un “raytracing” con raggi curvilinei e metodi di calcolo ai minimi quadrati 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.

Si ricostruisce in tal modo un modello di velocità, che può essere migliorato attraverso successive iterazioni: la fase di calcolo si conclude quando si ha la migliore sovrapposizione fra i tempi di primo arrivo calcolati e quelli misurati.

6.2 MASW

L’analisi dei dati acquisiti dalla metodologia avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità;
2. Individuazione del *modo fondamentale* e degli eventuali superiori;
3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa *picking* della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato *modo*;
4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Nel metodo MASW le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. In questo caso il segnale può essere rappresentato come una funzione $u(x,t)$ dove x è lo spazio e t il tempo. Applicando ai segnali la trasformata di Fourier lungo l’asse dei tempi otteniamo la funzione $U(x,f)$:

$$U(x, f) = \int u(x, t) e^{ift} dt \quad (1)$$

La funzione $U(x,f)$ può essere espressa come la moltiplicazione di due termini separati:

$$U(x, f) = P(x, f) A(x, f) \quad (2)$$

dove $P(x,f)$ e $A(x,f)$ rappresentano rispettivamente lo spettro di fase e di ampiezza. Nella funzione $U(x,f)$ ogni componente in frequenza è completamente separata dalle altre e l’informazione del tempo di arrivo è preservata nello spettro di fase $P(x,f)$. Nella funzione $P(x,f)$ sono contenute inoltre tutte le informazioni relative alla dispersione delle onde superficiali di Rayleigh mentre la funzione $A(x,f)$ contiene tutte le informazioni inerenti l’attenuazione e la divergenza sferica. Tenendo conto della rappresentazione esponenziale dello spettro di fase la (2) può essere espressa come:

$$U(x, f) = e^{-i\theta_k} A(x, f) \quad (3)$$

Dove $F=f/cf$ con f = frequenza angolare e cf = velocità di fase per ogni frequenza.

Operando un integrale di linea in dx e normalizzando per il modulo della funzione $|U(x, f)|$, otteniamo la funzione $V(f, \varphi)$:

$$V(f, \varphi) = \int e^{i\varphi x} [U(x, f) / |U(x, f)|] dx = \int e^{-i(\Phi - \varphi)x} [A(x, f) / |A(x, f)|] dx \quad (4)$$

La funzione $V(f, \varphi)$, ottenuta dalla trasformazione integrale, può essere pensata come la somma, lungo tutto lo stendimento, del campo d'onda relativo ad ogni frequenza, applicando uno shift di fase dipendente dall'offset, al campo d'onda, per un'assunta velocità di fase $cf = f/\varphi$.

La normalizzazione al modulo della funzione $|U(x, f)|$, minimizza i fenomeni di attenuazione e di divergenza sferica. Risulta ovvio che la funzione $V(f, \varphi)$ avrà un massimo in corrispondenza di un valore:

$$\varphi = F = f / cf \quad (5)$$

Per un dato valore di φ dove si verifica un massimo della funzione $V(f, \varphi)$, la velocità di fase cf può essere determinata.

Tenendo conto che $cf = f/\varphi$ la funzione $V(f, \varphi)$ può essere trasformata nella funzione $I(f, cf)$ che viene definita spettro di velocità di fase. In essa lungo l'asse cf appariranno dei picchi che soddisferanno, per ogni frequenza, l'equazione (5). Il luogo dei punti lungo questi massimi, per differenti valori di frequenza f , permettono di identificare le curve di dispersione delle velocità di fase dei modi di oscillazione dell'onda superficiale di Rayleigh.

Generalmente quando la rigidità degli strati aumenta gradualmente con la profondità il modo fondamentale risulta predominante a tutte le frequenze. Tuttavia esistono diverse stratigrafie, con strati rigidi compresi tra strati soffici o strati soffici compresi tra strati rigidi o con variazioni brusche di rigidità con la profondità, in cui i modi superiori al primo diventano predominanti in certi intervalli di frequenza (Roma, 2006). Per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio è poi necessario procedere alla fase d'inversione della curva di dispersione per ottenere un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo. Nel nostro caso il processing dei dataset è stato condotto mediante il modulo MASW del Software ZondST2D.

6.3 Calcolo moduli dinamici

Il valore della densità, utilizzato per la stima dei moduli dinamici, è stato fornito dalla committenza e risulta pari a 16.0 KN/m^3 per i terreni superficiali e 23.53 KN/m^3 per i materiali litoidi. (Nafe & Drake, 1965). In tal modo è stato possibile calcolare i moduli dinamici mediante i valori di V_p e V_{sh} estrapolati dall'indagine di sismica a rifrazione per ciascun sismostrato individuato dalla medesima indagine. Questa operazione ottenuta tramite il software *Surfer 11* ha permesso una mappatura 2D di tali parametri.

Il modulo di Young E (o modulo di elasticità longitudinale) è definito a partire dalla legge di Hooke:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

σ : sforzo, viene misurato in pascal.

ε : deformazione, è una grandezza adimensionale, spesso la si esprime in percentuale.

Il modulo di Young viene determinato dal diagramma sforzo-deformazione (fig.3a) mediante la formula appena vista, nel tratto in cui il materiale subisce una deformazione elastica (ovvero rimuovendo lo sforzo il materiale deve essere in grado di ritornare alle dimensioni iniziali).

Il **modulo di taglio μ** , detto anche modulo di scorrimento, di rigidità o di elasticità tangenziale, è una costante di Lamè che esprime il rapporto sforzo-deformazione tangenziali (fig.6b).

Data una piastra di lunghezza indefinita di spessore h , perpendicolare all'asse x , sulle cui facce agisce una coppia di tensioni tangenziali (o di taglio) di verso opposto T_1 e $-T_1$, si produrrà uno spostamento $\delta l / 2$ nel senso delle z positive e $\delta l / 2$ nel senso opposto. In pratica è come se una faccia rimanesse ferma e si producesse uno spostamento di δl .

Lo spostamento totale δl sarà in relazione allo sforzo di taglio T_1 e allo spessore h secondo la relazione:

$$\delta l = \frac{1}{\mu} h T_1$$

dove μ è il modulo di taglio.

Considerando lo spostamento angolare α , ponendo l'angolo uguale alla sua tangente, la relazione diventerà semplicemente:

$$\alpha = \frac{T_1}{\mu}$$

Il **modulo bulk k** (o modulo di compressibilità) di una materiale definisce la capacità della stessa di resistere ad una forza di compressione uniforme. È definito come l'incremento di pressione necessario a causare un relativo decremento di volume (fig.6c) secondo la relazione:

$$K = -V \frac{\partial p}{\partial V}$$

dove K è appunto il modulo di compressibilità, p la pressione e V il volume.

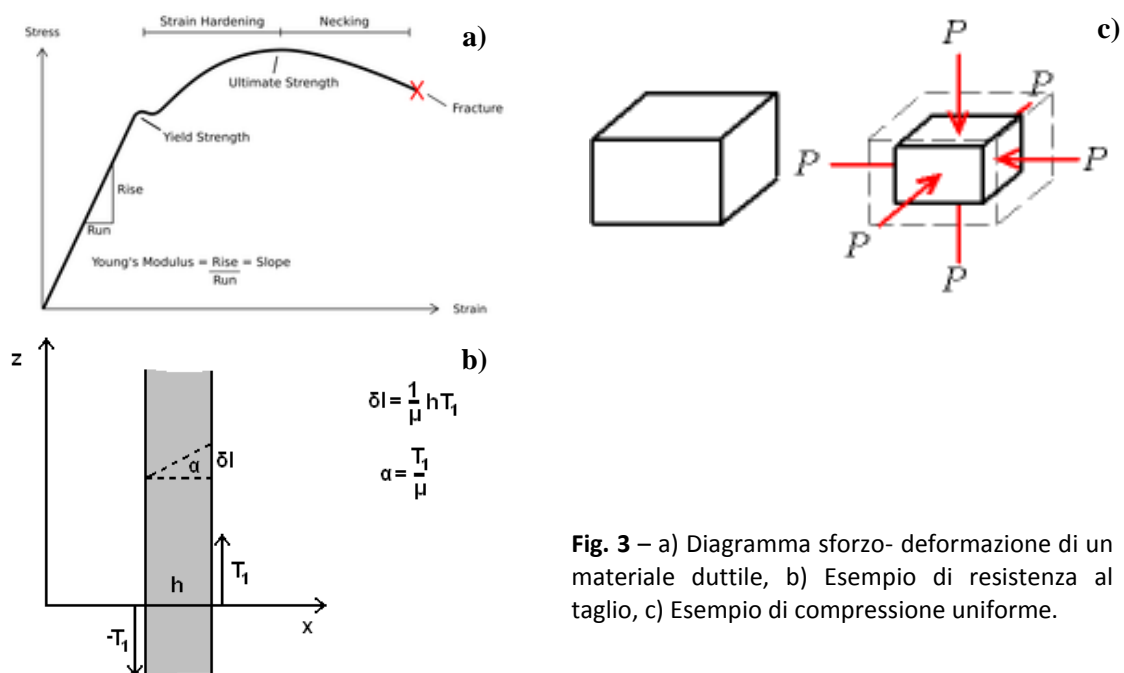


Fig. 3 – a) Diagramma sforzo- deformazione di un materiale duttile, b) Esempio di resistenza al taglio, c) Esempio di compressione uniforme.

Le correlazioni tra V_p , V_s e moduli dinamici, utilizzate nel presente lavoro, sono le seguenti:

Poisson	$\nu = (Vp^2 - 2 \cdot Vs^2) / 2 \cdot (Vp^2 - Vs^2)$
Young	$E = [2 \cdot \gamma \cdot Vs^2 \cdot (1 + \nu)] / 10000$
Shear	$G = (\gamma \cdot Vs^2) / 10000$
Bulk	$K = [\gamma \cdot Vp^2 - (4/3 \cdot Vs^2)] / 10000$

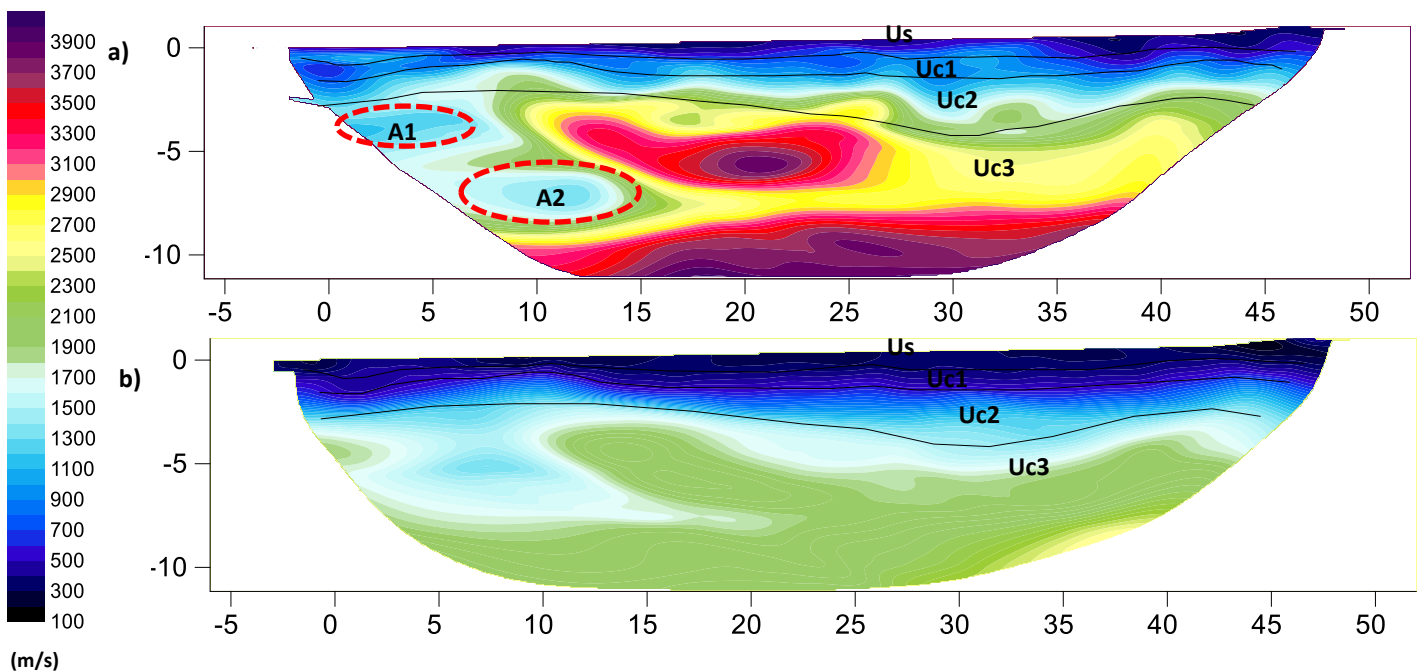
le quali restituiscono valori dei moduli in MPa. Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri elastici si basano essenzialmente sulle proprietà sismiche dei terreni (Vp e Vs): i parametri elastici calcolati non sono pertanto sempre confrontabili con quelli ottenuti staticamente da prove in situ e di laboratorio.

7. Risultati

7.1.1 REF01– Sismica a rifrazione in onde P ed SH

L'indagine suggerisce un sottosuolo costituito dall'alto verso il basso da 4 unità sismostratigrafiche di base che presentano, dal punto di vista della risposta sismica, un assetto pressoché tabulare soprattutto nella parte superficiale ad eccezione di locali variazioni laterali tra 3÷8m di profondità.

L'unità **Us** si estende per uno spessore variabile tra 0.3 ÷ 1 m e presenta Vp comprese tra 300÷800 m/s e Vs comprese tra 150÷400 m/s. Segue l'unità **Uc1** (Vp : 700÷1100 m/s, Vs : 400÷500 m/s) presenta un assetto tabulare con spessore variabile tra 0.3÷1.0 m ed un incremento progressivo di velocità con la profondità. La sottostante unità (**Uc2**, Vp : 1100÷2000 m/s, Vs : 500÷1300 m/s) si estende sino ad una profondità di 4,5 m da p.c. a 30m dall'inizio dello stendimento, con un aumento repentino di velocità al bottom dell'unità. Chiude la sequenza sismostratigrafica l'unità **Uc3** caratterizzata da velocità massime di Vp =4000 m/s e Vs =2480 m/s. Questa unità presenta anomalie di velocità tra le progressive 0m÷15m, (visibili soprattutto nella Vp nelle zone evidenziate in fig.4: A1, A2) potenzialmente dovute a differenti probabili cause tra le quali: forte aumento di fratturazione locale del litotipo calcareo/probabili cavità riempite di terra rossa/cavità. Queste zone (A1, A2) possiedono una velocità di Vp compresa tra i 1200÷1300m/s .



7.1.2 Calcolo dei moduli dinamici (m/s) Rif. 01, a) onde P, b) onde SH

Considerando i risultati dell'indagine di sismica a rifrazione in onde P ed SH, effettuata lungo lo stendimento REF01, in termini di distribuzione dei valori di V_p e V_{sh} , è stato possibile effettuare una stima dei valori dei moduli dinamici (cap.6.3) caratterizzanti le unità, riassunti nella seguente tabella (*Tab III*):

Strato	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ν -Poisson	E -Young (MPa)	G-Shear (MPa)	K-Bulk (MPa)
Us	300÷800	150÷400	0.40-0.35	200-600	100-250	300-850
UC1	700÷1100	400÷500	0.36-0.30	800-1000	300-400	1000-2000
UC2	1100÷2000	500÷1300	0.34-0.32	1500-7000	1000-3000	2500-6000
UC3	2000÷4000	1400÷2000	0.27-0.32	8000-28000	3000-13000	6500-40000

Tab. III -Tabella rappresentativa dei moduli dinamici calcolati (valori rappresentativi per ogni sub unità).

7.1.3 Associazioni litostratigrafiche

La subunità **Us** che presenta valori esigui di velocità sismiche, risulta associabile a terreno vegetale misto a blocchi calcarei.

La subunità **UC1** risulta assimilabile a calcare fratturato al *top*. La subunità **UC2** presenta valori assimilabili a litotipo calcareo a medio grado di fratturazione fino alla profondità di 1.5m da p.c. dove risulta caratterizzato da un rapido miglioramento delle proprietà verso il *bottom*. La subunità **UC3** evidenzia un netto cambio laterale alla progressiva 15m risultando compatibile con un litotipo calcareo fortemente fratturato e/o con la presenza di cavità riempite di terra rossa o probabilmente parzialmente vuote; lateralmente partendo dai 15m fino alla fine dello stendimento sismico c'è invece un miglioramento delle proprietà tecniche che risultano compatibili con la presenza di calcare a fratturazione media e medio-bassa.

7.2.1 MASW

L'analisi in frequenza è stata condotta sino ad una frequenza di 100 Hz sufficiente ad indagare il volume di sottosuolo di interesse.

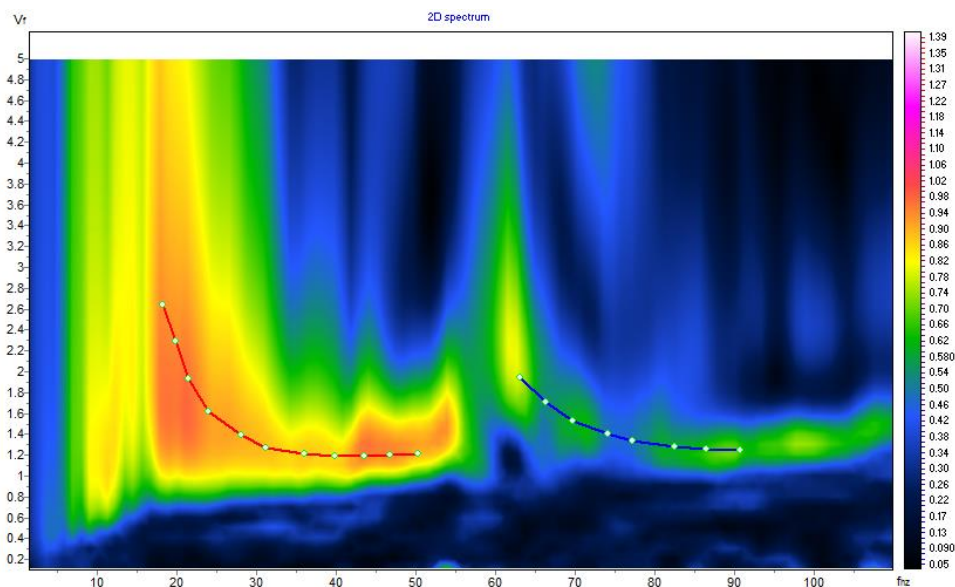


Fig. 5 – Spettro frequenza/velocità di fase. Sovrainposti sono i picking del I modo (rosso) e del II modo di vibrazione (blue) con le relative curve di dispersione sintetiche (tratteggio).

In tale range di frequenza la curva di dispersione appare dominata dal I e II modo di vibrazione e presenta dei chiari picchi in ampiezza dello spettro frequenza/velocità.

L'indagine MASW suggerisce un sottosuolo assimilabile a quello evidenziato dall'indagine di sismica a rifrazione (fig.4).

Infatti si riconosce dall'alto verso il basso una unità di copertura (Us) dello spessore medio di circa 0.6 m, con Vs pari a 180 m/s che poggia, attraverso un contatto netto su di un sismostrato Uc1 spesso circa 8 m con Vs variabili tra 740÷1130 m/s. Segue un brusco incremento di velocità dovuto alla subunità Uc2 spessa circa 4 m con Vs pari a 1730 m/s. Chiude la sequenza la subunità Uc3 (Vs >1320) a partire da una profondità pari a 8.0m a 22.0m da p.c., dopo i 22m c'è un brusco incremento della velocità (Vs>2100 m/s)

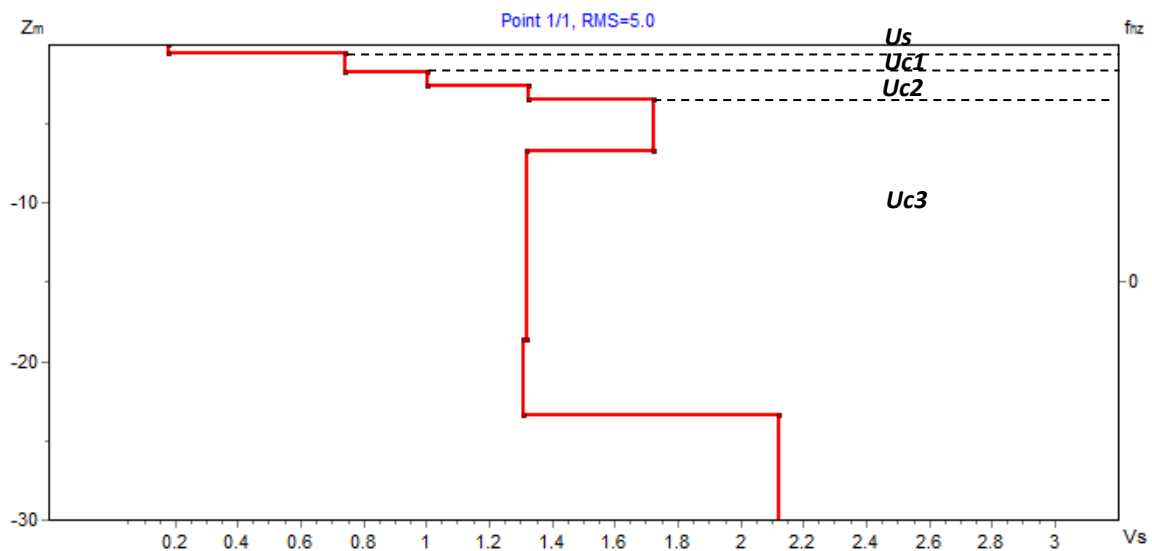


Fig. 6 - Profilo di Vs (Km/s).

Si riporta la tabella riepilogativa dell'andamento delle velocità delle onde S con la profondità per i sismostrati individuati attraverso l'analisi del modello di inversione.

Strato	Profondità Top (m)	Spessore (m)	Vs (Km/s)
1	0.0	0.6	180
2	0.6	1.8	740
3	1.8	2.6	1001
4	2.6	3.5	1330
5	3.5	6.7	1730
6	6.7	18.6	1320
7	18.6	23.4	1310
8	23.4	-	2120

Tab. IV - tabella riepilogativa: andamento della velocità delle onde (Vs) con la profondità

La problematica inerente la classificazione del terreno da un punto di vista sismico è stata oggetto di numerose ordinanze e normative (OPCM 3274; DM 14/09/2005); in ultimo, il Decreto del Ministero per le Infrastrutture del 14 gennaio 2008, che costituisce l'approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni.

Nel suddetto Decreto al par. 3.2.2. "Categorie di Sottosuolo e Condizioni Topografiche", facente parte del più ampio capitolo riguardante l'Azione Sismica, si riporta che "... per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento". Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel

“volume significativo”, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse. Tali categorie sono riepilogate nella tabella di seguito riportata.

Categoria di suolo		
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m	$V_{s,30} > 800$ m/s
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina)	$360 \text{ m/s} < V_{s,30} < 800 \text{ m/s}$ ovvero $N_{SPT,30} > 50$ (terreni a grana grossa) ovvero $c_{u,30} > 250$ kPa (terreni a grana fina)
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina)	$180 \text{ m/s} < V_{s,30} < 360 \text{ m/s}$ ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ (terreni a grana grossa) ovvero $70 < c_{u,30} < 250$ kPa (terreni a grana fina)
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina)	$V_{s,30} < 180$ m/s ovvero $N_{SPT,30} < 15$ (terreni a grana grossa) ovvero $c_u < 70$ kPa (terreni a grana fina)
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s)</i>	

Tab. V - Tabella di suddivisione delle categorie di suolo

Sono, inoltre, definite ulteriori due categorie che prevedono specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensibilità possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

S1	<i>Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche</i>	$V_{s,30} < 100$ m/s ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa
S2	<i>Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.</i>	

Tab. VI - Tabella di suddivisione delle categorie di suolo

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,30}$ è definita dall'espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}} \quad (6)$$

dove:

h_i è lo spessore (in metri) dell'i-esimo strato compreso nei primi 30 m di profondità;

V_{s_i} velocità (in m/s) delle onde di taglio nell'i-esimo strato.

Pertanto se si considerano i valori della velocità di propagazione delle onde "S", misurata da piano campagna, è possibile evidenziare che il valore V_{s30} è risultato essere pari a circa **1245 m/s** consentendo, per l'area in esame, la definizione di un suolo appartenente alla **categoria A**.

8. Bibliografia

Aki, K. and Richards, P.G. (1980) - *Quantitative Seismology, Theory and Methods* Vol. 1-2 W.H. Freeman & Co., New York.

Brückl, E. (1987) - *The interpretation of traveltimes fields in refraction seismology.* Geophys Prospect., Vol. 35, 973 – 992.

Gebrande, H. and Miller, H. (1985) - *Refraktionsseismik* (in German). In: F. Bender (Editor), *Angewandte Geowissenschaften II.* Ferdinand Enke, Stuttgart; p. 226-260. ISBN 3-432-91021-5.

Hagedoorn J.G. (1959) - *The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections.* Geophysical Prospecting, Vol. 7, p. 158-182.

Jones, G.M. and Jovanovich, D.B. (1985) - *A ray inversion method for refraction analysis.* Geophysics, Vol. 50, p. 1701-1720.

Nafe, J.E., and Drake, C., (1965) – *Interpretation theory in applied geophysics.* Grant & West .

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia J., (1999) - *Multichannel Analysis of surface waves* - Geophysics, 64, 800-808.

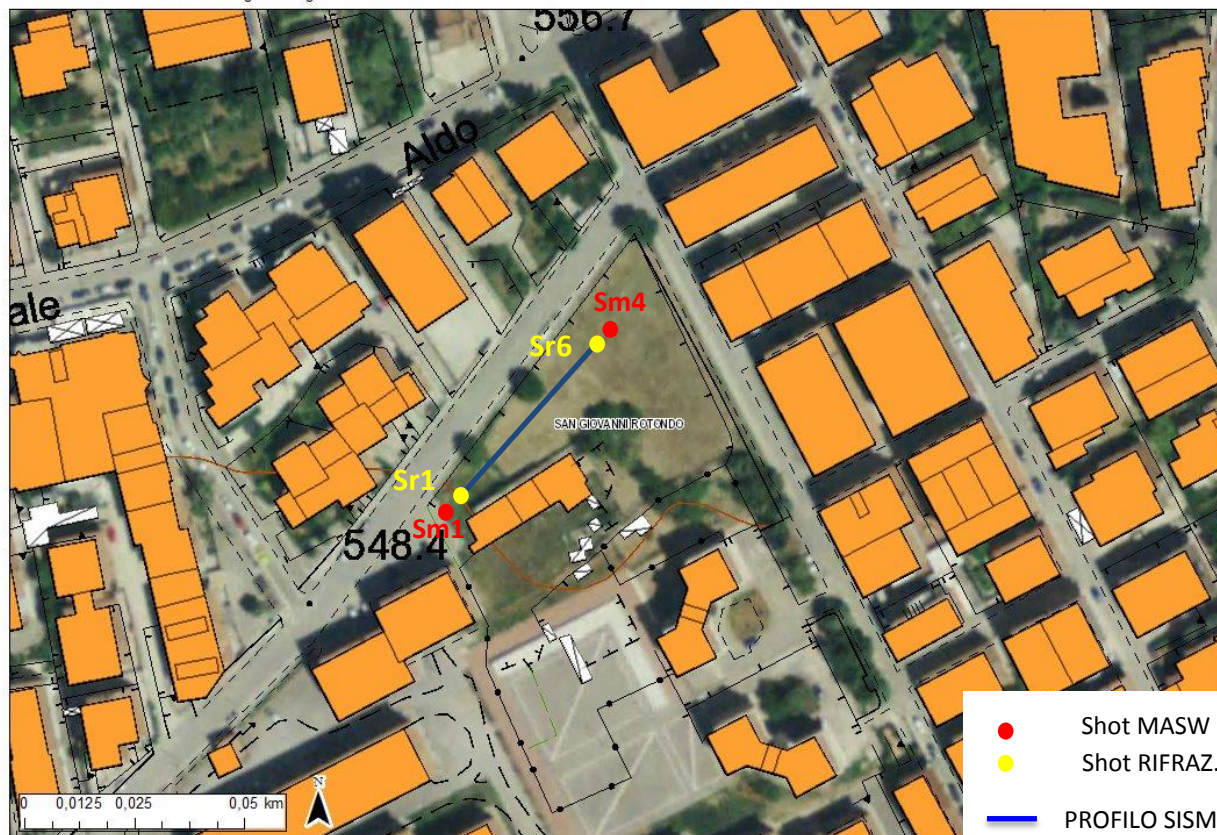
Roma, V., (2006) – *Caratterizzazione sismica dei suoli con Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)* http://www.masw.it/downloads/Opuscolo_MASW_22_Gen_2007.pdf. microtremor on the ground surface, QR of RTI, 30, 25-33.

ALLEGATO I
Elaborati Indagini geofisiche



REF01	E (m)	N (m)
Shot 1	559761.62	4617254.65
Shot 6	559795.03	4617292.02

Sistema Informativo Territoriale - Regione Puglia -- 23/03/2015 ERP SAN GIOVANNI (FG)



Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

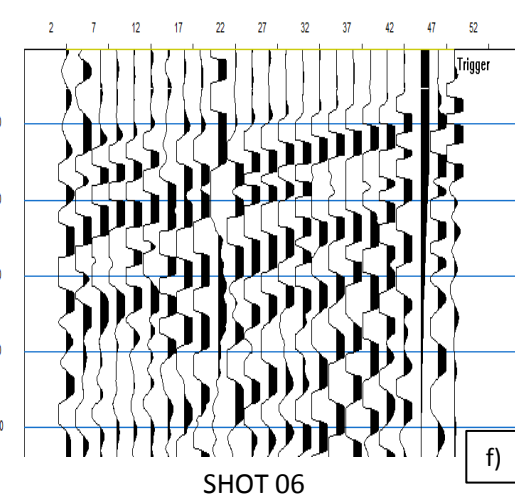
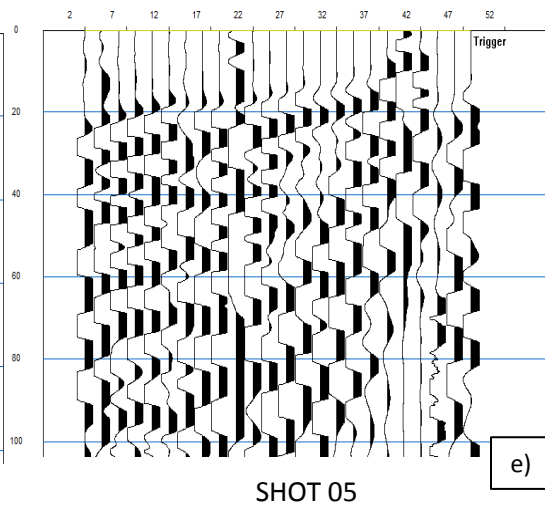
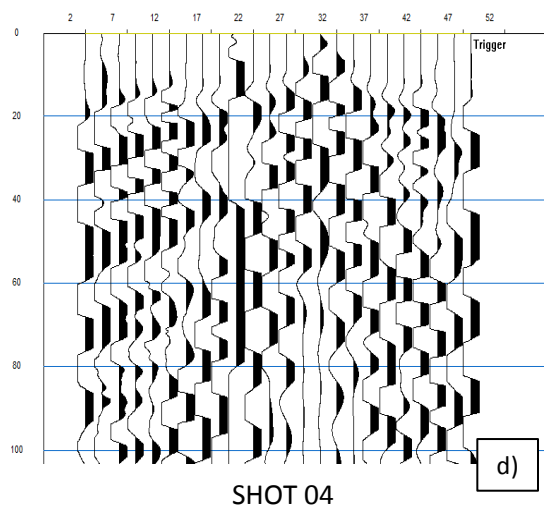
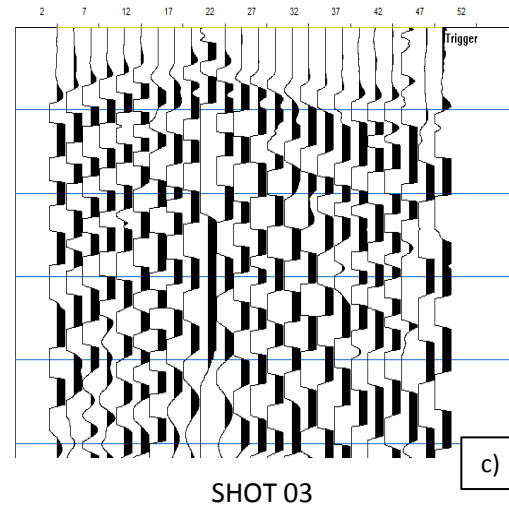
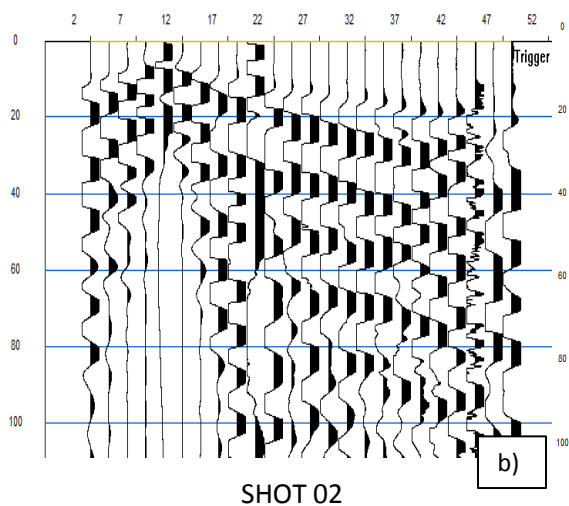
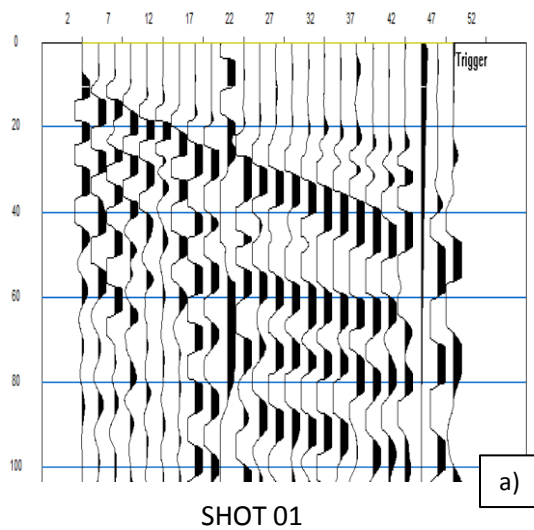
Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 1:
Ubicazione indagine
REF01 e MASW

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

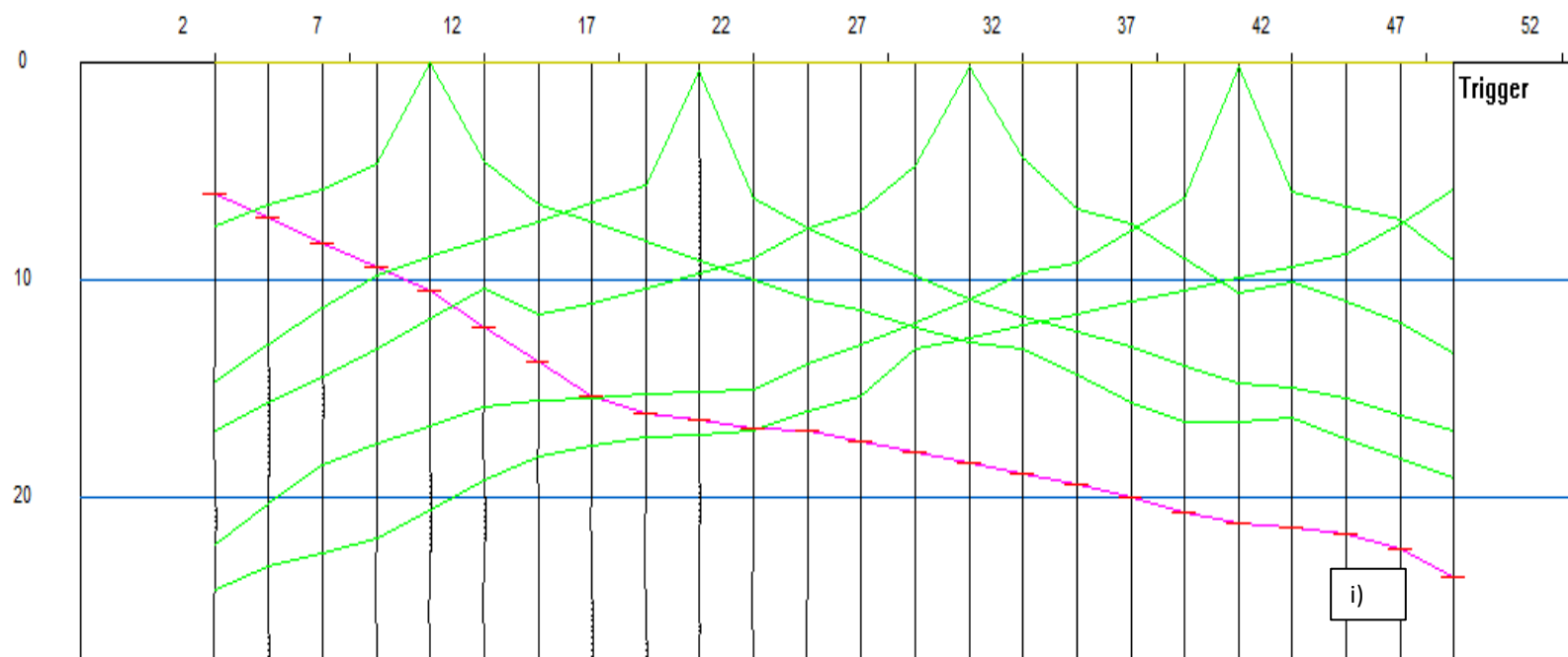
Tavola 2:
Sismogrammi onde P



Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 3:
Onde P dromocrone



DROMOCRONA ONDE P 6 SHOTS

ONDE P							
	SH01	SH02	SH03	SH04	SH05	SH06	
	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	
G1	6.113909	7.567952	14.598072	16.930048	22.116524	24.230453	
G2	7.212287	6.543718	12.931997	15.677639	20.31613	23.122086	
G3	8.310664	5.852767	11.265923	14.425228	18.515736	22.504801	
G4	9.409042	4.703388	9.769212	13.112087	17.505308	21.887518	
G5	10.507421	0.0	8.953601	11.752735	16.674847	20.556488	
G6	12.147893	4.565158	8.13799	10.393383	15.844387	19.22855	
G7	13.755702	6.55272	7.322379	11.588477	15.56712	18.074522	
G8	15.363512	7.394983	6.506768	11.081997	15.427769	17.581879	
G9	16.122789	8.26157	5.691157	10.411928	15.288417	17.204432	
G10	16.464464	9.146036	0.0	9.741858	15.149065	17.082874	
G11	16.806139	10.030503	6.242951	9.07179	15.009713	16.961317	
G12	16.886423	10.914969	7.638986	7.659102	13.887836	16.051607	
G13	17.370173	11.405008	8.723288	6.828228	12.917833	15.339785	
G14	17.853922	12.146756	9.80759	4.799268	11.947829	13.191324	
G15	18.386591	12.888505	10.891891	0.0	10.860712	12.649584	
G16	18.901888	13.146119	11.688917	4.401316	9.74393	12.107843	
G17	19.417187	14.397799	12.384295	6.750191	9.284514	11.566103	
G18	18.524006	15.649481	13.079674	7.441072	7.76042	11.024363	
G19	20.628933	16.504801	13.929584	9.02318	6.236325	10.482622	
G20	21.186666	16.504801	14.728599	10.605288	0.0	9.940881	
G21	19.724394	16.351313	14.915058	10.100037	5.969821	9.39914	
G22	21.01519	17.250418	15.480437	11.025634	6.605653	8.8574	
G23	22.305986	18.149525	16.198376	11.95123	7.241372	7.45655	
G24	23.596783	19.04863	16.916315	13.383327	9.152959	5.910657	

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

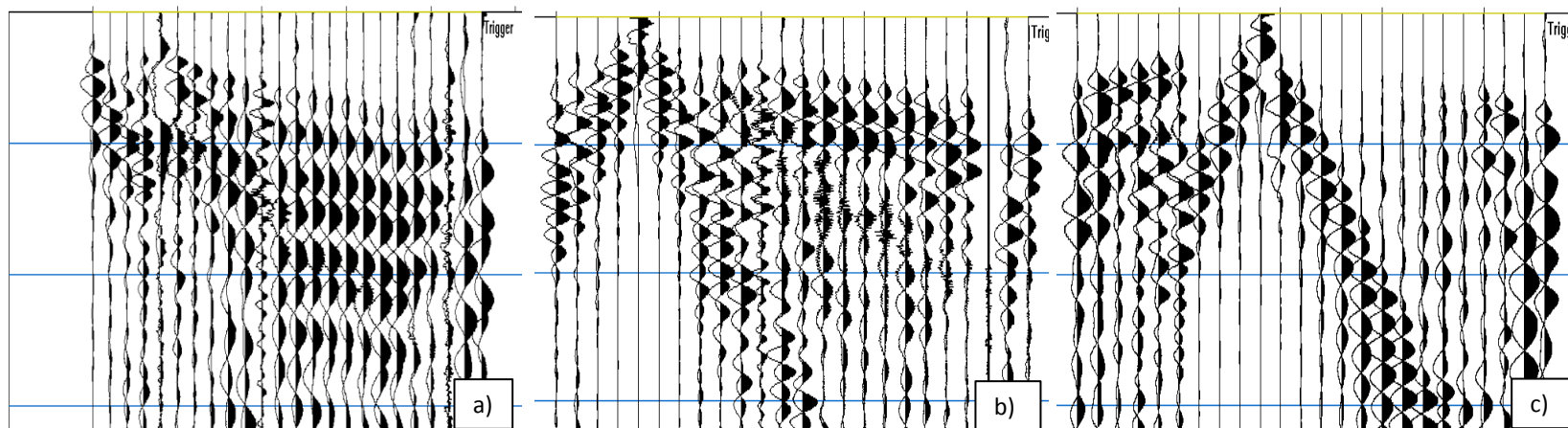
Indagine:
 REF
Data esecuzione:
 16/03/2015

Tavola 4:
 Tabella FBP

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

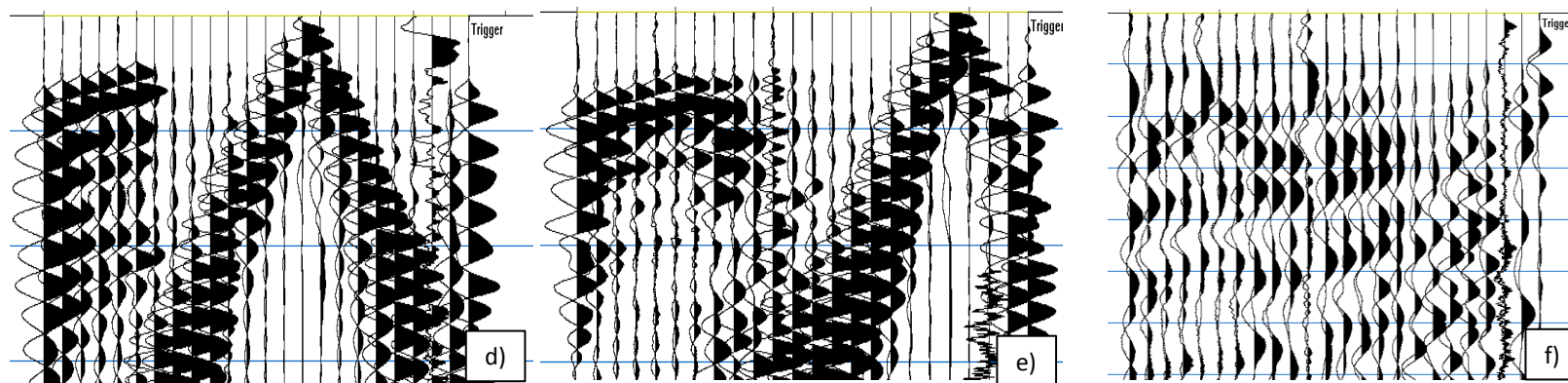
Tavola 5:
Sismogrammi
onde SH



SHOT 01

SHOT 02

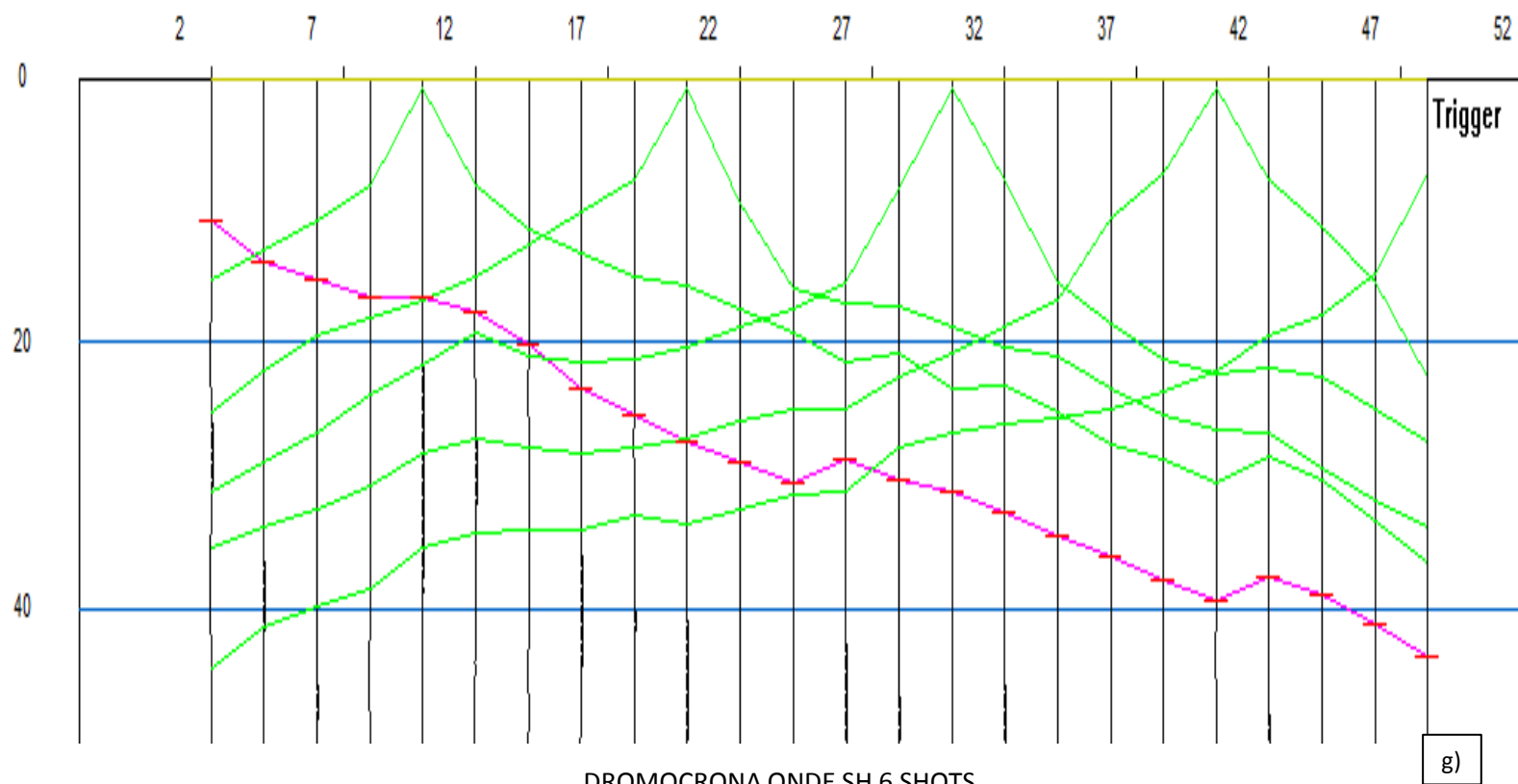
SHOT 03



SHOT 04

SHOT 05

SHOT 06



Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 6:
Onde SH dromocrone

g)

ONDE SH							
	SH01	SH02	SH03	SH04	SH05	SH06	
	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	first break [msec]	
G1	10.798354	15.223986	25.209263	31.250845	35.440514	44.378601	
G2	13.915398	13.054674	22.025183	28.985825	33.942749	41.37793	
G3	15.238955	10.885363	19.388268	26.720804	32.444988	39.923382	
G4	16.562511	8.164609	18.083998	23.878651	30.757025	38.468838	
G5	16.468702	0.0	16.779726	21.588438	28.3696	35.42387	
G6	17.638294	8.164609	15.008128	19.298225	27.246771	34.370369	
G7	20.148148	11.344661	12.561838	20.982168	27.961969	34.106995	
G8	23.3888	13.163508	10.115548	21.389927	28.395309	34.106995	
G9	25.449991	14.982357	7.669259	21.096079	27.842548	33.053497	
G10	27.407957	15.686488	0.0	20.377756	27.289787	33.580246	
G11	28.938822	17.480576	9.481482	18.858288	25.810699	32.502808	
G12	30.469685	19.274664	15.862447	17.33882	24.958048	31.425365	
G13	28.760767	21.465021	16.938383	15.407408	25.074015	31.07819	
G14	30.349159	20.850481	17.180258	8.427983	22.586496	27.932472	
G15	31.175892	23.484224	18.831276	0.0	20.638622	26.694818	
G16	32.832603	23.175747	20.411522	7.769547	18.690748	26.136427	
G17	34.489315	25.132935	21.054314	15.407408	16.768175	25.578037	
G18	36.146023	27.517258	23.283869	18.606136	10.53498	25.019646	
G19	37.802734	28.726631	25.513426	21.154919	7.286696	23.756069	
G20	39.459446	30.419754	26.513031	22.321531	0.0	22.181984	
G21	37.57476	28.444445	26.688614	21.831787	7.63786	19.548241	
G22	38.811157	30.212557	29.471201	22.645563	11.14952	17.899712	
G23	41.173782	33.367657	31.717237	24.99505	15.375192	14.764297	
G24	43.536404	36.522758	33.963272	27.344538	22.474623	7.111111	

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
 REF
Data esecuzione:
 16/03/2015

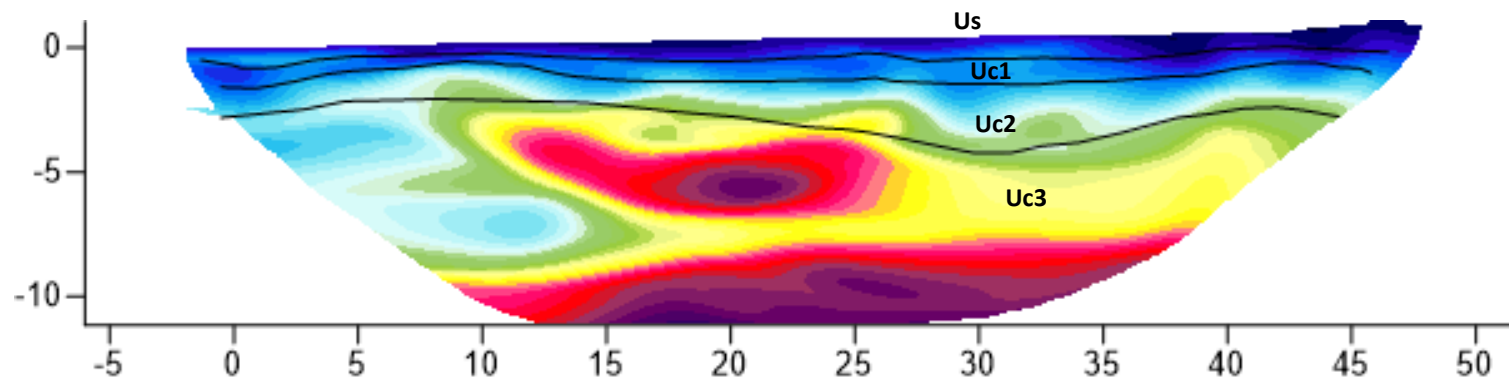
Tavola 7:
 Tabella FBP

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

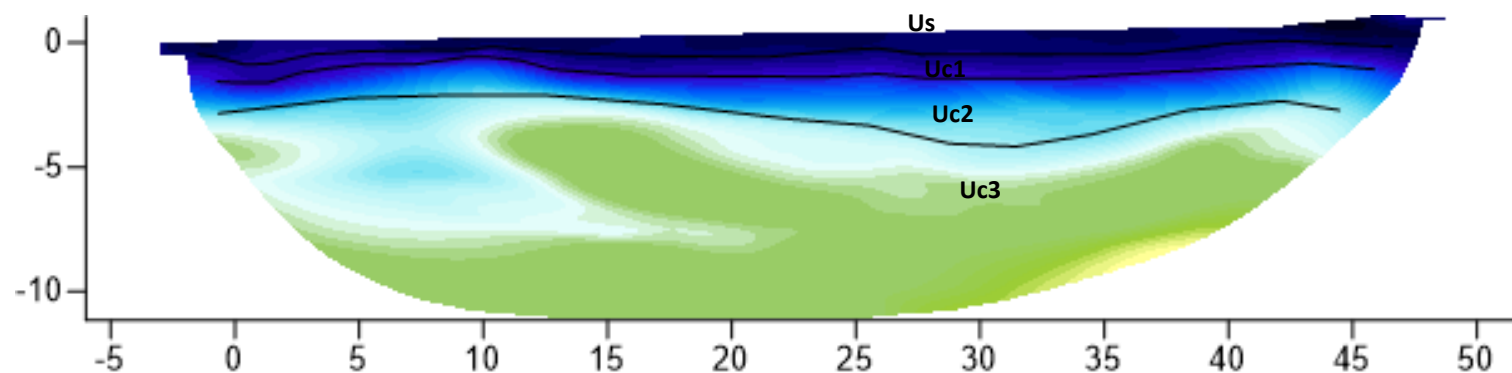
Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 8: Tomografia
sismica

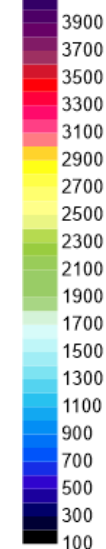
Vp)



Vs)



Vp- Vs



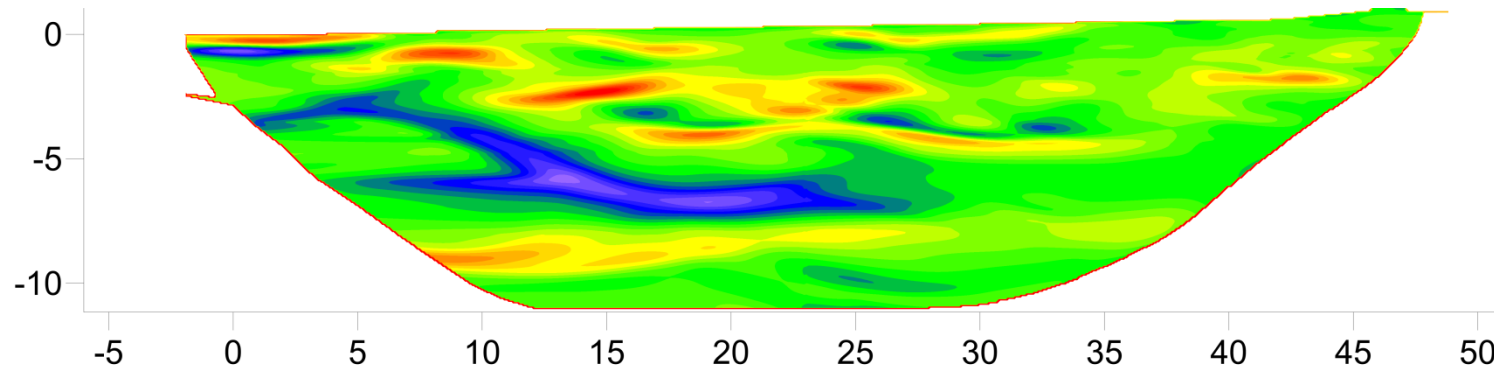
(m/s)

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

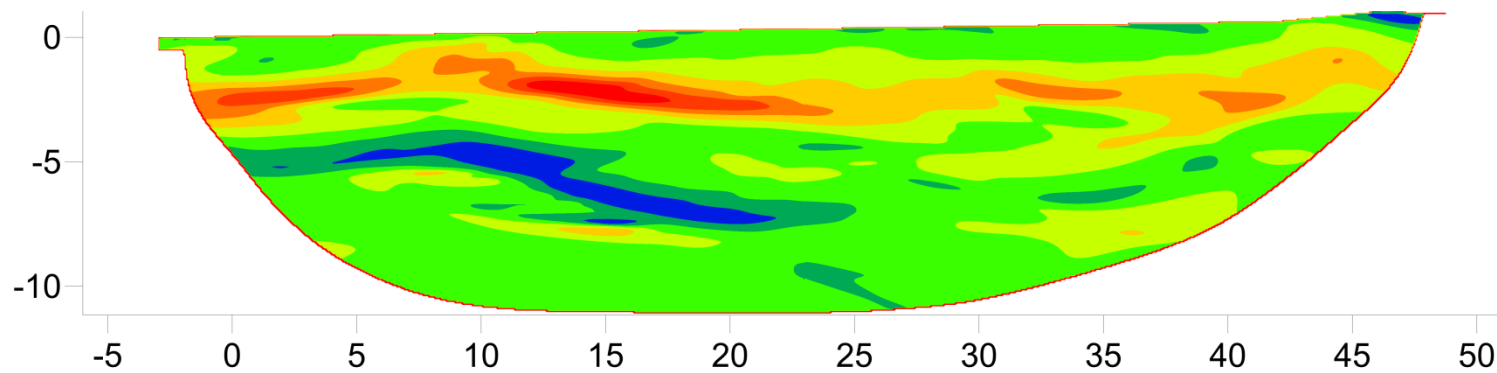
Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 9: gradiente

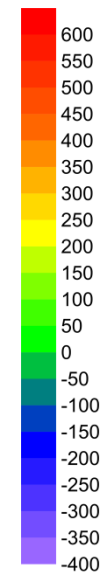
Gradiente onde P)



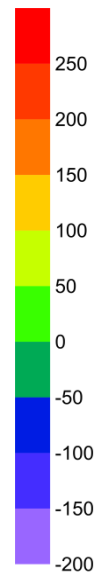
Gradiente onde SH)



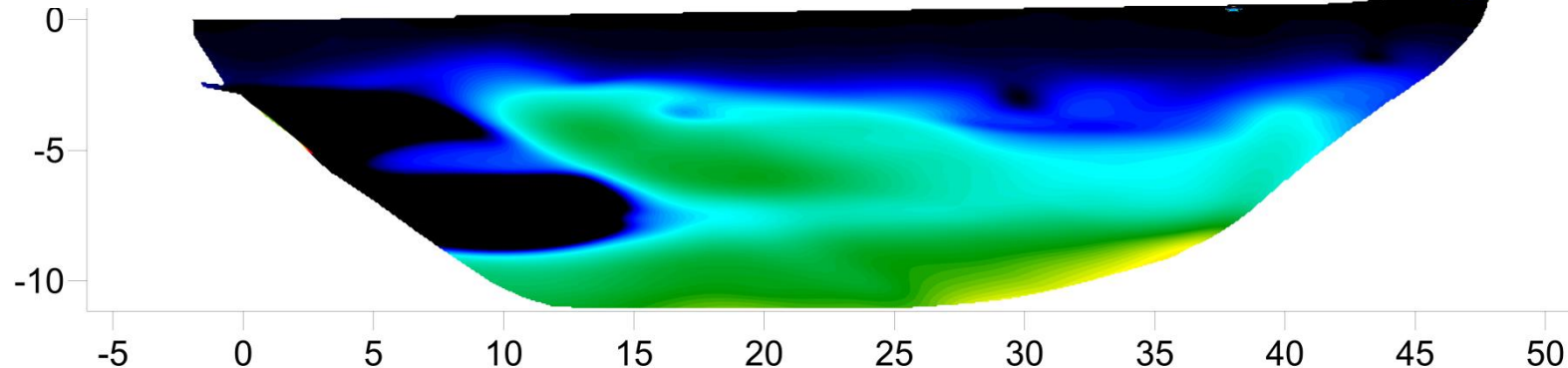
∇V_p



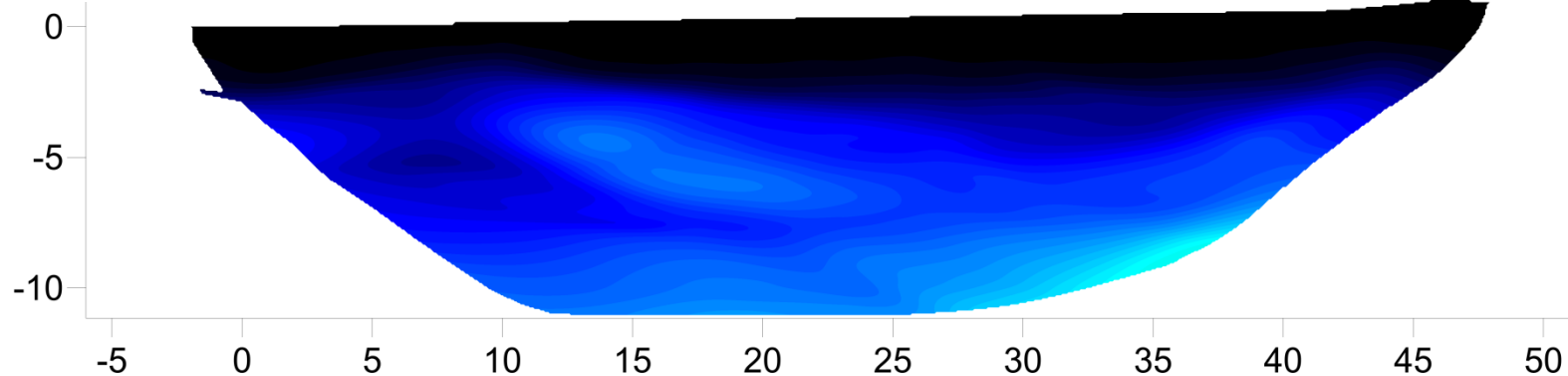
∇V_s



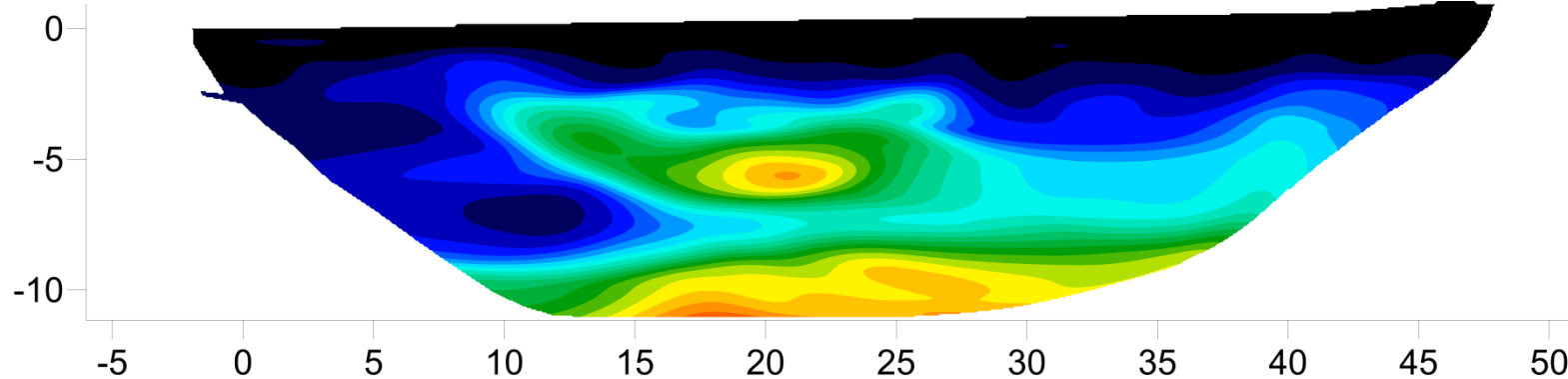
Mod. di Young)



Mod. di Shear)



Mod. di Bulk)

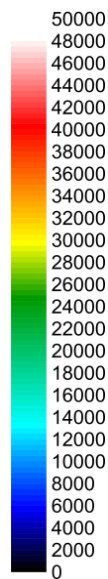


Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 10: Modulo di
Young, Shear e Bulk

[Mpa]



MASW01

E (m)

N (m)

G1

559763.16

4617256.39

G24

559793.86

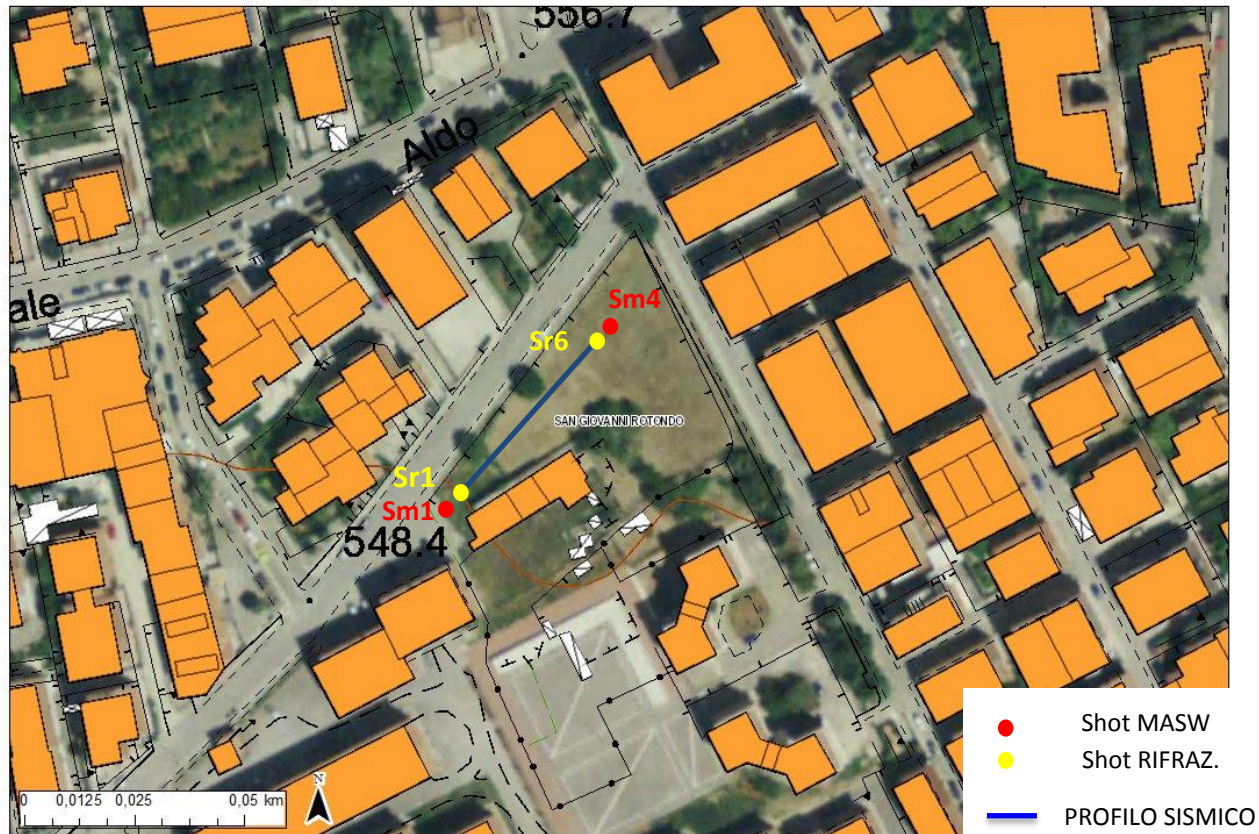
4617290.50

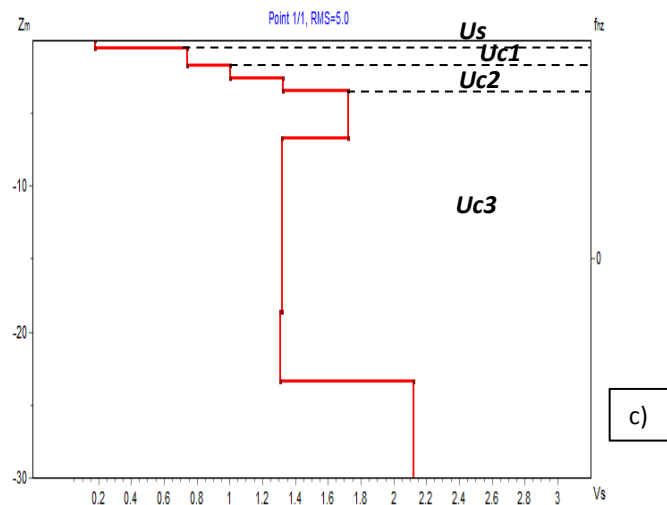
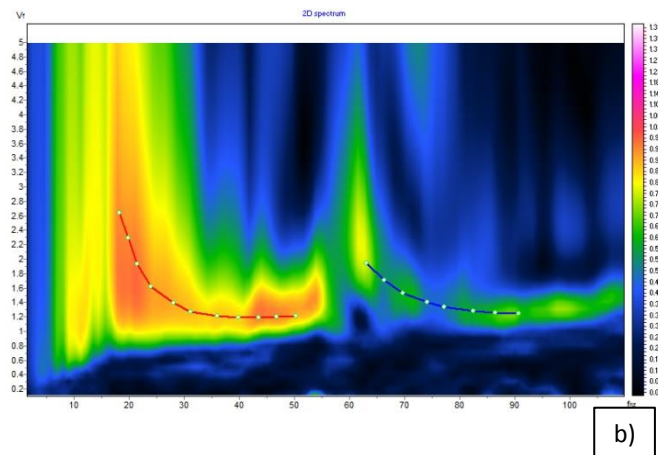
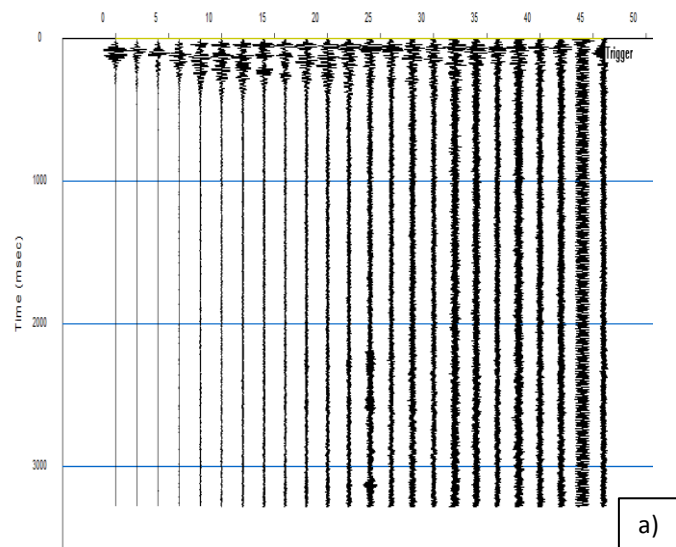
Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
MASW
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 11:
Ubicazione indagini
MASW

Sistema Informativo Territoriale - Regione Puglia -- 23/03/2015 ERP SAN GIOVANNI (FG)





$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s_i}}} = 1245 \text{ m/s}$$

Strato	Profondità Top (m)	Spessore (m)	Vs (Km/s)
1	0.0	0.6	180
2	0.6	1.8	740
3	1.8	2.6	1001
4	2.6	3.5	1330
5	3.5	6.7	1730
6	6.7	18.6	1320
7	18.6	23.4	1310
8	23.4	-	2120

d)

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO A

Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
MASW01
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 12:
a) Sismogramma,
b) spettro F-V,
c) profilo Vs
d) tabella
sismostratigrafia

ALLEGATO II
Documentazione fotografica





Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF01 – MASW01
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 1:
Foto indagine sismica





Lavoro:
progetto per la
realizzazione di nuove
costruzioni di e.r.p.
nel comune di san
giovanni rotondo (fg)

Indagine:
REF-MASW
Data esecuzione:
16/03/2015

Tavola 2:
Foto indagine sismica



PROVINCIA DI FOGGIA
COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO

COMMITTENTE:

Spett.le
Dott. Geol. Giancarlo Nigro
via Borgo 48 – 71021 Accadia (Fg)

PROGETTO:

Progetto per la realizzazione di nuove
costruzioni di E.R.P. nel comune di San
Giovanni Rotondo (Fg)

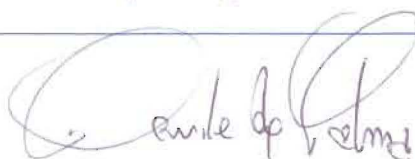
Relazione GEOFISICA

**Indagini Geofisiche di integrazione alla relazione
Geologica:
GEOELETTRICA 3D**

Dott. Geol. Pierpaolo Moretti
Ordine dei Geologi della
Regione Puglia n°786



Dott. Davide de Palma
Geofisico



1. INTRODUZIONE E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati della campagna di indagine geofisica mediante tomografia geoelettrica 3D (ERT 3D) eseguita nelle date 12-13-14/03/2015 nell'abitato di San Giovanni Rotondo (FG), in Via Soldato A. Massa angolo Via di Vagno, per i lavori riguardanti il **“PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE COSTRUZIONI DI E.R.P. NEL COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO (FG)”**.

Lo scopo dell'indagine è quello di fornire un **contributo all'implementazione di un modello geologico dell'area di indagine** con particolare riferimento alla mappatura delle anomalie potenzialmente associabili a cavità.

Lo studio, come da piano di indagine, ha seguito il seguente sviluppo:

- n° 3 misure tomografiche elettriche di tipo ERT 3D (*Electrical Resistivity Tomography*) per la ricostruzione di *block resistivity model* a tre dimensioni da cui estrarre piani di resistività differente profondità (*slice*) e *isosurface* finalizzate all'individuazione ed alla delimitazione spaziale delle anomalie compatibili con la presenza di eventuali cavità.
- elaborazione dei dati raccolti

Le indagini sono state condotte seguendo linee guida nazionali ed internazionali:

- Linee guida per indagini geofisiche A.S.G (Associazione Società di Geofisica)
- ASTM D6431 (Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation).

2. UBICAZIONE INDAGINI

Le indagini geoelettriche sono state eseguite in un'area compresa tra via Soldato Antonio Massa e via Vagno (fig.1) e sono state suddivise in tre tomografie tridimensionali, ciascuna con un'estensione pari a 262.5 m².



Fig.1 – ubicazione area di indagine (CTR, SIT Puglia).

Per le coordinate relative a ciascuna area di indagine si è fatto riferimento al sistema geografico UTM (Tab. I), prendendo come riferimento il 1°, 8°, 40° e 48° elettrodo di ogni maglia rettangolare utilizzata per l'acquisizione ERT 3D.

	ELETTRODO 1		ELETTRODO 8		ELETTRODO 40		ELETTRODO 48	
	E	N	E	N	E	N	E	N
ERT03	559793.00	4617275.00	559811.00	4617286.00	559805.00	4617297.00	559787.01	4617285.28
ERT02	559783.69	4617254.54	559801.44	4617265.88	559795.18	4617277.34	559777.44	4617265.78
ERT01	559771.16	4617235.01	559788.81	4617246.16	559782.19	4617256.43	559764.00	4617245.00

Tab.I – Coordinate degli estremi dei profili di sismica a rifrazione e MASW. Sistema di riferimento UTM - datum WGS84 - fuso 33T

3. TOMOGRAFIE GEOELETTICHE DI RESISTIVITÀ

In relazione alle caratteristiche morfologiche dell'area da studiare si è proceduto all'esecuzione di un'indagine geofisica con metodo di tomografia elettrica 3D.

Il sistema dei profili elettrici superficiali con dispositivo multi-array per Tomografia Elettrica di Resistività (ERT - Earth Resistivity Tomography) è una metodologia innovativa in quanto evoluzione delle misure geoelettriche classiche, intesa ed applicata in modo tale da ottenere risoluzioni spaziali elevate. L'impiego della tomografia elettrica grazie alla sua particolare risoluzione spaziale consente di individuare i contrasti di resistività elettrica che sono connessi con la natura dei terreni, con le strutture sepolte e con il loro contenuto in acqua. Inoltre tale metodologia è molto utilizzata nell'investigazione di potenziali cavità. Infatti, esse sono da considerarsi corpi infinitamente resistivi inclusi in un mezzo a resistività finita. La loro presenza provoca, nel campo elettrico artificialmente indotto nel sottosuolo, delle distorsioni rilevabili in superficie.

Il metodo della tomografia elettrica (ERT - Earth Resistivity Tomography) si basa sulla misura tra due elettrodi (detti convenzionalmente MN) della differenza di potenziale "V" connessa alla distribuzione nel sottosuolo di una corrente elettrica "I" immessa in una diversa coppia di elettrodi, detti AB. I valori di resistività elettrica misurati (resistività apparenti a) dipendono pertanto da "V" e "I" secondo la seguente relazione generale:

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

che è funzione, oltre che della posizione reciproca dei quattro elettrodi anzidetti (dipendenza contenuta nel parametro K, detto fattore geometrico), della distribuzione della resistività elettrica dei materiali nel sottosuolo interessato dalla propagazione della corrente "I". Tale metodo rappresenta una metodologia innovativa in quanto evoluzione delle misure geoelettriche classiche, intesa ed applicata in modo tale da ottenere risoluzioni spaziali elevate (Loke and Barker, 1996). L'impiego della tomografia elettrica grazie alla sua particolare risoluzione spaziale consente di individuare i contrasti di resistività elettrica che sono connessi con la natura dei terreni, con le strutture sepolte e con il loro contenuto in acqua.

Le tecniche tomografiche offrono la possibilità di ricostruire "immagini" del sottosuolo secondo configurazioni 2D e 3D. Il primo tipo permette di ricostruire la distribuzione spaziale in due dimensioni della resistività reale nel sottosuolo con una risoluzione che dipende dalla distanza tra gli elettrodi e dalle configurazioni elettrode utilizzate. Un profilo tomografico viene realizzato tramite lo stendimento di un cavo multipolare che collega una serie di elettrodi, i quali vengono utilizzati tanto per l'immissione della corrente I che per la misura della differenza di potenziale V. Spostando lateralmente il quadripolo si registrano le variazioni orizzontali della resistività, mentre con il progressivo allargamento della spaziatura degli elettrodi selezionati si acquisiscono informazioni sugli strati via via più profondi.

La realizzazione di una tomografia elettrica 3D si effettua utilizzando un set di elettrodi distribuiti su di una superficie sottoforma di una griglia a distanza ravvicinata l'uno dall'altro, che, analogamente al caso precedente dipende dalla risoluzione e dalla profondità di indagine richiesta. Si ottengono così centinaia di misure e, con un apposito algoritmo di inversione, è possibile ottenere una ricostruzione elettrostratigrafica 3D di resistività reale del sottosuolo ρ e di strutture in esso inglobato.

4. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Lo strumento di acquisizione utilizzato, il georesistivimetro multielettrodo multicanale A6000E (prodotto dalla M.A.E.), è capace di gestire contemporaneamente oltre 256 elettrodi e di personalizzare, tramite specifico software applicativo, tutte le misure desiderate e la loro posizione nel sottosuolo. Questo è uno strumento ad un canale di ricezione, ovvero consente l'acquisizione contemporanea di un quadripolo alla volta. Possiede una elevata precisione strumentale, utilizza un'alimentazione in corrente continua fino a 1,2 A ed effettua una compensazione automatica dei potenziali spontanei (Tab.IV).

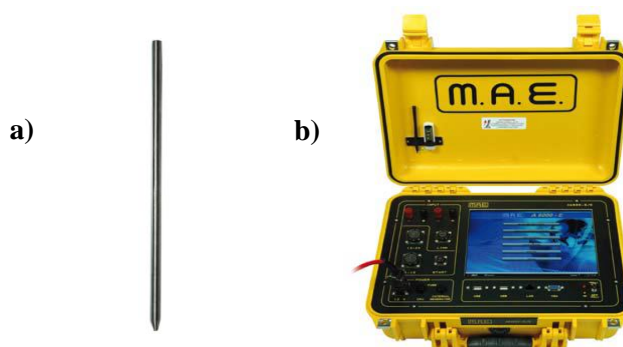


Fig. 2 – a) elettrodi, b) georesistivimetro A6000E

Automatic regulation	(4 steps)
Maximum intensity	1.2 A at 50V
Outlet voltages	±50V, ±100V, ±250V, ±500V nominal
Maximum power	60W
Input time	set from 100 ms to 30s
Measurement precision	±38μA
Maximum full scale	50V
Inlet impedance	1 MΩ
Network frequency filter	50 Hz
Measurement precision	maximum ±38μV (within range 0-1.25V), minimum ±1.53mV (within range 5-50V)
	Noise reduction: with average from 2 to 10 measurements
	Automatic zeroing of self-potential
Accuracy of the resistivity measured	±1%
	Chargeability measured on four temporal windows of overall duration of 1.2 seconds

Tab. II - specifiche tecniche M.A.E. A6000SE (esplorazione geoelettrica)

Per l'indagine in oggetto, 3 cavi ed 1 box d'espansione sono stati utilizzati 48 elettrodi di acciaio inox come elettrodi di immissione di corrente e di ricezione (fig.3a) di diametro pari a 14 mm e lunghezza pari a 40 cm infissi nel terreno oltre a 3 cavi con 16 take-out passo 5 m ed 1 box d'espansione.

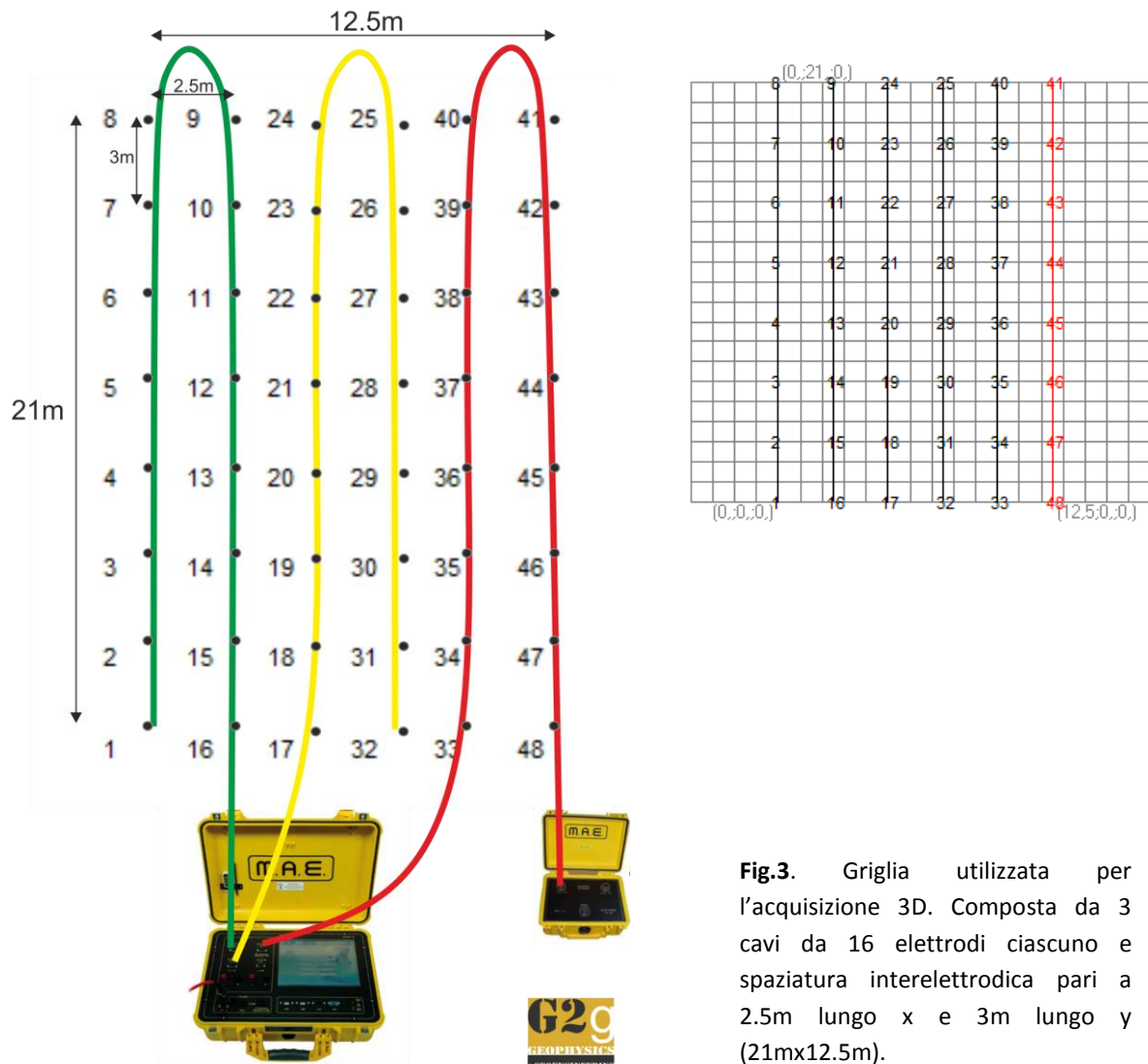


Fig.3. Griglia utilizzata per l'acquisizione 3D. Composta da 3 cavi da 16 elettrodi ciascuno e spaziatura interelettrodo pari a 2.5m lungo x e 3m lungo y (21mx12.5m).

5.ACQUISIZIONE

L'acquisizione ha interessato tre aree di 262.5 mq per un totale di 787.5 mq, circa 9000 misure quadripolari di resistività e quasi 18 ore di acquisizione.

Le indagini di tipo elettrico sono state condotte utilizzando un'acquisizione elettrotomografica 3D mediante le configurazioni (*array*) Dipolo-Dipolo (DD), Wenner-Alpha (WA) e Polo-Polo (PP) (Cap.6).

I 48 elettrodi sono stati posizionati su 6 file parallele, distanziate 2.5 m, comprendenti 8 elettrodi distanziati di 3 m (Fig.5, Fig.6, Fig.7) costituendo una griglia 8x3 a maglia rettangolare. L'acquisizione è stata eseguita sia su quadripoli selezionati lungo le linee che in direzione ortogonale ed obliqua.

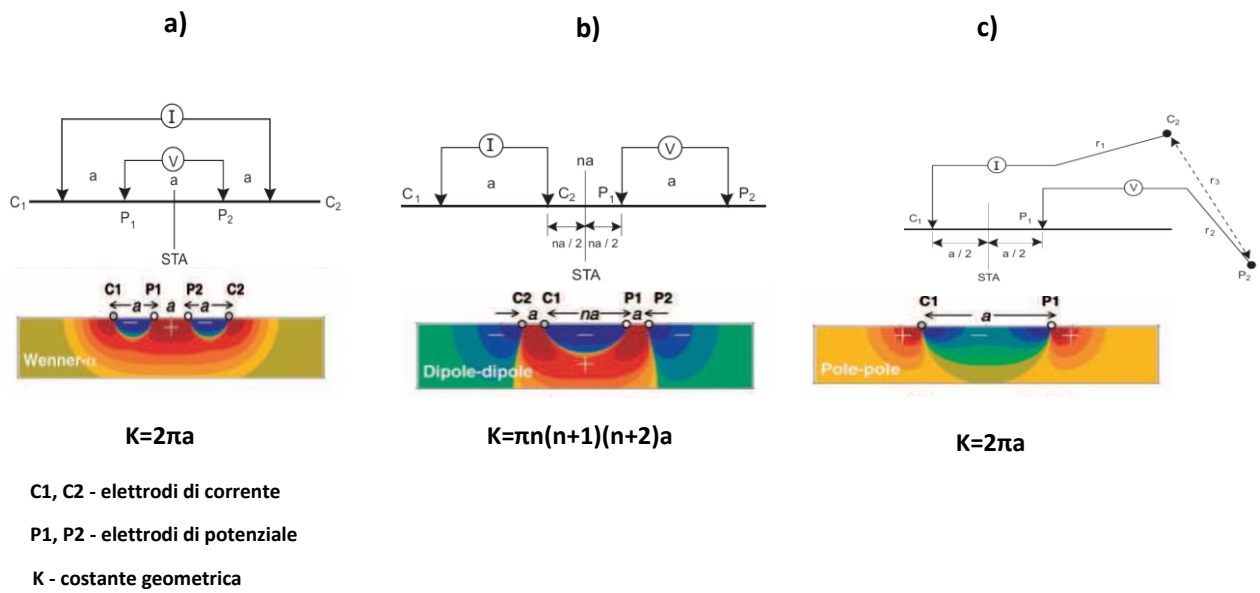


Fig. 4 – configurazioni elettrode utilizzate in 2D; **a)** Dipolo - Dipolo, **b)** Wenner-Alpha. **c)** Polo-polo

Ciascun metodo ha una sua peculiare risoluzione, profondità di investigazione e sensibilità ai rumori esterni:

- Il dispositivo WA è caratterizzato da una maggiore risoluzione verticale, una inferiore profondità di indagine ed una maggiore potenza del segnale se comparato con la configurazione DD.

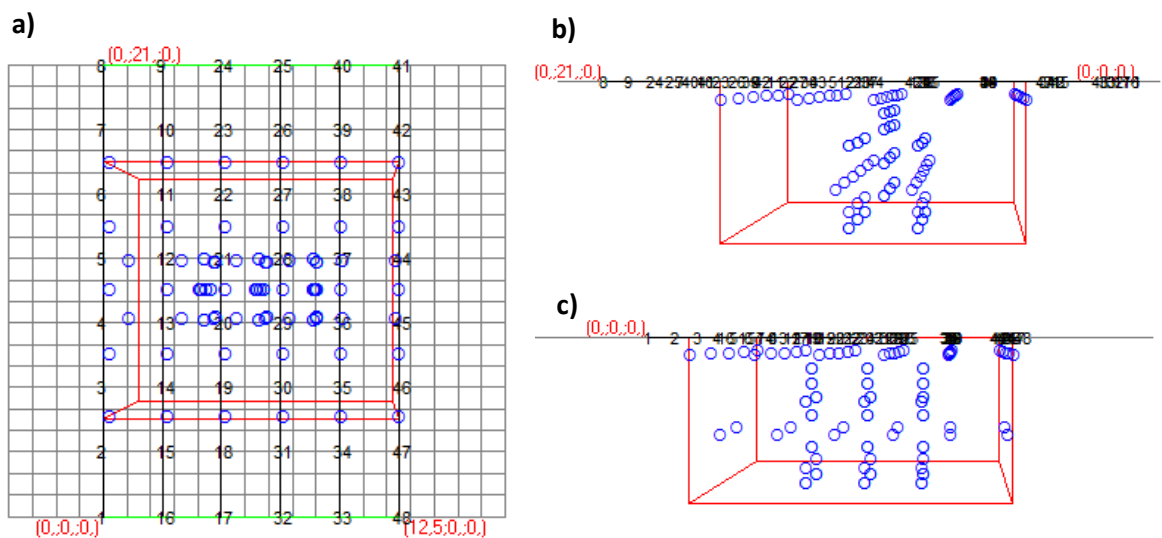


Fig. 5 – Visione prospettica schema acquisizione Wenner alpha 3D; **a)** YX, **b)** ZY. **c)**

- b. La configurazione *DD* (fig.6) è fortemente sensibile alle variazioni orizzontali, presenta una buona copertura orizzontale ma è caratterizzata da una bassa potenza del segnale. Questa configurazione risente più di ogni altro dispositivo, del rumore di fondo. Per utilizzare questo array efficacemente, il georesistivimetro dovrebbe avere un'elevata sensibilità e ci dovrebbe essere un buon accoppiamento tra gli elettrodi ed il terreno,

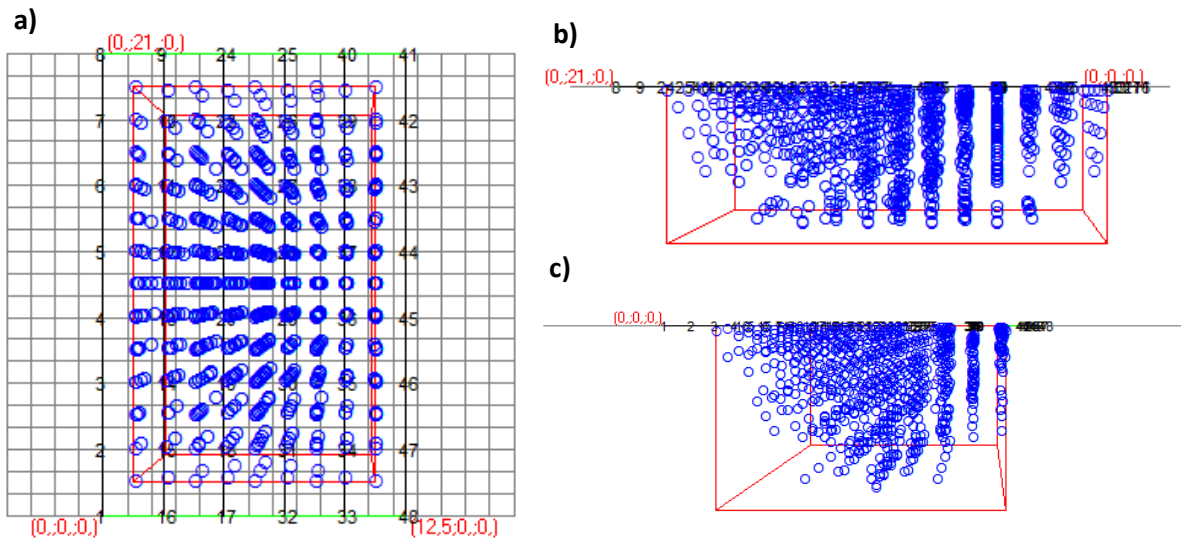


Fig. 6 – Visione prospettica schema acquisizione Dipolo Dipolo 3D; a) YX, b) ZY. c) ZX

- c. La configurazione *PP* (fig.7) è caratterizzata da una maggiore copertura, una maggiore profondità di investigazione ma un basso rapporto S/N dovuto alla bassa potenza del segnale se confrontato con le altre configurazioni.

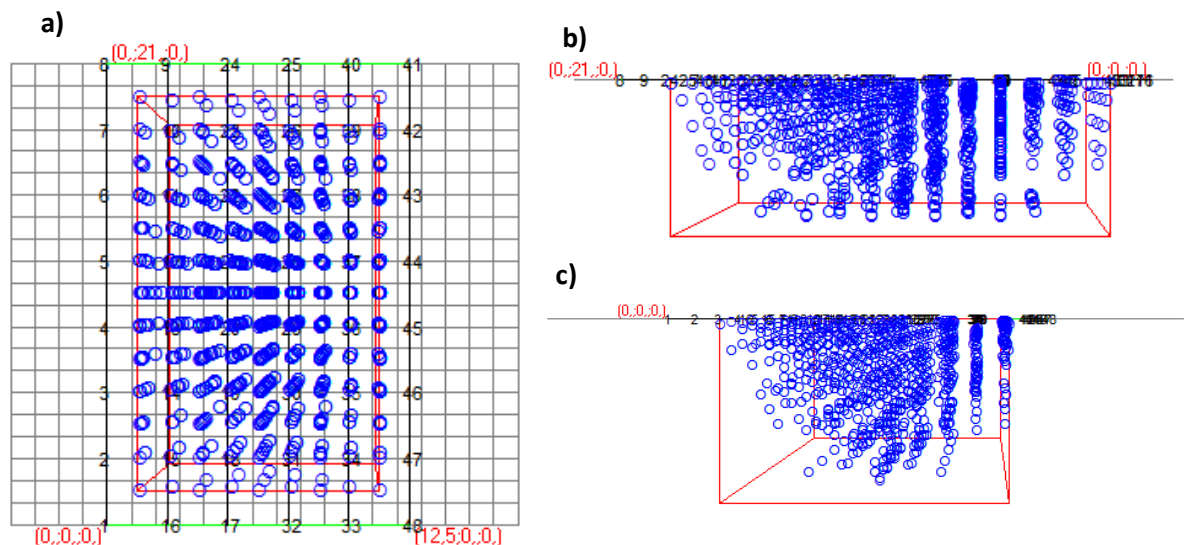


Fig. 7 – Visione prospettica schema acquisizione Polo Polo 3D; a) YX, b) ZY. c) ZX

L'acquisizione dei dati, lungo la griglia 3D stata condotta utilizzando i seguenti parametri:

- n° elettrodi: **48**
- Spaziatura interelettrodica lungo x: **3.00 m**
- Spaziatura interelettrodica lungo y: **2.50 m**
- Griglia xy: **8x6** elettrodi
- Area griglia: **262.5 m²**
- Voltaggio usato: **250 V**
- Stack min/max: **3/10**
- Quality factor: **2%**

6. ELABORAZIONE

I *dataset* provenienti dalle 3 configurazioni di acquisizione utilizzate, DD, WA, PP sono stati elaborati mediante tecnica *general array* che nella fase di inversione tomografica, sfrutta simultaneamente le peculiarità di ciascun array aumentando il potere risolutivo dell'indagine elettrica (Stummer et al., 2004).

Dal punto di vista numerico, l'inversione dei dati di resistività apparente è stata condotta utilizzando un algoritmo basato su un procedimento di deconvoluzione dei minimi quadrati (software *Res3Dinv* – R. Barker Birmingham University - *Geotomo Software*), che consente di ricavare sezioni bidimensionali e tridimensionali tramite moduli di calcolo alle differenze finite o agli elementi finiti. L'errore quadratico medio (RMS error) fornisce in percentuale lo scarto tra i valori misurati e quelli calcolati, per cui la corrispondenza tra i dati di campagna e quelli del modello è più elevata quando l'errore è minimo. Durante l'elaborazione delle pseudosezioni di resistività apparente l'errore quadratico medio è risultato essere variabile tra $4,3 \div 8,7$ %, valori che indicano una sostanziale bontà dei modelli proposti. Come strumento di *imaging 3D* è stato utilizzato il software *Voxler* (*Golden Software*).

7. RISULTATI

7.1. ERT03

I dati di resistività, opportunamente invertiti evidenziano un'elettrostratigrafia costituita (fig.8; All.I - Tav.2, 3,4) da un primo orizzonte (**Ue1**) relativamente conduttivo ($\rho > 150 \Omega \cdot m$) che si estende sino a profondità di 1 m circa associabile a terreno vegetale con clasti. Segue un elettrostrato (**Ue2**) caratterizzato da ρ comprese tra $200 \div 800 \Omega \cdot m$ e spessore pari a circa 2 m che tende ad aumentare nella zona centrale (fig.8) sino ad un massimo di 4.5 m, riferibile a calcare fortemente fratturato ed alterato.

Chiude la sequenza elettrostratigrafica l'orizzonte **Ue3** caratterizzato da ρ comprese tra $700 \div 4000 \Omega \cdot m$ associabile a calcare, caratterizzato da massimi riferibili a porzioni dell'ammasso meno fratturate/alterate e minimi compatibili con la presenza di porzioni altamente fratturate/alterate e/o con terra rossa.

La tomografia elettrica non ha evidenziato zone alto resistive compatibili con la presenza di cavità.

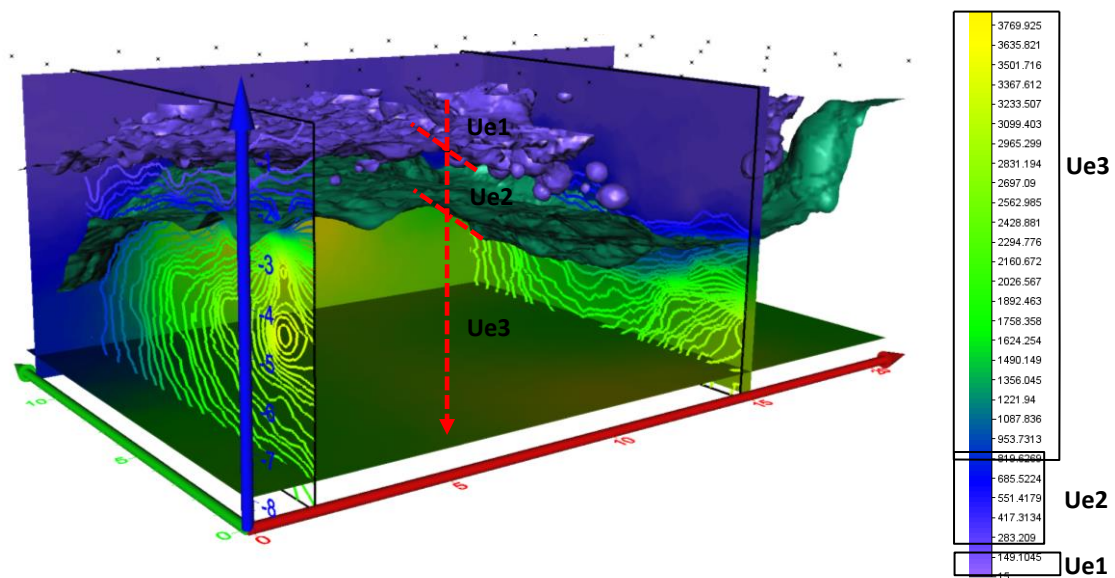


Fig. 8 – Visione prospettica ERT3 con isosuperfici e isolinee.

7.2. ERT02

I dati di resistività, opportunamente invertiti, indicano la presenza di anomalie di resistività positive visibili sia qualitativamente attraverso rappresentazioni volumetriche 3D (Fig.9), sia attraverso piani orizzontali a varie profondità dal piano campagna (ALL. I). Quest'ultima rappresentazione consente di avere indicazioni geometriche sull'andamento delle anomalie in profondità essendo una proiezione in superficie dell'anomalia stessa (ovvero del corpo che l'ha generata).

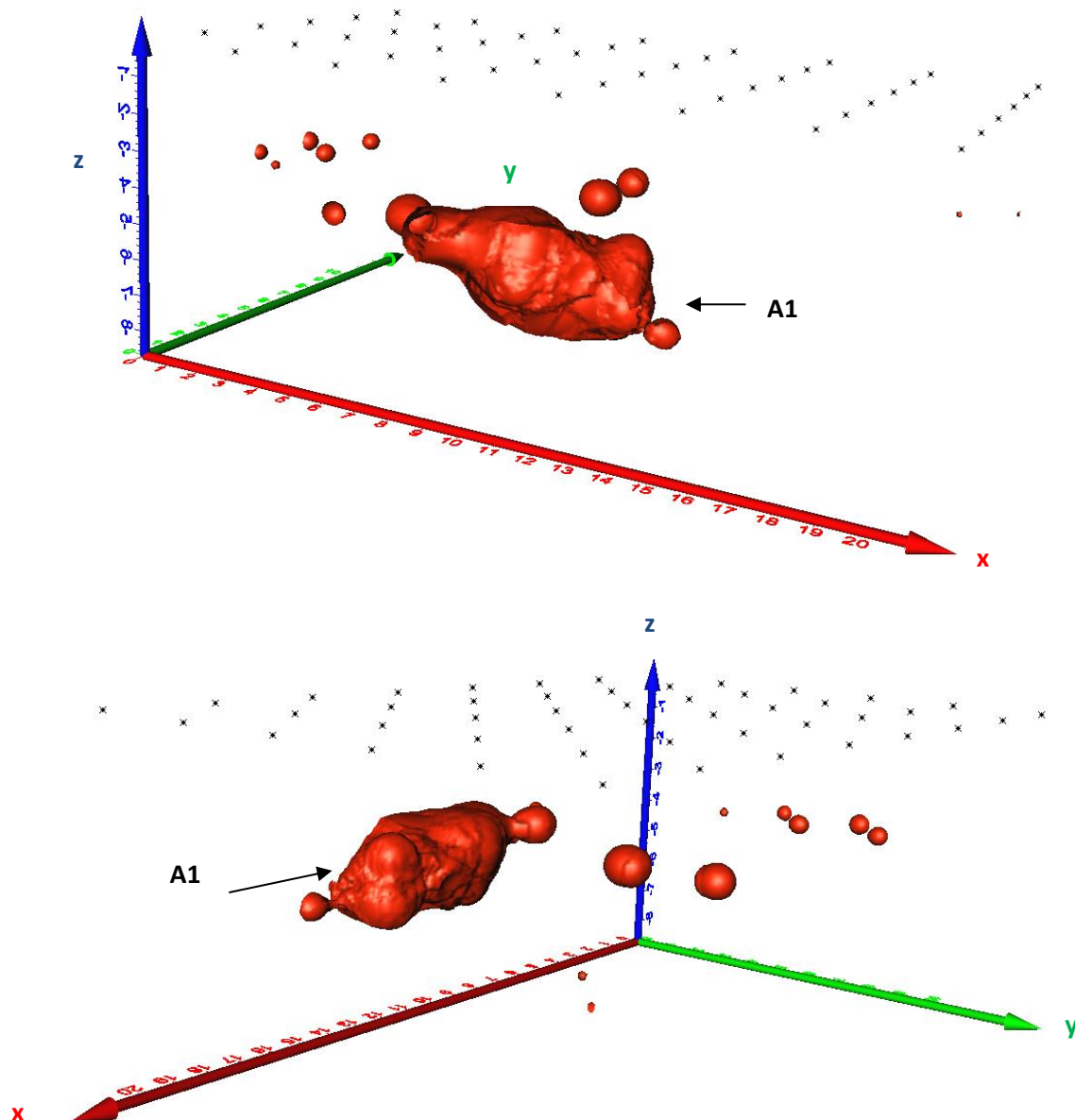


Fig. 9 – ERT2 - Visioni prospettiche anomalie.

In particolare la tomografia ha evidenziato la presenza di un'anomalia principale (A1) con $\rho > 8000 \Omega \cdot m$ che si estende tra le progressive 6÷13 m lungo l'asse x, tra le progressive 0÷2.5 m lungo l'asse y e per profondità comprese tra 3.6÷-5.5 m, associabile ad una cavità priva di materiali di riempimento, unitamente ad alcune anomalie di limitata estensione (fig.9; All.I - Tav.5, 6, 7).

Inoltre la tomografia conferma l'elettrostratigrafia individuata mediante la ERT03 ad eccezione di una relativa superficializzazione del substrato calcareo nella porzione centrale e della maggiore presenza di elettrozone conduttive ($50 < \rho < 800$) nella porzione al di sotto dei -4 m da p.c., associabili a porzioni del substrato calcareo maggiormente fratturate/alterate e/o con terra rossa.

7.3. ERT01

La tomografia 3D suggerisce una successione elettrostratigrafica del tutto analoga alla ERT2 , evidenziando la presenza, entro il volume investigato, di due anomalie resistive ($\rho > 8000 \Omega \cdot m$) compatibili con la presenza di cavità (fig.10; All.I - Tav.8, 9,10). L'anomalia A2 si diparte dalla zona periferica verso la porzione centrale del volume investigato, per una lunghezza di circa 9 m ed una larghezza massima di 3 m circa e a partire da -3.5 m da p.c. sino ad una profondità compresa tra 5.0 e 5.5 m da p.c. L'anomalia A3, a partire da 3.2 m sino alle stesse profondità della precedente anomalia, appare isolata e di esigue dimensioni ($< 2 m^3$). L'assetto elettrostratigrafico risulta del tutto analogo alla a quello suggerito della ERT02.

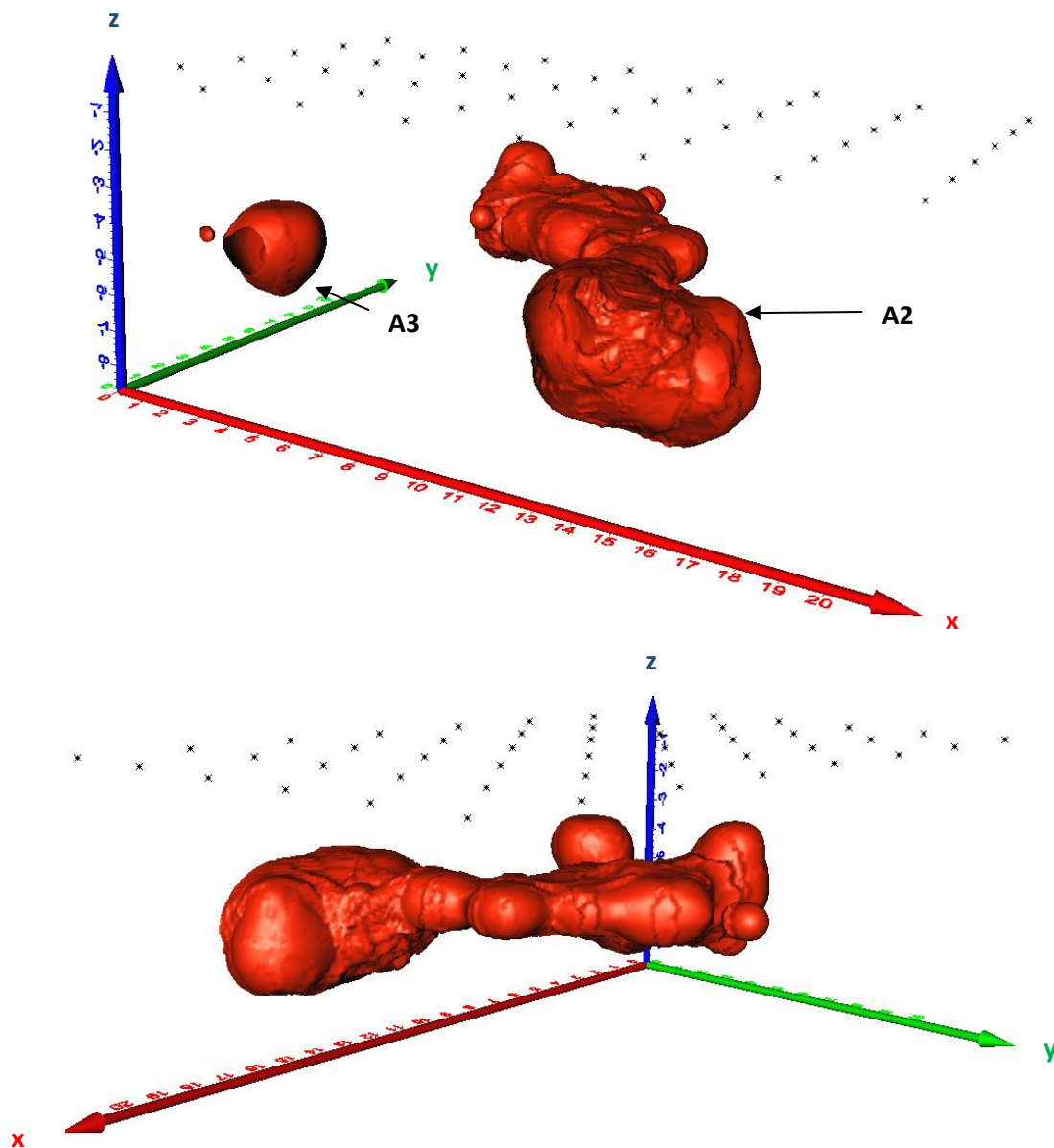


Fig. 10 – ERT1 - Visioni prospettiche anomalie.

9. BIBLIOGRAFIA

Loke, M.H. and Barker, R.D., (1996) - *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi – Newton method*. Geophys Prospect, Vol. 44, 131 – 152.

Loke, M.H., Barker, R., 1996b - Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting 44, 499–523

Loke, M.H., Barker, R., 1995 - Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. Geophysics 60, 1682–1690

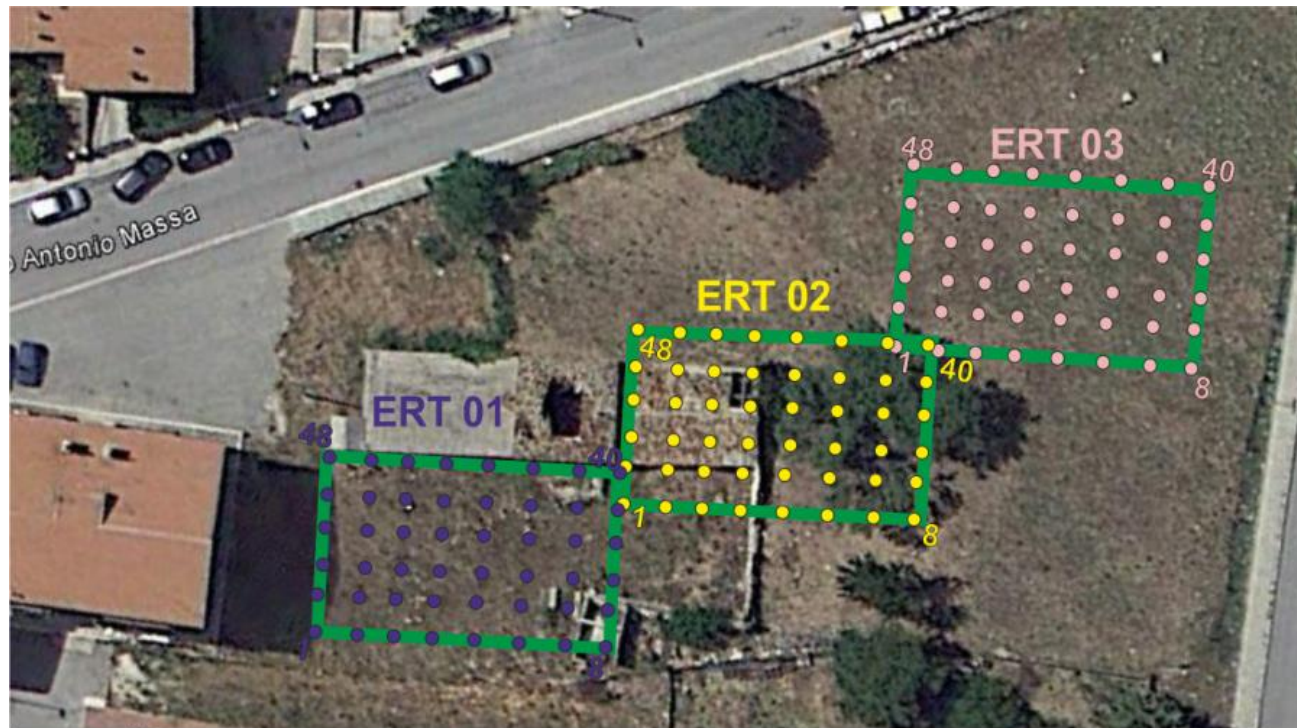
Park, S.K., Van, G.P., 1991 - Inversion of pole–pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes. Geophysics 56, 951–960

Stummer, P., Maurer, H., Green, A., 2004 - Experimental design. Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. Geophysics 69 (1), 120–139

ALLEGATO I
Elaborati Indagini geofisiche
ERT 3D



	ELETTRODO 1		ELETTRODO 8		ELETTRODO 40		ELETTRODO 48	
	E	N	E	N	E	N	E	N
ERT03	559793.00	4617275.00	559811.00	4617286.00	559805.00	4617297.00	559787.01	4617285.28
ERT02	559783.69	4617254.54	559801.44	4617265.88	559795.18	4617277.34	559777.44	4617265.78
ERT01	559771.16	4617235.01	559788.81	4617246.16	559782.19	4617256.43	559764.00	4617245.00



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI NUOVE COSTRUZIONI DI
E.R.P. NEL COMUNE DI SAN GIOVANNI ROTONDO (FG)

Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)

Indagine:

ERT 3D

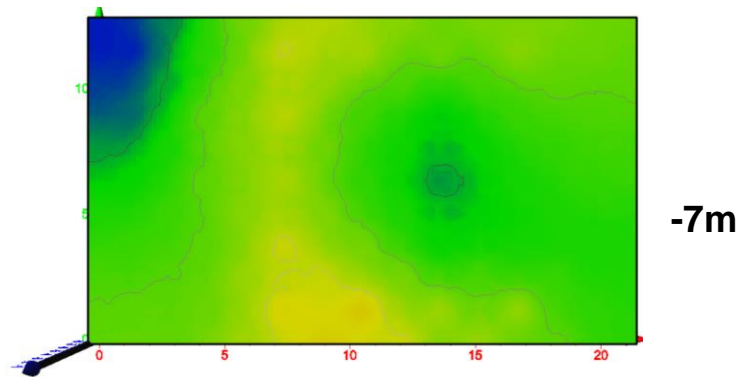
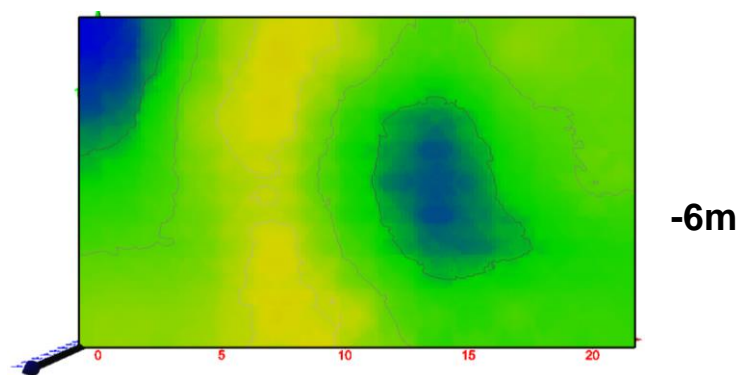
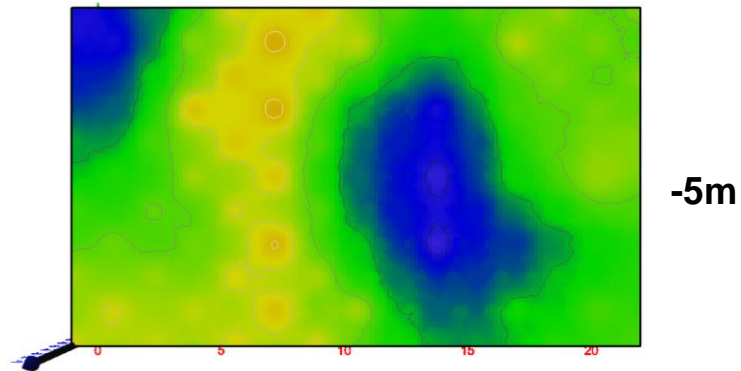
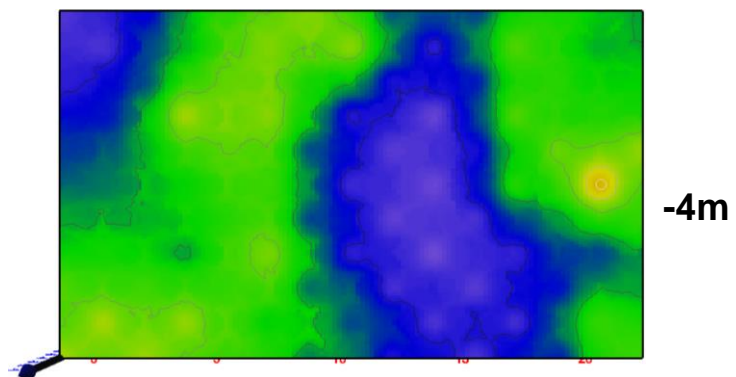
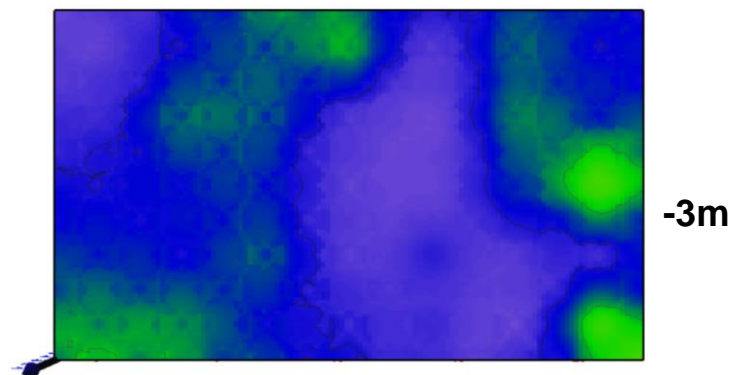
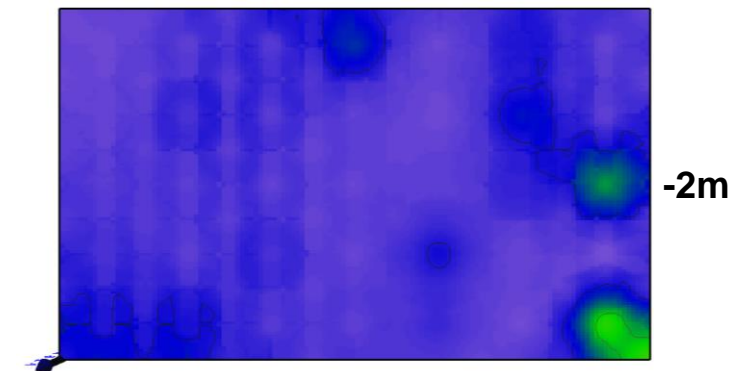
Data esecuzione:

12-13-14/03/2015

Tavola 1:

Ubicazione indagini

ERT 3D

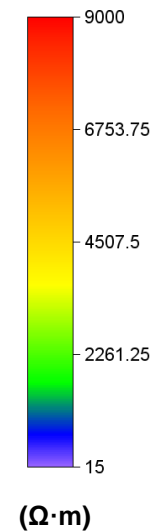


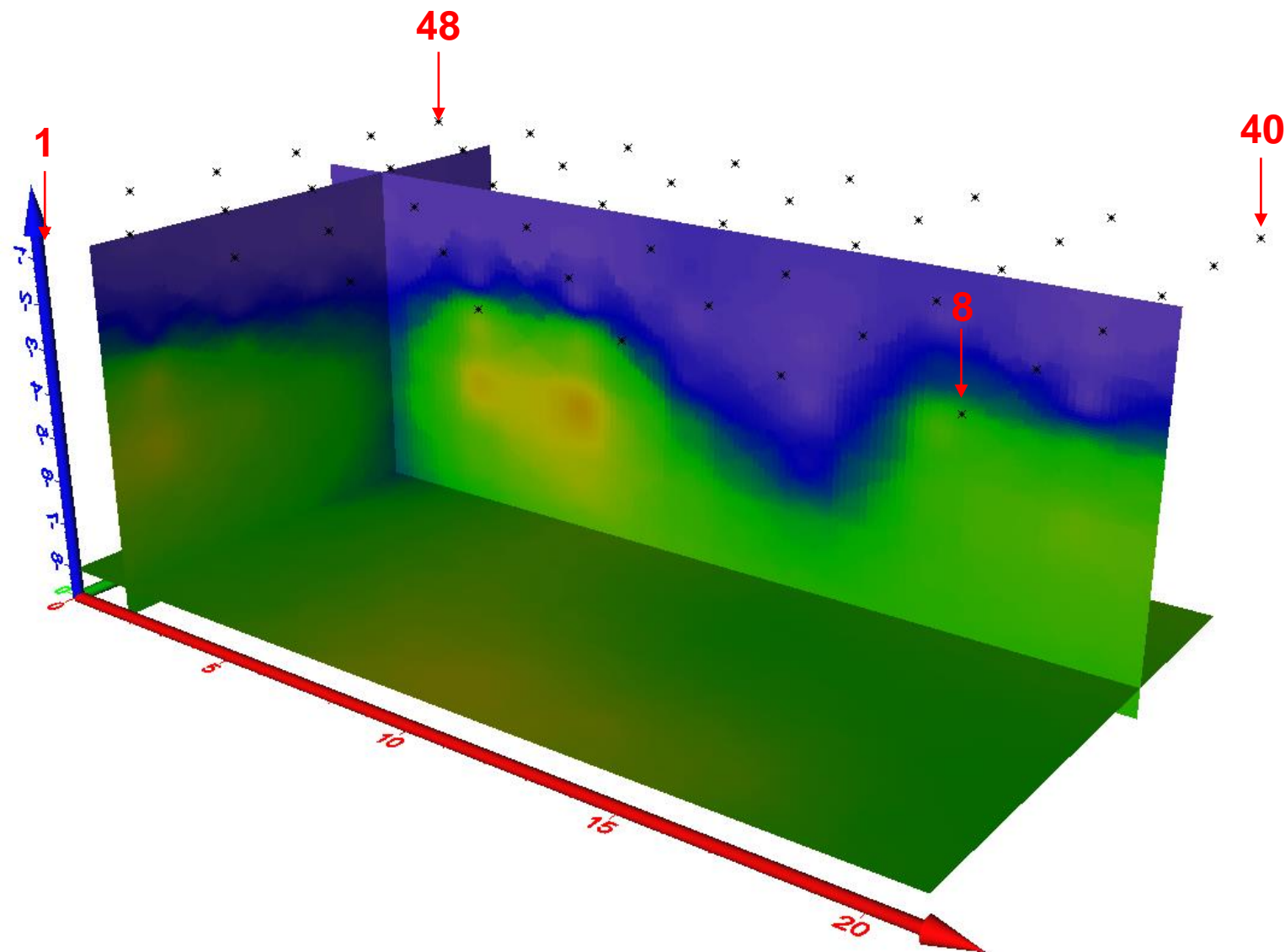
**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 3

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 2:
DEPTH SLICE



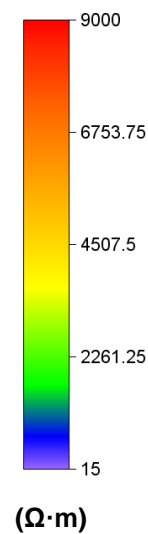


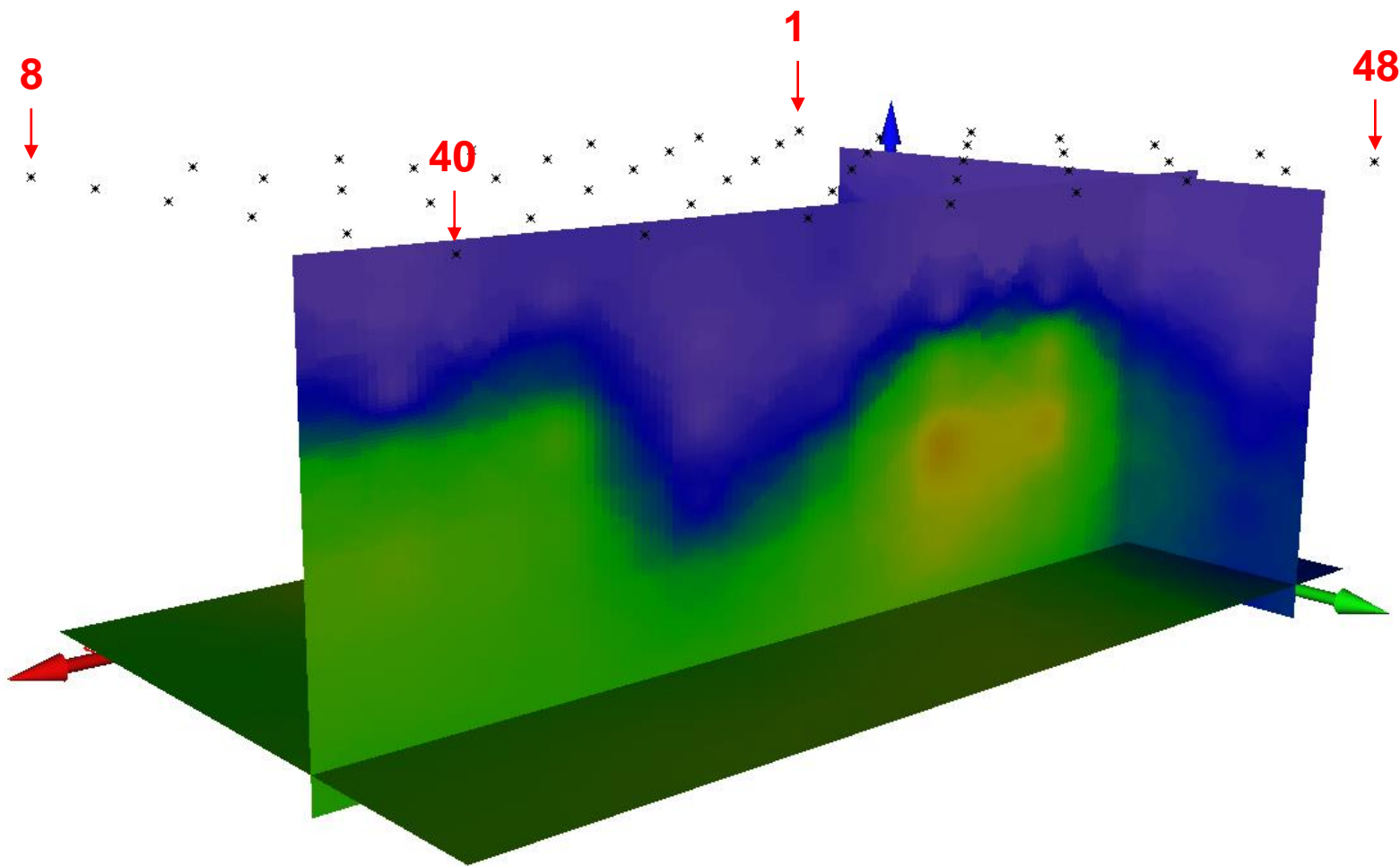
Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)

Indagine:
ERT 3

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 3:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi



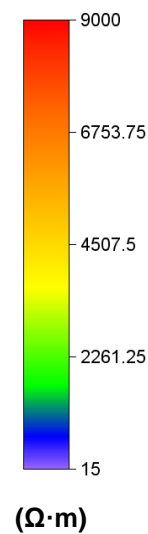


**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 3

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 4:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi

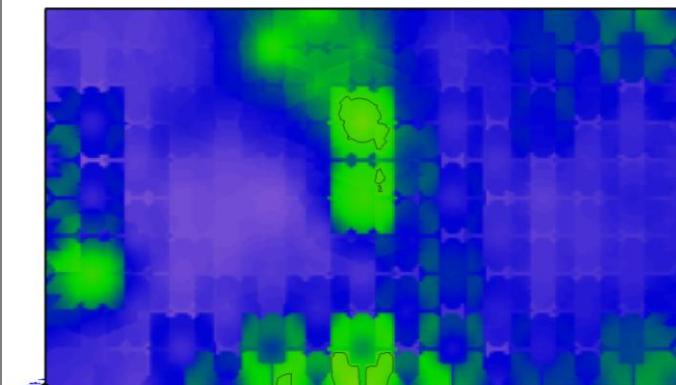


**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

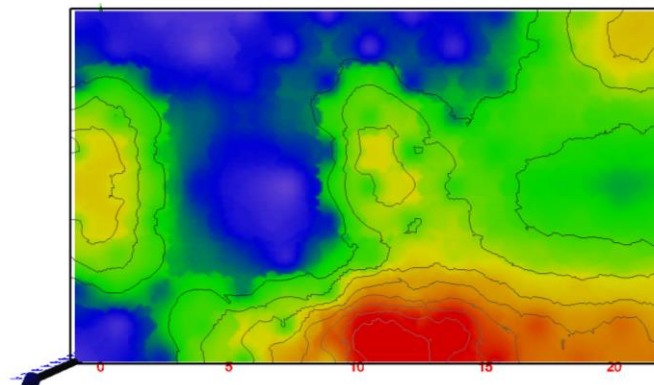
Indagine:
ERT 2

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

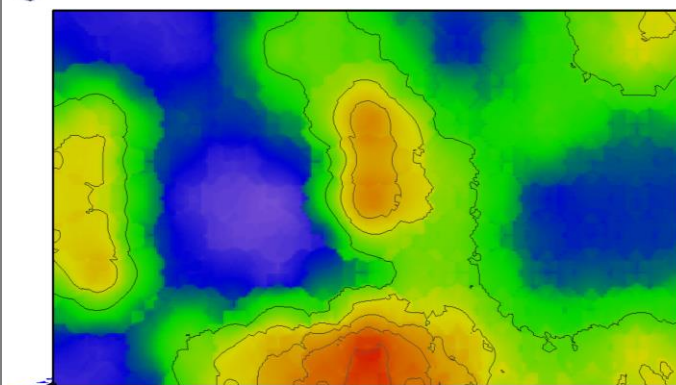
Tavola 5:
DEPTH SLICE



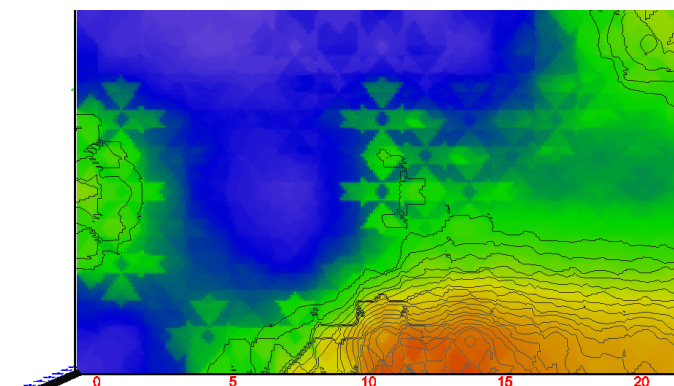
-2m



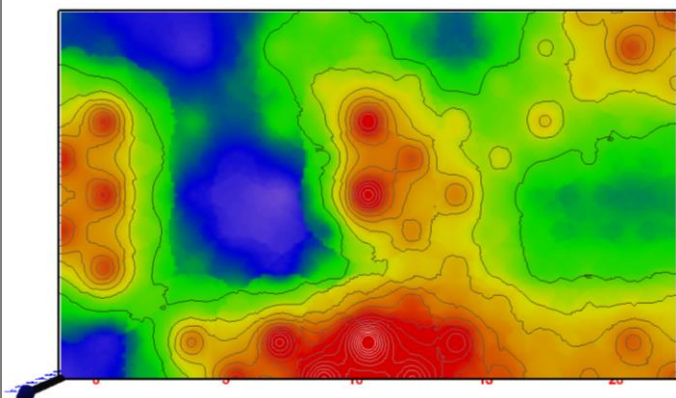
-5m



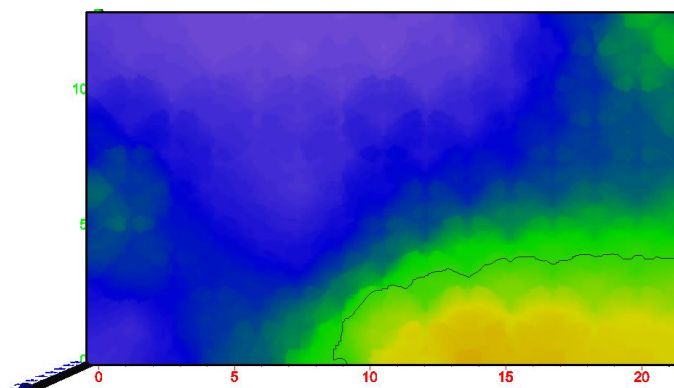
-3m



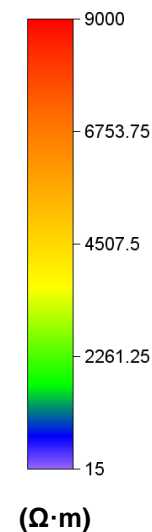
-6m

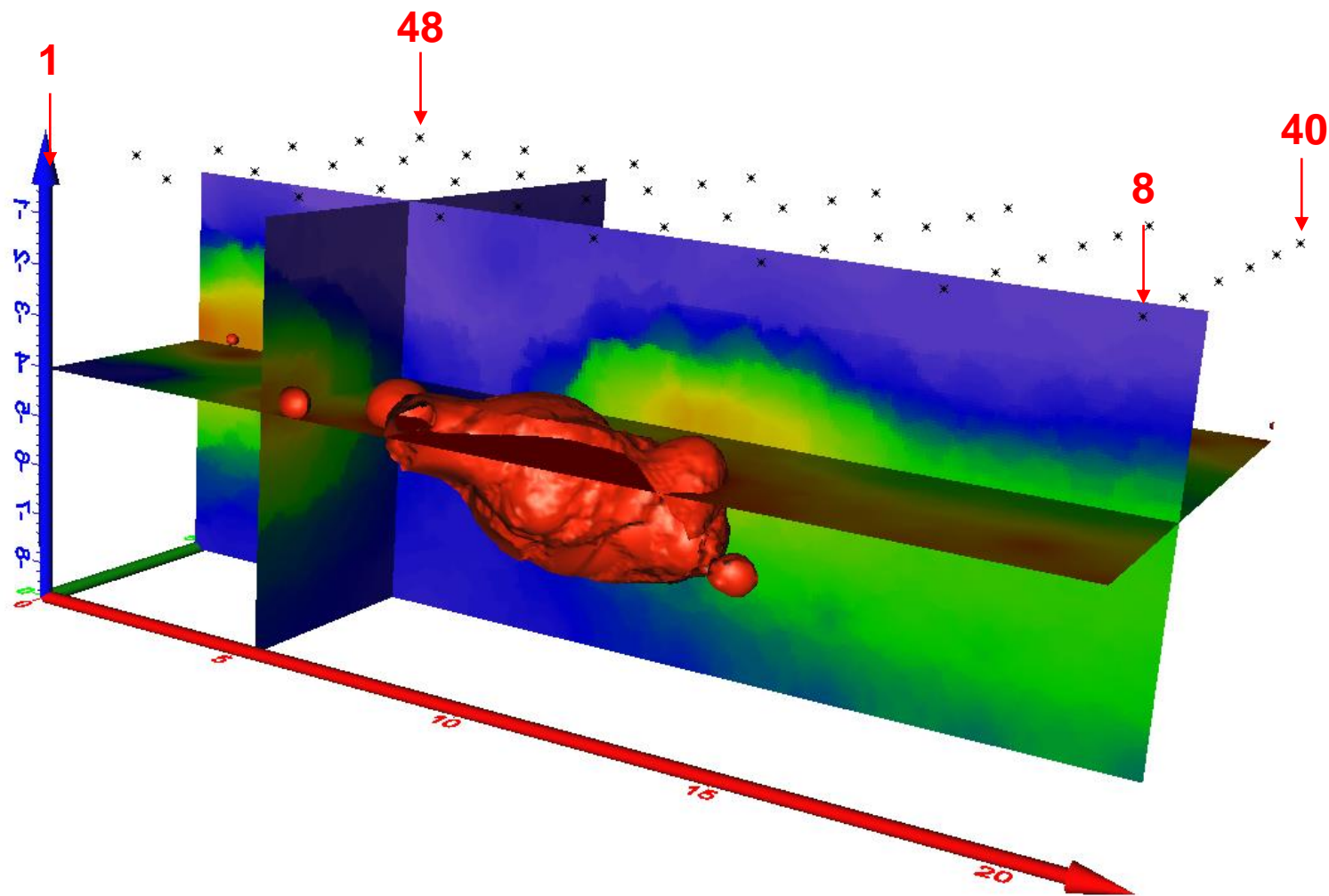


-4m



-7m



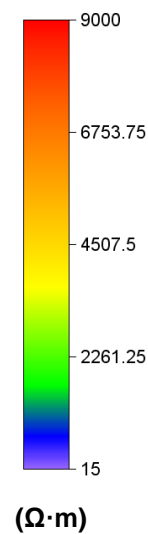


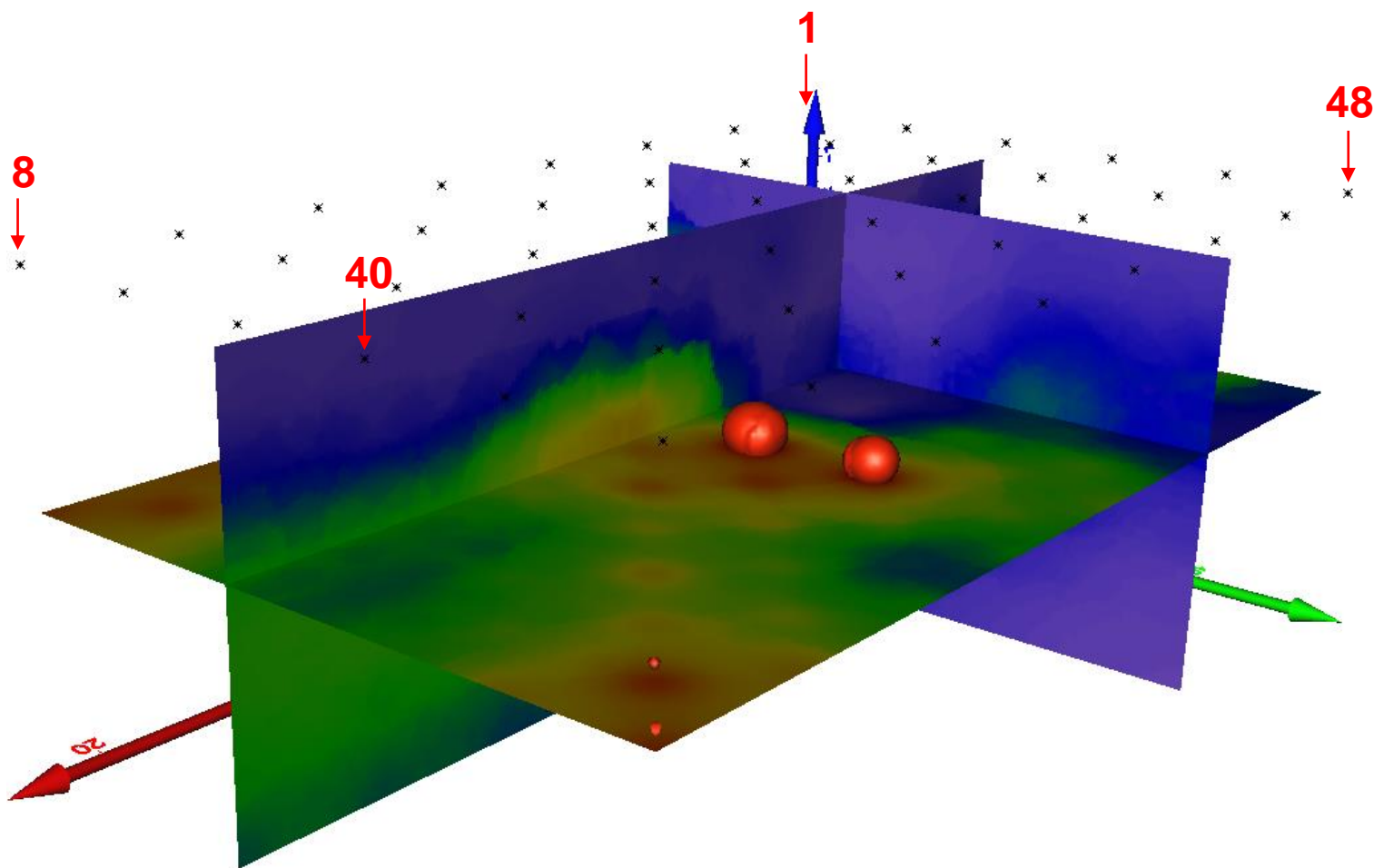
**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 2

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 6:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi



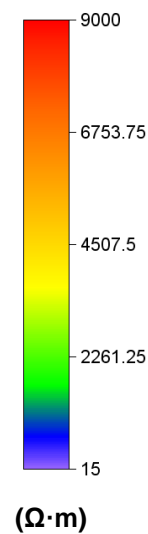


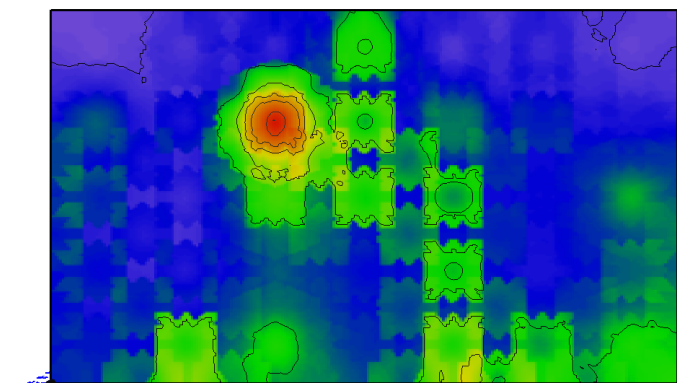
**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 2

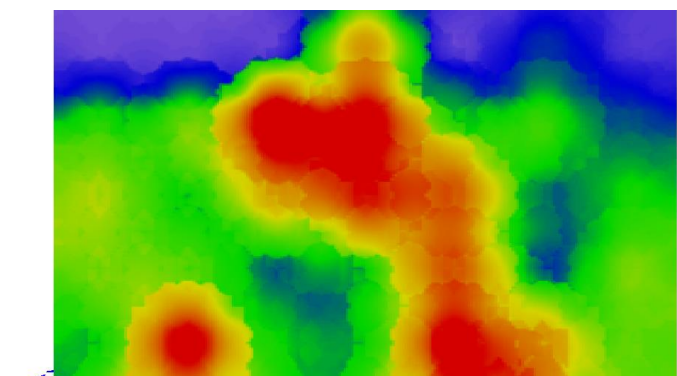
Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 7:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi

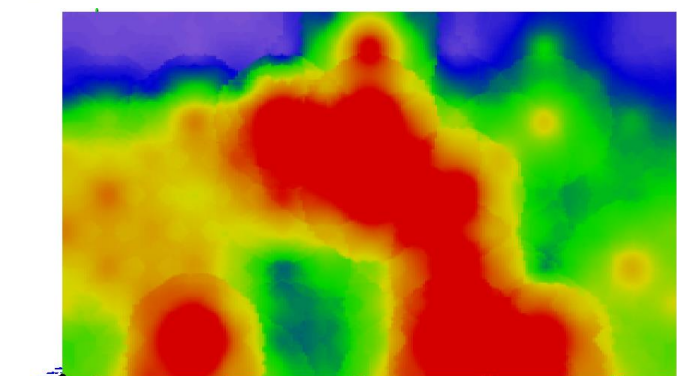




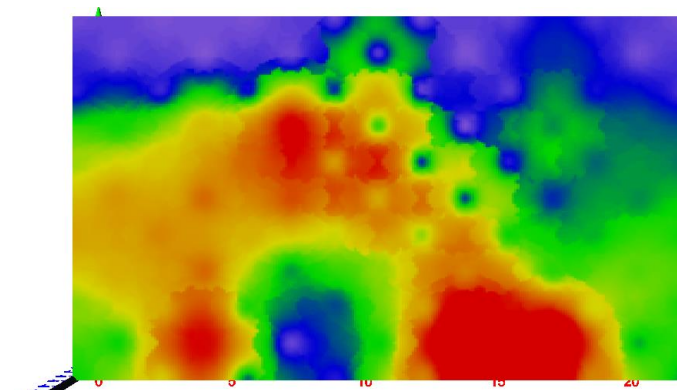
-2m



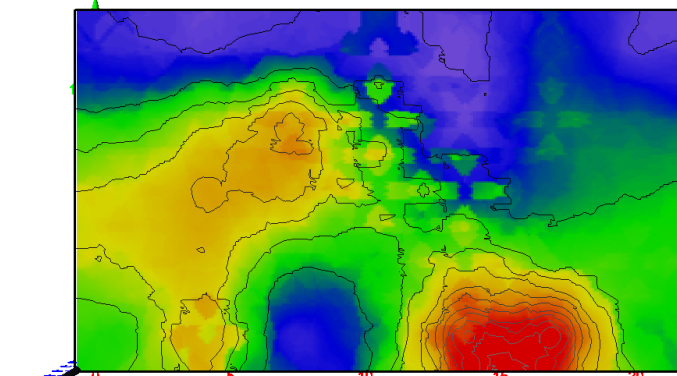
-3m



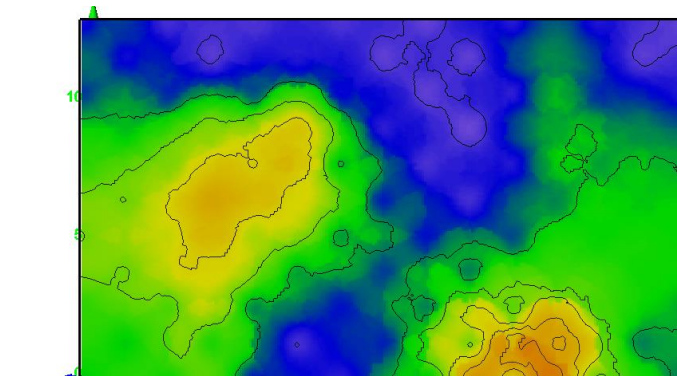
-4m



-5m



-6m



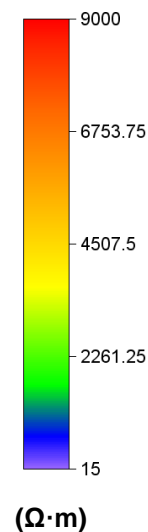
-7m

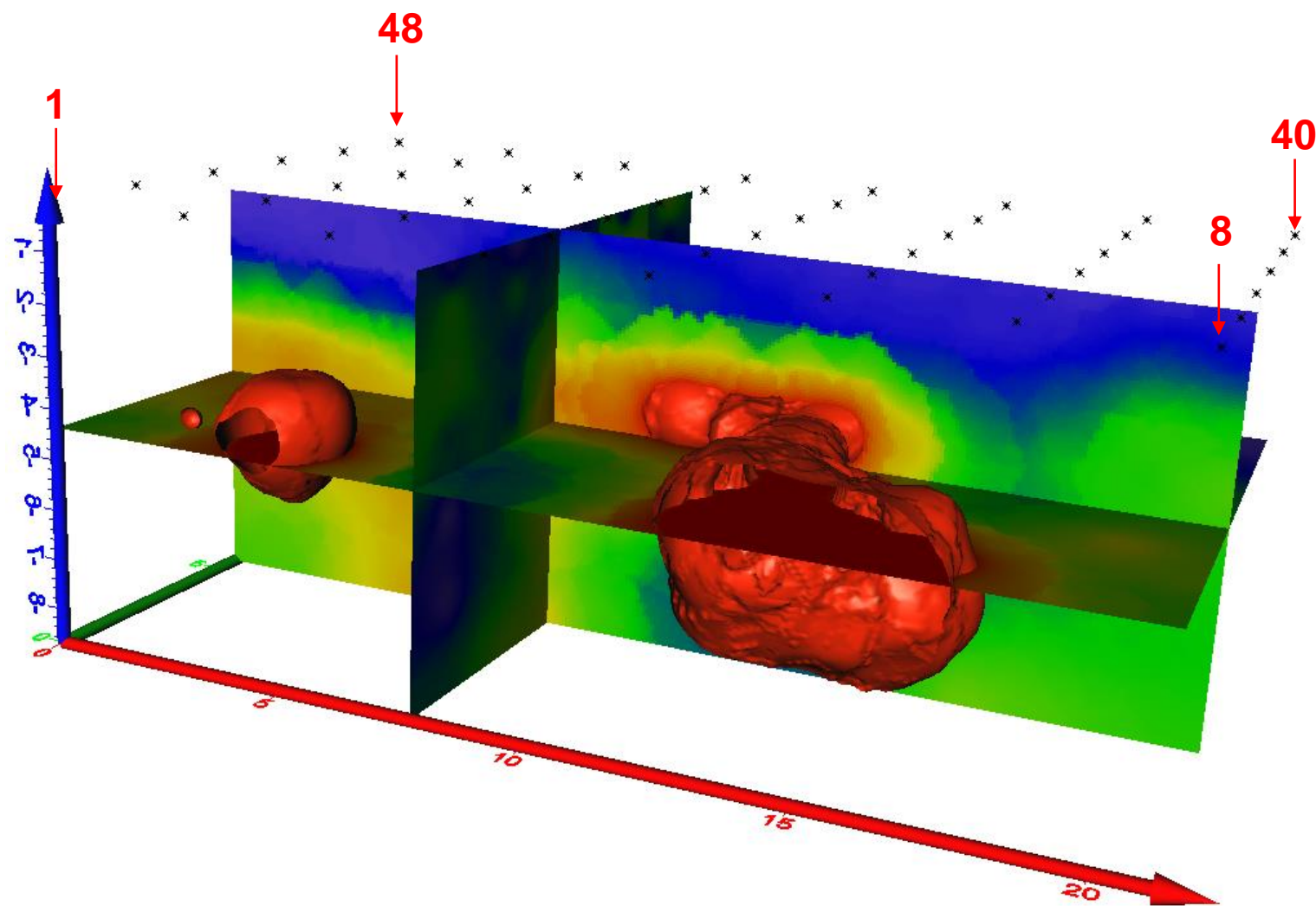
**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 1

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 8:
DEPTH SLICE



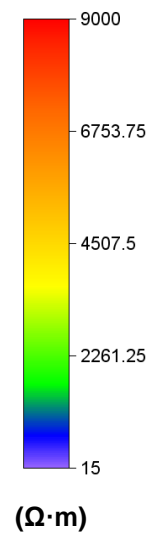


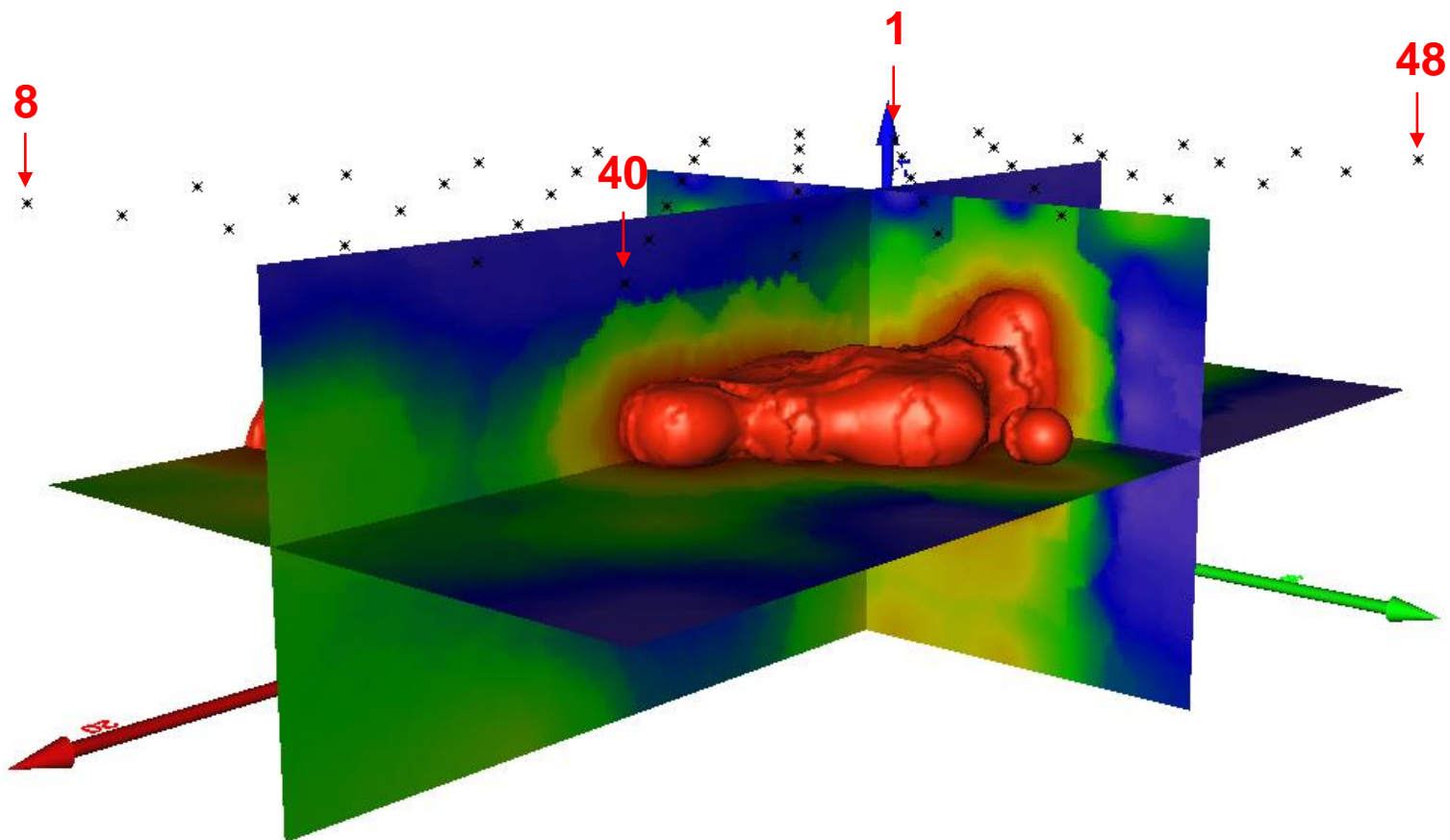
**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 1

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 9:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi



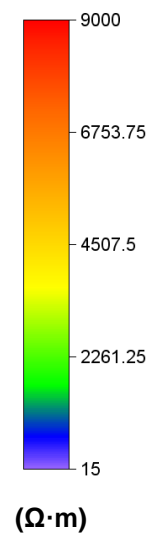


**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 1

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 10:
Visione Prospettica
↗ Elettrodi





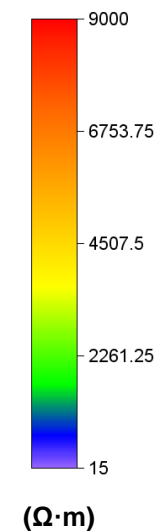
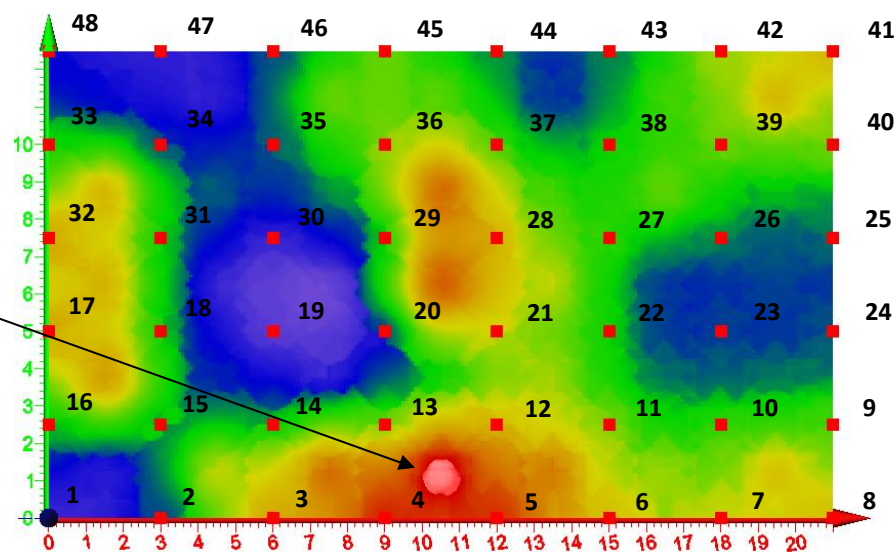
Lavoro: Progetto per la realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. nel comune di San Giovanni Rotondo (FG)

Indagine:
ERT 2 - Palazzina Centrale

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 11:
Anomalia A1 –ERT2

A1 - Top -3.6 m da p.c.





Lavoro: Progetto per la realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. nel comune di San Giovanni Rotondo (FG)

Indagine:

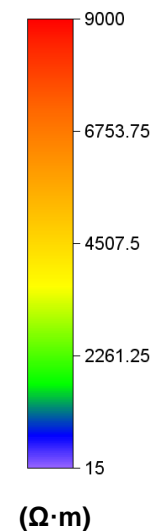
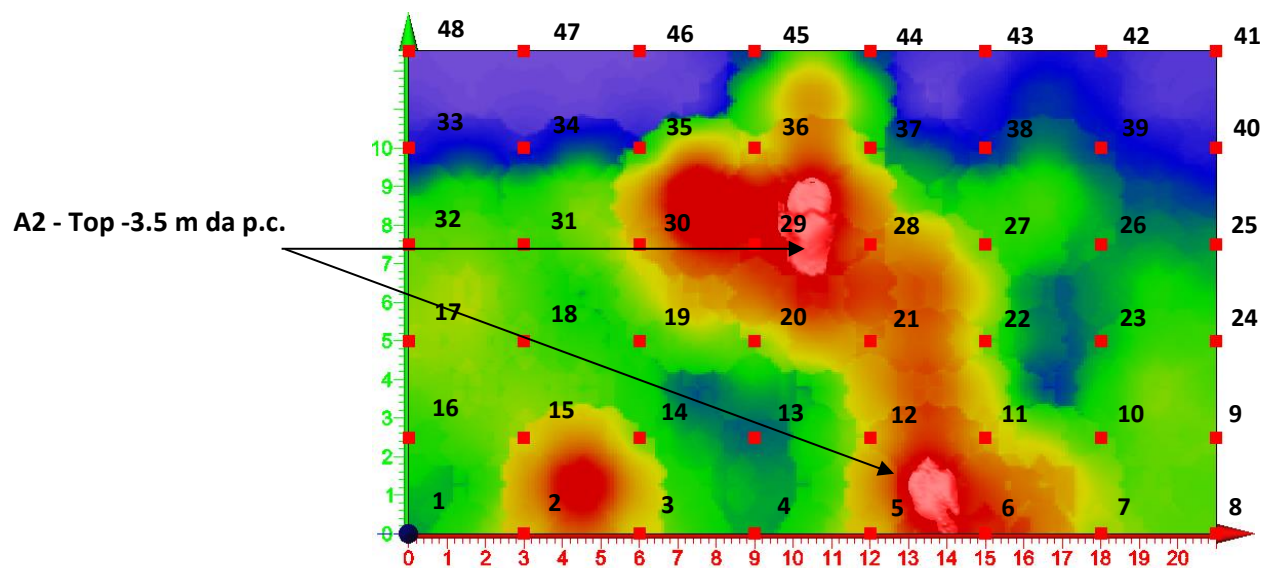
ERT 1- Palazzina S

Data esecuzione:

12-13-14/03/2015

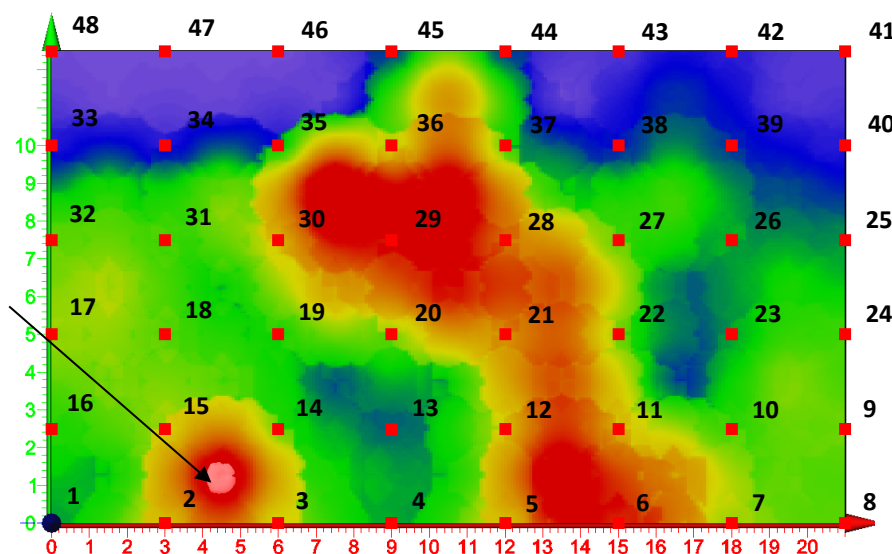
Tavola 12:

Anomalia A2 –ERT 1





Top -3.2 m da p.c.



Lavoro: Progetto per la realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. nel comune di San Giovanni Rotondo (FG)

Indagine:

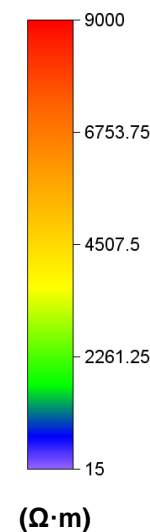
ERT 1 – Palazzina S

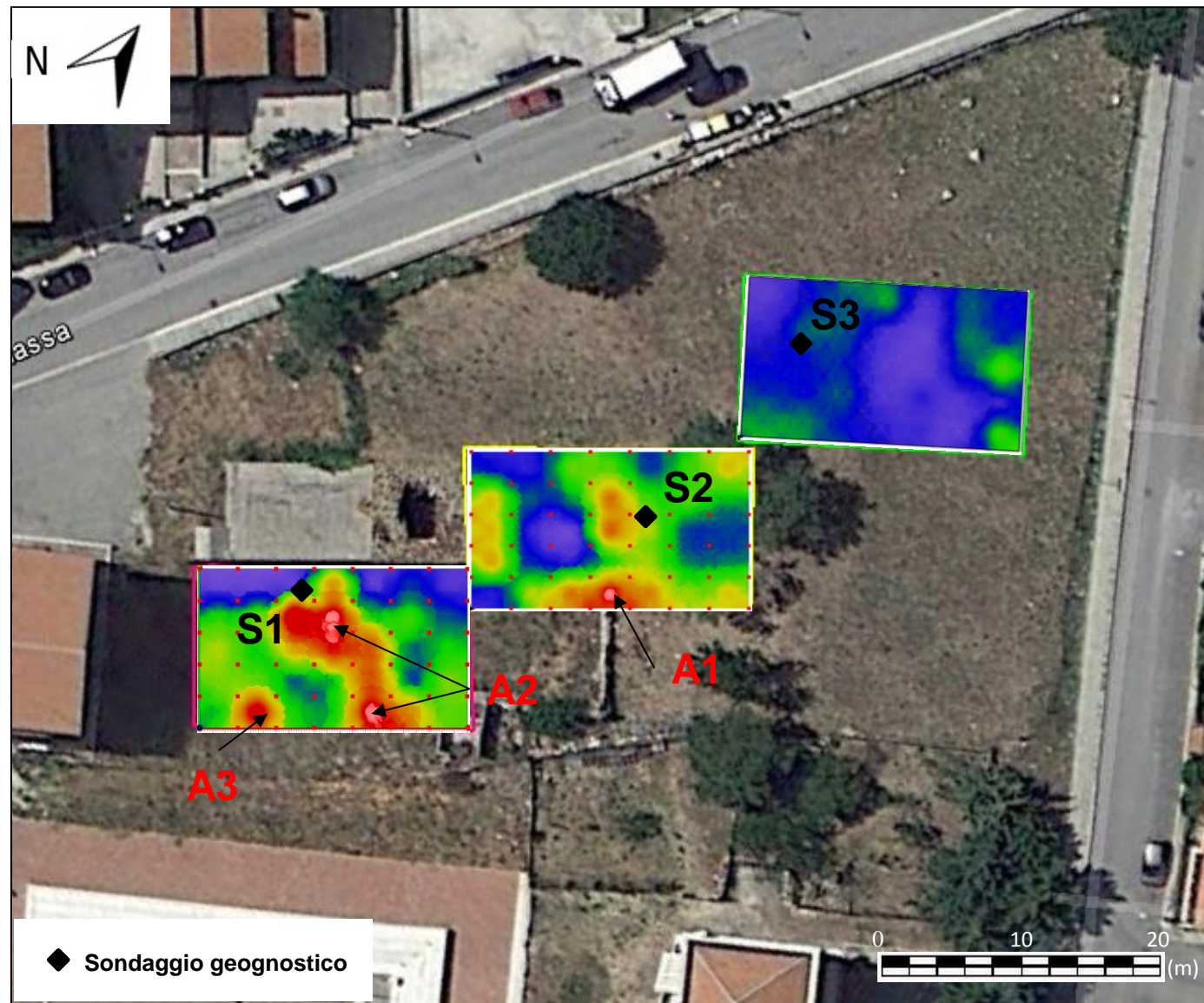
Data esecuzione:

12-13-14/03/2015

Tavola 13:

Anomalia A3 –ERT 1



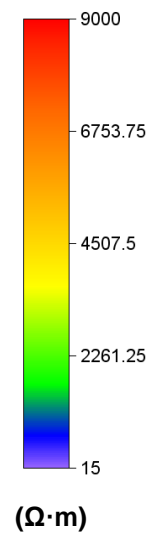


Lavoro: Progetto per la realizzazione di nuove costruzioni di E.R.P. nel comune di San Giovanni Rotondo (FG)

Indagine: ERT3D

Data esecuzione:
12-13-14/03/2015

Tavola 14: Ubicazione Anomalie e sondaggi geognostici su piani di resistività a -3.5m da p.c.



ALLEGATO II
Documentazione fotografica
ERT 3D





**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 3

Data esecuzione:
12/03/2015

Tavola 1:
Fotografie ERT3





**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 2

Data esecuzione:
13/03/2015

Tavola 2:
Fotografie ERT2





**Lavoro: Progetto per
la realizzazione di
nuove costruzioni di
E.R.P. nel comune di
San Giovanni
Rotondo (FG)**

Indagine:
ERT 1

Data esecuzione:
14/03/2015

Tavola 3:
Fotografie ERT1

