



**Progetto per la realizzazione di un impianto agrivoltaico avanzato denominato “Pontedera” di potenza pari a 43,2 MWp nel comune di Pontedera (PI) e opere di connessione alla RTN ricadenti nel Comune di Ponsacco (PI)**

**Misure di conducibilità - Resistività termica - Tomografia elettrica - SSE**

<b>02/10/2024</b>	<b>00</b>	<b>Emissione per autorizzazione</b>	<b>Simone Bassetti</b>	<b>L. Marabeti/ G. D’Amico/ O. Retini</b>	<b>F. Boni Castagnetti</b>
Data	Rev.	Descrizione Emissione	Preparato	Verificato	Approvato
Logo Committente e Denominazione Commerciale  <small>Iren Green Generation Tech s.r.l.</small>			ID Documento Committente  <b>H060_FV_BER_00105</b>		
Logo Appaltatore e Denominazione Commerciale 			ID Documento Appaltatore  -		

## Sommario

1	Premessa.....	3
2	Descrizione tecnica tomografia elettrica.....	4
3	Modalità di esecuzione tomografia elettrica .....	7
4	Elaborazione e ricostruzione bidimensionale del sottosuolo tramite tomografia elettrica .....	9
5	Risultanze delle indagini geoelettriche .....	11
6	Misure di conducibilità termica .....	13

## 1 Premessa

Nel mese di giugno 2024 è stato eseguito n. 1 stendimento geoelettrico (SEV1 in figura 1a) per ottenere misure di resistività elettrica dei primi metri di sottosuolo e sono stati prelevati n. 2 campioni di terreno in corrispondenza delle trincee esplorative TR2 e TR3 (eseguite nell'ambito dell'indagine geologico-tecnica a supporto del progetto di realizzazione della nuova sottostazione elettrica).

Di seguito si riporta una planimetria con indicati i punti di indagine:

*Figura 1a: Ubicazione punti di indagine in areale di progetto*



## 2 Descrizione tecnica tomografia elettrica


In data 25 giugno 2024 è stata condotta una campagna di indagini geofisiche di tipo elettrico all'interno del sito da indagare presso il Comune di Ponsacco (PI). Le indagini sono state eseguite con la finalità di determinare il valore di resistività del materiale naturale nei primi metri di profondità. A tale scopo sono stati eseguiti tre stendimenti geoelettrici presso il sito.

La strumentazione utilizzata per l'indagine geoelettrica è rappresentata dal georesistivimetro ABEM TERRAMETER LS2 di fabbricazione ABEM Instruments.

*Figura 2-a: Esecuzione indagine geoelettrica*



Il metodo di indagine è del tutto analogo a quello su cui si basa il tradizionale sondaggio elettrico verticale (SEV): immettendo nel terreno corrente continua (o corrente alternata a bassa frequenza) si genera un campo elettrico le cui linee di corrente all'interno del sottosuolo indagato sono

	ID Documento Committente <b>H060_FV_BER_00105</b>	Pagina 5 / 13
		Numero Revisione
		00

deformate dalla presenza di disomogeneità, come a titolo di esempio stratificazioni o corpi sepolti aventi differenti comportamenti elettrici.

Le rocce (matrice rocciosa) in quanto aggregati di minerali, a loro volta sali inorganici a legame chimico etero valente molto forte, sono intrinsecamente isolanti, poiché non esistono al loro interno particelle cariche libere di muoversi e quindi atte a trasportare corrente (I) se sottoposte ad una differenza di potenziale ( $\Delta V$ ).

Tuttavia gli “ammassi rocciosi” (coerenti) o gli “aggregati rocciosi” (incoerenti) sono generalmente fratturati o porosi e tale condizione favorisce la circolazione di acqua (elettrolita), la quale, essendo più o meno ricca di ioni, permette il passaggio della corrente elettrica, se esiste per qualche motivo un campo elettrico.

Nel caso di un materiale incoerente (per es. ghiaia, sabbia ecc) la porosità efficace, ovvero determinata alla porzione di pori interconnessi, è quella che da una parte risulta “utile” ai fini della circolazione acquifera in falda e dall’altra risulta altrettanto “utile” ai fine della condizione elettrica in quanto garantisce la continuità fisica della soluzione elettrolitica all’interno della matrice rocciosa. La correlazione tra circolazione idrica e circolazione di corrente nel dato mezzo è quantificata dalla legge di Archie che lega analiticamente la resistività elettrica del mezzo ( $\rho$ ) con quella dell’acqua ( $\rho_w$ ) con il fattore di formazione (F) funzione quest’ultimo del fattore di cementazione (m) e della porosità ( $\phi$ ) oltre che da un coefficiente empirico (a):

$$\rho = \rho_w F \quad \text{dove} \quad F = a \phi^{-m}$$

Tale legge vale per rocce porose non argillose in quanto l’argilla inciderebbe in modo sostanziale alla conduttività elettrica a causa del fenomeno dell’adsorbimento cationico rendendo erronea la valutazione di ( $\rho_w$ ).

Il metodo geoelettrico utilizza quindi come parametro geofisico per indagare il sottosuolo, la resistività elettrica del terreno.

In valori di resistività registrati in campagna sono valori di “resistività apparente” ( $\rho_a$ ) funzione quest’ultima dell’intensità di corrente (I) immessa nel sottosuolo attraverso gli elettrodi di corrente A e B (anche nominati C1 e C2), ed alla differenza di potenziale ( $\Delta V$ ) misurata tra i due elettrodi M e N di potenziale (anche nominati P1 e P2) sulla scorta della nota legge di Ohm:

$$\rho_a = k(\Delta V/I)$$

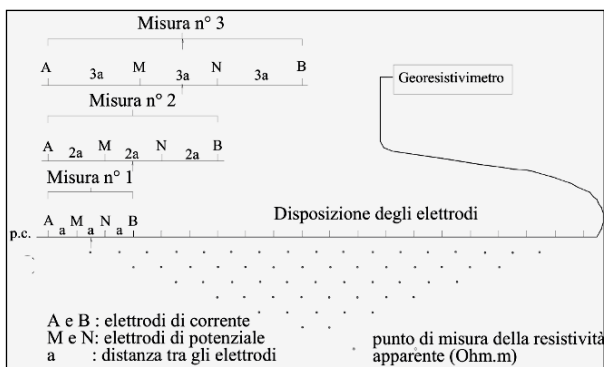
dove k è il “fattore geometrico” dipendente dal tipo di array utilizzato ovvero dalle posizioni reciproche di A, B, M, N.

Ogni misura di resistività apparente è riferita orizzontalmente al centro del quadripolo utilizzato (A-M-N-B) ed a una profondità funzione della distanza A-B e del tipo di quadripolo utilizzato.

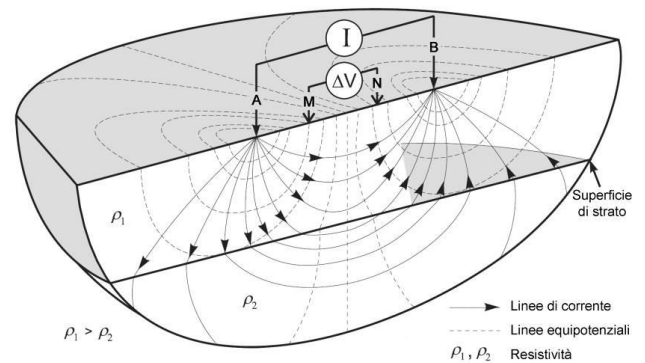
Si parla di “resistività apparente” perché le linee di corrente che consentono di valutare tale parametro, hanno attraversato più formazioni rocciose e quindi non corrisponde alla resistività reale di un dato strato a meno che il sottosuolo non sia omogeneo ed isotropo.

La tomografia elettrica (o multiSEV) è l’espressione più recente dell’evoluzione dei tradizionali metodi elettrici in corrente continua. L’energizzazione e determinazione della differenza di potenziale generata è consentita tramite un sistema multielettrodo allineato comprendente n.32 elettrodi collegati con un georesistivimetro. Gli elettrodi sono alternativamente commutati in base a configurazioni specifiche in energizzanti (A e B) che di misura (M e N). Maggiore è la spaziatura tra gli elettrodi A e B (o C1 e C2) maggiore sarà la profondità investigata.

Figura 2b: Schema stendimento



La lunghezza massima dello stendimento deve essere maggiore del tratto effettivo di investigazione in modo da ottenere la sua totale copertura.



### 3 Modalità di esecuzione tomografia elettrica

L'indagine geoelettrica è stata effettuata per mezzo di georesistivimetro di fabbricazione ABEM Instruments modello ABEM TERRAMETER LS2 collegato a n.2 cavi a 21 elettrodi ottenendo acquisizioni a 41 canali totali. La misurazione della resistività è completamente automatizzata e può essere eseguita usando differenti configurazioni elettrodeiche a seconda delle esigenze.

Nello specifico sono state eseguite tre stese tomografiche acquisite con configurazione elettrodeica Wenner, particolarmente adatta per la valutazione di variazioni orizzontali della resistività oltre che caratterizzato da un buon rapporto segnale/disturbo.

Al fine di evitare discrepanze tra la costante geometrica teorica dell'array e quella reale è stato importante garantire un ottimo allineamento delle stese (scostamento dalla traiettoria rettilinea inferiore al 5%).

Le stese sono state denominate con l'acronimo ERT (Electrical Resistivity Tomography) seguito dalla numerazione sequenziale.

*Figura 3a: Dettaglio strumentazione di lettura*



*Tabella 3-1: Parametri di acquisizione*

	<b>(ERT1)</b>
<b>Lunghezza stendimento</b>	46,5 m
<b>Interdistanza elettrodica</b>	1,5 m
<b>AB massimo</b>	45,0 m
<b>AB minimo</b>	3,0 m
<b>Numero elettrodi</b>	32
<b>Metodo utilizzato</b>	Wenner
<b>Numero data points</b>	155



## 4 Elaborazione e ricostruzione bidimensionale del sottosuolo tramite tomografia elettrica

Il valore numerico della resistività apparente misurata non è semplicemente il valore medio delle resistività degli elettrostrati incontrati dalle linee di corrente, ma è definito da una funzione più complessa in quanto dipende sia dalle resistività dei vari litotipi attraversati che dai loro spessori.

Ed è proprio grazie al fatto che la distribuzione della resistività apparente è legata allo spessore, alla localizzazione, alla forma e alla resistività dei litotipi che la corrente ha oltrepassato, che da questa misura si possono ottenere informazioni sulle discontinuità presenti nel sottosuolo.

La pseudosezione della resistività apparente (Measured Apparent Resistivity Pseudosection) ha quindi valore esclusivamente qualitativo in quanto ogni misura di resistività apparente raffigurata fa riferimento non al punto esatto in corrispondenza del quale essa viene attribuita convenzionalmente (centro del quadripolo a profondità funzione di A-B), bensì al considerevole volume di terreno interessato dalla circolazione di corrente introdotta da AB e misurata da MN. Per tale ragione tale pseudosezione fornisce essenzialmente un disegno “sfocato” dell’andamento della resistività sia lateralmente che verticalmente ma non consente l’identificazione di contorni netti delimitanti bordi di strutture sepolte.

Le misure di resistività apparente ricavate sperimentalmente sono state quindi elaborate per mezzo dello specifico programma di interpretazione ed inversione tomografica bidimensionale ZondRes2D ver. 7.0 (ZondSoftware LTD, Cyprus).


In generale il metodo inverso è un insieme organizzato di tecniche matematiche usate per analizzare i dati al fine di ottenere informazioni utili sulla realtà fisica che ha determinato l’andamento del dato misurato. Tale metodo può essere schematizzato come segue:

dati misurati (input) → modello (filtro inverso) → stime dei parametri del modello (output)

Nel caso della geoelettrica si deve risolvere un problema sovra-determinato (un sistema costituito da più dati che incognite), non lineare, che utilizza parametri realmente discreti o che possono essere considerati tali.


Se l’inversione è basata sulla suddivisione del sottosuolo in “voxel” omogenei, i parametri da determinare sono perciò i valori di resistività reale, i dati sono i valori di resistività apparente misurati in superficie e le risposte del modello sono le resistività apparenti calcolate tramite il modello.

Per fare ciò il programma ZondRes2D discretizza il sottosuolo in un numero definito di blocchi rettangolari (non superiori ai dati acquisiti) elaborando un modello bidimensionale nel quale i valori di resistività dei singoli blocchi (voxel) soddisferanno i valori sperimentali acquisiti.

	ID Documento Committente <b>H060_FV_BER_00105</b>	Pagina 10 / 13
		Numero Revisione
		00

La pseudosezione così calcolata (Calculated Apparent Resistivity Pseudosection) viene quindi confrontata con quella misurata (Measured Apparent Resistivity Pseudosection) indicato l'errore quadratico medio (RMS error), che fornisce in percentuale lo scarto tra i valori misurati e quelli calcolati: più basso è il valore, maggiore è la corrispondenza matematica tra i dati di campagna e quelli del modello. Successive iterazioni consentono di minimizzare tale errore ottenendo in fine la sezione di resistività reale definitiva (Inverse Model Resistivity Section).

Successivamente l'elaborazione i dati di output vengono lavorati tramite il software Surfer v.27 (Golden Software, USA), permettendo una rappresentazione grafica delle sezioni tomografiche e delle mappe.

	ID Documento Committente <b>H060_FV_BER_00105</b>	Pagina 11 / 13
		Numero Revisione
		00

## 5 Risultanze delle indagini geoelettriche

Durante la fase di acquisizione è apparso evidente la buona qualità del dato registrato. Ciò è stato garantito dall'assenza di sorgenti di disturbo elettro-magnetico e da un buon accoppiamento elettrodi-suolo.

Lo screening dei dati nella fase pre-inversione non ha determinato l'esigenza di rimuovere valori anomali ("spikes" o "bad data point") in tutte le stese eseguite.

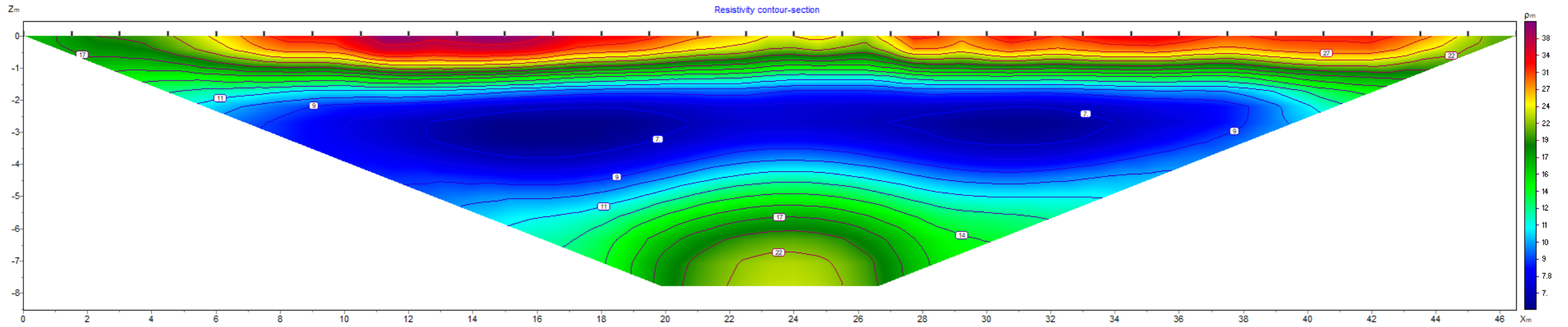
La stessa procedura di inversione non ha necessitato di un elevato numero di iterazioni al fine di ottenere un modello di resistività reale più che accettabile sia dal punto di vista matematico.

In generale i materiali presenti nell'area indagata sono connotati valori di resistività da medi a molto bassi.

I modelli di resistività reali ottenuti dall'elaborazione delle tomografie elettriche fa riferimento alla sezione verticale passante per lo stendimento elettrodo ed ha messo in evidenza quattro orizzonti a differente comportamento elettrico:

- **Orizzonte A:** orizzonte caratterizzato da resistività in generale comprese tra 10-40  $\Omega \cdot m$  associabili a materiali limoso-sabbiosi superficiali aventi spessore di circa 1,50-2,00 m.
- **Orizzonte B:** orizzonte caratterizzato da resistività in generale comprese tra 5-10  $\Omega \cdot m$  associabili a materiali argillosi fino alla profondità di circa 5,00-6,00 metri.
- **Orizzonte C:** orizzonte caratterizzato da resistività in generale comprese tra 10-25  $\Omega \cdot m$  associabili a materiali limoso-sabbioso-argillosi.

Figura 5-1: Modello di resistività reale ERTI



## 6 Misure di conducibilità termica

Sono stati prelevati i seguenti campioni all'interno delle trincee esplorative eseguite in data 25/06/2024:

Trincea	Profondità
TR2	1,00
TR3	1,00

Tali campioni sono stati sottoposti ad analisi di laboratorio; di seguito si riassumono i risultati ottenuti:

Trincea	Profondità	Resistività termica (m*K/W)	Conducibilità termica (W/m*K)
TR2	1,00	0,64	1,57
TR3	1,00	0,66	1,52

Di seguito si riportano i certificati rilasciati dal laboratorio Rina Consulting - GET S.r.l. di Genova (GE).


**CONDUCIBILITA' TERMICA DI UN TERRENO - ASTM D 5334-22**

Cliente : ALTAIR Srl for AB&amp;C STUDIO ASSOCIATO

Località : PONSACCO (PI)

Sondaggio : -

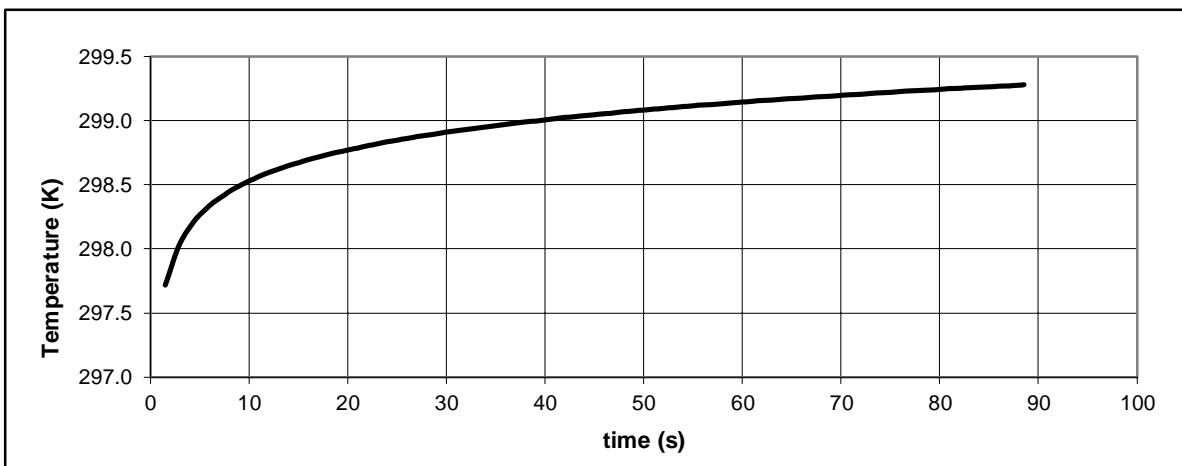
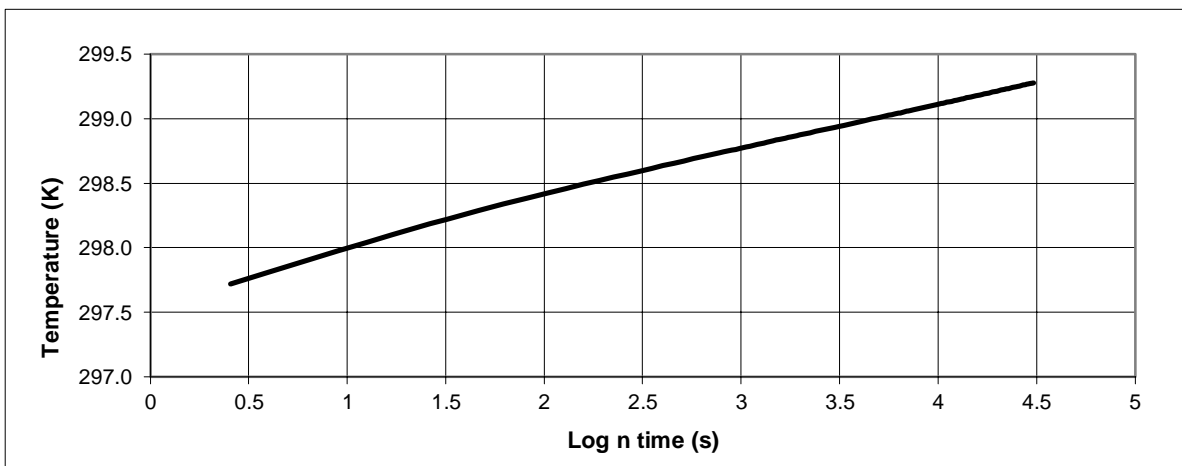
Campione : TR2

Profondità (m) : 1.00

Tipo campione : Indisturbato

Data Ricevimento : 01/07/2024

Data Prova : 02/07/2024



Contenuto in acqua	w	20.73	(%)
Peso di Volume	$\gamma$	20.73	(kN/m <sup>3</sup> )
<b>Resistività Termica</b>	$\rho$	<b>0.64</b>	<b>(m·K/W)</b>
<b>Conducibilità Termica</b>	$\lambda$	<b>1.57</b>	<b>(W/m·K)</b>

Direttore Laboratorio : Dott. Geol. Paolo Brasey

Operatore : Dott. Andrea Zito


**CONDUCIBILITA' TERMICA DI UN TERRENO - ASTM D 5334-22**

Cliente : ALTAIR Srl for AB&amp;C STUDIO ASSOCIATO

Località : PONSACCO (PI)

Sondaggio : -

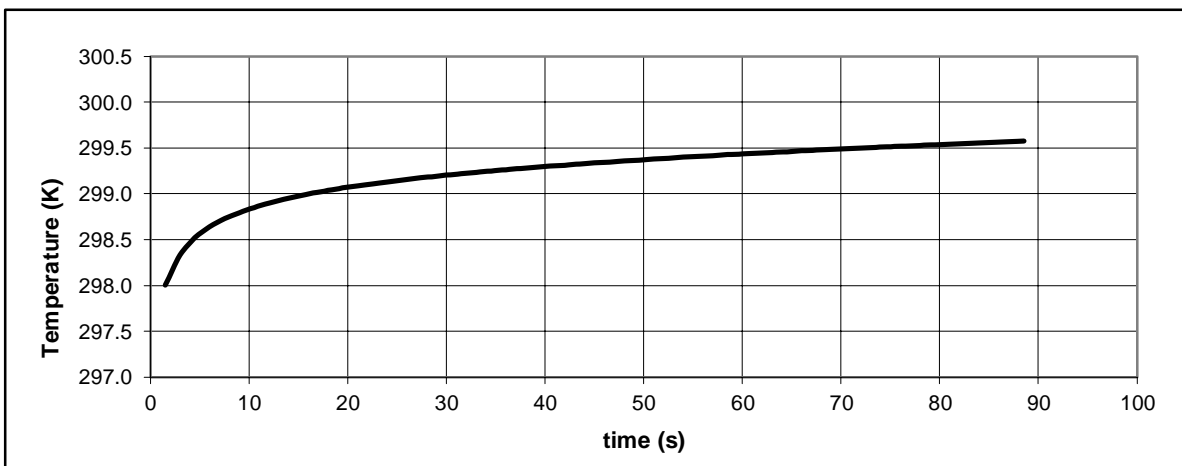
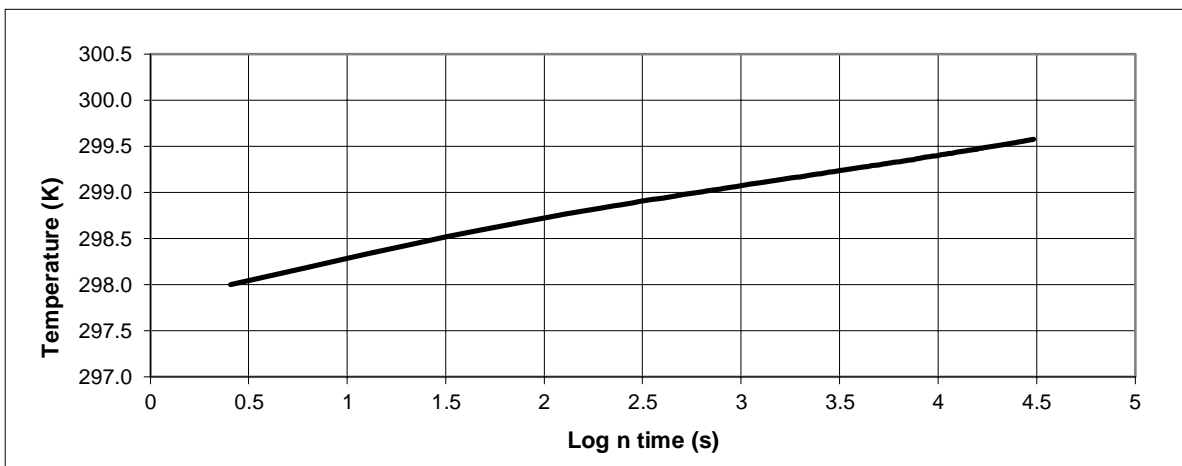
Campione : TR3

Profondità (m) : 1.00

Tipo campione : Indisturbato

Data Ricevimento : 01/07/2024

Data Prova : 02/07/2024



Contenuto in acqua	w	22.10	(%)
Peso di Volume	$\gamma$	19.43	(kN/m <sup>3</sup> )
<b>Resistività Termica</b>	$\rho$	<b>0.66</b>	<b>(m·K/W)</b>
<b>Conducibilità Termica</b>	$\lambda$	<b>1.52</b>	<b>(W/m·K)</b>

Direttore Laboratorio : Dott. Geol. Paolo Brasey

Operatore : Dott. Andrea Zito