



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

1 di/of 37

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

Indagini geognostiche Montemilone WIND farm

File: GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00– Indagini geognostiche Montemilone wind

00	-- / -- / ----	Issued	Name (Contactor)	Name (Contactor)	Name (Contactor)
			Name (Contactor)	Name (Contactor)	Name (Contactor)
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED

GRE VALIDATION

Name (GRE)	K. Tomassetti	F. Tamma
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT Montemilone Wind	GRE CODE																		
	GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT			SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION							
	GRE	EEC	R	2	5	I	T	W	1	5	4	3	8	4	9	0	0	1	0
CLASSIFICATION					UTILIZATION SCOPE														



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

2 di/of 37

INDEX

1. PREMESSA	4
2. INDAGINI DIRETTE	5
2.1. SONDAGGI GEOGNOSTICI	5
2.1.1. PRELIEVO CAMPIONI GEOTECNICI	7
2.1.2. PROVE SPT	7
2.2. PROVE PENETROMETRICHE DPSH	9
2.2.1. STRUMENTAZIONE	9
2.2.2. METODOLOGIA DELLA PROVA	10
3. INDAGINI GEOFISICHE	11
3.1. METODO MASW	12
3.1.1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CENNI SUL METODO	12
3.1.2. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	14
3.1.3. SCHEMA DI ACQUISIZIONE.....	16
3.2. METODO SISMICA A RIFRAZIONE (SRT)	17
3.2.1. PRINCIPI BASE DEL METODO	17
3.2.2. FATTORI DI INFLUENZA DELLE VELOCITÀ SISMICHE	19
3.2.3. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA	21
3.2.4. SCHEMA DI ACQUISIZIONE.....	22
3.2.5. PROCESSING	23
3.3. METODO DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT)	24
3.3.1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CENNI SUL METODO	24
3.3.2. PROPRIETÀ ELETTRICHE DEL SUOLO ED INTERPRETAZIONE DEI VALORI DI RESISTIVITÀ	27
3.4. RESISTIVITÀ ELETTRICA (SEV)	31
3.4.1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA.....	32
3.4.2. SCHEMA DI ACQUISIZIONE.....	33
3.4.3. PROCESSING	33
3.5. RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE	35
3.6. BIBLIOGRAFIA	36



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

3 di/of 37

ALLEGATI:

- FASCICOLO 1 - STRATIGRAFIE SONDAGGI;
- FASCICOLO 2 - INDAGINI GEOFISICHE



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

4 di/of 37

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio eseguite a Maggio 2022 nel Comune di Montemilone (Pz) per "Accordo Quadro relativo all'esecuzione di indagini geognostiche-geofisiche in sito finalizzate alla caratterizzazione dei terreni delle aree di ubicazione di impianti per la produzione di energia rinnovabile di varie tecnologie (geotermico, idrico, fotovoltaico, solare termodinamico, eolico) nel territorio italiano ed europeo secondo quanto previsto nel documento di Specifica Tecnica."

Nell'ambito del progetto summenzionato è stata effettuata una campagna di indagini geognostiche finalizzata alla determinazione delle caratteristiche geotecniche e geofisiche.

In particolare, secondo quanto indicato nel piano delle indagini, sono state programmate le seguenti attività come da tabella di seguito riportata.

ID	Descrizione
BH MM 2	Sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prelievo campioni e prove SPT
DPSH 8_9	Prova penetrometrica dinamica pesante continua
DPSH MM 2	Prova penetrometrica dinamica pesante continua
DPSH MT-04	Prova penetrometrica dinamica pesante continua
DPSH MT-05_06	Prova penetrometrica dinamica pesante continua
ERT MM2	Geoelettrica
ERT MM2	Geoelettrica
MASW MM2	Masw
MASW MT 4	Masw
MASW MT 5-6	Masw
RES ELETTR MT 04	Resistività elettrica Verticale
RES TERM MT 04	Resistività Termica
SRT 8-9	Sismica a rifrazione

Nella foto è riportata l'area con l'ubicazione delle indagini (fig.1).



Figura 1: Ubicazioni indagini.

2. INDAGINI DIRETTE

2.1. SONDAGGI GEOGNOSTICI

I sondaggi geognostici a carotaggio continuo sono stati eseguiti rispettando le specifiche allegato al contratto, le Raccomandazioni AGI (1984) e le Modalità Tecniche ANISG (1977).

Sono stati eseguiti complessivamente n°1 sondaggi eseguiti a carotaggio continuo per la definizione stratigrafica, prove S.P.T e prelievo campioni sia indisturbati che rimaneggiati.

Di seguito lo schema dei sondaggi effettuati con indicazione della profondità, del tipo di condizionamento del foro, delle prove in sito e prelievo di campioni sia geotecnici che ambientali.

Sond.	Lungh. [m]	Campioni	S.P.T.	Piez.	D.H.
S1	40,00	8	20	-	-

Tabella 1: Schema indagini eseguite

Le caratteristiche tecniche delle sonde di trivellazione utilizzate per la realizzazione dei sondaggi sono riassunte nella seguente tabella:

VELOCITA' DI ROTAZIONE (giri/min)	500
COPIA MASSIMA (daNm)	900
CORSA MASSIMA (cm)	350
SPINTA (daN)	6300
ARGANO A FUNE	SI
DAC TEST	-

Tabella 2: Caratteristiche tecniche delle Sonde di perforazione.

Le operazioni sono state eseguite da personale specializzato in perforazioni. La squadra operativa è stata composta da n°1 sondatore, n° 2 aiuto sondatore e dal geologo, il quale ha provveduto al rilievo stratigrafico dei terreni attraversati e alla conservazione delle carote estratte in apposite cassette catalogatrici, alla realizzazione dei report giornalieri e agli elaborati stratigrafici, al prelievo dei campioni ambientali di terreno e di acque sotterranee.

I sondaggi a carotaggio continuo, sono stati eseguiti a rotazione con il metodo classico con sistema ad aste e carotiere.

Tale perforazione avviene tramite aste di collegamento che vengono tirate su dopo ogni manovra (tratto perforato) per estrarre dal carotiere, posto alla base della colonna di aste, la carota di sedimento. Il raggiungimento di profondità maggiori avviene aggiungendo in superficie aste alla batteria. Le aste impiegate hanno diametro tra 76.1 mm.

Gli utensili di perforazione prevalentemente usati sono stati: carotiere semplice T1 con corone al widia, valvole di testa, valvole a farfalla e cestelli per il prelievo di materiale a bassa consistenza. Gli stessi carotieri sono stati utilizzati per la pulizia del foro.

Per il rivestimento dei fori sono stati usati Tubi metallici filettati del diametro esterno nominale da 127 mm e 152mm in funzione della strumentazione da installare in foro.

Le carote estratte nel corso della perforazione sono state sistemate in apposite cassette catalogatrici munite di scomparti divisorii e coperchio apribile di dimensioni 5m X 1m.

Su ogni cassetta è stato indicato l'oggetto, il cantiere, la profondità, ed il codice del sondaggio e fotografate.



Figura 2: Casette catalogatrici.



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

7 di/of 37

La stratigrafia dei terreni attraversati del singolo sondaggio è riportata nel FASCICOLO 1 degli allegati.

2.1.1. PRELIEVO CAMPIONI GEOTECNICI

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati prelevati campioni geotecnici con campionatori Shelby e campioni rimaneggiati. I campioni sono stati successivamente sottoposti ad analisi di laboratorio. In tabella il riepilogo dei campioni prelevati.

TIPO CAMPIONE	QUOTA PRELIEVO (ml)
Campione Ind. 1	7.00-7.50
Campione Ind. 2	12.00-12.50
Campione Ind. 3	20.00-20.50
Campione Rim. 1 (SPT10-PA)	20.50-20.95
Campione Rim. 2 (SPT11-PA)	22.50-22.95
Campione Rim. 3 (SPT17-PA)	34.00-34.45
Campione Rim. 4 (SPT18-PA)	36.00-36.45
Campione Rim. 5 (SPT20-PA)	40.00-40.45

Tabella 3: Riepilogo campioni prelevati.

2.1.2. PROVE SPT

Le prove SPT vengono eseguite seguendo la normativa vigente (AGI, 1977) nonché dalle norme presente sul capitolato speciale d'appalto.

La prova consente di determinare la resistenza di un terreno alla penetrazione dinamica di un campionatore infisso a partire dal fondo di un foro di sondaggio.



Figura 3: Esecuzione prova SPT.

La strumentazione impiegata consiste in:

- Tubo campionario apribile longitudinalmente: \varnothing est= 50.8 mm; \varnothing int= 35 mm L minima (escluso tagliente principale)>457 mm; L utile = 630 mm;
- La scarpa tagliente terminale (con rastremazione negli ultimi 19 mm) = 76 mm; il campionario sarà munito di valvola a sfera alla sommità e aperture di scarico e sfiato;
- Massa battente di peso 63,5 kg che cada da 75 cm di altezza;
- Aste collegate al campionario aventi peso per metro lineare 6.5 kg (± 0.5 kg/ml). Le aste saranno diritte, ben avvitate in corrispondenza dei giunti e con flessione totale della batteria pronta per la prova $< 1^\circ/^\circ$. La caduta del maglio deve essere libera; pertanto deve essere adottato un dispositivo di sgancia.

Di seguito si riporta la tabella con le risultanze delle prove SPT:

SONDAGGIO	Tipologia prova SPT	Profondità prova	N1	N2	N3
S1	Punta chiusa	2.00-2.22	40	R	-
	Punta chiusa	4.00-4.45	12	19	21
	Punta chiusa	6.00-6.26	30	R	
	Punta chiusa	8.00-8.14	R		
	Punta chiusa	10.00-10.10	R		
	Punta chiusa	12.50-12.95	8	19	23
	Punta chiusa	14.50-14.95	27	30	35
	Punta chiusa	16.00-16.45	15	22	34



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

9 di/of 37

Punta chiusa	18.00-18.36	20	40	R
Punta aperta	20.00-20.50	5	14	15
Punta aperta	22.50-22.95	3	7	11
Punta chiusa	24.50-24.95	7	15	21
Punta chiusa	26.50-26.77	30	R	
Punta chiusa	28.00-28.40	10	38	R
Punta chiusa	30.00-30.37	29	41	R
Punta chiusa	32.00-32.29	28	R	
Punta aperta	34.00-34.45	8	13	22
Punta aperta	36.00-36.45	9	12	24
Punta chiusa	38.00-38.45	12	23	37
Punta aperta	40.00-40.45	11	23	30

Tabella 4: Tabella SPT.

2.2. PROVE PENETROMETRICHE DPSH

La prova consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica infissa nel terreno per battitura. La prova fornisce informazioni di tipo continuo poiché le misure della resistenza alla penetrazione vengono eseguite durante tutta l'infissione.

2.2.1. STRUMENTAZIONE

Nella presente indagine è stato impiegato un penetrometro DPSH (Superpesante) tipo "Emilia" le cui caratteristiche sono riportate qui di seguito:

- Peso Massa Battente (M) = 63.50 Kg
- Altezza Caduta Libera (H) = 0.75 m
- Peso Sistema Battuta (M') = 2.0 Kg
- Diametro Punta Conica = 52.0 mm
- Area Base Punta Conica (A) = 21.24 cm²
- Angolo Apertura Punta = 60 °
- Lunghezza delle Aste = 1.50 m
- Peso Aste (M') = 8.3 Kg
- Avanzamento Punta = 0.30 m
- Numero Di Colpi N = N(30) di 30 cm
- Penetrazione per Colpo (e) = 1/N(30)
- Rivestimento/Fanghi = No

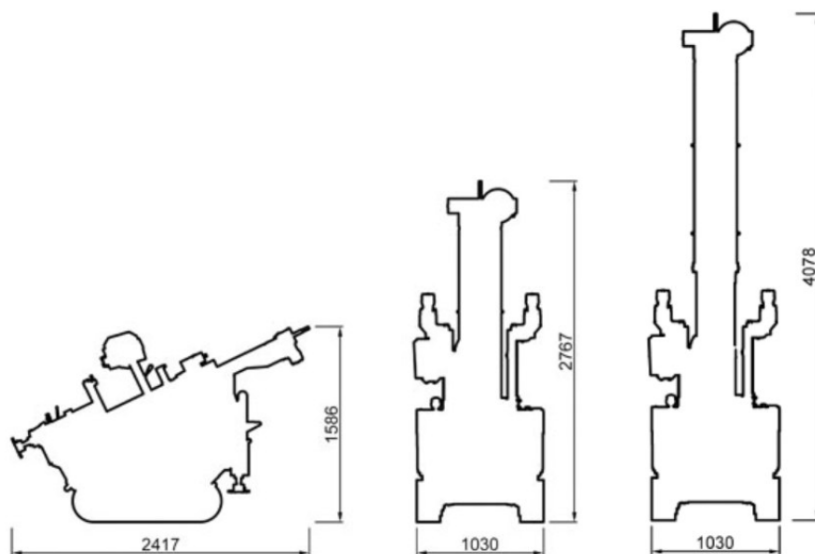


Figura 4: Penetrometro dinamico PAGANI.

2.2.2. METODOLOGIA DELLA PROVA

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infingere verticalmente nel terreno una punta conica metallica posta all'estremità di un'asta d'acciaio, prolungabile con l'aggiunta di successive aste. L'infissione avviene per battitura, facendo cadere da un'altezza costante un maglio di un peso standardizzato.

Durante l'esecuzione della prova vengono contati i colpi necessari ad infingere di una determinata lunghezza, un tratto di asta. La resistenza del terreno è funzione diretta del numero di colpi necessari ad effettuare l'infissione.



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

11 di/of 37

Esistono attrezzature penetrometriche con diverse altezze di caduta, pesi della massa battente, diametri di asta e angoli di apertura della punta.

Nella presente indagine è stato impiegato un penetrometro DPM30

L'energia cinetica propria di ciascun colpo è il prodotto della massa del maglio per l'accelerazione di gravità e per l'altezza di caduta ($M \times g \times H$). I risultati di diversi tipi di prove dinamiche possono essere presentati (e/o paragonati) come valori di resistenza r_d o q_d , dove:

$$r_d = MgH/Ae = \text{MPa}$$

$$q_d = M/(M+M') * MgH/Ae = \text{MPa}$$

I valori di r_d e q_d non sono correlabili con le resistenze del terreno e, specie in presenza di elevate resistenze, i grafici r_d o q_d devono essere analizzati con precauzioni.

Di seguito si riportano indicazioni delle prove realizzate, mentre per il dettaglio stratigrafico si rimanda all'allegato specifico.

Punto	Prof. Prova (m)	EST	NORD
DPSH 8-9	2.20	15°58'54.8"	41°01'04.7"
DPSH 8-9 bis	1.80	15°58'54.45"	41°01'04.66"
DPSH MM2	3.80	15°58'48.9"	41°00'45.7"
DPSH-05_06	3.40	15°58'21.9"	41°00'20.2"
DPSH MT 04	3.20	15°57'08.7"	40°59'43"

Tabella 5: Tabella riepilogativa DPSH.

3. INDAGINI GEOFISICHE

La presente relazione tecnica riferisce sui risultati delle indagini geofisiche eseguite presso Montemilone. Le indagini, realizzate nel mese di maggio 2022, consistono in n°1 indagini di tomografia sismica a rifrazione, n°3 indagini sismiche tipo MASW, n°1 sondaggio elettrico verticale e n°2 tomografie di resistività elettrica.

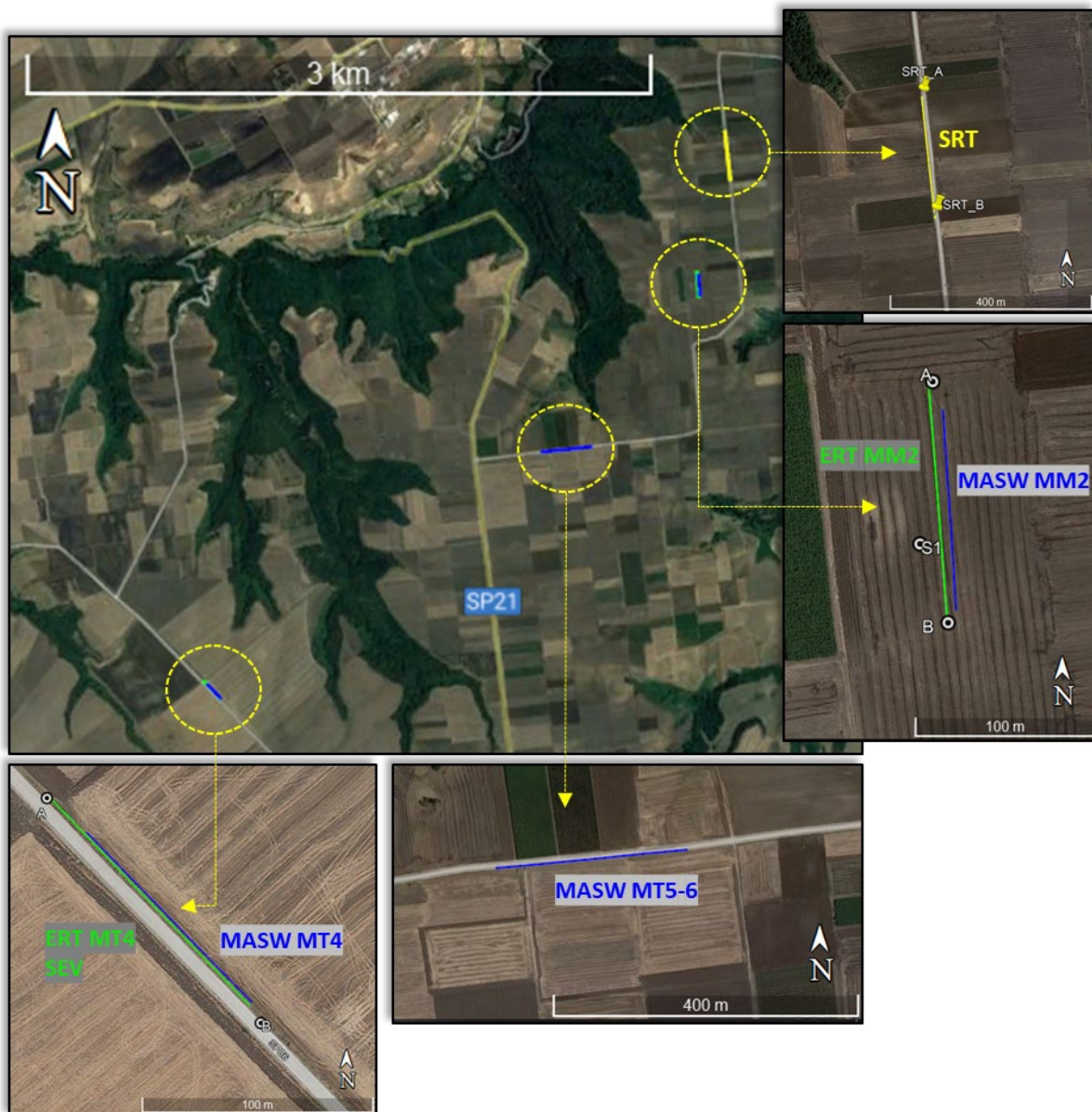


Figura 5 - Ubicazione Indagini.

3.1. METODO MASW

3.1.1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CENNI SUL METODO

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio 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 l'inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh (Fig. 6).

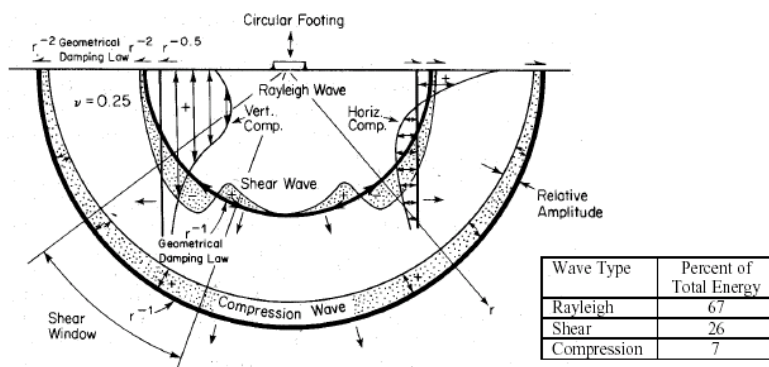


Figura 6 - Distribuzione delle onde di Rayleigh nel sottosuolo.

In un mezzo stratificato, le onde di Rayleigh sono dispersive, ossia 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). La velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh, quindi, dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza, ossia con lunghezza d'onda corta, si propagano negli strati più superficiali dando, quindi, informazioni sulla porzione più superficiale del suolo. Onde a bassa frequenza, invece, si propagano negli strati più profondi dando informazioni, quindi, sulla parte più profonda del suolo. Le indagini MASW si distinguono in attive e passive o in una combinazione di entrambe. Nel metodo attivo, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo passivo, lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e consente di misurare anche il rumore ambientale di fondo esistente.

Facendo riferimento al metodo attivo da noi utilizzato, possiamo dire che, una generica acquisizione di segnali sismici lungo uno stendimento lineare, con sorgente esterna alla linea sismica, può essere rappresentata 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 $U(x, f)$:

$$U(x, f) = \int u(x, t) e^{ift} dt \quad (2.1)$$

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

$$U(x, f) = P(x, f) A(x, f) \quad (2.2)$$

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 (2.2) può essere espressa come:

$$U(x, f) = e^{-i\theta x} A(x, f) \quad (2.3)$$

Dove $F=f/c_f$ con f = frequenza angolare e c_f = 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 $V(f, \phi)$:

$$V(f, \phi) = \int e^{i\theta x} [U(x, f) / |U(x, f)|] dx = \int e^{-i(\Phi-\phi)x} [A(x, f) / |A(x, f)|] dx \quad (2.4)$$

La funzione $V(f, \phi)$, 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 $c_f = f/\phi$.

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

$$\phi = F = f / c_f \quad (2.5)$$

Per un dato valore di ϕ , dove si verifica un massimo della funzione $V(f, \phi)$, la velocità di fase c_f può essere determinata. Tenendo conto che $c_f = f/\phi$, la funzione $V(f, \phi)$ può essere trasformata nella funzione $I(f, c_f)$ che viene definita "spettro di velocità di fase". In essa, lungo l'asse c_f , appariranno dei picchi che soddisferanno, per ogni frequenza, l'equazione (2.5). Il luogo dei punti lungo questi massimi, per differenti valori di frequenza f , permette di identificare le curve di dispersione delle velocità di fase dei modi di oscillazione dell'onda superficiale di Rayleigh.

La curva di dispersione media delle velocità di fase dell'onda di Rayleigh, estratta con la metodologia MASW, è invertita al fine ottenere un modello monodimensionale di onde di taglio.

3.1.2. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prova si compone delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

Nel dettaglio:

sistema energizzante: tale sistema deve essere in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali. Per generare le onde di compressione P è stata utilizzata una massa battente da 5kg.

sistema di ricezione: per l'indagine sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 10 Hz (Fig. 7).

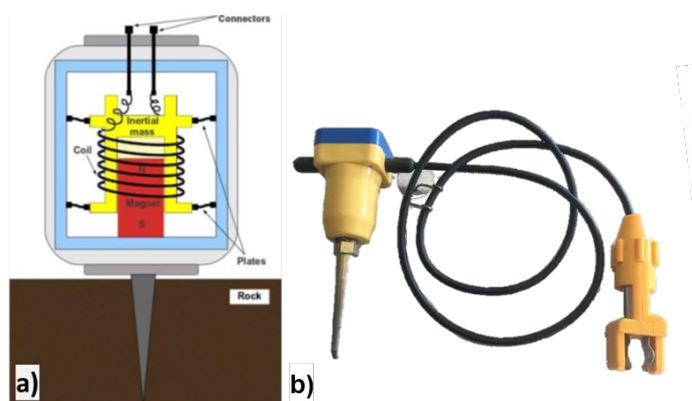


Figura 7 – Geofoni per onda P ed Sh; a) schema di funzionamento del geofono per onda P; b) geofono per onda P con frequenza caratteristica di 10 Hz.

trigger: la metodologia utilizzata, in quanto attiva, prevede che l'inizio della registrazione sia individuato mediante un *trigger*: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra o la trave (nel nostro caso si è usato un geofono starter) e 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: sismografo costituito da un sistema multicanale a conversione digitale. Il modello è denominato *GEODE* (prodotto dalla *GEOMETRICS*, Fig. 8; Tab. 6) ed è caratterizzato da una risoluzione di acquisizione pari a 24 bit (Tecnologia Delta Sigma). Tale sistema 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. Esso è collegato a ciascuno dei geofoni ed al sensore del trigger, consentendo quindi di registrare in forma numerica e visualizzare sotto forma di tracce, su un apposito monitor, le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger.



Figura 8 - Sismografo GEODE (Geometrics).

A/D Conversion:	24 bit (Crystal Semiconductor sigma-delta converters)
DynamicRange:	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB.
Distortion:	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz.
Bandwidth:	1.75 Hz to 20 kHz
Common Mode Rejection:	> -100 dB at <=100 Hz, 36 dB.
Crosstalk:	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms.
Noise Floor:	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz.
Stacking Trigger Accuracy:	1/32 of sample interval.
Maximum Input Signal:	2.8 VPP.
Input Impedance:	20 kOhm, 0.02 uf.
Preamplifier Gains: dB, or 0dB.	24 or 36 dB
Anti-alias Filters:	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB.
Pre-trigger Data:	Up to 4,096 Samples.
Sample Interval:	0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms.
Record Length:	16,000 samples standard
Delay:	0 to 9999 ms in 1 ms steps.
Data Transmission:	Ethernet connections

Tabella 6 - Specifiche tecniche Sismografo GEODE.

3.1.3. SCHEMA DI ACQUISIZIONE

Gli stendimenti sismici sono stati realizzati utilizzando 24 canali d'acquisizione (geofoni) con passo intergeofonico pari a 2 m (Fig. 9). L'acquisizione dei dati sismici è stata condotta secondo la seguente configurazione spazio temporale:

- n° geofoni: 24;
- tempo di acquisizione: 1 s;
- intervallo di campionamento 0.125 μ s.



Figura 9 - Fasi di acquisizione

3.2. METODO SISMICA A RIFRAZIONE (SRT)

3.2.1. PRINCIPI BASE DEL METODO

Le indagini indirette, ed in particolare la metodologia a rifrazione, permettono la ricostruzione areale delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, la 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. Il metodo di sismica a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo, giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o birifratte (*head wave*): le onde analizzate sono quelle birifratte ossia quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono 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 possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche. L'indagine viene eseguita disponendo una serie di i trasduttori del moto del suolo (velocimetri o accelerometri) lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme che può essere una massa battente, un fucile sismico o una carica esplosiva. 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 birifratte che viaggiano a velocità più elevata. Quando l'onda birifratta avrà percorso sufficiente distanza alla velocità V_2 , essa arriverà prima della diretta (Fig. 10).

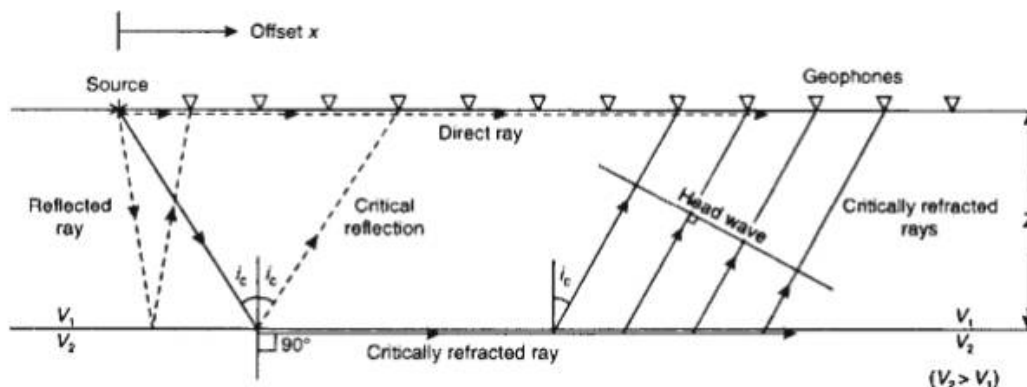


Figura 10 - Schema illustrativo delle onde sismiche

Se si riporta in un semplice grafico x-y, per ogni distanza di ciascun ricevitore, il tempo di arrivo del primo impulso letto sui sismogrammi, i punti si dispongono in una serie di allineamenti di cui il primo passante per l'origine: ciascuna linea è detta "dromocrona" ed è rappresentativa della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo posto al di sopra di un rifratore (una superficie di separazione più o meno netta tra due materiali a comportamento elastico diverso). Il coefficiente angolare della dromocrona passante per l'origine rappresenta l'inverso della velocità di propagazione delle onde elastiche nel primo strato (V_0), i coefficienti angolari delle altre dromocrone rappresentano l'inverso delle velocità degli strati sottostanti (dal più superficiale al più profondo). L'intersezione tra due dromocrone è detto "punto di ginocchio" e rappresenta il punto in cui arrivano contemporaneamente le onde rifratte da due rifrattori adiacenti o, se consideriamo le prime due dromocrone, le onde dirette e le onde rifratte dal primo rifratore. In un'indagine di sismica a rifrazione sarà possibile individuare un numero di punti di ginocchio pari al numero di rifrattori investigati (Fig. 11).

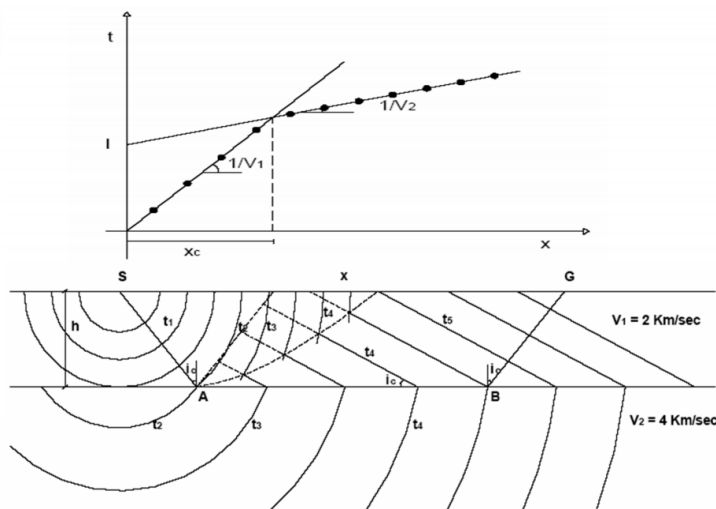


Figura 11 - Schema esemplificativo delle dromocrone in un sottosuolo a 2 strati.

Pertanto, più è profondo il rifratore più il rispettivo punto di ginocchio sarà distante dalla sorgente:

da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una certa distanza proporzionale alla profondità del rifrattore e che quindi la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento dei ricevitori. Tramite semplici relazioni trigonometriche è possibile, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nei diversi strati omogenei del sottosuolo, conoscere gli spessori di ciascuno di essi. Se gli strati sono poco spessi e caratterizzati da velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto, ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva. Nei casi reali, si assume che l'effetto delle onde dirette, in termini di ampiezza delle vibrazioni, sia predominante rispetto a quello delle onde indirette, tanto da potere trascurare queste ultime e considerare il mezzo, limitatamente all'area comprendente la sorgente e il ricevitore, come mezzo omogeneo, isotropo e non confinato.

3.2.2. FATTORI DI INFLUENZA DELLE VELOCITÀ SISMICHE

Sebbene la velocità dell'onda P sia un buon indicatore del tipo di terreno o di roccia, non è un indicatore univoco. Ogni tipo di sedimento o roccia ha una vasta gamma di velocità sismiche e molti di questi range si sovrappongono tra loro. Ci sono molte variabili che influenzano il modulo elastico e quindi la velocità delle onde di compressione delle rocce e dei terreni. Nelle tabelle 7 e 8, si riportano le velocità da bibliografia di alcune delle principali litologie.

VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE		
LITOLOGIA	VELOCITA' [m/sec]	
Suoli superficiali	300	700
Limi ed argille sature	1100	2500
Arenarie sature e porose	2000	3500
Acqua	1450	1500
Sabbie asciutte	400	1200
Sabbie sature	1500	2000
Arenarie	2100	4400
Argilliti	2000	6000
Calcari	2000	7000
Dolomie	2500	6500
Marne	2000	3000

Tabella 7 - Velocità delle onde di compressione di alcuni terreni.

VELOCITA' ONDE DI TAGLIO		
LITOLOGIA	VELOCITA' [m/sec]	
Suoli superficiali	50	300
Limi ed argille sature	200	800
Arenarie sature e porose	800	1800
Acqua	-	-
Sabbie asciutte	100	500
Sabbie sature	400	600
Arenarie	900	3100
Argilliti	500	2100
Calcari	1000	3500
Dolomie	1200	3800
Marne	750	1500

Tabella 8 - Velocità delle onde di taglio di alcuni terreni.

I primi esperimenti sulla variazione delle proprietà elastiche delle rocce sono iniziati tra il 1950 e il 1960. A quel tempo molti ricercatori (Wyllie et al., 1956; 1962; 1963; 1985) hanno studiato i cambiamenti della velocità di elasticità onde in funzione di saturazione, porosità e contenuto in argilla, fratturazione. In particolare:

- Saturazione: in condizioni di saturazione totale, la velocità delle onde P è controllata dal mezzo liquido (che è incompressibile) se superiore a quello dello scheletro solido: questo perché la velocità delle onde S non risulta influenzata da tale parametro (l'acqua non può sostenere sforzi di taglio). Per saturazioni parziali, invece, la velocità delle onde P è inferiore a quella ottenibile alla massima saturazione ma, nel contempo, è inferiore anche a quella che si ottiene per gli stati secchi.
- Porosità e contenuto in argilla: la diminuzione della velocità associata ad un aumento del contenuto di argilla può essere confrontata con la diminuzione della velocità associata ad un aumento della porosità. Infatti, le particelle di argilla creano una microporosità composta da piccoli pori di 1 μm riducendo notevolmente la dimensione dei pori. Da vari studi effettuati in merito, si evince che una gran parte della variazione della velocità dovuta al cambiamento di contenuto di argilla, è attribuibile alla significativa quantità di microporosità presente all'interno di minerali di argilla. Si riscontra, infatti, un brusco cambiamento delle proprietà della matrice rocciosa con l'aggiunta di una piccola quantità d'argilla.



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

21 di/of 37

- **Fratturazione:** il grado di fratturazione di una formazione rocciosa è legato alle proprietà idrogeologiche delle rocce, come la porosità e la permeabilità (capacità delle rocce di farsi attraversare dalle acque). L'importanza dell'impiego del metodo sismico per la valutazione del grado di fratturazione di una formazione rocciosa, è basata sulle evidenze sperimentali che indicano una diminuzione della velocità delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s) e un aumento del coefficiente di attenuazione α al crescere della densità di frattura. In sintesi, le indagini suggeriscono che le velocità delle onde P e S decrescono con l'aumentare dei parametri di frattura, mentre il rapporto V_p/V_s aumenta con il decrescere dei parametri di frattura.

Le velocità sismiche che si andranno a misurare su rocce o terreni, pertanto, saranno spesso influenzate dall'effetto contemporaneo di tutti i fattori citati (oltre che ad altri meno importanti nel nostro contesto).

3.2.3. STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone delle seguenti parti:

- sistema energizzante;
- sistema di ricezione;
- trigger;
- sistema di acquisizione dati.

La strumentazione, ad eccezione del sistema di ricezione, è la stessa utilizzata nelle indagini sismiche tipo MASW. Per il sistema di ricezione, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione verticale), con frequenza caratteristica di 4.5 Hz e 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile (oscillazione orizzontale), con frequenza caratteristica di 8 Hz (Fig. 12).



Figura 12 – Geofoni per onda P e Sh; a) schema di funzionamento del geofono per onda P; b) geofono per onda P con frequenza caratteristica di 4.5 Hz; geofono per onda S con frequenza caratteristica di 8 Hz.

3.2.4. SCHEMA DI ACQUISIZIONE

Lo stendimento sismico è stato realizzato utilizzando 48 canali di acquisizione con un passo intergeofonico di 5 m.

Tutti gli stendimenti sono caratterizzati da:

- tempo di acquisizione: 2 s;
- intervallo di campionamento 1 ms.



Figura 13 - Fasi di acquisizione



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

23 di/of 37

3.2.5. PROCESSING

Il processing del dataset di sismica a rifrazione è stato condotto mediante il Software RAYFRACT (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, soprattutto nel caso di strutture profonde.

Lo schema di interpretazione utilizzato nel presente lavoro è basato sulla creazione di un modello iniziale ottenuto mediante interpretazione con una tecnica sofisticata di processo dei tempi di primo arrivo basata sui metodi dei "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. In generale, il tempo di percorrenza di un'onda sismica lungo un percorso S attraverso un mezzo bidimensionale (2D) può essere scritto come

$$t = \int_S u[\mathbf{r}(x, y)] \quad (2.1)$$

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

$$t_i = \sum_{k=1}^m l_{ik} \cdot u_k \quad (2.2)$$

dove l_{ik} rappresenta la porzione dell' i -esima dromocrona nella cella k -esima. Considerando tutte le dromocrone disponibili si ottiene il seguente sistema

$$\mathbf{t} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} \quad (2.3)$$

dove \mathbf{t} è il vettore dei dati sperimentali (tempi di primo arrivo letti sui sismogrammi), \mathbf{M} è la matrice

rettangolare contenente le porzioni dei percorsi nelle varie celle, \mathbf{u} è il vettore delle lentezze (incognite del problema). Il problema inverso da risolvere è pertanto:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{M}}^{-1} \cdot \mathbf{t} \quad (2.4)$$

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

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{t} \quad (2.5)$$

dove $\Delta \mathbf{t}$ è la differenza tra i tempi sperimentali e i tempi calcolati per il modello di lentezze iniziale \mathbf{u}_0 ; $\Delta \mathbf{u}$ è la perturbazione del modello iniziale; e \mathbf{J} è la matrice jacobiana contenente le derivate parziali delle dromocrone rispetto alle lentezze nelle celle. Poiché il problema è parzialmente sovradeterminato (per alcune celle si hanno molti percorsi) e parzialmente sottodeterminato (per alcune celle non è disponibile nessun percorso) esso è stato risolto con la tecnica dei minimi quadrati smorzati, cioè è stata minimizzata con la seguente funzione errore

$$\varphi = \|\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{u} - \Delta \mathbf{t}\|^2 + \lambda \|\mathbf{L}_2 \mathbf{u}\|^2 \quad (2.6)$$

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

3.3. METODO DELLA RESISTIVITÀ ELETTRICA (ERT)

3.3.1. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO E CENNI SUL METODO

Le indagini geoelettriche sono tra i metodi geofisici più utilizzati per lo studio del sottosuolo. Lo scopo è quello di ricavare informazioni riguardanti la geometria e la localizzazione di elementi sepolti geologici (e non) alla luce delle loro proprietà elettriche. In particolare, il metodo della resistività si realizza attraverso la misura della differenza di potenziale elettrico in diversi punti della superficie del terreno. L'obiettivo è quello di ricostruire modelli di resistività del sottosuolo attraverso un processo di inversione dei dati acquisiti in campagna. Questa tipologia di rilievi non invasivi si basa sui principi che descrivono la conduzione elettrica attraverso un mezzo: più una sostanza si lascia attraversare da portatori di carica, più essa viene definita conduttiva; viceversa, essa è definita resistiva. Quando si fanno fluire cariche elettriche attraverso un conduttore è possibile misurare la corrente elettrica (I). In presenza di un conduttore ohmico (ossia per cui vale



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

25 di/of 37

la legge di Ohm), la corrente elettrica incontra una resistenza (R), misurata in Ohm, che dipende dalla differenza di potenziale (ΔV), misurata in Volt, e dalla corrente (I) secondo la relazione (Legge di Ohm):

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.1)$$

Per un conduttore omogeneo (ovvero un corpo in cui ogni sua parte ha le stesse proprietà fisiche), isotropo (ovvero un corpo le cui proprietà fisiche non dipendono dalla direzione lungo le quali vengono considerate) e cilindrico di sezione S e lunghezza l , la resistenza elettrica può essere espressa come:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4.2)$$

dove con (ρ) si indica la resistività tipica del materiale: la resistività è l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio delle cariche elettriche. Dall'equazione (6.3) risulta evidente che la resistenza elettrica di un materiale dipende non solo dalle sue proprietà fisiche ma anche dalle sue caratteristiche geometriche.

Nel dettaglio, il metodo geoelettrico della resistività prevede l'energizzazione del terreno (generalmente attraverso una batteria) con corrente continua I ed una misura diretta sulla superficie del suolo della differenza di potenziale (ΔV). Combinando le relazioni (6.2) e (6.3) è possibile scrivere la relazione:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (4.3)$$

dove con (K) si indica un fattore geometrico (misurato in metri) e con ρ_a la resistività apparente, la quale è influenzata dal contributo delle diverse resistività degli elementi presenti nel sottosuolo. Nel caso di una misura geofisica, non si verificano le condizioni di omogeneità ed isotropia del mezzo (il sottosuolo è generalmente molto eterogeneo ed anisotropo dal punto di vista elettrico): è pertanto necessario introdurre il concetto di resistività apparente. Un successivo processo di inversione, consente di passare dalle misure di resistività apparente al modello di resistività. Per realizzare misure di resistività si utilizzano 2 elettrodi conduttivi (chiamati convenzionalmente A e B) che, a contatto con il terreno, permettono l'immissione della corrente elettrica. A distanza nota, attraverso altri due elettrodi (chiamati convenzionalmente M e N), viene misurata la differenza di

potenziale (ΔV). Questa configurazione è chiamata quadripolo: in Fig. 14, è rappresentato uno schema con il posizionamento dei 4 elettrodi, le linee di corrente e quelle di potenziale. Le cariche, nel passare da un elettrodo all'altro, percorrono linee di corrente a profondità diverse: maggiore è la separazione tra A e B, maggiore è la diffusione della corrente nel terreno (e di conseguenza la profondità raggiunta) e minore è la differenza di potenziale registrata in superficie al centro del quadripolo (con M e N fissati).

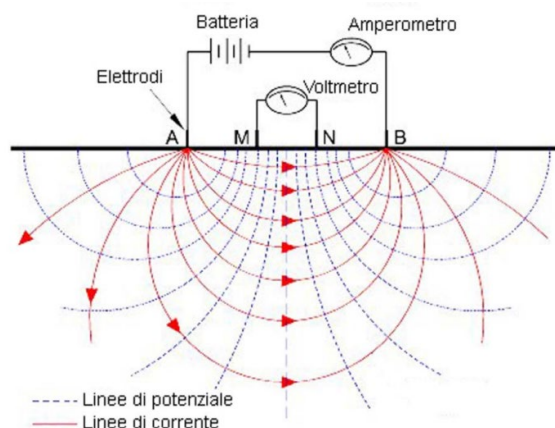


Figura 14 - Schema di un quadripolo: A e B sono gli elettrodi di corrente; M e N sono elettrodi di potenziale. Sono visibili anche le linee di corrente e superfici equipotenziali.

Una volta che posizionati gli elettrodi A, B, M e N, è possibile compiere una misura, immettendo con una corrente elettrica A e B e registrando la differenza di potenziale M e N. Allargando ad ogni misura i quattro elettrodi mantenendo invariato il centro del quadripolo, si ottiene un sondaggio elettrico verticale (SEV), mentre spostando ad ogni misura i quattro elettrodi lungo un allineamento orizzontale si realizza un profilo di resistività a profondità costante. Fissata una linea, è possibile realizzare più profili a profondità crescenti: il risultato è un insieme di misure che formano una sezione 2D di resistività apparente, detta pseudosezione. Un sondaggio elettrico 2D è, pertanto, un'indagine bidimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale sia lungo una direzione orizzontale. Attraverso un processo di inversione, è possibile elaborare le misure di resistività apparente per ottenere un modello 2D di resistività del sottosuolo chiamato "tomografia elettrica": decine di elettrodi vengono impiantati nel terreno e collegati, attraverso cavi elettrici, ad una centralina computerizzata che ne gestisce l'attivazione. Si utilizzano cavi multiconduttori a 24 prese ciascuno; ogni elettrodo (picchetto metallico di lunghezza da 45 – 50 cm) viene infisso nello strato superficiale per una profondità media di 30 cm dal piano campagna e collegato al sistema di cavi. In caso di terreno molto duro ed asfaltato, i fori vengono preventivamente realizzati attraverso l'uso di un trapano a roto-percussione o, in presenza di suoli



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

27 di/of 37

secchi e/o a granulometria grossolana, si può migliorare il contatto con l'uso di soluzioni saline (o semplicemente acqua) versate attorno agli elettrodi.

La strumentazione adottata (Syscal Pro switch 96 a commutazione concentrata, prodotto da IRIS Instruments, Francia), permette di eseguire misure di alta precisione, con correnti indotte fino ad oltre 2 Ampere, con compensazione automatica del potenziale spontaneo (caduta di tensione esistente tra due poli in assenza di trasmissione e spesso fortemente variabile nel breve tempo). Il Syscal-Pro, rispetto ai resistivimetri di più classica concezione, ha la possibilità di ricevere 10 coppie di elettrodi contemporaneamente, abbattendo di un ordine di grandezza il tempo necessario per l'acquisizione. Sia nel caso di indagini 1D che 2D, la metodologia di acquisizione può variare a seconda di come vengono posizionati sul terreno gli elettrodi di corrente e di potenziale: le configurazioni più comuni sono chiamate Wenner, Schlumberger, polo – dipolo e dipolo – dipolo.

3.3.2. PROPRIETÀ ELETTRICHE DEL SUOLO ED INTERPRETAZIONE DEI VALORI DI RESISTIVITÀ

La resistività dei materiali è controllata da molteplici fattori e principalmente da:

- grado di saturazione dei pori;
- porosità;
- salinità del fluido (se presente nei pori);
- temperatura;
- eventuale presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.);
- presenza di argilla;
- presenza di minerali particolari (ad esempio metalli pesanti, miche);
- grado di compattazione.

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

$$\rho_s = \rho_f a \phi^{-n} S^{-m} \quad (4.4)$$

dove:

- ρ_s è la resistività (espressa in Ohm·m, di seguito indicata con $\Omega \cdot m$) del suolo parzialmente saturo di fluido;
- ρ_f è la resistività ($\Omega \cdot m$) del fluido presente nei pori;
- S è la frazione del volume di pori occupata dal fluido;
- m è il coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2);



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

28 di/of 37

- a è la costante empirica di Winsaur (es. per la sabbia pari a 0.62);
- n è il coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (es. per la sabbia pari a 2.15);
- ϕ è la porosità del suolo.

La resistività del fluido ρ_f è calcolabile, qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es. Cl⁻, SO₄⁼, NO₃⁻, ecc.), utilizzando la formula:

$$\rho_f = 0.0123 + 10^{(3.562 - 0.955 \log_{10} C)} \quad (4.5)$$

dove C è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti. Nel caso di presenza di argilla, i cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di tale sostanza, offrono cammini addizionali per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti. Esistono relazioni semi-empiriche valide per il calcolo della resistività di sedimenti con componente argillosa non trascurabile, che non riporteremo in questo contesto. La distribuzione della resistività nel sottosuolo consente di discriminare eventuali variazioni nella risposta elettrica dei terreni dovute alla presenza, al suo interno, di sostanze o materiali stessi diversi dal terreno che li ingloba, ovvero rispetto alle variazioni di un normale schema geologico-stratigrafico. Alla luce di tutti i parametri di influenza citati in precedenza, si riportano i valori di resistività di alcuni terreni e materiali; si nota che il *range* di variazione della resistività può essere molto ampio (Palacky, 1988): nei materiali granulari, da grossolani a fini, piccole variazioni del contenuto in argilla o del fuso granulometrico possono comportare notevoli cambiamenti nella resistività del materiale. Nei materiali lapidei, invece, è la fratturazione e/o la porosità (Worthigton et al., 1993) ad essere il principale fattore di controllo (Tab. 9).

Rocce e minerali metallici	Resistività ($\Omega \cdot m$)
Sedimentarie	
Calcere	50 ÷ 150
Argilla	1 ÷ 100
Ghiaia	100 ÷ 5000
Calcere compatto	50 ÷ 10 ⁷
Marna	1 ÷ 100
Quarzite	10 ÷ 10 ⁸
Argilla	10 ÷ 1000
Sabbia	500 ÷ 5000
Arenaria	1 ÷ 10 ⁸
Ignee e Metamorfiche	
Basalto	10 ÷ 10 ⁷
Gabbro	10 ³ ÷ 10 ⁶
Granito	10 ² ÷ 10 ⁶
Marmo	10 ² ÷ 10 ⁸
Scisto	10 ÷ 10 ⁴
Ardesia	10 ² ÷ 10 ⁷
Minerali e minerali metallici	
Argento	1,6 · 10 ⁻⁸
Grafite (giacimento massivo)	10 ⁻⁴ ÷ 10 ⁻³
Galena (Pbs)	10 ⁻³ ÷ 10 ²
Magnetite di giacimento	1 ÷ 10 ⁵
Sfalerite (ZnS)	10 ³ ÷ 10 ⁶
Pirite	10 ²
Calcopirite	10 ⁻⁵ ÷ 0,3
Quarzo	10 ¹⁰ ÷ 2 · 10 ¹⁴
Salgemma	10 ÷ 10 ¹³
Acque ed effetto del contenuto in sale	
Acqua pura	10 ⁶
Acque naturali	1 ÷ 10 ³
Acqua di mare	0,2
Sale 20%	5 · 10 ⁻²
Granito 0% di acqua	10 ¹⁰
Granito 0,19% di acqua	10 ⁶
Granito 0,31% di acqua	4 · 10 ³

Tabella 9 - Riepilogo delle resistività dei principali materiali

Quindi, in linea generale, la distribuzione della resistività elettrica consente di discriminare eventuali variazioni nei geo-materiali dovute a:

- presenza di litologie differenti o con caratteristiche di maggiore o minore cementazione;
- fratture o discontinuità tettoniche;
- presenza di sostanze fluide a comportamento elettrico resistivo o conduttivo all'interno dei pori;
- presenza di argilla (i cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di tale sostanza offrono cammini aggiuntivi per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti).

Inoltre, la resistività è strettamente dipendente dalla temperatura. In particolare, tale dipendenza è espressa dalla seguente relazione:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 T) \quad (4.6)$$



Engineering & Construction



SOCOTEC

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

30 di/of 37

dove ρ è la resistività alla temperatura T , ρ_0 è la resistività a 0°C e α_0 è il coefficiente di temperatura della resistività riferito alla temperatura di 0°C . L'equazione è valida in un intervallo di temperatura di alcune centinaia di gradi ed il coefficiente di temperatura della resistività può essere positivo o negativo. Se il materiale considerato è una roccia, la relazione che lega la resistività alla temperatura è ancora più complessa. Infatti, essendo la roccia un aggregato di più minerali, per definire il comportamento elettrico delle rocce in funzione delle variazioni di temperatura, bisogna studiare non solo le relazioni di ogni minerale in essa presente, ma anche le relazioni tra i diversi meccanismi di conduzione. Infatti, i minerali possono presentare una conducibilità metallica, essere dei semiconduttori o, come nella maggior parte dei casi, essere degli elettroliti solidi. La minima conduzione elettrica che può avvenire negli elettroliti solidi è dovuta alle imperfezioni reticolari per temperature inferiori a $500 - 600^\circ\text{C}$, o può essere causata dalla temperatura per valori più elevati di 600°C (Keller & Rapolla; 1974). A complicare ulteriormente la relazione tra resistività e temperatura vi è il fatto che le rocce a temperatura ambiente presentano una certa quantità d'acqua che, se è presente in quantità tale da formare almeno una pellicola continua sulle pareti dei pori (in genere superiore al 10% della quantità totale di acqua che potenzialmente la roccia può contenere), le proprietà elettriche cambiano sensibilmente. Esse dipenderanno, quindi, anche dalle caratteristiche elettriche della soluzione a contatto con la roccia.

La temperatura è legata alla resistività da una relazione di tipo inverso: all'aumentare della temperatura la viscosità dell'acqua diminuisce e quindi gli ioni in essa presenti godono di una mobilità maggiore. Come già accennato, il parametro della resistività è influenzato anche da: tessitura, porosità, grado di cementazione, contenuto argilloso e salinità della soluzione acquosa che imbibisce la formazione. Le rocce con tessitura granitica conducono l'elettricità lungo le fessure o i giunti di strato per cui presentano generalmente una resistività alta; un'arenaria ben selezionata ha una resistività più bassa rispetto ad un'arenaria meno selezionata. Sperimentalmente si verifica, inoltre, che, a parità di contenuto e tipo d'acqua, una roccia vulcanica presenterà una resistività più alta di una roccia sedimentaria con la stessa porosità. La causa è da ricercarsi, molto probabilmente, nella differenza tra porosità totale e porosità utile che caratterizza le due litologie (Fig. 15).

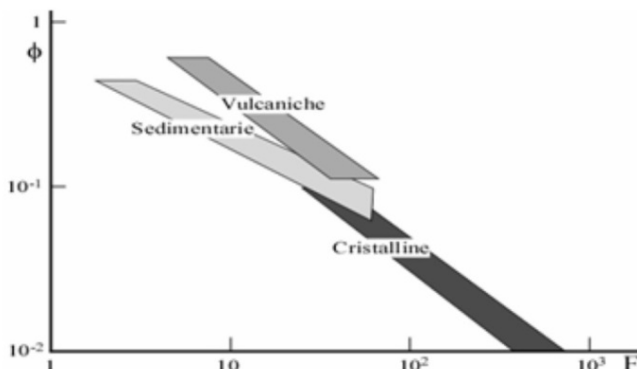


Figura 15 – Campi di variazione del fattore di formazione F con la porosità Φ per le principali tipologie di rocce sature (da Keller & Rapolla, 1974).

3.4. RESISTIVITÀ ELETTRICA (SEV)

Le misure di resistività elettrica sono state condotte per fornire informazioni sulla resistività elettrica del terreno finalizzata alla progettazione della rete di messa a terra.

La metodologia impiega la stessa strumentazione (IRIS Syscal Pro) e lo stesso principio della tomografia elettrica sopra descritta ma viene limitata alla registrazione di pochi quadrupoli riferiti ad una singola verticale di misura. Questa tecnica consiste nell'aumentare progressivamente la distanza degli elettrodi d'immissione, misurando ogni volta la differenza di potenziale esistente fra due punti, situati a piccola distanza, posti al centro dello stendimento. In questo modo il flusso di corrente penetra sempre più nel sottosuolo interessando così gli strati via via più profondi. Dalle misure così ottenute si costruisce il diagramma di resistività dal quale, tramite opportune elaborazioni, si potrà risalire al profilo elettrico del sottosuolo.

Da tutti i grafici ricavati tramite le prospezioni elettriche effettuate in campagna, si ottengono sempre valori di R_a (resistività apparente) e solo nei punti di asintoto si hanno valori molto prossimi alla resistività effettiva.

Al fine di individuare oltre che la resistività effettiva anche lo spessore reale dei vari strati investigati, si devono effettuare opportune interpretazioni. Esse consistono nel mettere a confronto le curve di campagna normalizzate con delle curve teoriche pre-calcolate e riferite ad un'ampia casistica.

Il valore di resistività apparente ottenuto ad ogni passaggio è tracciato in funzione di $AB/2$.

Gli elettrodi metallici (sia AB che MN) devono essere collegati a terra il più profondamente possibile per diminuire la resistenza dei terreni. Una resistenza di pochi kohms è accettabile per ottenere degli ottimi dati di resistività (da 10 a 20 kohm max). Ove non sia possibile, può essere versata

acqua sugli elettrodi, o due gli elettrodi possono essere impostati in modalità parallelo. I cavi che vanno dal SYSCAL agli elettrodi A, B (fino a diverse centinaia di volt) devono essere posti il più lontano possibile dai cavi che vanno agli elettrodi M, N per evitare problemi di isolamento. I valori AB/2 sono spazati logaritmicamente (circa 8 valori per decade da 1 a 10, da 10 a 100, da 100 a 1000 m, ecc.). Quando la misurazione diventa rumorosa (standard deviation Q maggiore del 5%), si consiglia di diminuire la resistenza di massa degli elettrodi A, B; i valori di resistività apparente devono essere tracciati su un foglio bilogarithmico. La profondità di indagine è dell'ordine del 20% della lunghezza della linea AB.

3.4.1. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Lo strumento di acquisizione utilizzato, il georesistivimetro multielettrodo e multicanale IRIS SYSCAL PRO (Fig. 16; Tab. 10), 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. È uno strumento a 10 canali di ricezione, ovvero consente l'acquisizione contemporanea di più quadripoli, fino ad un massimo di dieci. Il Syscal ha una precisione strumentale di circa 0.5%, utilizza un'alimentazione in corrente continua fino a 2.5 A ed effettua una compensazione automatica dei potenziali spontanei.

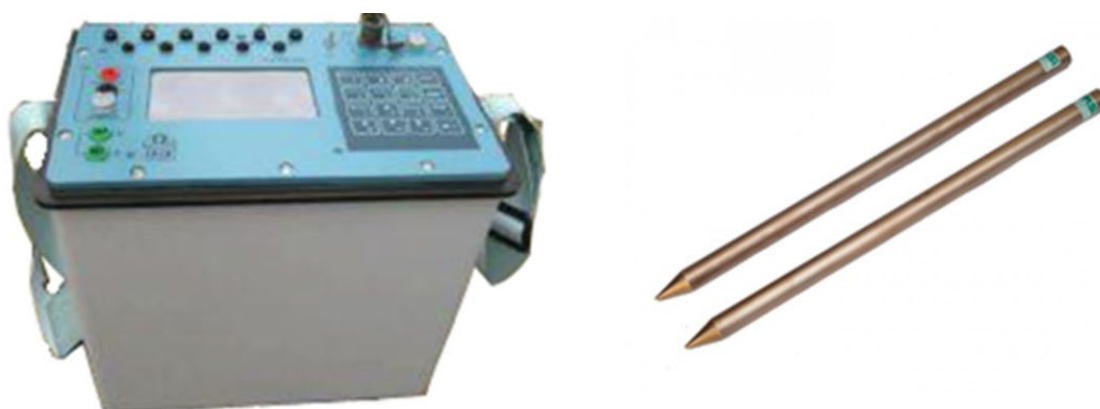


Figura 16 - Georesistivimetro Syscal Pro (IRIS instruments) ed elettrodi di acquisizione.

Specifiche SYSCAL Pro	
Casa produttrice	IRIS Instruments (Orléans, Francia)
Vtaggio massimo	800V in modalità switch
Vtaggio massimo	1000V in modalità manuale
Corrente massima	2.5A, accuratezza 0.2%
Potenza massima	250W con DC/DC interna
Energia	1200 W con AC / DC esterno
Durata dell'impulso	250ms, 500ms, 1s, 2s, 4s o 8s
Risoluzione/precisione	1 μ V / 0,2%
Impedenza di input	100Mohm

Tabella 10 - Specifiche tecniche SYSCAL Pro.

Inoltre, sono stati utilizzati cavi di connessione elettrodi - georesistivimetro schermati, batteria esterna da 12V/65Ah, elettrodi in acciaio inossidabile e una soluzione salina per migliorare l'accoppiamento terreno-elettrodi.

3.4.2. SCHEMA DI ACQUISIZIONE

Gli stendimenti di tomografia elettrica sono stati realizzati utilizzando 72 canali di acquisizione passo 2 m, in configurazione elettrodica Polo-Dipolo (Fig. 17):



Figura 17 – Fasi di acquisizione

3.4.3. PROCESSING

I dati acquisiti sono stati elaborati mediante il software ERTlab 64™ sviluppato e prodotto da Geostudi Astier srl (Livorno, Italia) e dalla Multi-Phase Technologies LLC (Nevada, U.S.A.). Viene effettuato un filtraggio in base ad una serie di criteri:

- Fattore di qualità Q: i valori che eccedono il fattore Q, imposto in fase di acquisizione, vengono esclusi;
- Valori di intensità di corrente I: se troppo bassi non garantiscono un sufficiente rapporto S/N (segnale/rumore);
- Fattore geometrico K: data la rapidità di acquisizione delle moderne attrezzature, si preferisce utilizzare sequenze che presentano anche quadripoli con fattori geometrici K molto elevati. Nel caso in cui i parametri I e Q si rivelino ottimali, si riesce ad ottenere un numero maggiore di dati, in caso contrario i dati con “K” elevato vengono scartati.



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

34 di/of 37

Al fine di calcolare un'immagine di resistività dai dati ERT, è necessario effettuare un'inversione che produca un modello in grado di dare una distribuzione spaziale di resistività il più possibile vicina a quella reale del sistema investigato.

L'obiettivo finale è derivare la distribuzione delle proprietà elettriche all'interno del sottosuolo, da un insieme di misurazioni effettuate sul contorno dell'oggetto, o almeno al di fuori della regione di interesse. A tal fine, si ricorre al cosiddetto "modello inverso" ossia, dato un insieme di misurazioni (dati), la distribuzione delle proprietà elettriche (modello) deve essere "coerente" con le resistenze effettivamente misurate. In generale, per formulare il modello inverso, il sottosuolo è suddiviso in celle, ciascuna avente una conduttività σ (o resistività ρ). Ne consegue, quindi, che la distribuzione di conduttività è rappresentata da un vettore di incognite m . Dal momento che le variazioni di conduttività possono essere di vari ordini di grandezza, usualmente il vettore m è dato dai logaritmi della conduttività. Questa trasformazione ha anche il vantaggio di garantire che la soluzione del problema inverso non contenga conduttività elettriche negative. Il modello inverso cerca di determinare il miglior set di parametri che riproduca i dati sperimentali di resistenza tramite calcoli effettuati con il modello diretto.

Il calcolo del miglior set m si effettua minimizzando una funzione obiettivo (Ψ_d), generalmente corrispondente alla norma della differenza pesata tra valori di resistenza misurati d e calcolati con il modello diretto $F(m^*)$. Usare soltanto il *misfit* dei dati causa, però, un sistema contemporaneamente sotto determinato (troppe incognite e poche equazioni) e sovra determinato (solo alcune parti del dominio). Per tale motivo, l'inversione va vincolata, introducendo una funzione di penalità (Ψ_m) alla funzione obiettivo, in modo che l'inversione non conduca a soluzioni diverse da ciò che riteniamo accettabile.

La funzione da minimizzare sarà composta da una funzione obiettivo (Ψ_d), che si occupa dei dati, e una funzione di penalità (Ψ_m) che si occuperà del modello. Resta all'operatore decidere quale peso attribuire ai vari termini: questo viene stabilito sulla base di un fattore peso α (più è piccolo e più pesano i dati rispetto alla *lisciatura*):

$$\Psi(\mathbf{m}) = \Psi_d(\mathbf{m}) + \alpha\Psi_m(\mathbf{m}) \quad (4.7)$$

Le iterazioni del modello inverso si devono fermare una volta che il misfit dei dati è prossimo agli errori dei dati stessi e del modello diretto (Telford et al., 1976). A tale scopo, il set di dati di resistività è stato importato su specifico software per la visualizzazione bidimensionale di dati



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

35 di/of 37

geostatistici (MVS della C-Tech – USA).

Nel dettaglio, il programma di inversione per ogni profilo fornisce: la pseudosezione misurata, che riporta la distribuzione laterale e verticale della resistività apparente in funzione della profondità teorica (i.e., pseudo-profondità); la pseudosezione calcolata, derivata dal modello bidimensionale, relativamente all'iterazione che fornisce il valore più basso di errore percentuale; il modello 2D del terreno che mostra la distribuzione verticale ed orizzontale delle resistività reali.

3.5. RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE

L'indagine geofisica ha permesso di ricostruire, da un punto di vista sismo-stratigrafico, l'area indagata restituendo mediamente risultati in accordo tra loro.

Il settore nord, investigato esclusivamente attraverso la tomografia sismica, ha restituito valori mediamente alti di V_p e V_s che aumentano gradualmente con la profondità, identificando il basamento sismico a circa 17 – 20 m dal p.c.. La tomografia ha identificato, inoltre, a nord dello stendimento sismico, un'area caratterizzata da valori leggermente inferiori delle velocità suggerendo la presenza di argilla meno compatta.

Il settore centrale è stato investigato attraverso due indagini sismiche tipo MASW (MM2 e MT5-6) e una di resistività elettrica (ERT MM2). Le indagini MASW hanno restituito una categoria di suolo tipo **B** suggerendo la presenza di materiale mediamente compatto. Inoltre, entrambe le MASW hanno identificato il basamento sismico ($V_s > 800 \text{ m/s}$) a profondità diversa: a nord dell'area la MASW MM2 ha identificato il basamento sismico a circa 19 m di profondità, in accordo con la SRT vicina, mentre la MASW MT5-6, più a sud, lo identifica a circa 23 m dal p.c.

Il settore meridionale dell'area è stato investigato attraverso la MASW MT4, la ERT MT4 e l'indagine SEV. La MASW MT4 ha restituito anch'essa una categoria di suolo **B** identificando il basamento sismico a profondità maggiori ovvero a circa 30 m dal p.c..

Le indagini ERT, effettuate nel settore centrale e meridionale dell'area, hanno identificato un netto cambio nei valori di resistività a una profondità che corrisponde a quella in cui le indagini MASW identificano il basamento sismico, mostrando la presenza di litologie fortemente conduttive. Le indagini ERT, in entrambi i settori, evidenziano la presenza di aree caratterizzate da valori di resistività più alta o più bassa rispetto ai valori medi identificando aree in cui è presente più o meno matrice e/o vuoti.



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

36 di/of 37

L'indagine SEV, in corrispondenza della ERT MT4, ha restituito un valore di resistività che può essere ritenuto esaustivo del profilo verticale nel punto centrale dello stendimento. In linea generale, esso mostra, un graduale aumento dei valori di resistività identificando un netto aumento degli stessi a circa 3.3 m dal p.c. in cui la resistività aumenta da 28 a 197 Ohm·m.

Per i dettagli si rimanda all'allegato grafico.

3.6. BIBLIOGRAFIA

Achenbach J. D., Xu Y., 1999. Wave motion in an isotropic elastic layer generated by a time-harmonic point load of arbitrary direction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106, 83 – 90.

Aki K., Richards P. G., 1980. *Quantitative Seismology, Theory and Methods*. Geological Magazine, 118, 02, DOI: 10.1017/S0016756800034439.

Biot M. A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *Journal of the Acoustic Society of America*, 28, 2, 168-191.

Biot M. A., 1962. Mechanism of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics*, 33, 4, 1482-1498.

Boadu F. K., 1997. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 1-19.

Brückl E., 1987. The interpretation of traveltimes fields in refraction seismology. *Geophysical prospecting*, 33, 9, 973-992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1987.tb00855.x>.

Cessaro R.K., 1994. Sources of Primary and Secondary Microseisms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 1, 142-148.

Doglioni C. (1993): Some remarks on the origin of foredeeps. *Tectonophysics*, 228, 1-2, 1-20.

Gutenberg, 1958. Two types of microseisms. *JGR*, 63, 3, 595-597.

Hagedoorn J. G., 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting*, 7, 2, 158-182. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1959.tb01460.x>.

Jones G.M. and Jovanovich D.B., 1985. A ray inversion method for refraction analysis. *Geophysics*, 50, 11, 1701-1720. <https://doi.org/10.1190/1.1441861>.

Kahraman S., 2002. The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Engineering Geology*, 63, 347-350.

Klimentos T. & McCann C., 1990. Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. *Geophysics*, 55, 8, 998-1014.

Kovallis B. J., Jones L. E. & Wang H. F., 1984. Velocity Porosity Clay content systematics of poorly consolidated

**Engineering & Construction****SOCOTEC**

GRE CODE

GRE.EEC.R.25.IT.W.15438.49.001.00

PAGE

37 di/of 37

sandstones. Journal of Geophysical Research, 89, B12, 10355-10364.

Leucci G. & De Giorgi L., 2004. Studio degli effetti delle fratture sulla variazione di velocità di propagazione delle onde P ed S nelle calcareniti. Atti del 22° Convegno Nazionale GNGTS.

Liu Z., Rector J. W., Nihei K. T., Tomusa L., Myer L. R. & Nakagawa S., 2001. Extensional wave attenuation and velocity in partially-saturated sand in the sonic frequency range. EG Technical Program Expanded Abstracts 2001, 1808-1811. DOI:10.1190/1.1816479.

Watanabe T. & Sassa K., 1995. Velocity and amplitude of P-waves transmitted through fractured zones composed of multiple thin low-velocity layers. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 32, 4, 313-324.

Wyllie M. R., Gregory A. R. & Gardner G. H., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. Geophysics, 21, 1, 41-70.

Wyllie M. R., Gregory A. R. & Gardner G. H., 1962. Studies of elastic wave attenuation in porous media. Geophysics, 27, 3, 569-589.

Wyllie M. R., Gregory A. R., & Gardner G. H., 1963. Addendum to "Studies of elastic wave attenuation in porous media". Geophysics, 28, 6, 1074-1074.

Wyllie M. R., Gregory, A. R. & Gardner G. H., 1985. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. Geophysics, 23, 3, 459-493.

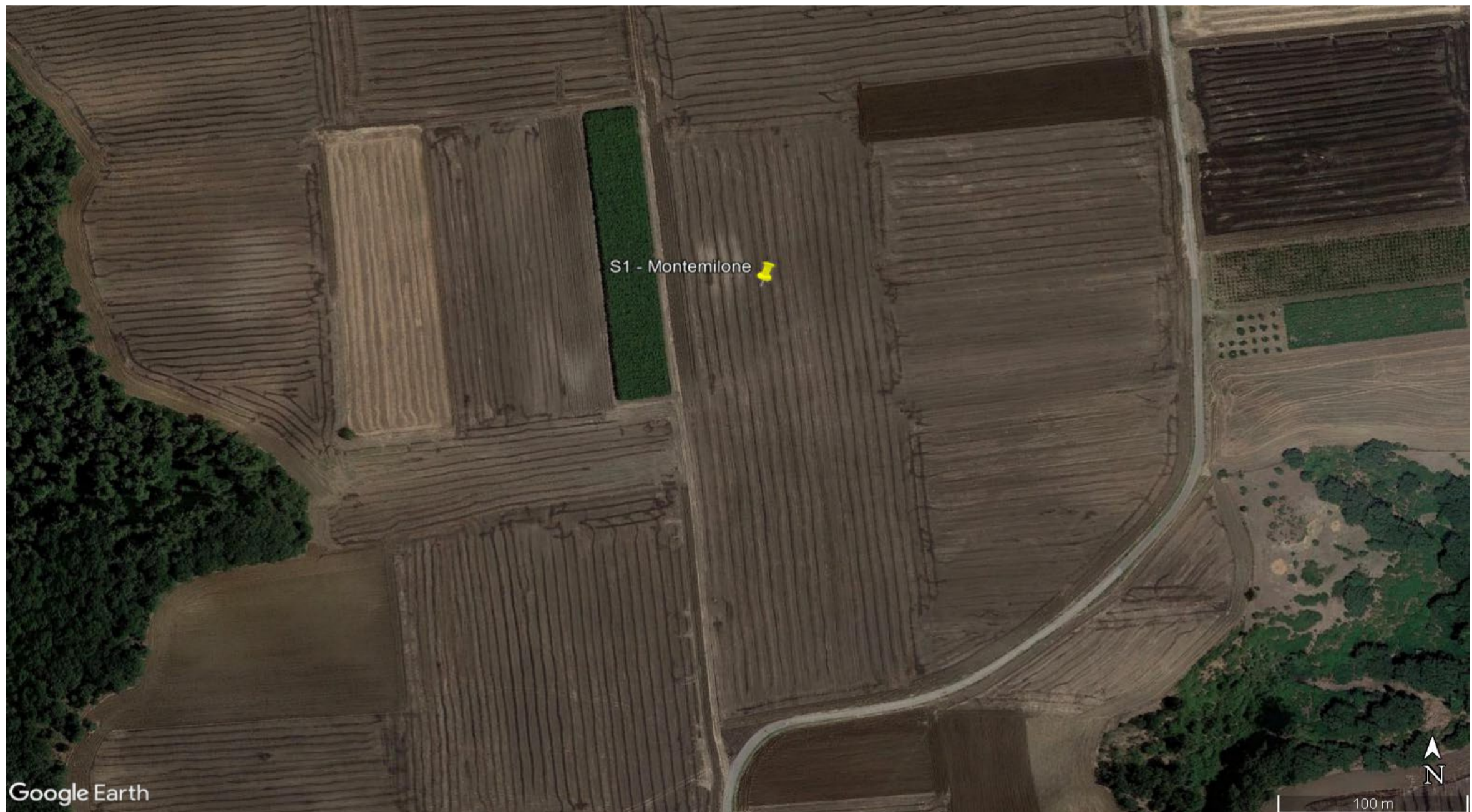
ALLEGATI

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Verbale di Accettazione n°	-
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Commessa n°:	GT 17	Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E
Località:	Montemilone (PZ)	Quota (m.s.l.m):	369,00
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N	Quota Ellissoidica:	-

UBICAZIONE INDAGINI



Planimetria ubicazione indagine: SONDAGGIO S1



Postazione SONDAGGIO S1



PROVA SPT

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL		
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone		
Commessa n°:	GT 17	Vebrale di Accettazione n°	-
Località:	Montemilone (PZ)	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota (m.s.l.m.): 369,00
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		Quota Ellissoidica: -

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOTO CASSETTA 0,00m - 5,00m



FOTO CASSETTA 5,00m - 10,00m

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Vebrale di Accettazione n°	-
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone		
Commessa n°:	GT 17	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Località:	Montemilone (PZ)	Quota (m.s.l.m.):	369,00
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota Ellissoidica: -
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOTO CASSETTA 10,00m - 15,00m



FOTO CASSETTA 15,00m - 20,00m

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Vebrale di Accettazione n°	-	
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone			
Commessa n°:	GT 17	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022	
Località:	Montemilone (PZ)	Quota (m.s.l.m.):	369,00	
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota Ellissoidica:	-
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N			

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOTO CASSETTA 20,00m - 25,00m



FOTO CASSETTA 25,00m - 30,00m

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Vebrale di Accettazione n°	-
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone		
Commessa n°:	GT 17	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Località:	Montemilone (PZ)	Quota (m.s.l.m):	369,00
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota Ellissoidica: -
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOTO CASSETTA 30,00m - 35,00m

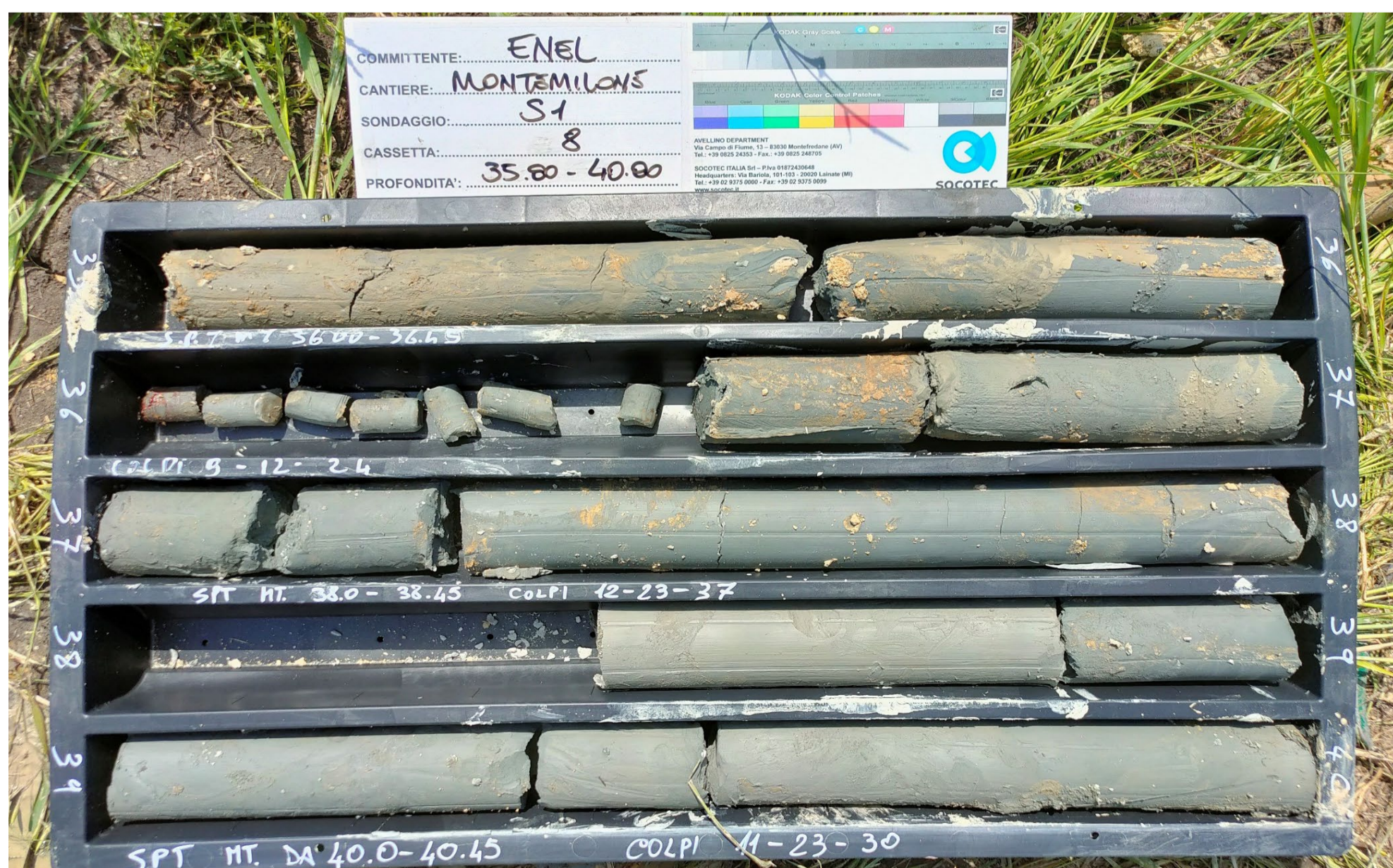


FOTO CASSETTA 35,00m - 40,00m

SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL		
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone		
Commessa n°:	GT 17	Vebrale di Accettazione n°	-
Località:	Montemilone (PZ)	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota (m.s.l.m): 369,00
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		Quota Ellissoidica: -

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOSSILI



FOTO CAMPIONI

SONDAGGIO S1

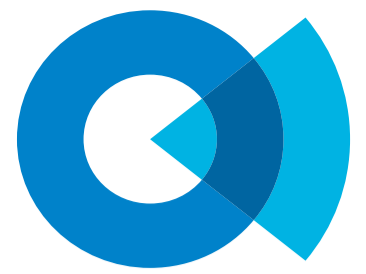
R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL		
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone		
Commessa n°:	GT 17	Verbale di Accettazione n°	-
Località:	Montemilone (PZ)	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		Quota (m.s.l.m): 369,00
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		Quota Ellissoidica: -

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



FOTO POST INTERVENTO



SONDAGGIO S1

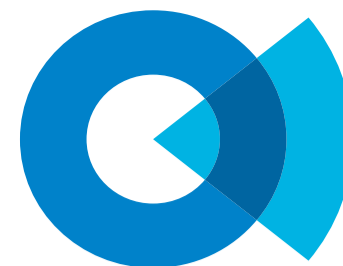
R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Vebrale di Accettazione n°	-
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Commessa n°:	GT 17	Quota (m.s.l.m):	369,00
Località:	Montemilone (PZ)	Quota Ellissoidica:	-
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		

Campione Rimaneggiato:	Cr1,2..	Prova Pressiometrica:	◆	Tubo inclinometrico		S.P.T. (Punta chiusa)	PC
Campione Indisturbato:	C1,2,..	Prova Dilatometrica:	◆	Piezometro a tubo aperto:		S.P.T. (Punta aperta)	PA
Shelby:	S	Prova Lugeon:	⊗	Tubo in PVC per Down-hole:		Quota falda iniz.	
Deinson -Mazier:	DM	Prova Lefranc	◆	Cella casagrande:		Quota falda finale	

Profondità p.c. (m)	Potenza strati (m)	Simbologia	Consistenza		DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	Indice di carotaggio		Prelievo campioni		Prove in foro		Installazione in foro		Falda quota (m dal p.c.)	Dati foro	
			Pocket σ (kg/cm²)	Vane Test Cu (kg/cm²)		% carot.	RQD	Modalità	Profondità (m)	S.P.T.		Schema	Note:		Utensile perforazione	Rivestimento Foro
										prof. (m p.c.)	N° Colpi					
0,60	0,60				Terreno vegetale.											
2,00	1,40				Limo sabbioso argilloso consistente di colore avana					SPT N°1 PC 2,00-2,22	40-R					
7,00	5,60				Conglomerati poligenici in matrice sabbiosa debolmente limosa, colore grigio chiaro.					SPT N°2 PC 4,00-4,45	12-19-21			6,00		
7,80	0,80				Limo debolmente sabbioso, consistente di colore avana			C 1	7,00-7,50	SPT N°3 PC 6,00-6,26	30-R					
11,50	3,70				Conglomerati poligenici in matrice sabbiosa debolmente limosa, colore ocra - avana.					SPT N°4 PC 8,00-8,14	R					
16,50	5,00				Argilla debolmente limosa, consistente di colore avana con inclusi millimetrici e centimetrici.					SPT N°5 PC 10,00-10,10	R					
17,00	0,50				Argilla con limo, consistente di colore avana.					SPT N°6 PC 12,00-12,50	8-19-23					
18,50	1,50				Conglomerati poligenici in matrice sabbiosa limosa colore avana.					SPT N°7 PC 14,50-14,95	27-30-35					
19,00	0,50				Argilla debolmente limosa colore avana con inclusi millimetrici.					SPT N°8 PC 16,00-16,45	15-22-34					
24,00	5,00				Argilla debolmente limosa, consistente di colore grigio azzurra con abbondante presenza di molluschi bivalvi e gasteropodi.					SPT N°9 PC 18,00-18,36	20-40-R					
27,70	3,70				Argilla con limo debolmente sabbiosa, consistente, di colore marrone chiaro - ocra con inclusi millimetrici talora centimetrici.					SPT N°10 PA 20,00-20,50	5-14-15					
								Cr 1	20,50-20,95	SPT N°11 PA 22,50-22,95	3-7-11					
										SPT N°12 PC 24,50-25,00	7-15-21					
										SPT N°13 PC 26,50-26,77	30-R					
										SPT N°14 PC 28,00-28,40	10-38-R					
					Conglomerati poligenici in matrice sabbiosa limosa colore avana.											

CAROTIERE SEMPLICE 101 mm



SONDAGGIO S1

R.d.P. n° SA-22-303 Del 06/05/22

Committente:	ENEL	Vebrale di Accettazione n°	-
Oggetto Lavoro:	Indagini geognostiche Montemilone	Data esecuzione sondaggio:	Dal 02/05 al 04/05/2022
Commessa n°:	GT 17	Quota (m.s.l.m):	369,00
Località:	Montemilone (PZ)	Quota Ellissoidica:	-
Coordinate UTM WGS 84:	Lat 41° 0'45.00"N; Long 15°58'48.00"E		
Coordinate Gauss-Boaga:	582404.49 m E; 4540607.17 m N		

Campione Rimaneggiato:	Cr1,2..	Prova Pressiometrica:	◇	Tubo inclinometrico		S.P.T. (Punta chiusa)	PC
Campione Indisturbato:	C1,2,..	Prova Dilatometrica:	◆	Piezometro a tubo aperto:		S.P.T. (Punta aperta)	PA
Shelby:	S	Prova Lugeon:	⊗	Tubo in PVC per Down-hole:		Quota falda iniz.	
Deinson -Mazier:	DM	Prova Lefranc	◇	Cella casagrande:		Quota falda finale	

Profondità p.c. (m)	Potenza strati (m)	Simbologia	Consistenza		DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	Indice di carotaggio		Prelievo campioni		Prove in foro		Installazione in foro		Falda quota (m dal p.c.)	Dati foro		
			Pocket σ (kg/cm²)	Vane Test Cu (kg/cm²)		% carot.	RQD	Modalità	Profondità (m)	S.P.T.		Schema	Note:		Utensile perforazione	Rivestimento Foro	
										prof. (m p.c.)	N° Colpi						
32,50	4,30				Conglomerati poligenici in matrice sabbiosa limosa colore avana.					SPT N°15 PC 30,00-30,37 29-41-R				CAROTIERE SEMPLICE 101 mm			
										SPT N°16 PC 32,00-32,29 28-R							
											SPT N°17 PA Cr 3 34,00-34,45 34,00-34,45 8-13-22						
	7,50				Argilla debolmente limosa, consistente, di colore grigio azzurra con abbondante presenza di molluschi bivalvi e gasteropodi.						SPT N°18 PA Cr 4 36,00-36,45 36,00-36,45 9-12-24						
											SPT N°19 PC 38,00-38,45 12-23-37						
40,00											SPT N°20 PA Cr 5 40,00-40,45 40,00-40,45 11-23-30						

COMMITTENTE: **ENEL GREEN POWER**

CANTIERE: Indagini geognostiche Montemilone

PROVA: DPSH 8-9 DATA: 19/4/22 FALDA: Assente
Coordinate WGS 84 41° 1'4.57"N - 15°58'54.80"E
COMMESSA: GT17 R.d.P. SITO N°: SA22-357 Rev. 00 DEL: 26/05/2022

UBICAZIONE



Il Direttore Tecnico SOA:
ing. Massimo De Iasi

Il Responsabile Prove in Sito:
dott. Orlando Cavallaro

COMMITTENTE: **ENEL GREEN POWER**

CANTIERE: Indagini geognostiche Montemilone

PROVA: DPSH 8-9 bis DATA: 19/4/22 FALDA: Assente
Coordinate WGS 84 41° 1'4.57"N - 15°58'54.80"E
COMMESSA: GT17 R.d.P. SITO N°: SA22-358 Rev. 00 DEL: 26/05/2022

UBICAZIONE



Il Direttore Tecnico SOA:
ing. Massimo De Iasi

Il Responsabile Prove in Sito:
dott. Orlando Cavallaro

AVELLINO DEPARTMENT
Via Campo di Fiume, 13 – 83030 Montefredane (AV)
Tel.: +39 0825 24353 - Fax.: +39 0825 248705

SOCOTEC ITALIA Srl – P.Iva 01872430648
Headquarters: Via Bariola, 101-103 - 20020 Lainate (MI)
Tel.: +39 02 9375 0000 - Fax: +39 02 9375 0099
www.socotec.it



COMMITTENTE: **ENEL GREEN POWER**

CANTIERE: Indagini geognostiche Montemilone

PROVA: DPSH MM2 DATA: 19/4/22 FALDA: Assente
Coordinate WGS 84 41° 0'45.70"N - 15°58'48.85"E
COMMESSA: GT17 R.d.P. SITO N°: SA22-359 Rev. 00 DEL: 26/05/2022

UBICAZIONE



Il Direttore Tecnico SOA:
ing. Massimo De Iasi

Il Responsabile Prove in Sito:
dott. Orlando Cavallaro

AVELLINO DEPARTMENT
Via Campo di Fiume, 13 – 83030 Montefredane (AV)
Tel.: +39 0825 24353 - Fax.: +39 0825 248705

SOCOTEC ITALIA Srl – P.Iva 01872430648
Headquarters: Via Bariola, 101-103 - 20020 Lainate (MI)
Tel.: +39 02 9375 0000 - Fax: +39 02 9375 0099
www.socotec.it



COMMITTENTE: **ENEL GREEN POWER**

CANTIERE: Indagini geognostiche Montemilone

PROVA: DPSH MT-05_06 DATA: 19/4/22 FALDA: Assente

Coordinate WGS 84 41° 0'20.25"N - 15°58'21.80"E

COMMESSA: GT17 R.d.P. SITO N°: SA22-360 Rev. 00 DEL: 26/05/2022

UBICAZIONE



Il Direttore Tecnico SOA:
ing. Massimo De Iasi

Il Responsabile Prove in Sito:
dott. Orlando Cavallaro

COMMITTENTE:	ENEL GREEN POWER		
CANTIERE:	Indagini geognostiche Montemilone		
PROVA:	DPSH MT-04	DATA: 19/4/22	FALDA: Assente
Coordinate WGS 84	40°59'43.05"N - 15°57'8.68"E		
COMMESSA: GT17	R.d.P. SITO N°: SA22-361	Rev. 00 DEL:	26/05/2022

UBICAZIONE



Il Direttore Tecnico SOA:
ing. Massimo De Iasi

Il Responsabile Prove in Sito:
dott. Orlando Cavallaro



TEST REPORT

1/4

MASW

CLIENTE	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mm2		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4540628.21 m N	
	Long.	582420.39 m E	





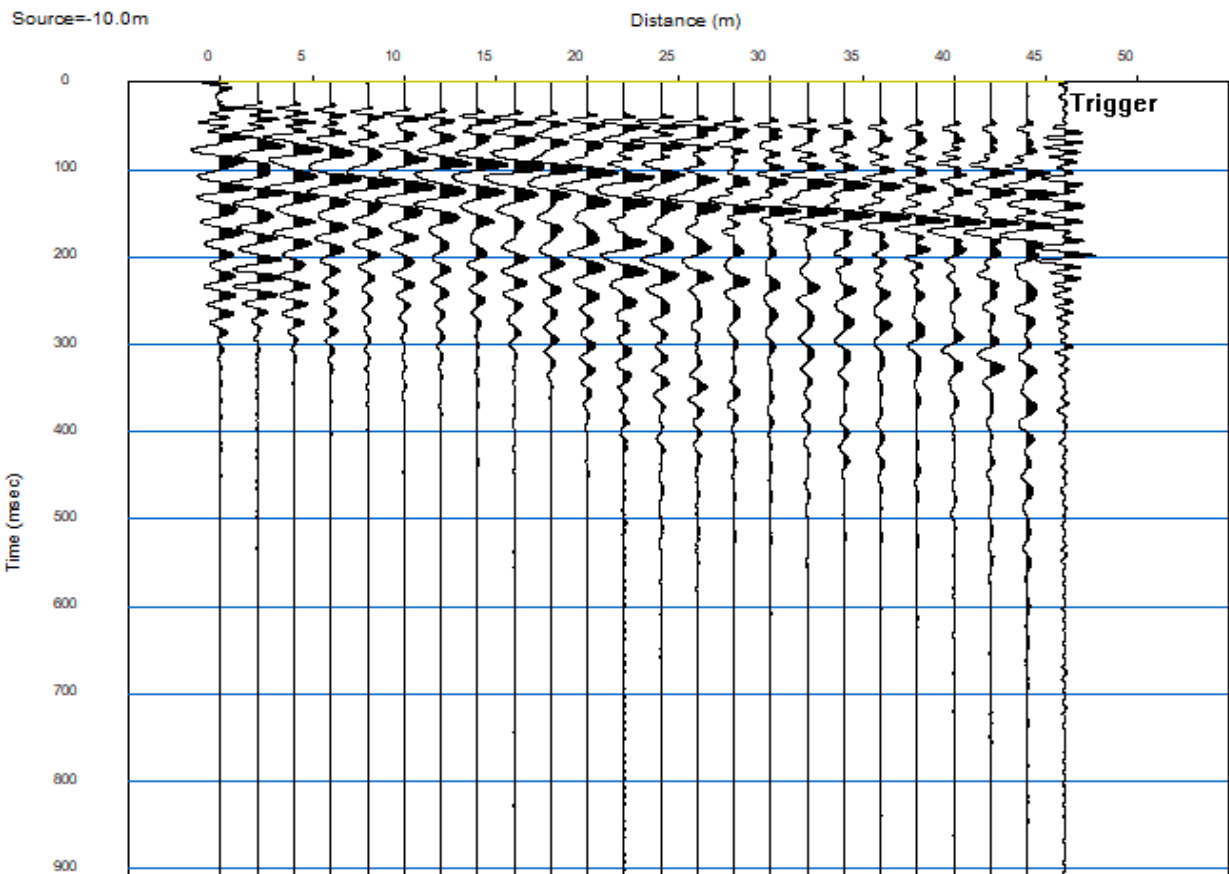
TEST REPORT

2/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mm2		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4540628.21 m N	
	Long.	582420.39 m E	

SISMOGRAMMA





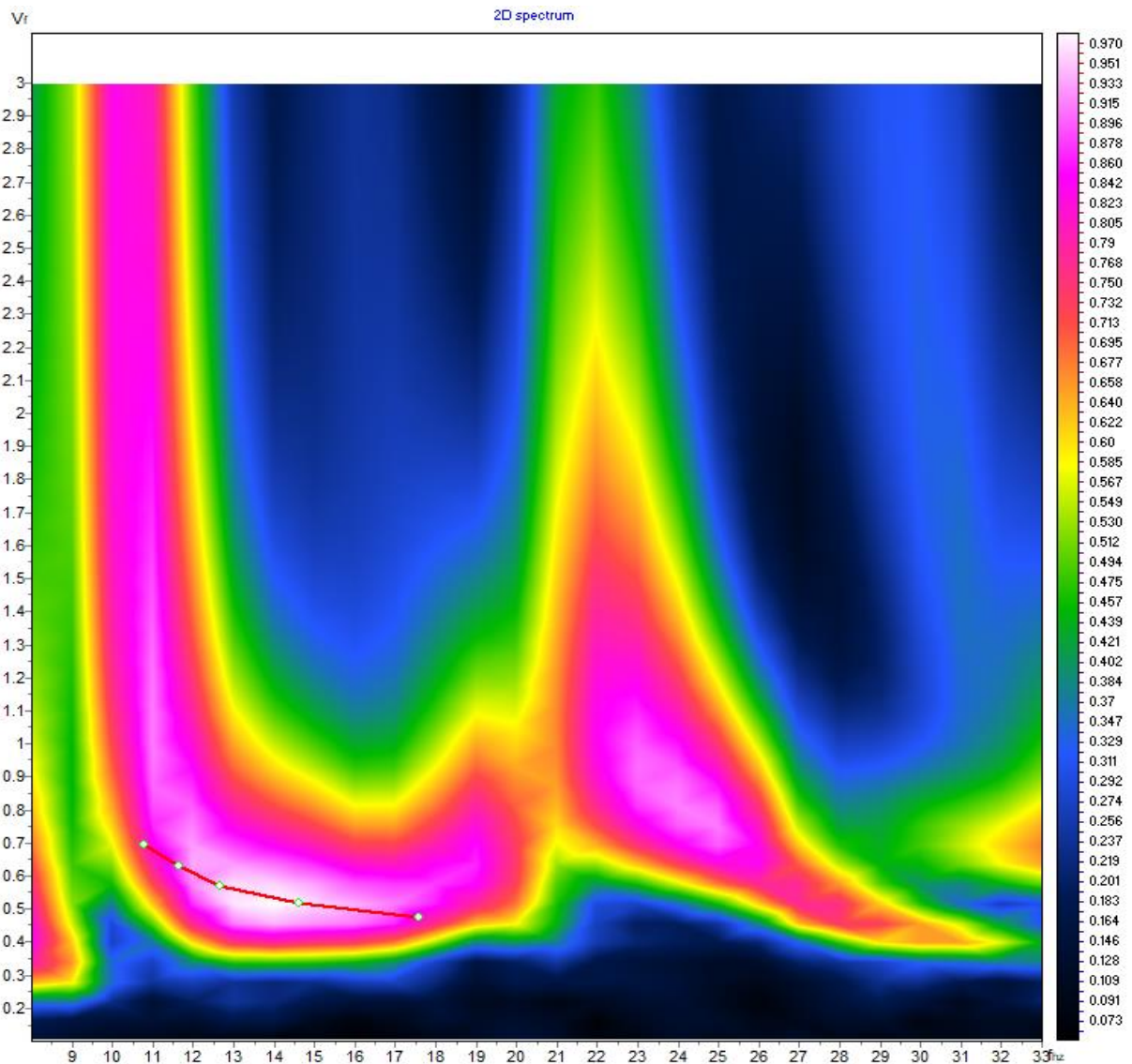
TEST REPORT

3/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mm2		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4540628.21 m N	
	Long.	582420.39 m E	

SPETTRO OSSERVATO E CURVA DI DISPERSIONE





TEST REPORT

4/4

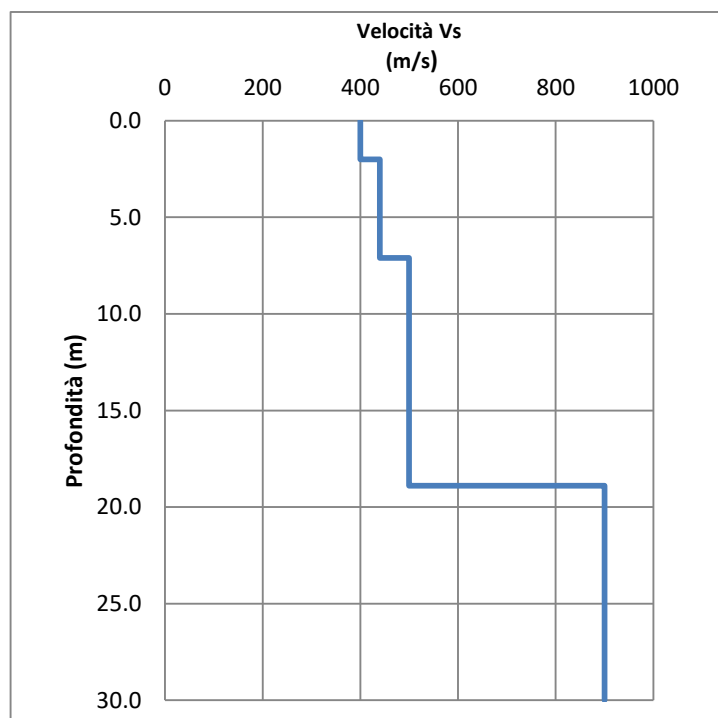
MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST:	MASW_mm2		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4540628.21 m N	
	Long.	582420.39 m E	

GRAFICO & TABELLA Vs - h

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)
1	0.00	2.00	2.00	400.00
2	2.00	7.10	5.10	440.00
3	7.10	18.90	11.80	500.00
4	18.90	inf.	inf.	900.00

Vs eq **470**
Suolo **B**





TEST REPORT

1/4

MASW

CLIENTE	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt5-6		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4539837.61 m N	
	Long.	581795.79 m E	





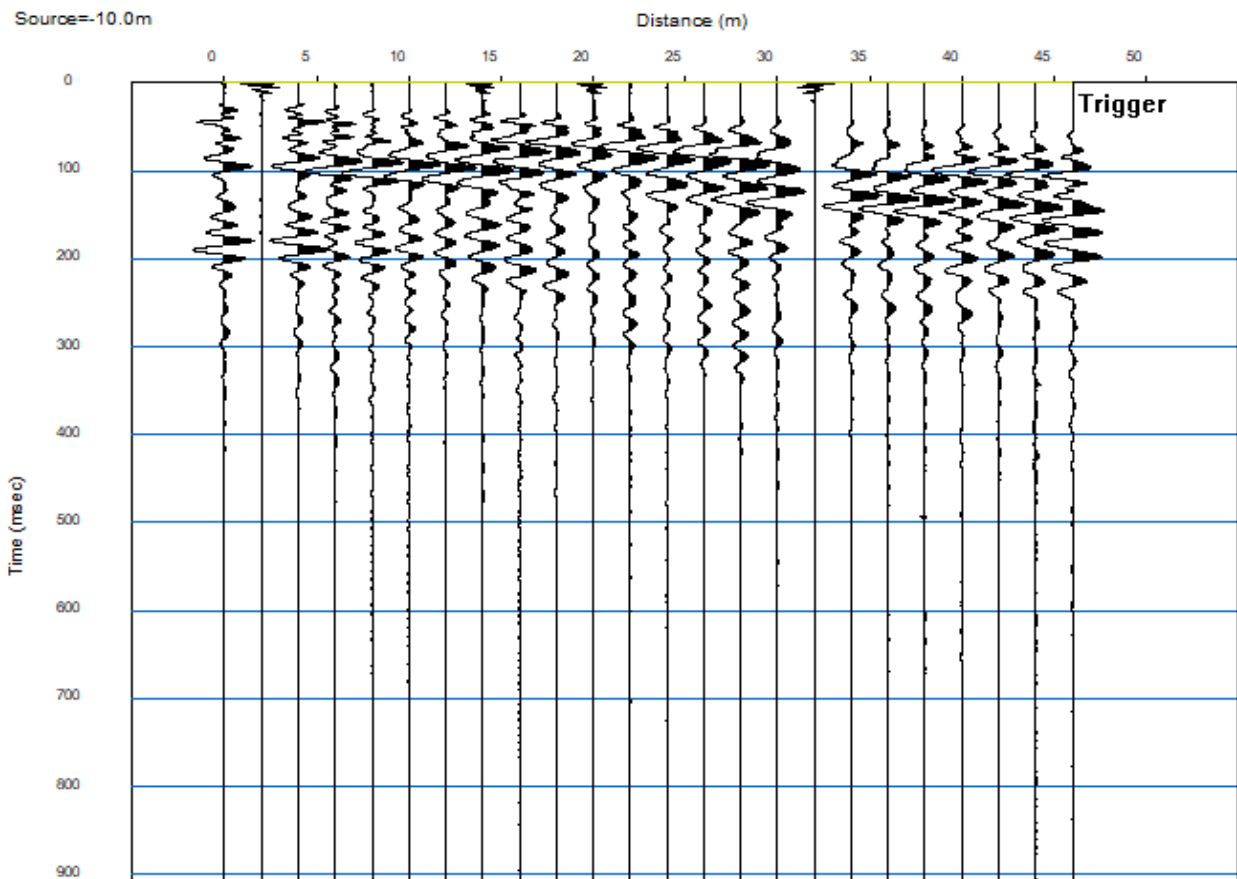
TEST REPORT

2/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt5-6		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4539837.61 m N	
	Long.	581795.79 m E	

SISMOGRAMMA





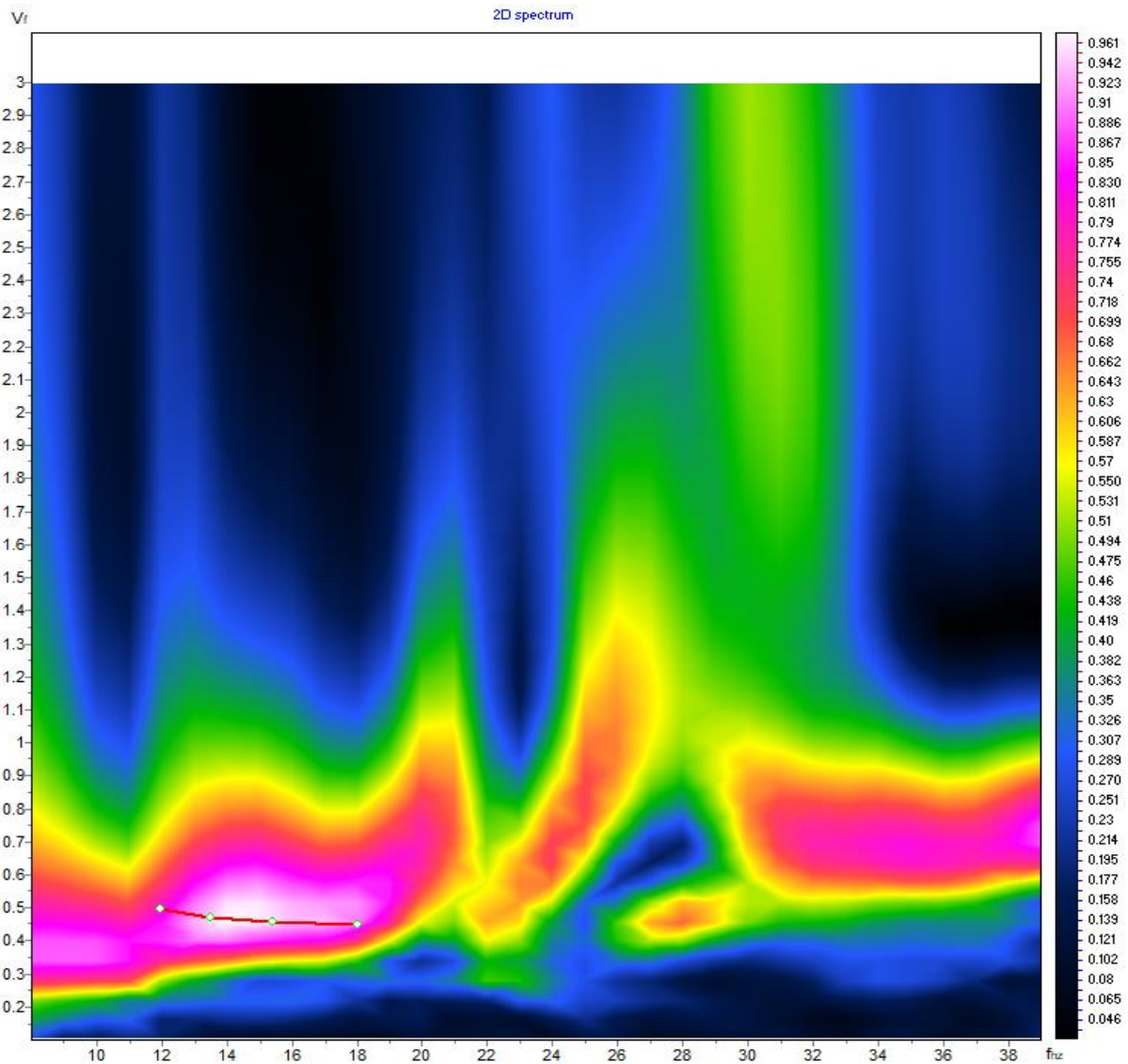
TEST REPORT

3/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt5-6		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4539837.61 m N	
	Long.	581795.79 m E	

SPETTRO OSSERVATO E CURVA DI DISPERSIONE





TEST REPORT

4/4

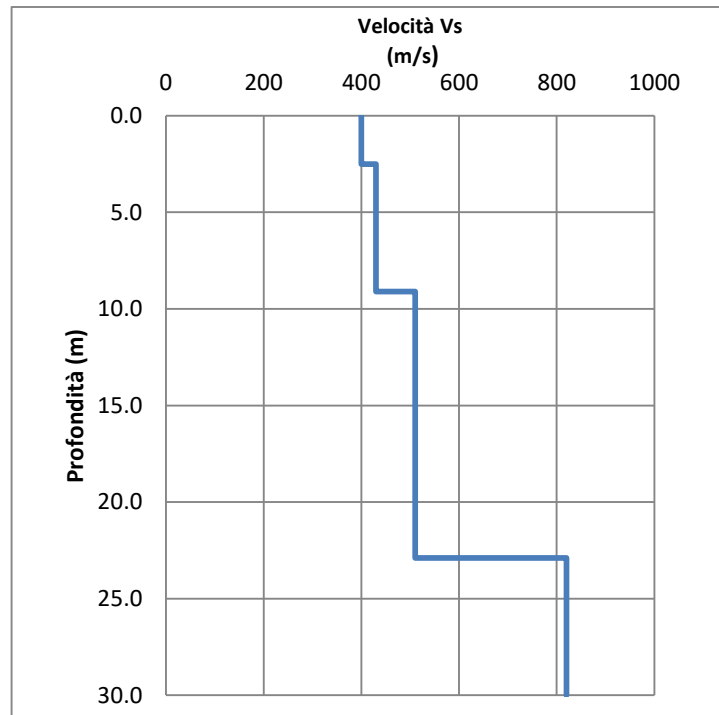
MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST:	MASW_mt5-6		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4539837.61 m N	
	Long.	581795.79 m E	

GRAFICO & TABELLA Vs - h

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)
1	0.00	2.50	2.50	400.00
2	2.50	9.10	6.60	430.00
3	9.10	22.90	13.80	510.00
4	22.90	inf.	inf.	820.00

Vs eq **471**
Suolo **B**



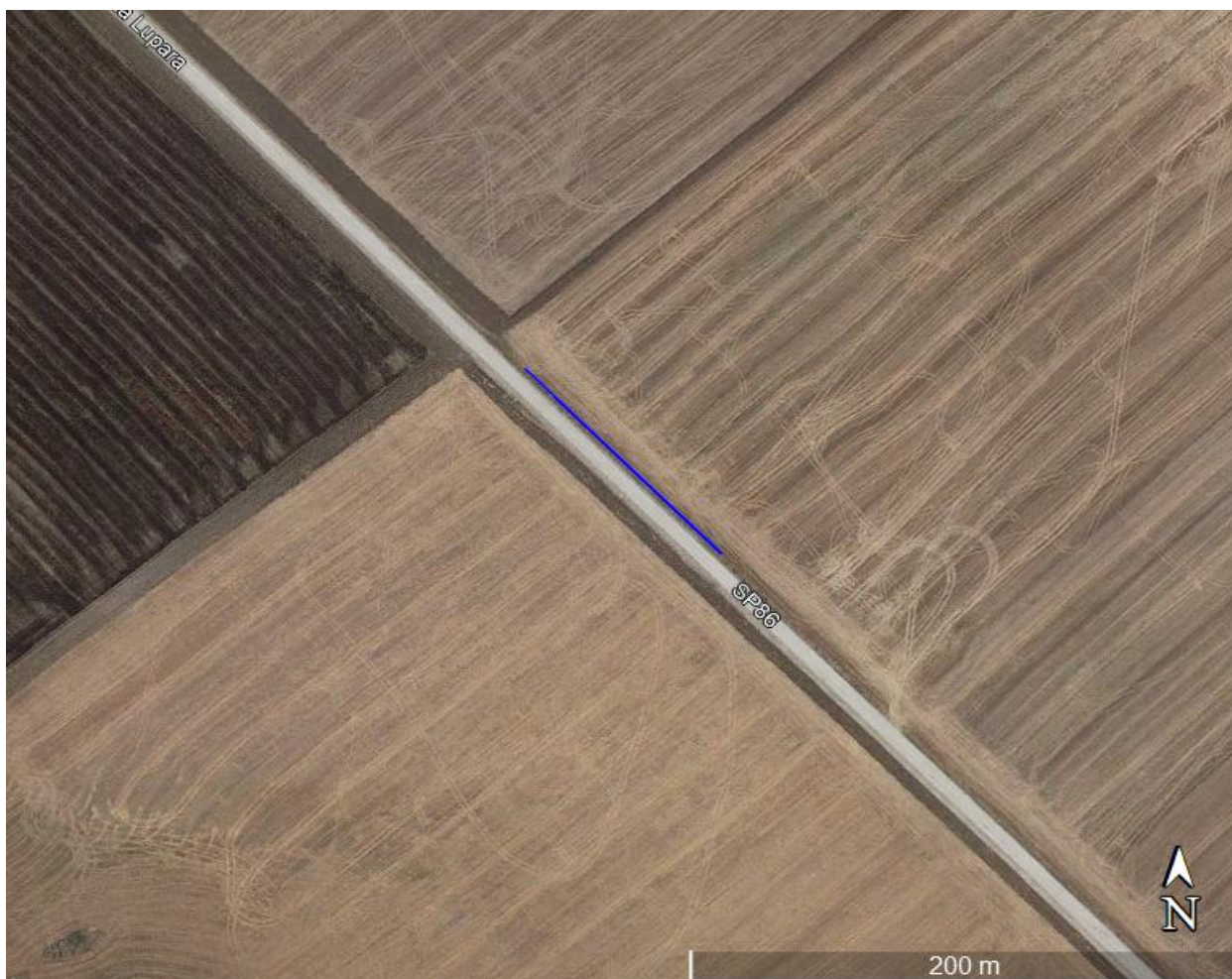


TEST REPORT

1/4

MASW

CLIENTE	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt4		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4538669.66 m N	
	Long.	580107.55 m E	





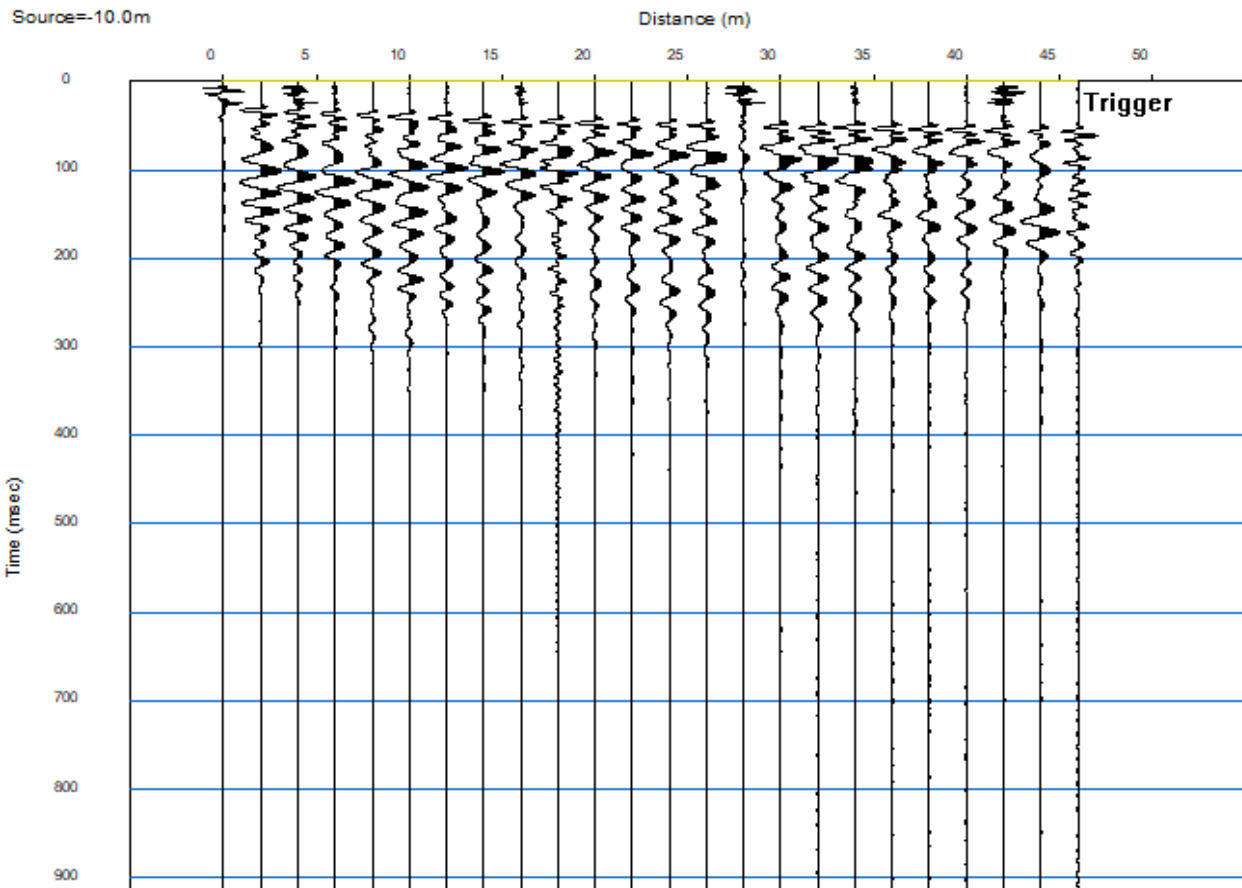
TEST REPORT

2/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt4		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4538669.66 m N	
	Long.	580107.55 m E	

SISMOGRAMMA





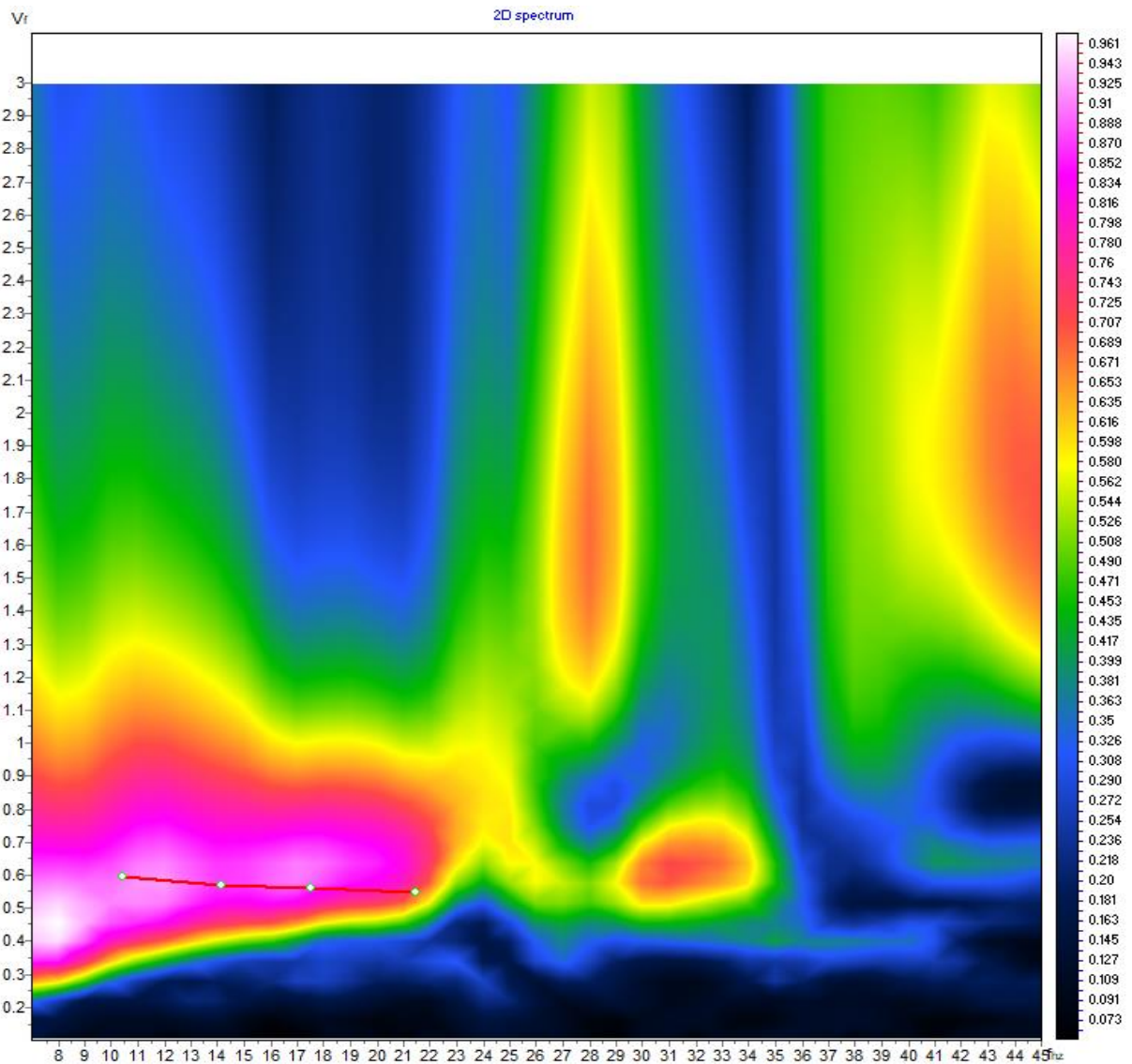
TEST REPORT

3/4

MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST	MASW_mt4		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4538669.66 m N	
	Long.	580107.55 m E	

SPETTRO OSSERVATO E CURVA DI DISPERSIONE





TEST REPORT

4/4

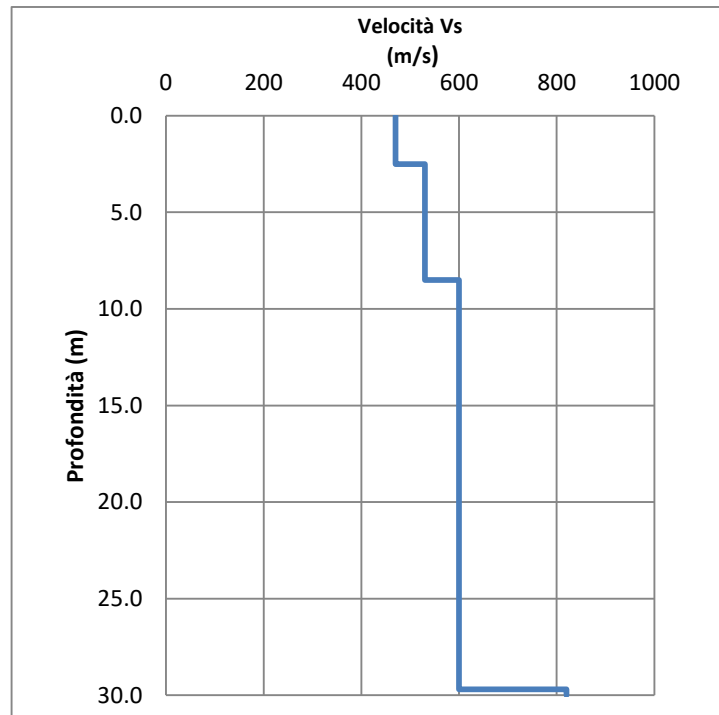
MASW

CLIENTE:	ENEL		
LAVORO:	Indagini geofisiche Montemilone		
UBICAZIONE:	Montemilone (PZ)		
NOME TEST:	MASW_mt4		
DATA DI ESECUZIONE	09/05/2022		
COORDINATE	Lat.	4538669.66 m N	
	Long.	580107.55 m E	

GRAFICO & TABELLA Vs - h

Sismostrato	Profondità		Spessore	Vs (m/s)
1	0.00	2.50	2.50	470.00
2	2.50	8.50	6.00	530.00
3	8.50	29.70	21.20	600.00
4	29.70	inf.	inf.	820.00

Vs eq **571**
Suolo **B**



Indagini geofisiche presso Montemilone (PZ)

Tomografia sismica a rifrazione.

EMISSIONE: Rev.00
DATA: 23/05/2022

Elaborato	Verificato	Approvato
Paola Luiso	Donato Fiore	Massimo De Iasi
<i>Paola Luiso</i>	<i>Donato Fiore</i>	<i>Massimo De Iasi</i>
Marco Taddeo		
<i>Marco Taddeo</i>		

TAVOLA N°2

Ubicazione indagini SRT



Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:



Indagini:

SRT

Data di esecuzione:

Maggio 2022

Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo

Verificato: D. Fiore

Approvato: M. De Iasi



SOCOTEC

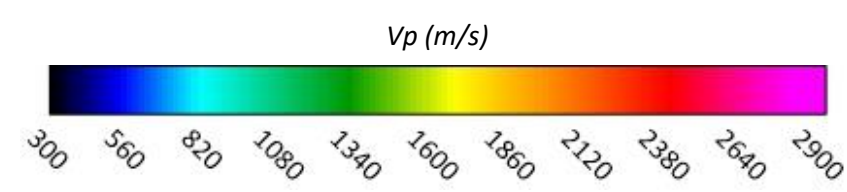
TAVOLA N°3

Tomografia sismica SRT 8-9 – Onda P



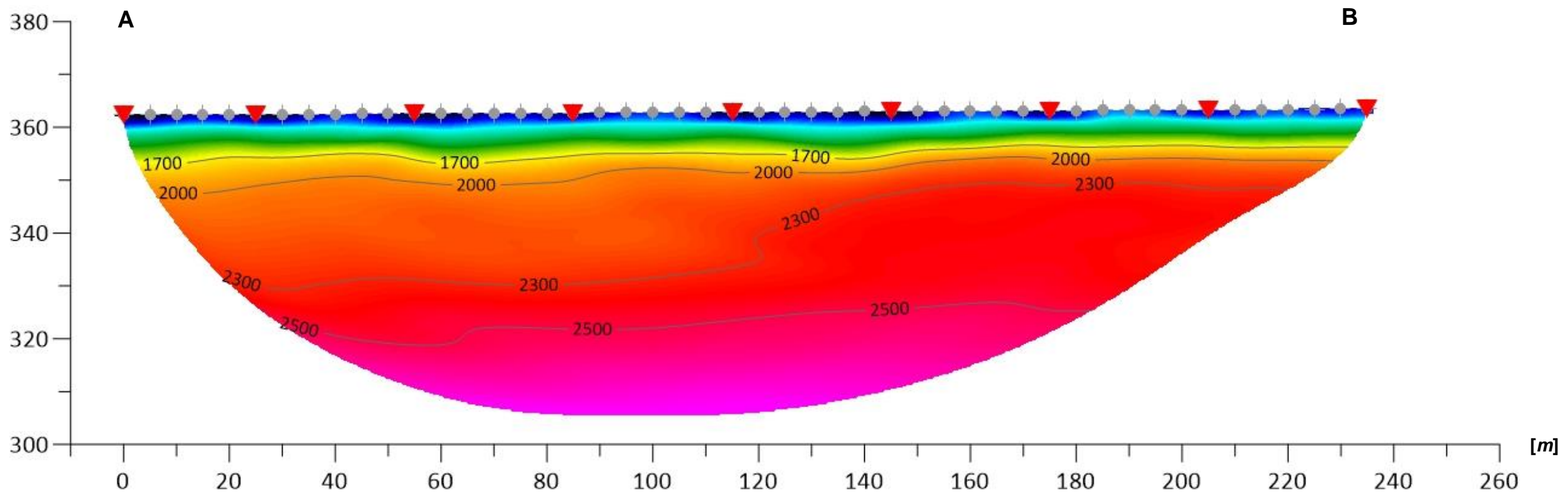
Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4541363.631 N	582537.421 E
B	4541130.420 N	582565.140 E



SRT 8-9

Quota ellissoidica [m]



Scala 1 : 500

Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:

Indagini:
SRT
Data di esecuzione:
Maggio 2022

Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo
Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



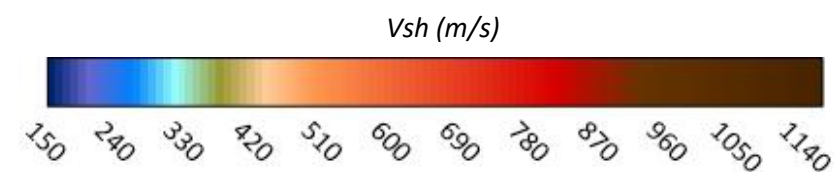
TAVOLA N°4

Tomografia sismica SRT 8-9 – Onda Sh



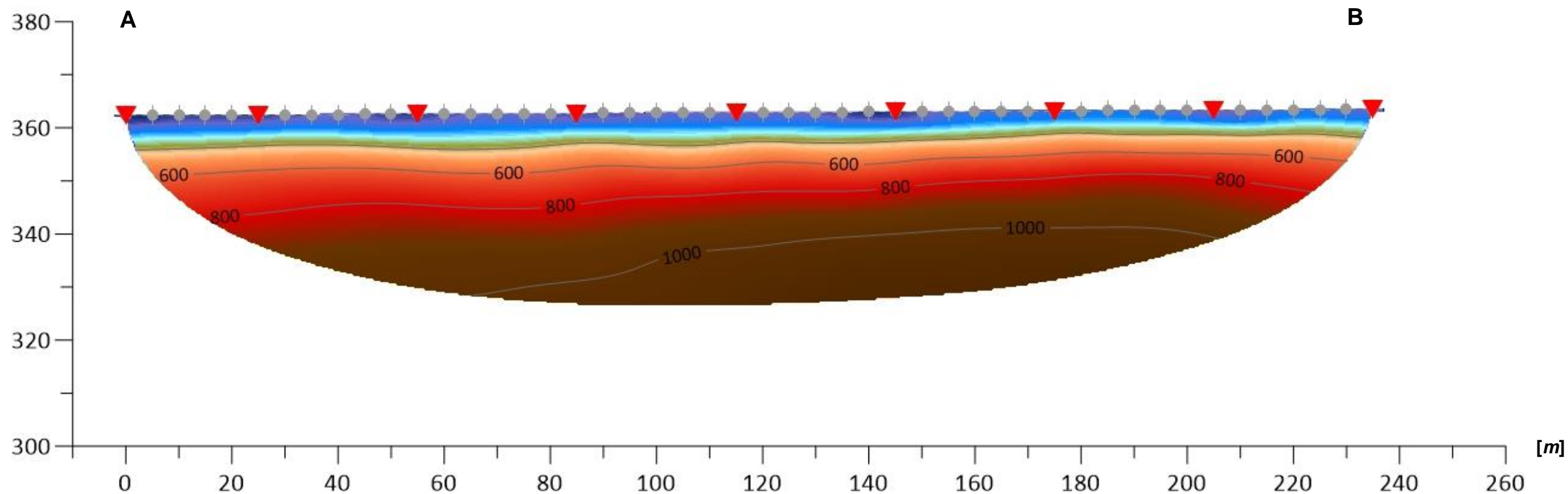
Passo intergeofonico: 5 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4541363.631 N	582537.421 E
B	4541130.420 N	582565.140 E



SRT 8-9

Quota ellissoidica [m]



Scala 1 : 500

Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:



Indagini:

SRT
Data di esecuzione:
Maggio 2022

Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo

Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



SOCOTEC

Indagini geofisiche presso Montemilone (PZ)

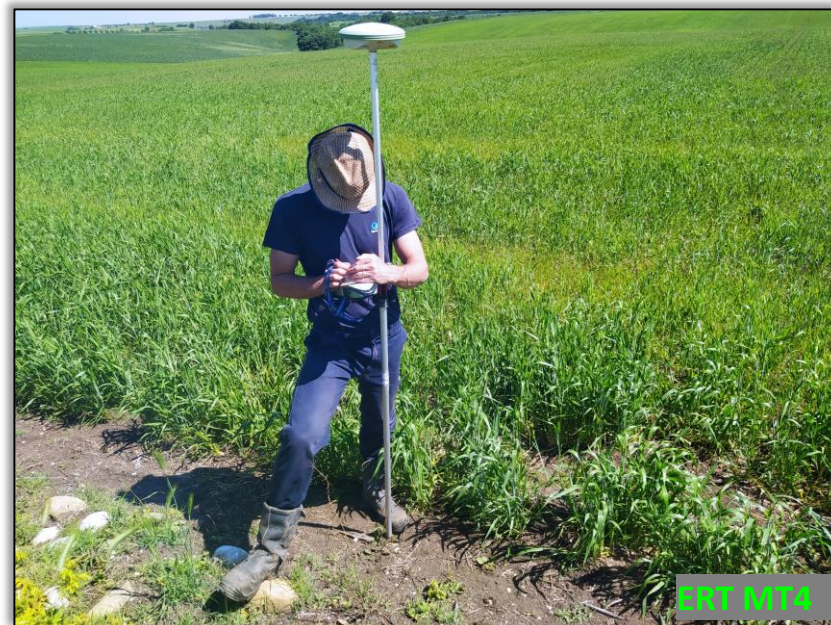
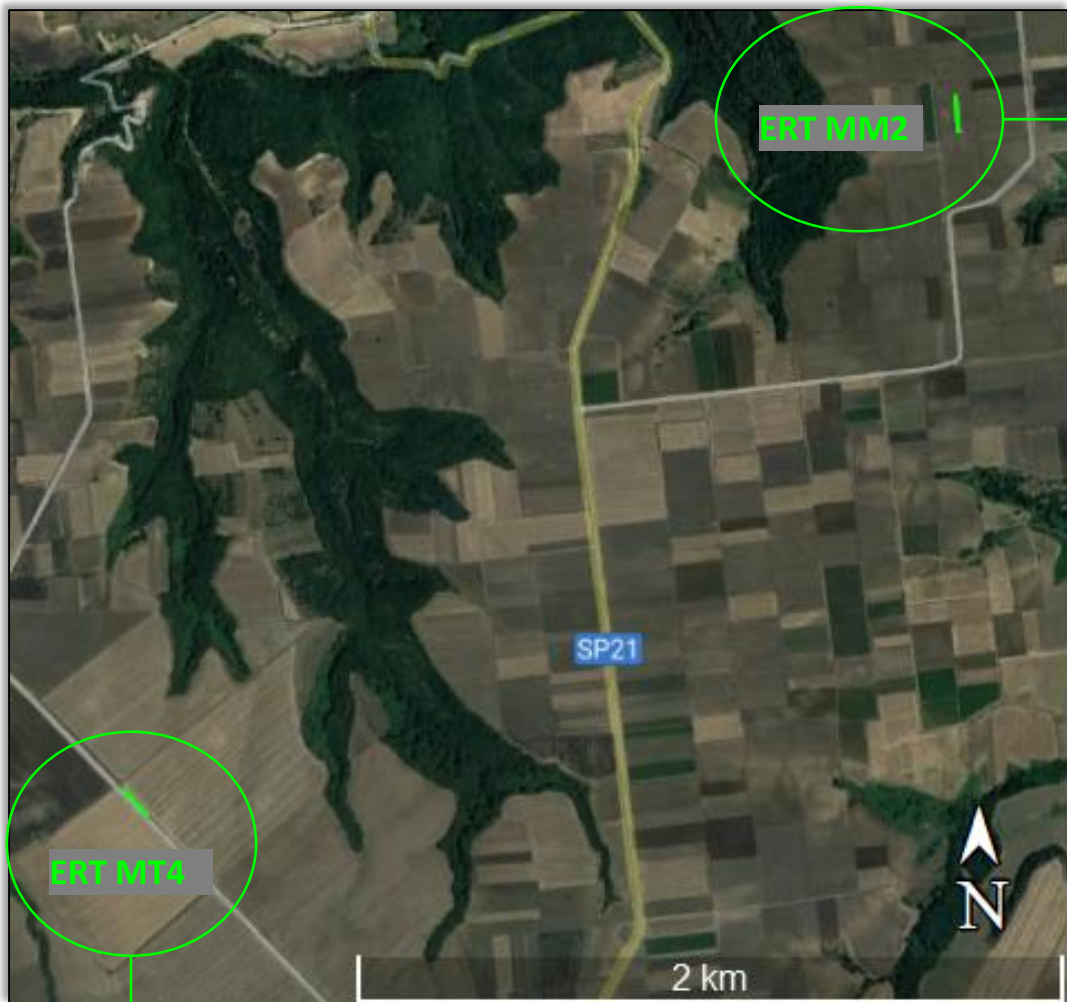
Tomografia di resistività elettrica.

EMISSIONE: Rev.00
DATA: 23/05/2022

Elaborato	Verificato	Approvato
Paola Luiso	Donato Fiore	Massimo De Iasi
<i>Paola Luiso</i>	<i>Donato Fiore</i>	<i>Massimo De Iasi</i>
Marco Taddeo		
<i>Marco Taddeo</i>		

TAVOLA N°2

Ubicazione indagini ERT



Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:



Indagini:

SRT

Data di esecuzione:

Maggio 2022

Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo

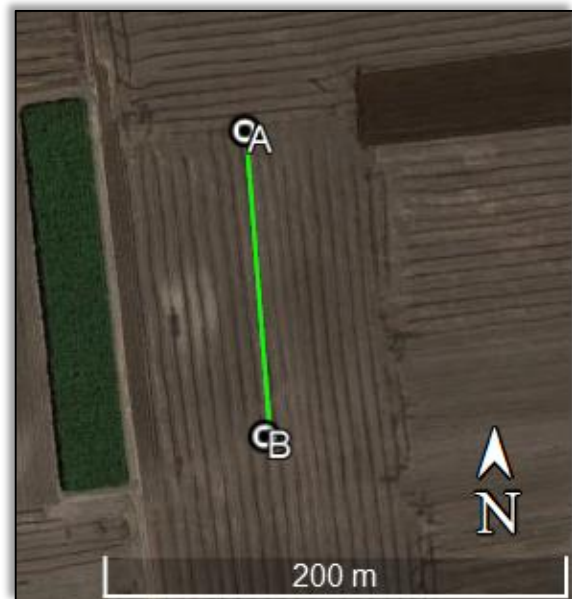
Verificato: D. Fiore

Approvato: M. De Iasi



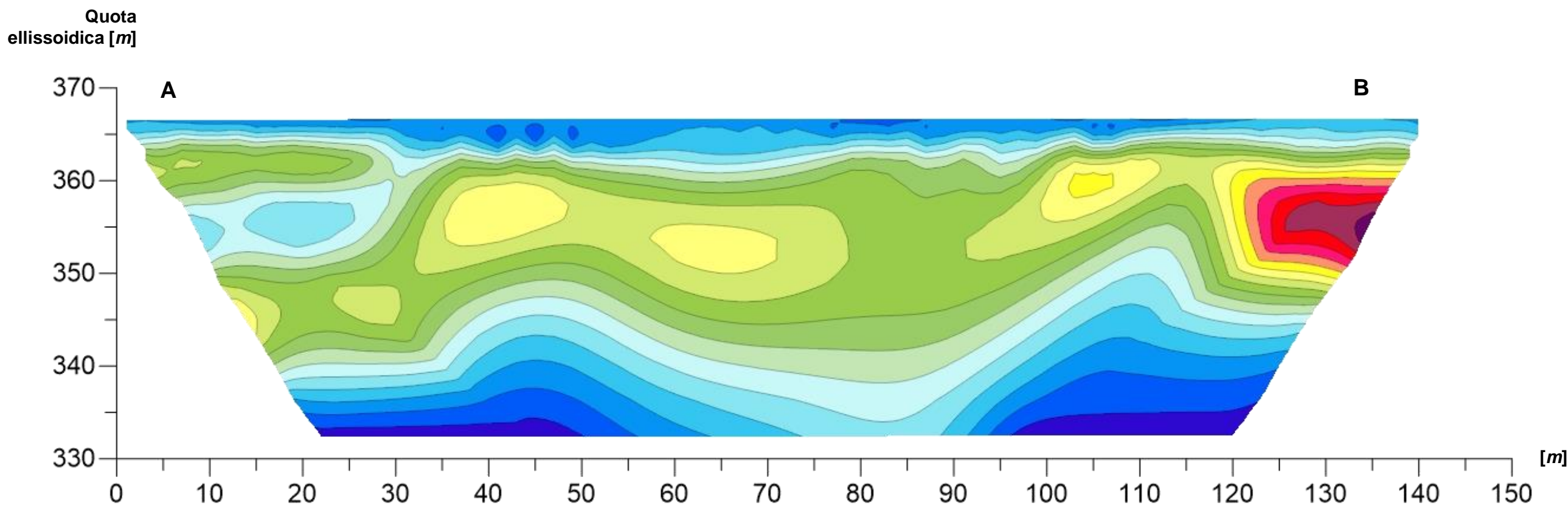
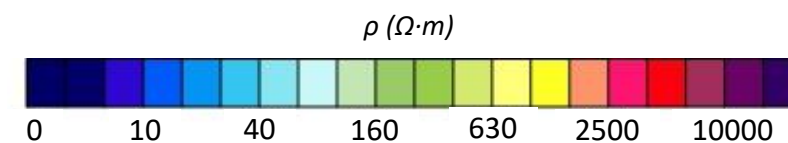
TAVOLA N°3

Tomografia elettrica ERT MM2



Passo interelettrodo: 2 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4540696.841 N	582410.683 E
B	4540564.978 N	582420.051 E



Scala 1 : 500

Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:



Indagini:

ERT
Data di esecuzione:
Maggio 2022

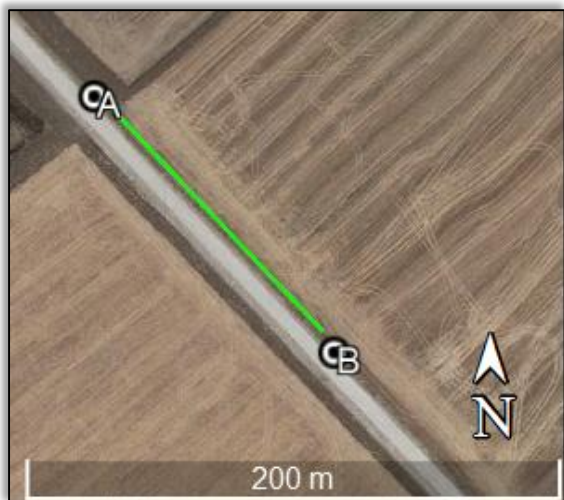
Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo

Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



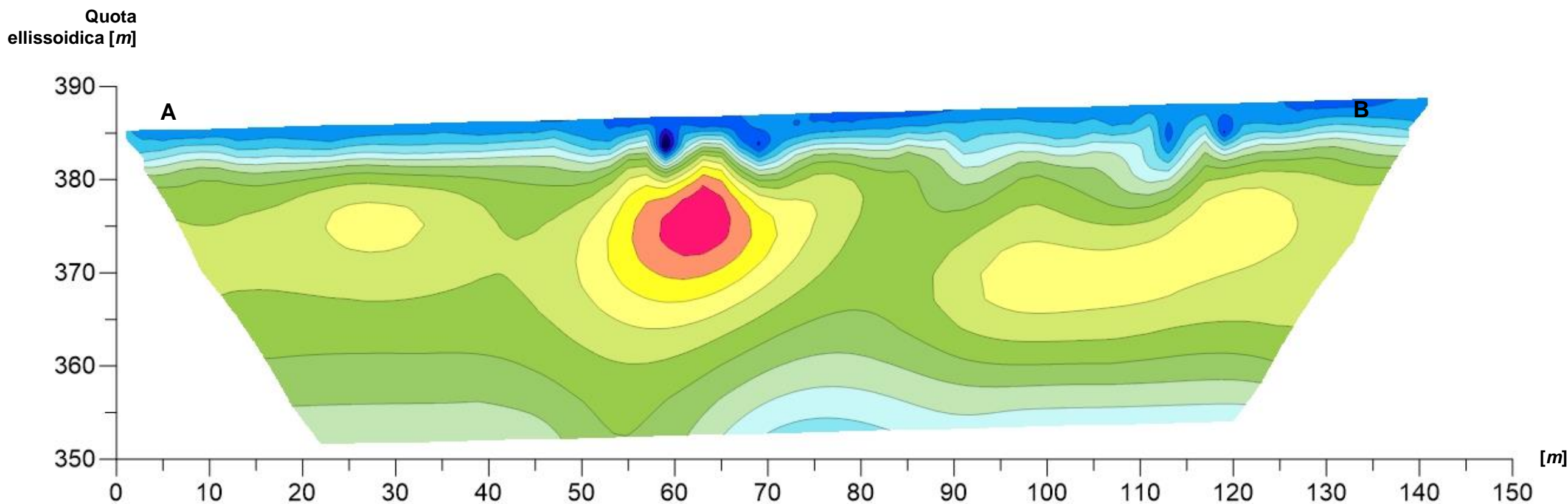
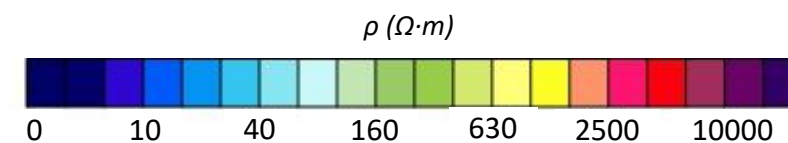
TAVOLA N°4

Tomografia elettrica ERT MT4



Passo interelettrodo: 2 m

Coordinate		
ID	Latitudine	Longitudine
A	4538719.732 N	580057.649 E
B	4538623.927 N	580150.482 E



Scala 1 : 500

Lavoro:
Indagini geofisiche presso Montemilone

Committente:



Indagini:

ERT
Data di esecuzione:
Maggio 2022

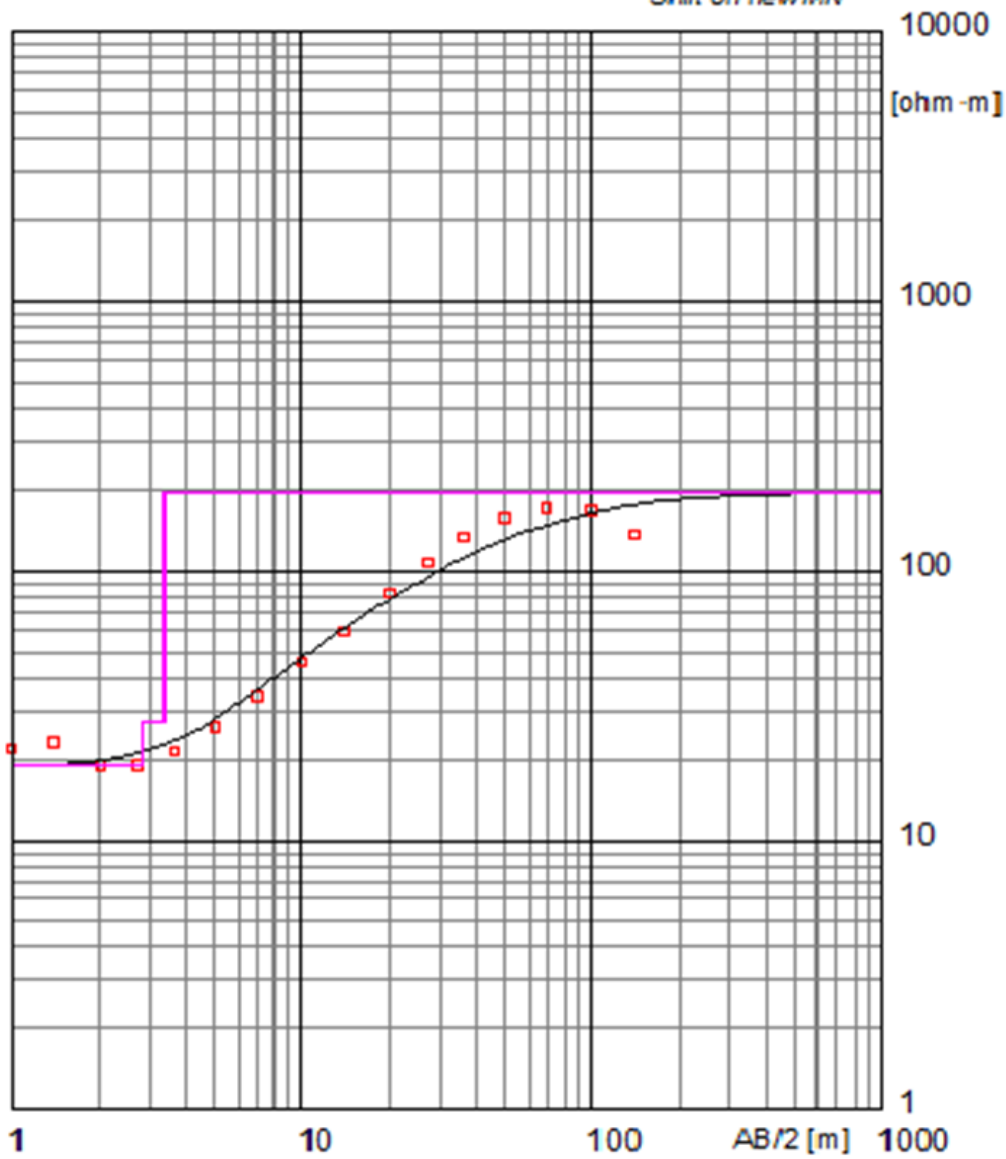
Elaborato: P. Luiso – M. Taddeo

Verificato: D. Fiore
Approvato: M. De Iasi



Electrical sounding Schlumberger - S.E.V. MT4

Shift on new MN



Model	Resistivity	Thickness	Depth
	[ohm·m]	[m]	[m]
1	19	2.8	
2	28	.53	2.8
3	197		3.3

RESISTIVITA' TERMICA (ASTM D 5334-14) RESTER04

R.d.P. n° SA22-356 Del 26/05/22

Committente: ENEL GREEN POWER

Oggetto Lavoro: Indagini geognostiche Montemilone

Commessa n°: AV-GT17

Verbale di Accettazione n°

Località: MONTEMILONE

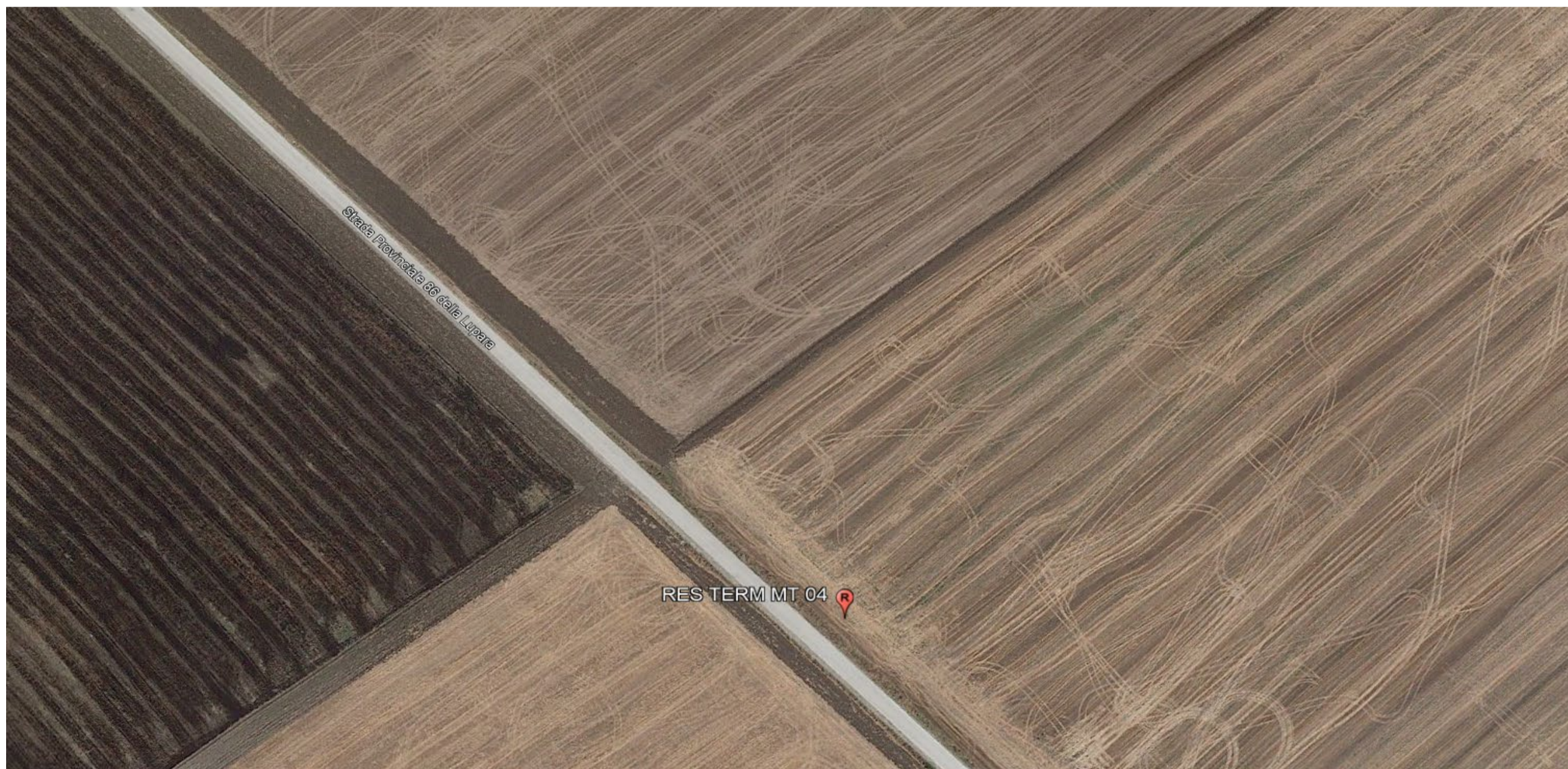
Data esecuzione sondaggio:

Coordinate UTM WGS 84 40°59'42.90"N - 15°57'9.23"E

Quota (m.s.l.m):

Coordinate Gauss-Boaga:

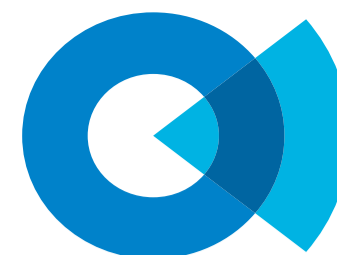
UBICAZIONE INDAGINI



Planimetria ubicazione indagine: RESISTIVITA' TERMICA (ASTM D 5334-14) RESTER04



Misura RESISTIVITA' TERMICA (ASTM D 5334-14) RESTER04



RESISTIVITA' TERMICA (ASTM D 5334-14) RESTER04

R.d.P. n° SA22-356 Del 26/05/22

Committente: ENEL GREEN POWER

Oggetto Lavoro: Indagini geognostiche Montemilone

Commessa n°: AV-GT17

Verbale di Accettazione n°

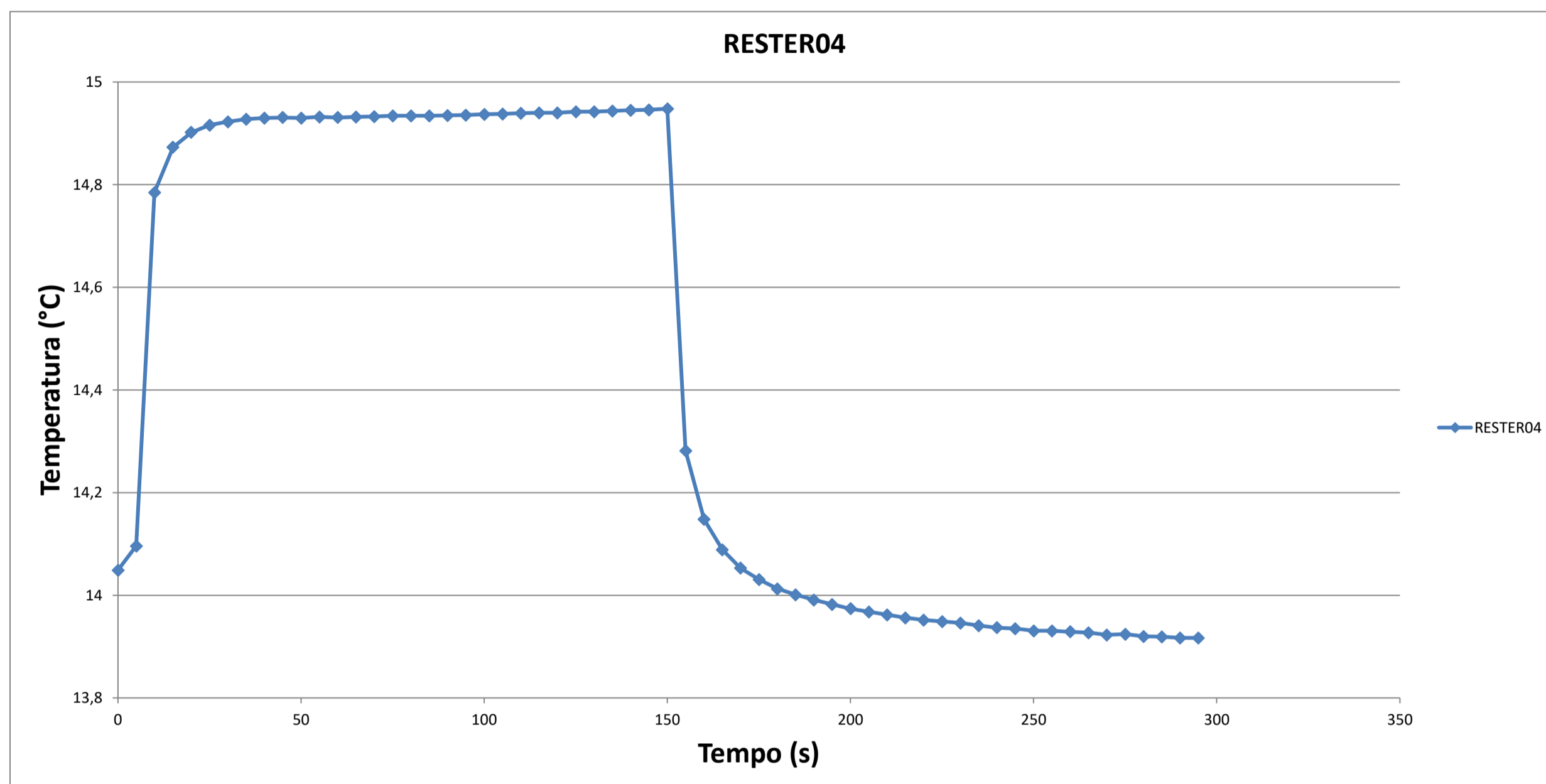
Località: MONTEMILONE

Data esecuzione sondaggio:

Coordinate UTM WGS 84 40°59'42.90"N - 15°57'9.23"E

Quota (m.s.l.m):

Coordinate Gauss-Boaga:



CARATTERISTICHE STRUMENTO

Intervallo di Cond. Term. (W/m*k)	<u>0,1 - 5,0</u>
Intervallo di Rest. Term. (m*k/W)	<u>0,2 - 10,0</u>
Durata misurazione (s)	<u>300</u>

RISULTATI

Conducibilità termica (W/Mk)	<u>0,419</u>
Resistività termica (mK/W)	<u>2,385</u>
Temperatura iniziale (°C)	<u>14,049</u>
Temperatura massima(°C)	<u>14,948</u>
Temperatura finale (°C)	<u>13,917</u>