

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al
cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento
Climatico sul Territorio
Laboratorio Impatti sul Territorio e nei Paesi in Via di Sviluppo
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione:
accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali
Laboratorio Combustione Sostenibile e Cicli Termici e
Termodinamici avanzati
Centro Ricerche Casaccia, Roma

REALIZZAZIONE DEI PIEZOMETRI NEL CAMPO GEOTERMICO SPERIMENTALE DEL C.R. ENEA-CASACCIA E MISURE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA

RT/2024/20/ENEA

ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al
cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento
Climatico sul Territorio
Laboratorio Impatti sul Territorio e nei Paesi in Via di Sviluppo
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Tecnologie e Vettori per la Decarbonizzazione:
accumuli, idrogeno, mobilità, CCUS e usi finali
Laboratorio Combustione Sostenibile e Cicli Termici e
Termodinamici avanzati
Centro Ricerche Casaccia, Roma

REALIZZAZIONE DEI PIEZOMETRI NEL CAMPO GEOTERMICO SPERIMENTALE DEL C.R. ENEA-CASACCIA E MISURE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA

RT/2024/20/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

REALIZZAZIONE DEI PIEZOMETRI NEL CAMPO GEOTERMICO SPERIMENTALE DEL C.R. ENEA-CASACCIA E MISURE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA

A.C. Violante, M. Proposito, R. Trinchieri

Riassunto

L'attività descritta in questo report è parte del progetto di ricerca, relativo al Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, linea di attività 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Nello specifico, l'attività in oggetto è la L.A. 4.1 (WP4).

Nel primo anno e mezzo di attività sono stati realizzati due fori attrezzati a piezometri, per monitorare temperatura e livello dell'acqua di falda nel campo geotermico realizzato nel 2021, costituito da 4 pozzi a diversa profondità (da 35 a 85 m), a circuito chiuso e con configurazione a doppia U (cfr. RT/2023/23/ENEA). Le due perforazioni (PZ1 e PZ2), profonde 45 m, sono state eseguite a carotaggio continuo nel marzo 2023. Di ogni litotipo è stato estrapolato il valore del coefficiente di permeabilità e di porosità efficace. È stata determinata la portata unitaria attraverso i diversi strati, tenuto conto della permeabilità del litotipo e del gradiente idraulico effettivamente calcolato. Inoltre, sono state caratterizzate le litologie attraversate in ogni foro ed è stata effettuata la correlazione litostratigrafica tra i due siti. Misurazioni dirette di conducibilità termica sono state eseguite, all'atto del recupero, sulle carote dei sondaggi PZ1 e PZ2, in condizioni sostanzialmente indisturbate. I valori sono stati confrontati con le misure effettuate in laboratorio sulle carote del sondaggio geognostico S1 (corrispondente al pozzo 1 del campo geotermico) correlando le successioni litostratigrafiche fino alla profondità di 45 m. Da 45 a 85 m sono stati considerati i valori di conducibilità termica media misurati in laboratorio sui campioni del sondaggio S1. Su tutti i campioni dei sondaggi S1, PZ1 e PZ2 sono stati calcolati densità e calore specifico, con l'intento di utilizzare tali valori nelle future fasi di modellizzazione termica del campo geosonde. I dati rilevati ogni 12 ore dai piezometri hanno permesso di definire la quota del livello statico della falda acquifera e di registrarne le variazioni in funzione della pluviometria.

Parole chiave: Piezometri, Conducibilità termica, Correlazione litostratigrafica, Monitoraggio temperatura.

Abstract

The activity described in this report is part of the research project, related to the 2022-2024 Three-Year Implementation Plan of the National Electricity System Research, activity line 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Specifically, this activity is L.A. 4.1 (WP4). In the first year and a half of activity, two boreholes equipped with piezometers were drilled, to monitor temperature and groundwater level in the geothermal field constructed in 2021 and consisting of 4 boreholes at different depths (from 35 to 85 m), with a closed circuit and a double U configuration (see RT/2023/23/ENEA). The two 45 m deep boreholes (PZ1 and PZ2) were drilled by continuous coring in March 2023. The value of the permeability coefficient and effective porosity was extrapolated for each lithotype. The unit flow rate through the different layers was determined, considering the permeability of the lithotype and the effectively calculated hydraulic gradient. In addition, the lithologies crossed in each borehole were characterised and the lithostratigraphic correlation between the two sites was carried out. Direct measurements of thermal conductivity were carried out, upon recovery, on the cores of boreholes PZ1 and PZ2 under substantially undisturbed conditions. The values were compared with laboratory measurements on the cores of geognostic survey S1 (corresponding to borehole 1 of the geothermal field) by correlating the lithostratigraphic successions up to a depth of 45 m. From 45 to 85 m, the mean thermal conductivity values measured in the laboratory on the S1 samples were considered. Density and specific heat were calculated on all samples from S1, PZ1 and PZ2, to use these values in future thermal modelling of the geosonde field. The data collected every 12 hours from the piezometers made it possible to define the static level of the aquifer and to record its variations as a function of the rainfall.

Keywords: Piezometers, Thermal conductivity, Lithostratigraphic correlation, Temperature monitoring.

Indice

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE..... | 7 |
| 1. TRIVELLAZIONE E ALLESTIMENTO DEI PIEZOMETRI | 8 |
| 2. MISURE E STUDI EFFETTUATI SUI CAMPIONI DEI SONDAGGI GEOGNOSTICI..... | 13 |
| 2.1 MISURE IN SITU DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA SUI CAMPIONI DEI SONDAGGI PZ1 E PZ2 | 16 |
| 2.2. CORRELAZIONE STRATIGRAFICA TRA I SONDAGGI PZ1 E PZ2..... | 19 |
| 2.3. MISURE DI LABORATORIO SUI CAMPIONI DEL SONDAGGIO GEOGNOSTICO S1 | 22 |
| 2.4. MISURE DI LABORATORIO SUI CAMPIONI PZ1 E PZ2..... | 32 |
| 2.5. DENSITÀ E CALORE SPECIFICO A CONFRONTO IN S1, PZ1 E PZ2 | 34 |
| 3. CARATTERIZZAZIONE DELLA FALDA FREATICA CON I DATI PIEZOMETRICI..... | 38 |
| 3.1 DETERMINAZIONE DELLA PERMEABILITÀ DEGLI STRATI SOTTOSTANTI IL C.R. CASACCIA..... | 42 |
| 3.2. DATI PIEZOMETRICI E CORRELAZIONE CON I DATI DI PRECIPITAZIONE MENSILE..... | 47 |
| 4. CONCLUSIONI..... | 51 |
| RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 52 |

INTRODUZIONE

Il presente report descrive i risultati di un'attività di ricerca inserita nel più ampio contesto del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale. In particolare, l'attività si concentra sulla linea di ricerca 1.7, denominata "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali", con particolare riferimento alla L.A. 4.1 del WP4 ("*Sistemi integrati: Misure di conducibilità termica e realizzazione dei piezometri presso il campo geotermico di ENEA-Casaccia*"). Questa attività riguarda l'allestimento di un apparato sperimentale per testare una pompa di calore ad alta temperatura, in grado di sfruttare come fonti termiche sia sorgenti geotermiche a bassa entalpia, sia aria.

Per quanto riguarda le attività sulla configurazione geotermica, procede l'approfondimento relativo alla caratterizzazione dei 4 pozzi realizzati e strumentati nel recente passato. Riveste particolare interesse comprendere l'impatto della falda acquifera sulle sonde geotermiche e valutare l'accumulo termico stagionale. Di conseguenza, nel corso del primo anno e mezzo di operatività sono stati realizzati due piezometri (PZ1 e PZ2) per monitorare temperatura e livello dell'acqua di falda nell'area del campo geotermico. Per la loro costruzione, datata al marzo 2023, si è proceduto con il carotaggio continuo fino alla profondità di 45 m, così da disporre di campioni "indisturbati" (carote) su cui poter effettuare misure dirette di conducibilità termica lungo tutti i termini della successione stratigrafica attraversata dal sondaggio. I valori sono stati confrontati con le misure effettuate in laboratorio sulle carote del sondaggio geognostico S1 – corrispondente al pozzo 1 del campo geosonde realizzato nel 2021 – correlando le successioni litostratigrafiche fino alla profondità di 45 m. Da 45 a 85 m sono stati considerati i valori di conducibilità termica media misurati in laboratorio sui campioni del sondaggio S1. Su tutti i campioni dei sondaggi S1, PZ1 e PZ2 sono stati effettuati i calcoli di densità e di calore specifico, con l'intento di utilizzare tali valori nelle future fasi di modellizzazione termica del campo geosonde. Inoltre, sono state caratterizzate le litologie attraversate nei due fori ed effettuata la correlazione litostratigrafica tra i due punti di indagine. Di ogni litotipo è stato estrapolato il valore del coefficiente di permeabilità e di porosità efficace. È stata calcolata la portata unitaria per i differenti strati, considerando permeabilità del litotipo e gradiente idraulico effettivamente calcolato, nota la distanza tra i due piezometri e il livello piezometrico misurato in ogni foro. Infine, i dati rilevati ogni 12 ore dai piezometri hanno permesso di registrare le variazioni della quota del livello statico della falda acquifera, utili ai fini di eventuali correlazioni con il regime pluviometrico.

1. TRIVELLAZIONE E ALLESTIMENTO DEI PIEZOMETRI

I due piezometri sono stati ubicati in modo da disporre di un punto (PZ1) a monte idrogeologico, con l'altro (PZ2) posizionato esattamente nel margine a valle del campo geosonde realizzato nel 2021. Nel dettaglio, PZ1 è stato realizzato in prossimità del lato destro del parcheggio autovetture antistante l'ingresso dell'edificio F40, mentre PZ2 si trova a circa 2 m dal pozzo più prossimo del campo geosonde (Figura 1). Relativamente a tutte le informazioni e alle caratteristiche del campo geosonde si rimanda ai Rapporti tecnici ENEA già pubblicati su questo tema (RT/2023/2/ENEA, RT/2023/23/ENEA, RT/2024/4/ENEA).



Figura 1: Ubicazione del campo geosonde (realizzato nel 2021) e dei piezometri di nuova esecuzione (in arancione)

Entrambe le perforazioni sono state eseguite a carotaggio continuo (diametro esterno carotiere 101 mm) fino a -45 m dal p.c. utilizzando una perforatrice cingolata Beretta GT54. Prima di iniziare il carotaggio vero e proprio, si è proceduto all'asportazione meccanica (preforo) dello strato di asfalto. Quindi, lo scavo è stato approfondito manualmente con una trivella fino a circa 1,2-1,5 m dal p.c., curando di non intercettare eventuali sottoservizi (tubazioni di acqua, gas, rete fognaria ed elettrica) (Figure 2a-c).



Figura 2: a) carotiere semplice (diametro esterno 101 mm); b) perforatrice Beretta mentre esegue il preforo; c) scavo manuale successivo al preforo

All'avanzare della perforazione il foro è stato alesato con tubi di rivestimento in acciaio, di lunghezza variabile tra 0,5, 1,5 o 3 m e diametro di 127 mm, inseriti a rotazione e quindi tra loro avvitati in successione (Figura 3a). Sono utilizzati per il *casing* temporaneo del foro e quindi per evitare fenomeni di sgrottamento durante la perforazione. All'interno del rivestimento scorre la batteria di aste di perforazione in acciaio, ognuna delle quali ha lunghezza di 1,5 o 3 m.

Data la natura vulcanica dei litotipi, appartenenti alla successione stratigrafica sabatina, è stato necessario utilizzare corone speciali rinforzate (Figura 3b) e il carotiere doppio negli

intervalli costituiti da lave fratturate. Il carotiere doppio contiene al suo interno un cilindro portacampione diviso in due metà apribili per facilitare il recupero della carota (Figure 3c-d).

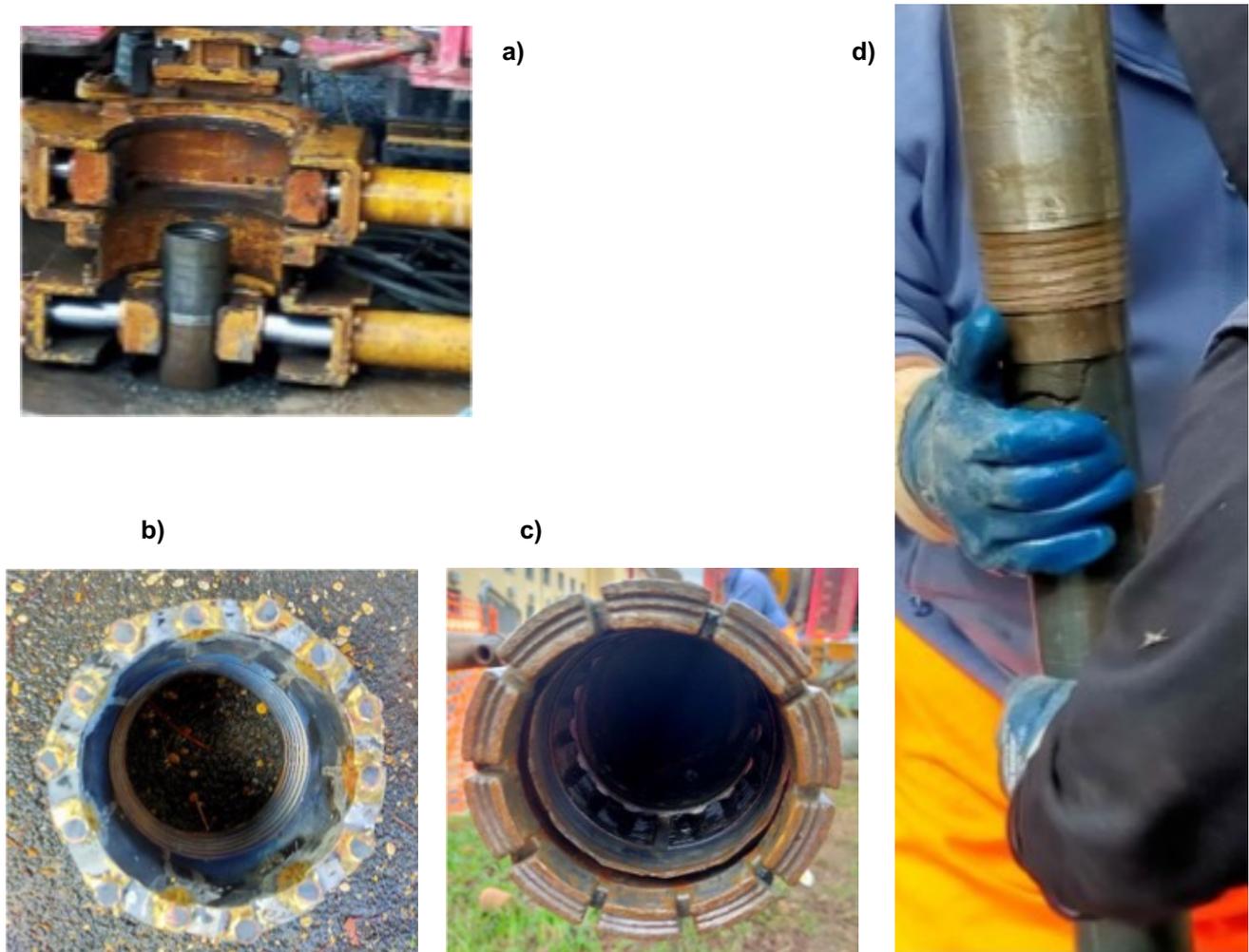


Figura 3: a) tubo di rivestimento del foro; b) carotiere semplice rinforzato; c) carotiere doppio, con il cilindro porta campione ben visibile; d) recupero del materiale litoide fratturato (lava)

Raggiunta la profondità stabilita si è proceduto alla pulizia del foro con acqua pulita, all'allestimento e installazione del piezometro e quindi alla rimozione del rivestimento temporaneo a sostegno delle pareti.

I piezometri sono costituiti dall'unione di più tubi, lunghi in genere 3 m, filettati alle estremità e avvitati in serie fino alla profondità desiderata. Si utilizzano gli spezzoni microfessurati in corrispondenza dell'acquifero e quelli ciechi nei tratti non drenanti (Figura 4). Il piezometro utilizzato in questo lavoro è a tubo aperto, in PVC, con diametro di 3" e raggiunge il fondo foro a -45 m dal p.c.

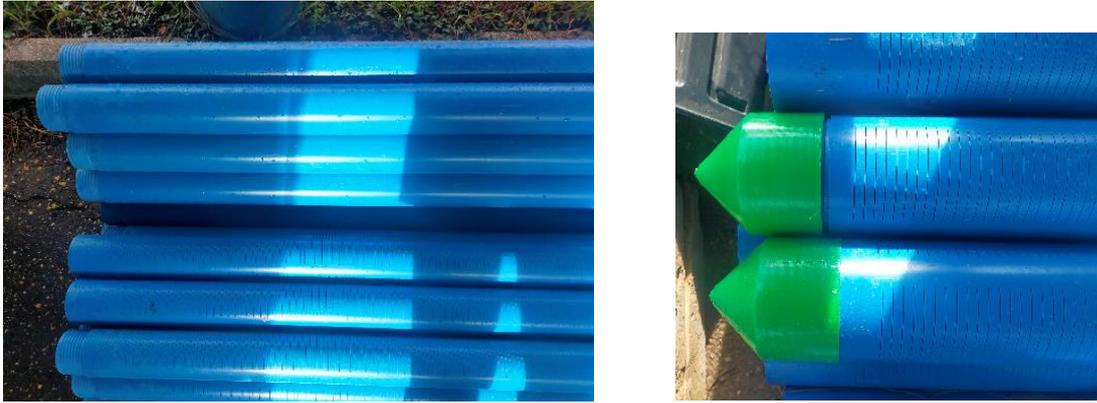


Figura 4: Tubi piezometrici in PVC da 3", microfessurati nel tratto drenante e ciechi nella parte insatura del sottosuolo

All'atto della perforazione, la superficie della falda regionale è stata intercettata a circa -34 m dal p.c., stratigraficamente al di sotto dello strato di lava. Successivamente, raggiunto l'equilibrio, la falda è risalita a circa -26 m dal p.c.

Operativamente, i tubi microfessurati (larghezza fessure 2,5 mm) sono stati inseriti da fondo foro (-45 m) fino a -24 m dal p.c. (in totale 7 tubi), considerando l'entità delle fluttuazioni del livello piezometrico. La scelta della profondità dei piezometri (45 m) e della lunghezza del tratto filtrante (21 m) è stata determinata dalla quota del livello statico della falda acquifera e dalle caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo.

La zona anulare filtrante, ovvero lo spazio tra il tratto di piezometro fessurato e le pareti del foro, è stata riempita con ghiaietto siliceo, lavato e calibrato, di diametro (4-6 mm) scelto in funzione della granulometria del terreno acquifero a contatto con il carotaggio (Figura 5). In entrambi i piezometri, lo spessore di ghiaietto drenante copre l'intervallo da fondo foro fino a -21 dal p.c.



Figura 5: Ghiaietto siliceo, lavato e calibrato (diametro 4-6 mm), utilizzato per il filtro

Al di sopra dei filtri, tra -21 e -20 m dal p.c. è stata realizzata la sigillatura con bentonite (Figura 6) per proteggere il tratto finestrato del piezometro dall'eventuale percolazione di inquinanti.



Figura 6: Bentonite in pellets utilizzata per realizzare il tappo a sigillo dello strato drenante

Nel tratto superiore insaturo del foro, da -24 m dal p.c. fino a boccapozzo, sono stati installati 8 tubi ciechi. Per scongiurare eventuali infiltrazioni di acque meteoriche dal piazzale è stata effettuata la cementazione contro terra fino a boccapozzo (Figura 7). Il lavoro è stato completato con l'installazione in superficie di due pozzetti carrabili 50 x 50 cm.

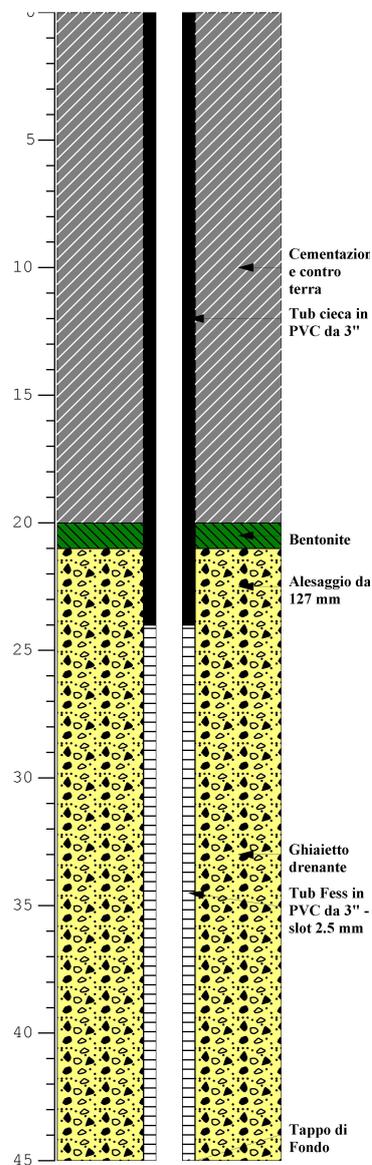


Figura 7: Schema di allestimento dei due piezometri realizzati

2. MISURE E STUDI EFFETTUATI SUI CAMPIONI DEI SONDAGGI GEOGNOSTICI

Le carote ottenute dai sondaggi geognostici hanno permesso di determinare la correlazione stratigrafica delle formazioni geologiche presenti nei due siti di studio (Figura 8). Come ampiamente ipotizzabile, il piezometro PZ2 (distante circa 2 metri dal pozzo 1, nel piazzale dell'ex Impianto VAPORE) ha fornito la stessa successione litostratigrafica (e gli stessi spessori delle formazioni) ricostruita nel campo geosonde realizzato nel 2021.



Figura 8: Carote provenienti dai due sondaggi geognostici PZ1 e PZ2: profondità 0-15 m (continua)



Figura 8: Carote provenienti dai due sondaggi geognostici PZ1 e PZ2: profondità 15-30 m (*continua*)



Figura 8: Carote provenienti dai due sondaggi geognostici PZ1 e PZ2: profondità 30-45 m

Il piezometro PZ1, installato sul lato destro del parcheggio di fronte all'ingresso principale dell'edificio F40, dista circa 100 m dal PZ2. La correlazione tra le due successioni litostratigrafiche ha permesso una completa ricostruzione dell'assetto litostratigrafico dell'area di interesse. Il piezometro PZ1 (boccapozzo) si trova a circa 147 m s.l.m., con la superficie piezometrica sottostante di 25,30 m. Al contrario, il piezometro PZ2 (boccapozzo) si trova a circa 148 m s.l.m., (soggiacenza della falda 26,21 m). Considerando il dislivello di quota topografica, l'andamento della superficie piezometrica è da considerarsi

sub-orizzontale (Tabella 1).

| Piezometro | Coordinata E (m) | Coordinata N (m) | Quota topografica (m s.l.m.) | Quota piezometrica (m s.l.m.) | Soggiacenza (m) |
|------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| PZ1 | 276733 | 4657621 | ≈ 147 | ≈ 121,70 | 25,30 |
| PZ2 | 276744 | 4657526 | ≈ 148 | ≈ 121,79 | 26,21 |

Tabella 1: Coordinate dei piezometri (UTM WGS84), quota topografica, livello di falda e misura della soggiacenza al boccapozzo

A breve sono previsti rilievi delle quote topografiche dei boccapozzi dei due piezometri con l'utilizzo del GPS differenziale, così da migliorare sensibilmente anche la precisione nella determinazione della quota della superficie piezometrica.

2.1 Misure in situ della conducibilità termica sui campioni dei sondaggi PZ1 e PZ2

Per le misurazioni della conducibilità termica dei campioni di roccia è stato utilizzato il misuratore portatile ad ago *Transient Line Source* TLS-100 (Thermtest), di cui in Tabella 2 sono riportate le specifiche tecniche.

| | |
|--------------------------|---|
| Materials | Soil, Rock, Concrete, & Polymers |
| Measurement Capabilities | Bulk Properties |
| Thermal Conductivity | 0.1 to 5 W/m•K |
| Thermal Resistivity | 0.2 to 10 m•K/W |
| Measurement Time | 3 min. |
| Reproducibility | ± 2% |
| Accuracy | ± 5% |
| Temperature Range | -40 to 100°C |
| Largest Sample Size | Unlimited |
| Standard | 100 mm: ASTM D5334, and IEEE 442-1981; 150mm: ASTM D5334, IEEE 442-1981, and IEEE 442-2017 |

Tabella 2: Specifiche tecniche del misuratore portatile *Transient Line Source* TLS-100 (Thermtest)

L'ago del sensore è costituito da un filo sottile riscaldante e da un sensore di temperatura sigillato dentro un tubicino di acciaio di lunghezza pari a 50 mm (ago di maggior spessore) o 150 mm (ago più sottile) (Figura 9).



Figura 9: Sensore di temperatura da 50 mm (a sinistra) e da 150 mm (a destra)

Dopo aver inserito completamente l'ago nel campione da testare, il calore viene erogato attraverso una sorgente di corrente costante (q), registrando l'aumento di temperatura in un tempo definito. Per il calcolo della conducibilità termica (k) si usa la pendenza (a) del grafico dell'aumento di temperatura rispetto al logaritmo del tempo, secondo l'equazione (1):

$$k = \frac{q}{4\pi a} \quad (1)$$

dove:

k = conducibilità termica (W/m·K);

q = potenza di riscaldamento (W/m);

a = pendenza del grafico.

Dalla (1) è evidente che maggiore è la conducibilità termica di un campione, minore sarà la pendenza (Figura 10).

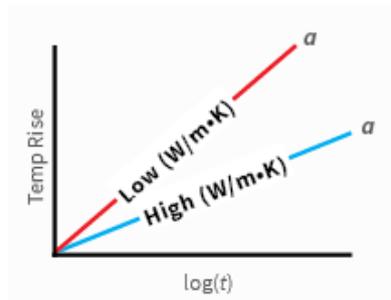


Figura 10: Pendenza del grafico a in funzione del valore della conducibilità termica del campione

Nei terreni sopra falda (fino al tetto delle lave), la perforazione è stata effettuata a secco in modo da non perturbare il campione. Nell'apertura creata dall'ago è stata inserita una pasta termoconduttiva priva di silicone, per agevolare il trasferimento ottimale di calore tra provino e sonda. I materiali litoidi, come le lave, sono stati inizialmente forati con un trapano e lasciati raffreddare. Successivamente, è stata eseguita la misurazione introducendo l'ago (Figura 11).



Figura 11: Misurazioni della conducibilità termica su diverse tipologie di campioni

La Tabella 3 riporta i valori di conducibilità termica λ (espressa in W/m·K) in funzione della profondità nei sondaggi PZ1 e PZ2. A seconda della tipologia di terreno interessata è visibile l'alternanza di livelli più o meno conduttivi: all'interno dello stesso litotipo si notano variazioni di conducibilità termica in base alla presenza di materiale meno conduttivo (livelli di argilla) o più conduttivo (livelli sabbiosi). I valori più alti di conducibilità termica sono stati misurati in corrispondenza delle lave, il cui spessore è 12,50 m in PZ2 (da -21 m a -33,50 m dal p.c.) e di 11,20 m nel PZ1 (da -23 m a -34,20 m dal p.c.). La conducibilità termica media nei due sondaggi è pari a 0,90 W/m·K.

| PZ1 | | PZ1 | | PZ2 | | PZ2 | |
|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| Profondità (m) | λ (W/mK) |
| 0,5 | 0,556 | 15,9 | 1,067 | 1,5 | 1,082 | 16,3 | 0,86 |
| 0,8 | 0,273 | 16,2 | 1,366 | 2 | 0,903 | 16,6 | 0,602 |
| 0,9 | 0,333 | 16,5 | 1,383 | 2,2 | 1,039 | 16,8 | 0,333 |
| 1 | 0,229 | 16,8 | 1,09 | 2,5 | 1,034 | 17 | 0,343 |
| 1,1 | 0,348 | 17,3 | 0,621 | 2,9 | 1,052 | 17,1 | 0,808 |
| 1,3 | 1,312 | 17,95 | 0,846 | 3,2 | 1,049 | 17,5 | 0,745 |
| 1,5 | 1,126 | 18,2 | 0,932 | 3,8 | 0,924 | 20 | 0,708 |
| 1,8 | 1,026 | 18,7 | 0,447 | 4,3 | 1,052 | 23,1 | 1,651 |
| 2,1 | 0,973 | 19,4 | 0,615 | 4,7 | 0,724 | 33,4 | 1,34 |
| 2,45 | 0,958 | 20,9 | 0,628 | 5 | 0,984 | 34,4 | 0,587 |
| 2,8 | 0,854 | 21,15 | 0,77 | 5,2 | 0,802 | 34,8 | 0,706 |
| 3 | 0,952 | 22,1 | 0,8 | 5,6 | 1,018 | 35,5 | 1,156 |
| 3,2 | 0,843 | 22,4 | 0,845 | 6 | 0,927 | 35,8 | 0,794 |
| 3,5 | 0,939 | 23,5 | 1,806 | 6,35 | 0,829 | 35,9 | 0,861 |
| 4 | 0,942 | 31 | 1,656 | 6,9 | 1,008 | 36,55 | 0,998 |
| 4,4 | 0,903 | 34,5 | 0,607 | 7,3 | 0,834 | 37 | 1,019 |
| 4,8 | 0,934 | 35 | 1,265 | 7,6 | 0,924 | 37,3 | 0,845 |
| 5,2 | 0,057 | 35,5 | 1,004 | 7,9 | 0,792 | 37,6 | 1,181 |
| 5,5 | 0,805 | 36 | 0,567 | 8,2 | 1,054 | 38 | 1,169 |
| 5,8 | 0,811 | 36,7 | 0,913 | 8,5 | 0,567 | 38,5 | 1,192 |
| 6,5 | 1,044 | 36,8 | 0,71 | 8,9 | 0,782 | 38,9 | 1,034 |
| 6,85 | 0,936 | 37,1 | 0,879 | 9,3 | 0,907 | 39,3 | 0,88 |
| 7,25 | 0,99 | 37,6 | 0,917 | 9,5 | 0,913 | 39,7 | 0,703 |
| 7,7 | 0,93 | 38 | 1,019 | 9,7 | 0,705 | 40 | 0,567 |
| 8,15 | 0,998 | 38,2 | 1,074 | 10,2 | 0,806 | 40,3 | 1,037 |
| 8,6 | 0,975 | 38,6 | 1,205 | 10,6 | 0,917 | 40,7 | 1,07 |
| 9 | 0,846 | 39,4 | 0,967 | 10,9 | 0,866 | 41 | 0,972 |
| 9,2 | 0,815 | 39,9 | 0,831 | 11,2 | 0,754 | 41,5 | 1,031 |
| 9,6 | 0,853 | 40,1 | 1,024 | 11,5 | 0,868 | 41,9 | 0,908 |
| 10 | 0,761 | 40,3 | 0,904 | 11,9 | 1,111 | 42,2 | 1,151 |
| 10,3 | 0,998 | 41,1 | 0,955 | 12,6 | 0,835 | 42,5 | 1,263 |
| 10,6 | 0,768 | 41,7 | 0,89 | 12,85 | 0,851 | 43 | 1,093 |
| 11 | 0,989 | 42,2 | 0,821 | 13,1 | 0,848 | 43,2 | 1,011 |
| 11,3 | 0,856 | 42,7 | 1,072 | 13,5 | 0,681 | 43,5 | 0,933 |
| 11,7 | 0,983 | 43 | 0,947 | 14,15 | 0,63 | 43,9 | 1,041 |
| 12 | 0,711 | 43,2 | 0,927 | 14,4 | 0,943 | 44,2 | 0,944 |
| 12,5 | 1,08 | 43,7 | 0,931 | 14,85 | 1,029 | 44,6 | 0,863 |
| 13 | 0,705 | 44 | 0,668 | 15,1 | 0,948 | 44,8 | 1,103 |
| 14 | 1,088 | 44,4 | 0,65 | | | | |
| 14,4 | 1,46 | 44,6 | 1,001 | | | | |
| 15,05 | 0,942 | 45 m | 0,821 | | | | |
| 15,4 | 0,944 | | | 15,35 | 0,979 | | |

Tabella 3: Valori di conducibilità termica (λ) in funzione della profondità nei sondaggi PZ1 e PZ2

2.2. Correlazione stratigrafica tra i sondaggi PZ1 e PZ2

L'analisi dei campioni di roccia provenienti dai due sondaggi geognostici ha consentito di identificare gli spessori e le variazioni litologiche delle rocce, facilitando una correlazione litostratigrafica tra i siti scelti per i due piezometri. I depositi vulcanici piroclastici, caratterizzati da marcata eterogeneità, si distribuiscono differenzialmente nelle aree topografiche a causa dell'ambiente deposizionale. Le piroclastiti, costituite da cenere e frammenti di magma, si adattano al terreno e tendono a depositarsi con spessori maggiori nelle aree morfologicamente depresse. Se la temperatura è sufficientemente elevata al momento della deposizione, i materiali possono saldarsi tra loro dando luogo alle ignimbriti. Di seguito è riportata la colonna stratigrafica di PZ1 con la relativa legenda, così come ricostruita attraverso i campioni del sondaggio geognostico (Figura 12).

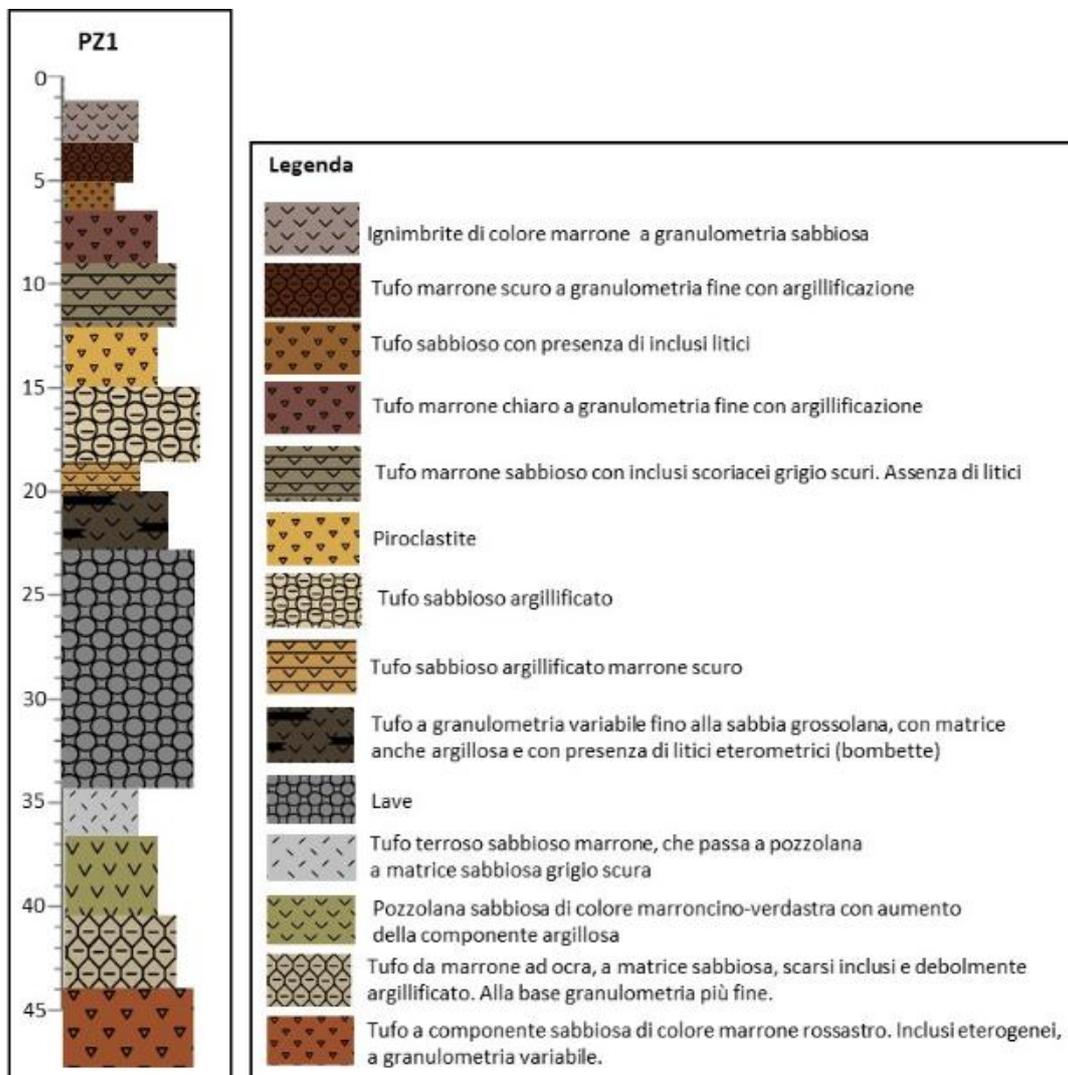


Figura 12: Stratigrafia di dettaglio del sito PZ1, ricostruita con il sondaggio geognostico

La successione stratigrafica nel sondaggio PZ2 (Figura 13) è simile a quella del pozzo 1 del campo geosonde (realizzato nel 2021 e distante circa 2 m da PZ2), con l'intercalazione di tufi da argillificati a sabbiosi fino all'ignimbrite e un tufo sabbioso chiaro, in eteropia di facies,

tra -8,80 e -11 m dal p.c. (assente nel sondaggio PZ1). Come detto nel paragrafo precedente, le lave hanno spessore di 12,50 m (da -21 m a -33,50 m dal p.c.) e il livello di falda misurato giace a 26,21 m dal boccapozzo.

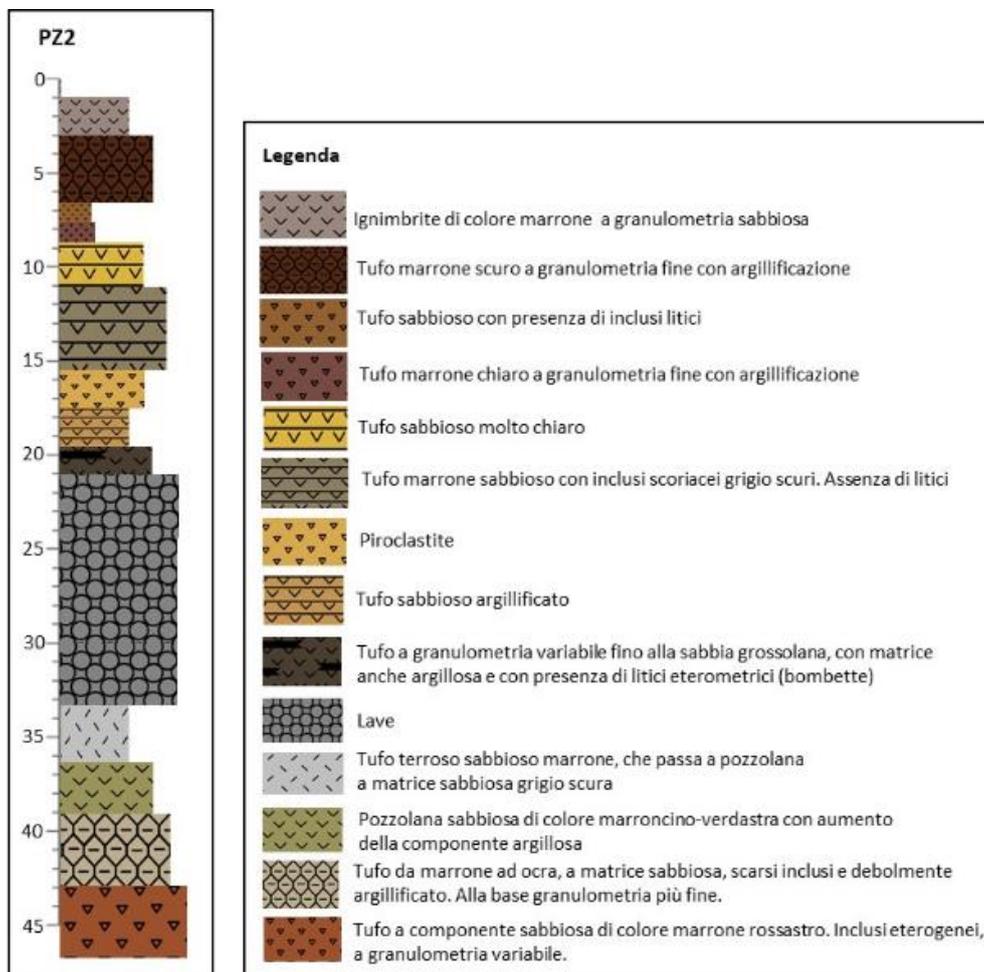


Figura 13: Stratigrafia di dettaglio del sito PZ2, ricostruita con il sondaggio geognostico

La Figura 14 mostra la correlazione litostratigrafica tra i due sondaggi, distanti tra loro circa 100 m. Da notare lo spessore variabile delle formazioni, l'assenza di alcune di esse per eteropia di facies e l'andamento pressoché suborizzontale della superficie della falda.

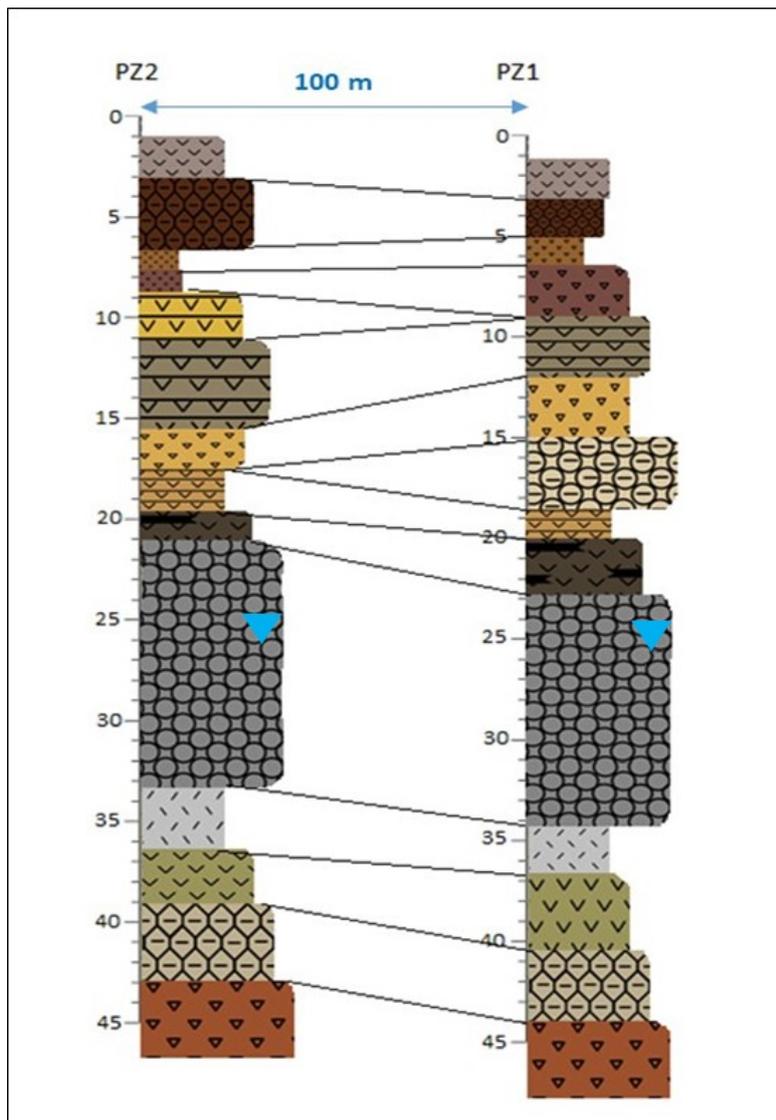


Figura 14: Correlazione litostratigrafica tra i sondaggi PZ1 e PZ2

Dai profili di conducibilità termica, misurata direttamente in situ sui campioni di roccia appena estratti, si osservano valori più o meno conduttivi anche all'interno dello stesso litotipo a seconda se predomina la componente argillosa (meno conduttiva) o sabbiosa (più conduttiva). È interessante notare come i valori più alti di conducibilità termica vengono rilevati all'interno delle lave, anche se diversi alla base e al tetto. In particolare, i valori maggiori si registrano al tetto delle lave sia in PZ1 (1,806 W/m·K) che in PZ2 (1,651 W/m·K). Alla base, invece, le lave si presentano più fratturate e maggiormente interessate da processi di mineralizzazione, causati dalla risalita di acque profonde; in questi strati si osservano i valori più bassi di conducibilità termica, rispettivamente 1,656 W/m·K per PZ1 e 1,340 W/m·K per PZ2 (Figura 15).

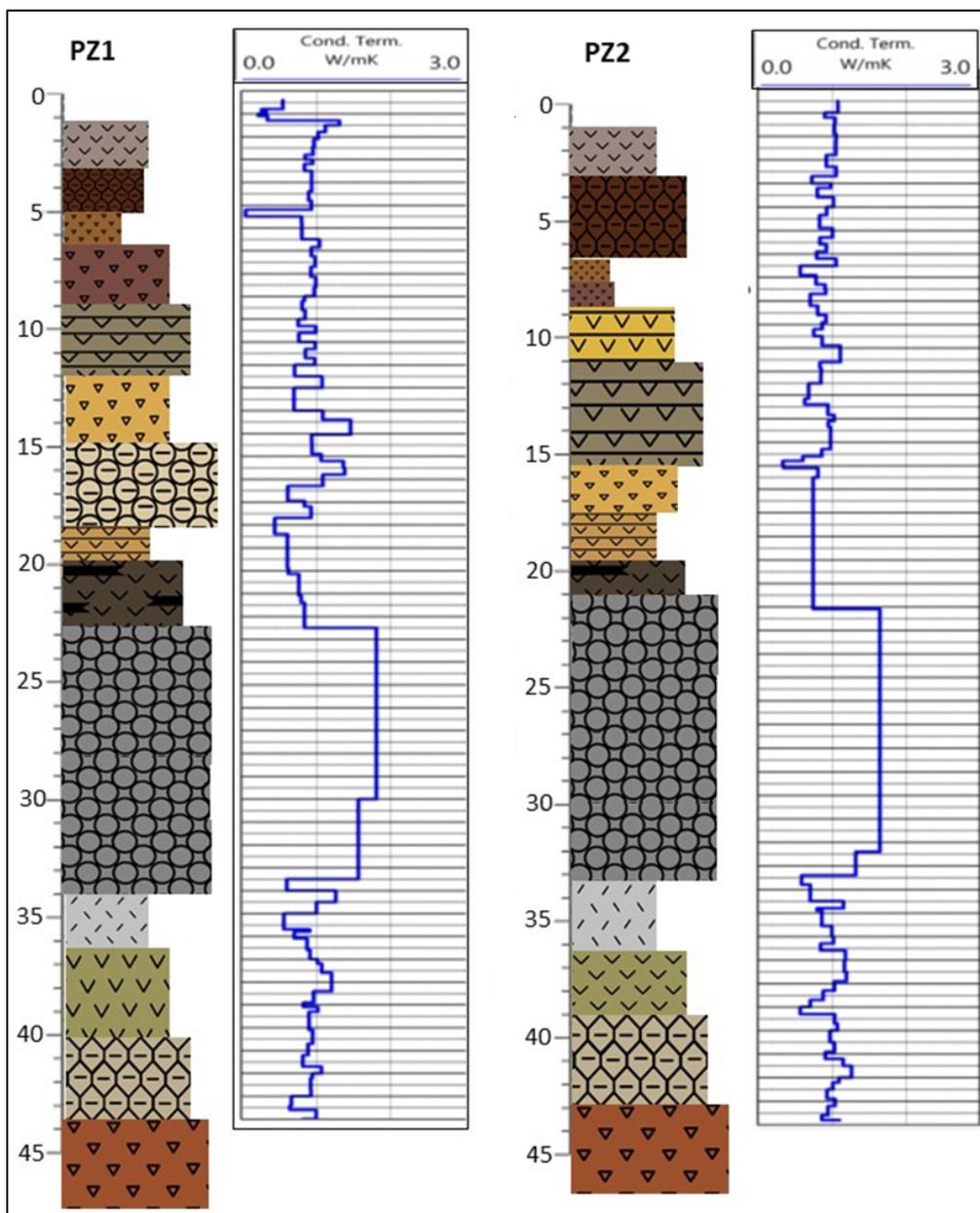


Figura 15: Profili di conducibilità termica nei sondaggi PZ1 e PZ2

2.3. Misure di laboratorio sui campioni del sondaggio geognostico S1

Prima della realizzazione dei due piezometri, sono state condotte misure di conducibilità termica in laboratorio sulle carote estratte dal sondaggio geognostico S1 – successivamente identificato come pozzo 1 del campo geosonde realizzato nel 2021 – fino a una profondità di –85 m dal p.c.. Per ogni campione prelevato, sono stati eseguiti numerosi test di conducibilità termica in condizioni di saturazione e di non saturazione. Si rammenta che un terreno è definito saturo quando gli spazi vuoti sono completamente riempiti d'acqua.

A partire dalla superficie e fino a una profondità di –21 m dal p.c., corrispondente al tetto delle lave, i campioni sono stati classificati come insaturi. Dopo essere stati pesati, sono stati collocati in una stufa ventilata a 40 °C per diversi giorni e pesati nuovamente al termine

dell'essiccazione. Questa pesatura, effettuata sia prima che dopo il processo di essiccazione, ha consentito di determinare il contenuto d'acqua di ciascun litotipo (Figura 16).

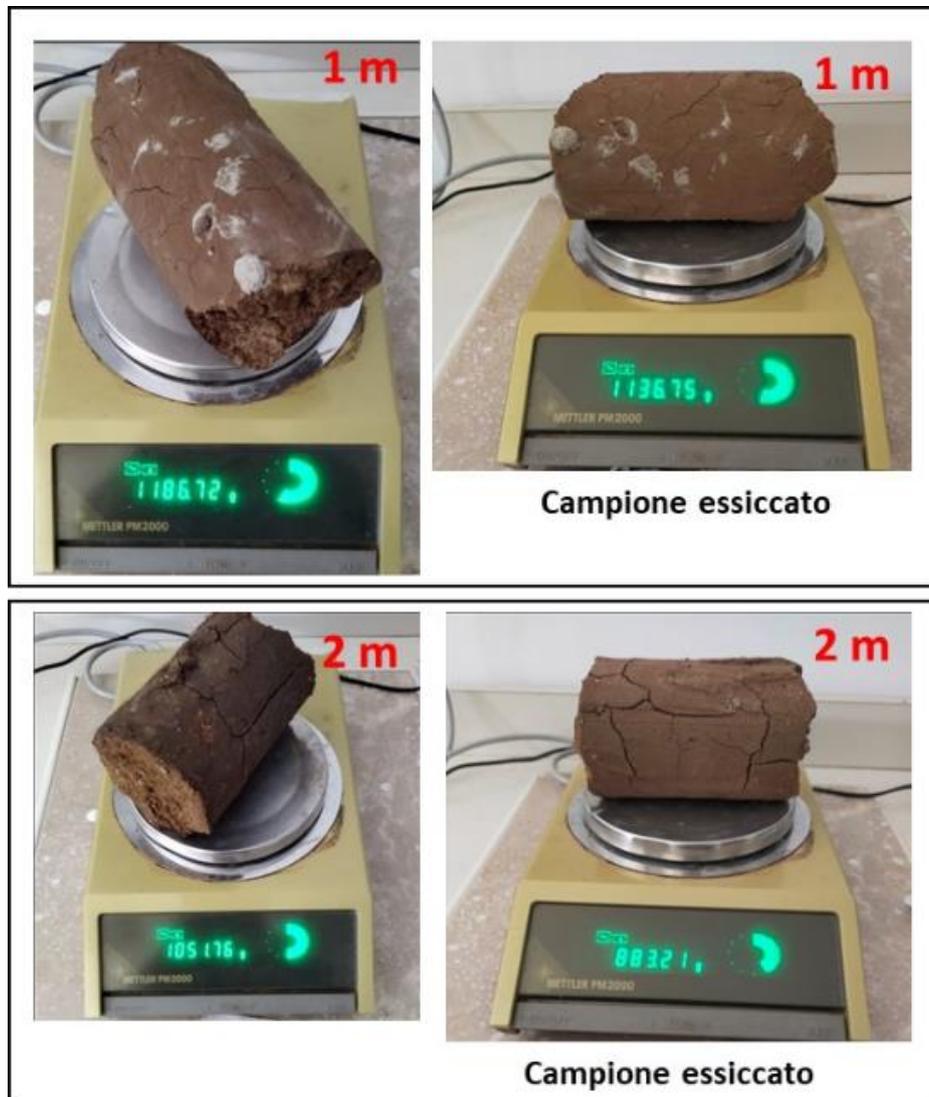


Figura 16: Pesatura di alcuni campioni del sondaggio geognostico S1 prima (a sx) e dopo (a dx) l'essiccazione (continua)

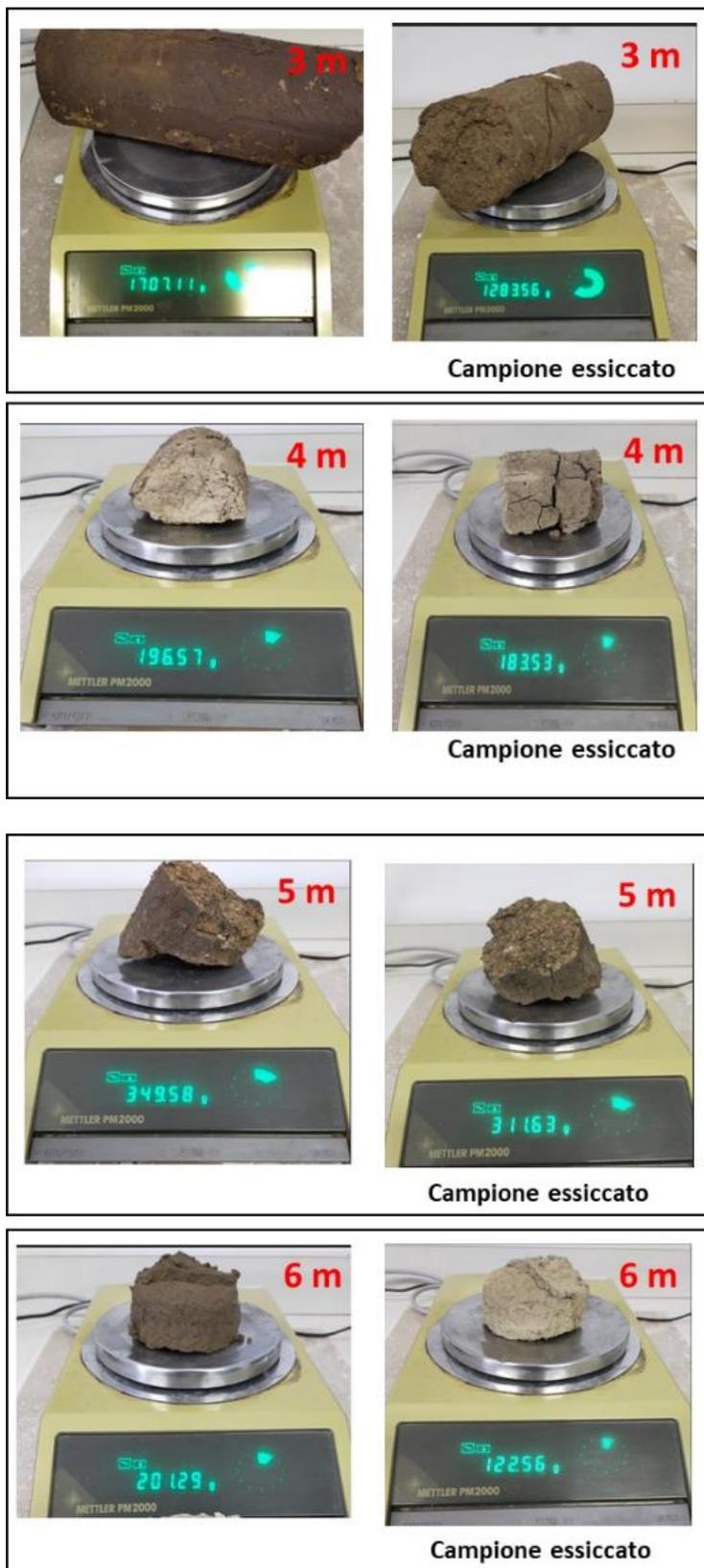


Figura 16: Pesatura di alcuni campioni del sondaggio geognostico S1 prima (a sx) e dopo (a dx) l'essiccazione (continua)

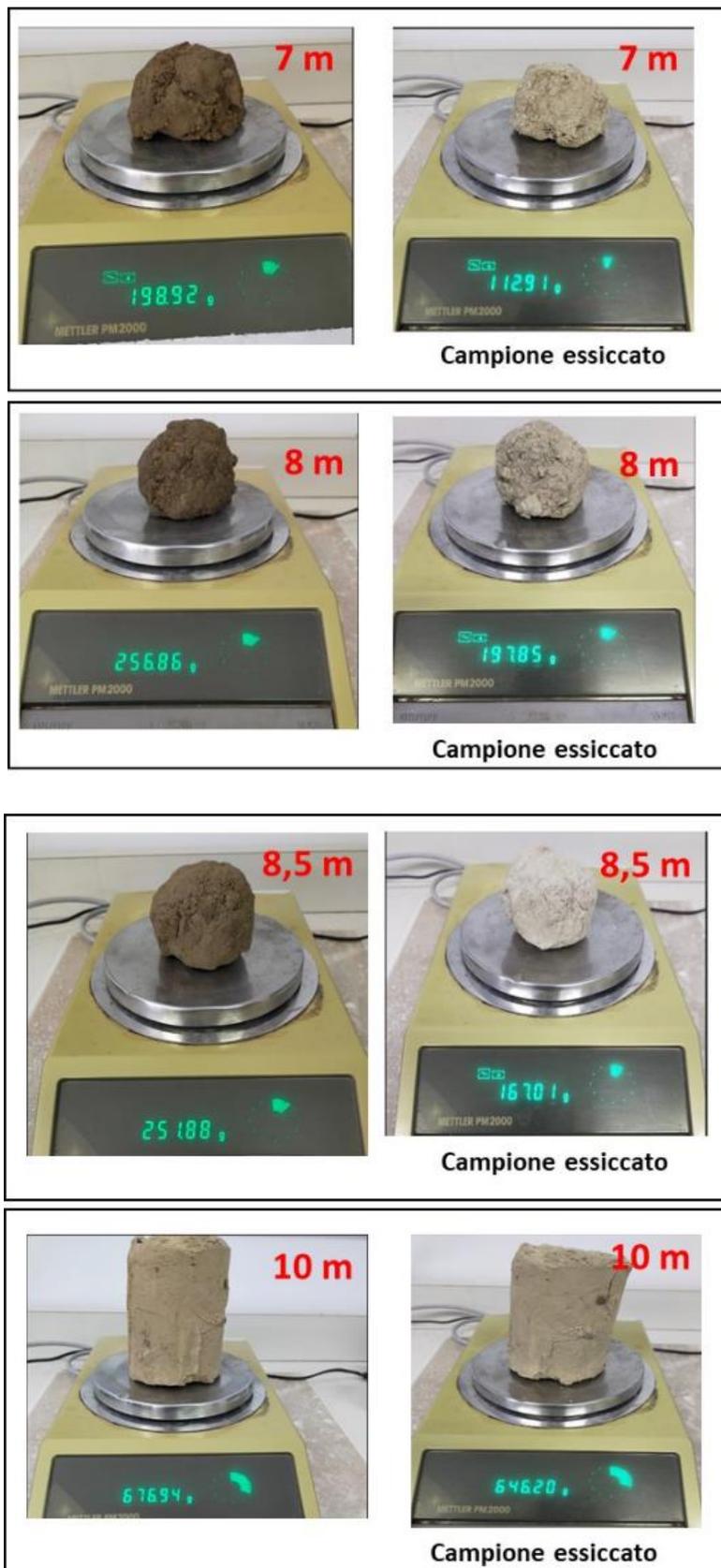


Figura 16: Pesatura di alcuni campioni del sondaggio geognostico S1 prima (a sx) e dopo (a dx) l'essiccazione (continua)

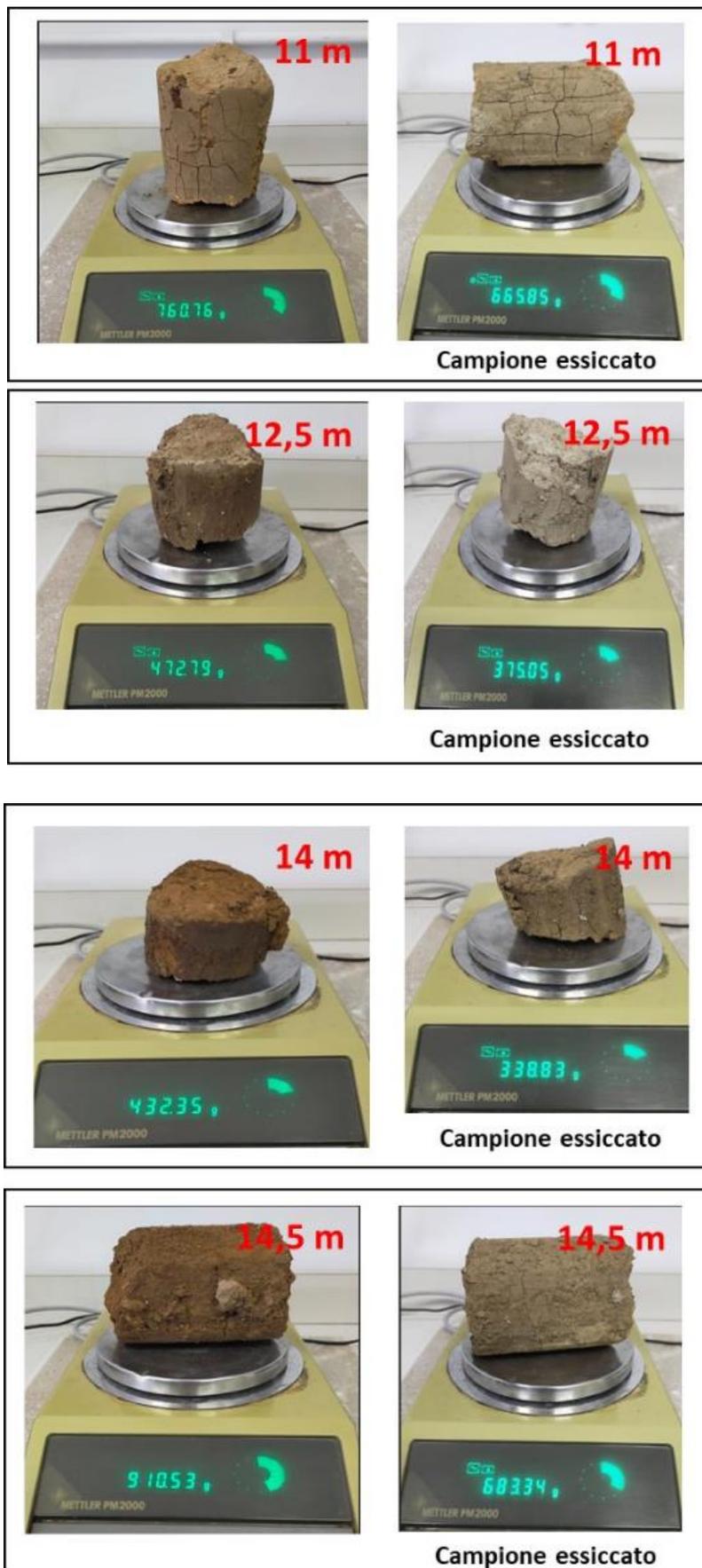


Figura 16: Pesatura di alcuni campioni del sondaggio geognostico S1 prima (a sx) e dopo (a dx) l'essiccazione (continua)

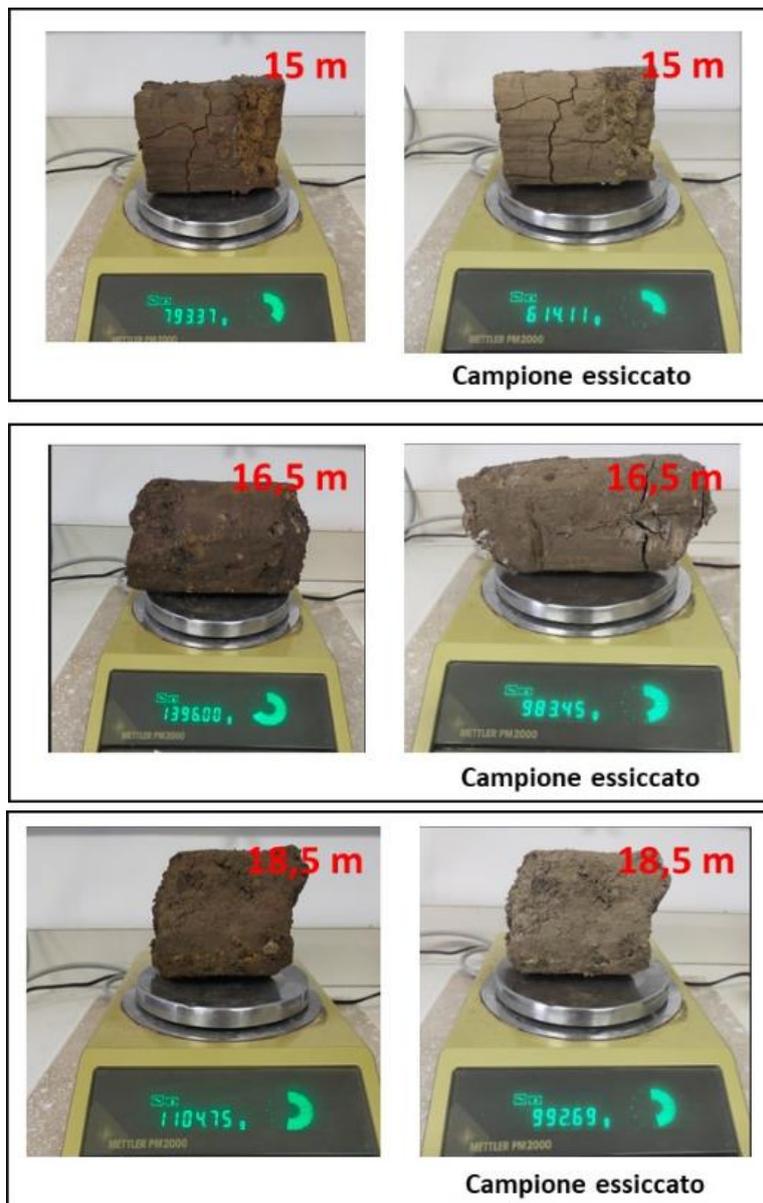


Figura 16: Pesatura di alcuni campioni del sondaggio geognostico S1 prima (a sx) e dopo (a dx) l'essiccazione

Una volta accertata la presenza della falda acquifera regionale all'interno delle lave, i campioni prelevati a una profondità superiore ai 32 m sono stati immersi in un becher con acqua per 24 ore, al fine di simulare le condizioni di saturazione reali (Figura 17). I campioni più rappresentativi delle diverse litologie riscontrate lungo il sondaggio geognostico, in condizioni quanto più possibile indisturbate, sono stati sottoposti alle misurazioni necessarie per la determinazione della conducibilità termica, seguendo la procedura descritta nel paragrafo 2.1.



Figura 17: Campione di tufo rosso a scorie nere (-71 m dal p.c.) immerso in un becher per le misure di conducibilità in condizione di saturazione

Per ottenere un valore medio attendibile sono state effettuate tre misurazioni della conducibilità termica per ciascun campione, sia per i litotipi in condizioni di saturazione che per quelli presenti nei livelli insaturi (Tabella 4).

| | Profondità (m) | Conducibilità termica (W/mK) | | | Media |
|--|----------------|------------------------------|----------|----------|-------|
| | | Misura 1 | Misura 2 | Misura 3 | |
| Ignimbrite | 1 | 0,77 | 0,82 | 0,80 | 0,80 |
| | 2 | 0,82 | 0,81 | 0,80 | 0,81 |
| | 3 | 0,98 | 0,97 | 0,99 | 0,98 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 4 | 0,78 | 0,76 | 0,74 | 0,76 |
| | 4,5 | 0,87 | 0,88 | 0,86 | 0,87 |
| | 5 | 0,87 | 0,83 | 0,82 | 0,84 |
| | 6 | 0,90 | 0,87 | 0,82 | 0,86 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 6,5 | 0,86 | 0,88 | 0,91 | 0,88 |
| | 7 | 0,93 | 0,87 | 0,88 | 0,90 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 8 | 0,74 | 0,75 | 0,75 | 0,75 |
| | 8,5 | 0,82 | 0,75 | 0,75 | 0,77 |
| Tufo sabbioso molto chiaro | 10 | 0,97 | 0,93 | 0,95 | 0,95 |
| | 11 | 0,86 | 0,88 | 0,88 | 0,87 |
| | 12 | 0,71 | 0,67 | 0,66 | 0,68 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 12,5 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 |
| | 14 | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 0,93 |
| | 14,5 | 0,89 | 0,82 | 0,82 | 0,84 |
| | 15 | 0,70 | 0,71 | 0,69 | 0,70 |
| Piroclastite | 16 | 0,56 | 0,56 | 0,55 | 0,56 |
| | 16,5 | 1,20 | 1,21 | 1,20 | 1,20 |
| | 17 | 0,94 | 0,86 | 0,87 | 0,89 |
| | 17,5 | 0,77 | 0,76 | 0,76 | 0,76 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 18 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,87 |
| | 18,5 | 1,16 | 1,00 | 0,85 | 1,01 |
| | 19,5 | 0,45 | 0,37 | 0,24 | 0,35 |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 20 | 0,80 | 0,78 | 0,75 | 0,78 |
| | 21 | 0,75 | 0,72 | 0,76 | 0,74 |
| Lave | 21,5 | 1,65 | 1,63 | 1,67 | 1,65 |
| | 25 | 1,44 | 1,43 | 1,43 | 1,43 |
| | 32 | 1,38 | 1,34 | 1,36 | 1,36 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 34 | 0,67 | 0,81 | 0,82 | 0,76 |
| | 35 | 0,89 | 0,93 | 0,92 | 0,91 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 36,5 | 0,95 | 0,95 | 0,97 | 0,96 |
| | 37 | 0,98 | 1,10 | 1,28 | 1,12 |
| | 38 | 1,06 | 1,06 | 1,02 | 1,05 |
| | 39 | 1,26 | 1,21 | 1,17 | 1,22 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 39,5 | 0,67 | 0,78 | 0,97 | 0,81 |
| | 40 | 1,13 | 0,79 | 0,79 | 0,90 |
| | 40,5 | 0,84 | 0,89 | 1,13 | 0,95 |
| | 42 | 0,97 | 1,10 | 1,03 | 0,80 |
| Tufo a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Includi eterogenei, a granulometria variabile | 44 | 1,01 | 0,98 | 0,97 | 0,99 |
| | 44,5 | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |
| | 45 | 0,89 | 0,73 | 0,78 | 0,80 |
| | 46 | 1,07 | 0,99 | 0,98 | 1,01 |
| | 46,8 | 0,88 | 0,81 | 0,84 | 0,84 |
| | 47 | 0,97 | 0,91 | 0,93 | 0,94 |
| | 48 | 0,77 | 0,82 | 0,63 | 0,74 |
| | 49 | 0,86 | 0,94 | 0,77 | 0,86 |
| | 50 | 0,85 | 0,92 | 0,80 | 0,86 |
| | 51 | 0,98 | 1,23 | 1,56 | 1,26 |
| Tufo rosso a scorie nere | 53 | 0,70 | 0,67 | 0,72 | 0,70 |
| | 54 | 0,77 | 0,86 | 0,73 | 0,79 |
| | 56 | 0,79 | 0,65 | 0,98 | 0,80 |
| | 57 | 0,93 | 0,80 | 0,99 | 0,91 |
| | 59 | 0,99 | 1,03 | 1,00 | 1,01 |
| | 62 | 1,34 | 1,52 | 1,12 | 1,33 |
| | 62,3 | 1,02 | 1,23 | 1,54 | 1,26 |
| | 62,8 | 1,25 | 1,43 | 1,33 | 1,34 |
| Tufo sabbioso argilloso | 65,8 | 0,98 | 0,87 | 0,77 | 0,87 |
| | 67,5 | 0,67 | 0,75 | 0,55 | 0,66 |
| | 68 | 0,45 | 0,54 | 0,66 | 0,55 |
| | 69 | 0,52 | 0,68 | 0,47 | 0,56 |
| Tufo avana chiaro con pomice grigio scure | 70 | 0,44 | 0,37 | 0,55 | 0,45 |
| | 70 | 0,76 | 0,65 | 0,58 | 0,66 |
| Tufi di Sacrofano | 71 | 0,875 | 0,962 | 0,628 | 0,82 |
| | 76 | 0,68 | 0,71 | 0,68 | 0,69 |
| | 77 | 0,84 | 0,87 | 0,99 | 0,90 |
| | 78 | 0,99 | 1,02 | 0,92 | 0,98 |
| | 79 | 0,71 | 0,74 | 0,79 | 0,74 |
| Limi sabbiosi | 80 | 0,73 | 0,71 | 0,72 | 0,72 |
| | 81 | 0,71 | 0,72 | 0,76 | 0,73 |
| | 83,5 | 1,14 | 1,20 | 1,20 | 1,18 |
| | 84,5 | 0,94 | 0,98 | 0,89 | 0,94 |
| | | | | | 0,90 |

Tabella 4: Misure di conducibilità termica sui campioni del sondaggio geognostico S1

La conducibilità termica media, calcolata sul totale delle misure effettuate in laboratorio sui litotipi del sondaggio geognostico S1, coincide con il dato ottenuto in cantiere dai campioni prelevati dai sondaggi PZ1 e PZ2, ossia 0,90 W/m·K.

Per ciascun litotipo, è stata misurata l'altezza del campione, mentre il diametro (8 cm, costante lungo l'intera lunghezza del sondaggio) era già noto. Con queste informazioni, è stato possibile determinare il volume del campione. Successivamente, misurando il peso e conoscendo il volume, è stata calcolata la densità. Fino a una profondità di 21 m è stato considerato il peso dei campioni in stato insaturo, ossia quello rilevato dopo essiccazione in stufa ventilata. Al di sotto dello strato delle lave, invece, si sono utilizzati i pesi dei campioni in stato saturo.

Utilizzando i valori di densità e capacità termica volumica [1], è stato quindi possibile calcolare il calore specifico (c_p , J/Kg·K) (Tabella 5). In particolare, è stato assunto un valore di capacità termica volumica di $2,2 \cdot 10^6$ (J/m³·K) per le rocce magmatiche fratturate e non fratturate, e di $2,5 \cdot 10^6$ (J/m³·K) per le lave.

| | | h (m) | V (m ³) | m (g) | densità (kg/m ³) | cp (J/Kg*K) |
|---|--|-------|---------------------|----------|------------------------------|-------------|
| CAMPIONI INSATURI | Ignimbrite | 0,19 | 9,55E-04 | 1284 | 1344 | 1637 |
| | Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 0,05 | 2,51E-04 | 312 | 1240 | 1774 |
| | Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 0,06 | 3,02E-04 | 113 | 374 | 5876 |
| | Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 0,04 | 2,01E-04 | 198 | 984 | 2236 |
| | Tufo sabbioso molto chiaro | 0,12 | 6,03E-04 | 666 | 1104 | 1993 |
| | Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 0,13 | 6,53E-04 | 614 | 940 | 2341 |
| | Piroclastite | 0,15 | 7,54E-04 | 983 | 1304 | 1687 |
| | Tufo sabbioso argillificato | - | - | - | - | - |
| | Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 0,11 | 5,53E-04 | 993 | 1795 | 1225 |
| | Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 0,04 | 2,01E-04 | 411 | 2042 | 1077 |
| | CAMPIONI SATURI | Lave | 0,11 | 5,53E-04 | 1543 | 2791 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | | 0,04 | 2,01E-04 | 419 | 2084 | 1056 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | | 0,09 | 4,52E-04 | 1017 | 2248 | 979 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | | 0,08 | 4,02E-04 | 700 | 1741 | 1264 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | | 0,09 | 4,52E-04 | 735 | 1624 | 1354 |
| Tufo rosso a scorie nere | | 0,06 | 2,76E-04 | 441 | 1597 | 1378 |
| Tufo sabbioso argilloso | | 0,09 | 4,52E-04 | 724 | 1600 | 1375 |
| Tufo avana chiaro con pomici grigio scure | | - | - | - | - | - |
| Tufi di Sacrofano | | 0,09 | 4,52E-04 | 753 | 1664 | 1322 |
| Limi sabbiosi | | 0,05 | 2,26E-04 | 400 | 1767 | 1245 |

Tabella 5: Valori di densità e calore specifico relativi ai campioni del sondaggio geognostico S1

2.4. Misure di laboratorio sui campioni PZ1 e PZ2

Il procedimento descritto in precedenza è stato adottato per determinare anche i valori di densità e calore specifico delle diverse litologie individuate nei sondaggi PZ1 (Tabella 6) e PZ2 (Tabella 7). In questo caso i campioni sono ampiamente rappresentativi delle condizioni indisturbate, poiché la perforazione a carotaggio continuo è stata eseguita senza l'uso di fluidi di circolazione fino alla profondità di 21 m e le misurazioni di conducibilità sono state effettuate contemporaneamente all'estrazione delle carote. Questi aspetti conferiscono alle misure di tali parametri un'importanza fondamentale per la loro reale rappresentatività del contesto litologico dell'area in studio.

| PZ1 | Profondità (m) | h (m) | V (m ³) | m (g) | densità (kg/m ³) | cp (J/Kg*K) |
|--|----------------|-------|---------------------|-------|------------------------------|-------------|
| Ignimbrite | 3 | 0,20 | 1,00E-03 | 1912 | 1903 | 1156 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 5 | 0,13 | 6,53E-04 | 1329 | 2035 | 1081 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 6,4 | 0,13 | 6,53E-04 | 1101 | 1686 | 1305 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 9 | 0,11 | 5,53E-04 | 1100 | 1990 | 1105 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 12 | 0,09 | 4,27E-04 | 823 | 1927 | 1142 |
| Piroclastite | 15 | 0,17 | 8,54E-04 | 1898 | 2222 | 990 |
| Tufo sabbioso argillificato | 18,2 | 0,14 | 7,03E-04 | 1311 | 1864 | 1180 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 20 | 0,11 | 5,53E-04 | 1382 | 2501 | 880 |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 23 | 0,10 | 5,02E-04 | 1292 | 2572 | 855 |
| Lave | 34,2 | 0,17 | 8,54E-04 | 2160 | 2529 | 989 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 36,5 | 0,14 | 7,03E-04 | 1720 | 2445 | 900 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 40,7 | 0,17 | 8,54E-04 | 1676 | 1962 | 1121 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 44 | 0,14 | 6,78E-04 | 1352 | 1993 | 1104 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | 45 | 0,13 | 6,53E-04 | 1258 | 1926 | 1142 |

Tabella 6: Valori di densità e calore specifico relativi ai campioni del sondaggio geognostico PZ1

| PZ2 | Profondità (m) | h (m) | V (m ³) | m (g) | densità (kg/m ³) | cp (J/Kg*K) |
|--|----------------|-------|---------------------|-------|------------------------------|-------------|
| Ignimbrite | 3 | 0,175 | 8,79E-04 | 1807 | 2055 | 1070 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 6,8 | 0,075 | 3,77E-04 | 691 | 1834 | 1200 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 7,5 | 0,18 | 9,04E-04 | 1688 | 1867 | 1179 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 8,8 | 0,16 | 8,04E-04 | 1366 | 1699 | 1295 |
| Tufo sabbioso molto chiaro | 11 | 0,17 | 8,54E-04 | 1488 | 1742 | 1263 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 15,5 | 0,135 | 6,78E-04 | 1208 | 1781 | 1235 |
| Piroclastite | 17,6 | 0,07 | 3,52E-04 | 727 | 2067 | 1064 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 19,5 | - | - | - | - | - |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 21 | 0,07 | 3,52E-04 | 757 | 2153 | 1022 |
| Lave | 33,5 | 0,11 | 0,0005526 | 1518 | 2747 | 910 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 36,3 | 0,095 | 4,77E-04 | 997 | 2089 | 1053 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 39 | 0,17 | 8,54E-04 | 1925 | 2254 | 976 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 43 | 0,16 | 8,04E-04 | 1355 | 1686 | 1305 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | 45 | 0,18 | 9,04E-04 | 1695 | 1874 | 1174 |

Tabella 7: Valori di densità e calore specifico relativi ai campioni del sondaggio geognostico PZ2

2.5. Densità e calore specifico a confronto in S1, PZ1 e PZ2

La Figura 18 illustra i valori di densità ottenuti dai campioni dei sondaggi S1, PZ1 e PZ2. Per quanto riguarda il sondaggio S1, i valori di densità risultano significativamente inferiori rispetto a quelli delle carote ottenute nei due piezometri, dal p.c. fino al tetto delle lave. Questa divergenza può essere attribuita a un eccessivo tempo di essiccazione in stufa dei campioni prelevati in S1; pertanto, tali dati non sono rappresentativi del reale contesto di confinamento nel sottosuolo e vanno quindi esclusi dall'analisi. In condizioni sature, come nel caso dei terreni sottostanti la falda acquifera regionale, i valori di densità relativi alle medesime litologie campionate nei tre sondaggi risultano abbastanza omogenei. Le densità maggiori si registrano nei campioni di lava, con un valore medio di 2689 kg/m³.

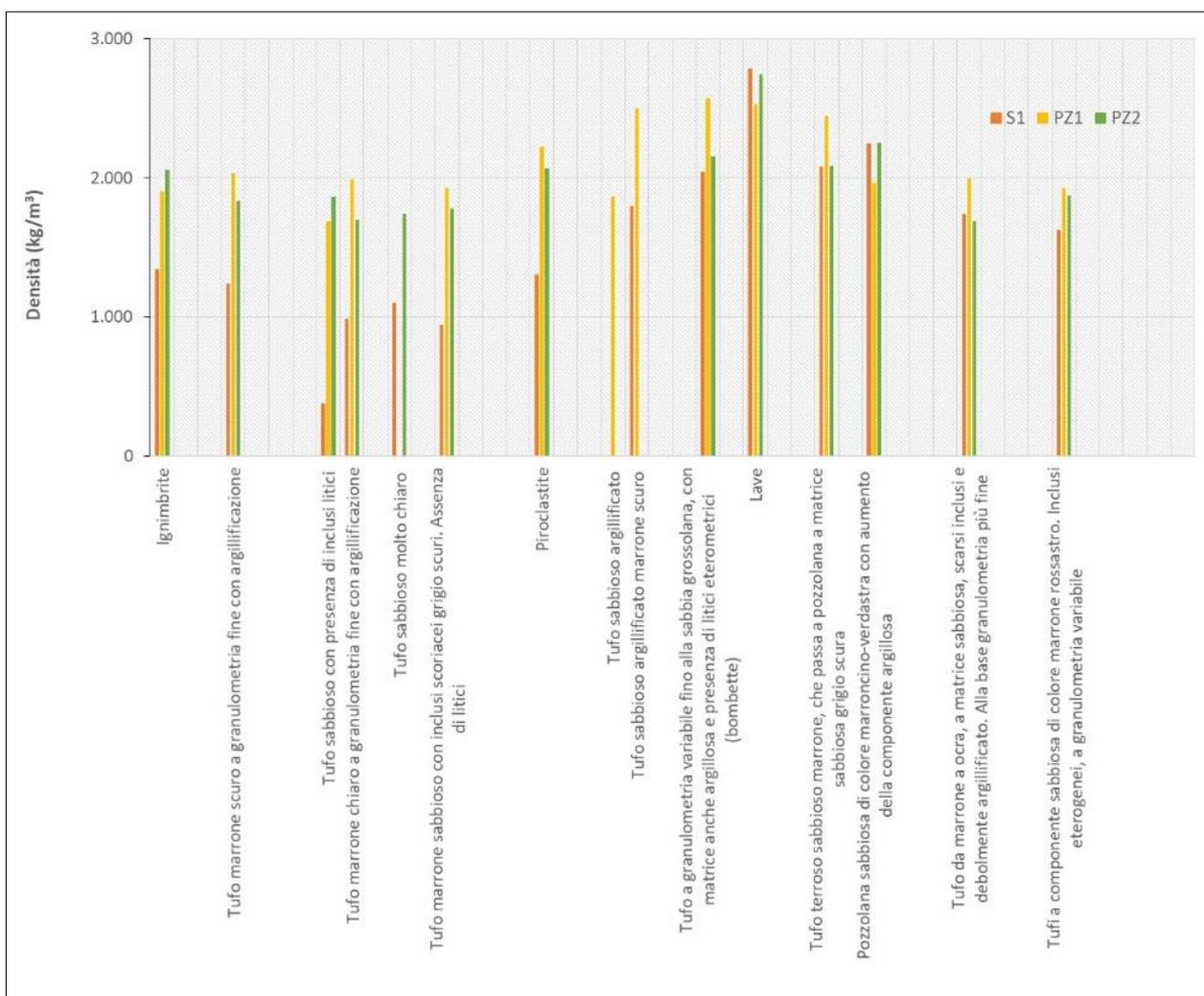


Figura 18: Confronto tra i valori di densità nei campioni provenienti da S1, PZ1 e PZ2

La densità e il peso specifico apparente delle rocce sono influenzati da diversi fattori, tra cui composizione mineralogica, tessitura e presenza di acqua di imbibizione [2]. In particolare, la tessitura ha un impatto significativo sulla densità di una roccia; infatti, la presenza di “vuoti” – che possono essere preesistenti o acquisiti – riduce il peso specifico apparente. Pertanto,

una roccia con tessitura vacuolare o bollosa può avere un peso volumetrico notevolmente inferiore rispetto a una roccia della stessa tipologia ma con tessitura compatta. Nelle rocce poco coerenti, è fondamentale considerare l'assortimento delle dimensioni dei granuli, oltre alle loro dimensioni assolute, forma, densità di impaccamento e contenuto d'acqua. Un assortimento maggiore di dimensioni si traduce, infatti, in un incremento del peso specifico e della densità apparenti.

Per esempio, un calcare "tufaceo" può presentare una densità di 1100 kg/m^3 , mentre un calcare compatto può raggiungere una densità di 2750 kg/m^3 . D'altra parte, una pomice liparitica o trachitica mostra un peso volumetrico inferiore a 1000 kg/m^3 , nonostante sia composta da materiale vetroso con un peso specifico reale superiore a 2400 kg/m^3 .

Nella Tabella 8 sono riportati i valori medi di densità e calore specifico relativi all'intera successione stratigrafica, che verranno impiegati per le simulazioni del campo termico. Per i primi 20 metri di profondità sono presentati esclusivamente i valori medi derivati dai sondaggi PZ1 e PZ2, in quanto i dati del sondaggio S1 non sono rappresentativi delle condizioni indisturbate. Tra i 20 e i 45 metri, i valori sono calcolati come media dei dati registrati nei tre sondaggi (S1, PZ1 e PZ2). Infine, per i livelli oltre i 45 metri fino ai limi sabbiosi, si riportano solo i dati derivanti dal sondaggio S1, poiché i carotaggi PZ1 e PZ2 si arrestano a una profondità di 45 metri dal p.c.

| | Media | Media |
|--|------------------------------|-------------|
| | densità (kg/m ³) | cp (J/Kg*K) |
| Ignimbrite | 1979 | 1113 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 1934 | 1140 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 1776 | 1242 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 1845 | 1200 |
| Tufo sabbioso molto chiaro | 1742 | 1263 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 1854 | 1188 |
| Piroclastite | 2145 | 1027 |
| Tufo sabbioso argillificato | 1864 | 1180 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 2501 | 880 |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 2256 | 985 |
| Lave | 2689 | 931 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 2206 | 1003 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 2155 | 1025 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 1807 | 1224 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | 1808 | 1223 |
| Tufo rosso a scorie nere | 1597 | 1378 |
| Tufo sabbioso argilloso | 1600 | 1375 |
| Tufo avana chiaro con pomici grigio scure | - | - |
| Tufi di Sacrofano | 1664 | 1322 |
| Limi sabbiosi | 1767 | 1245 |

Tabella 8: Valori medi di densità specifica (densità apparente per i campioni del sondaggio S1 oltre i 45 m di profondità) e di calore specifico (cp)

I valori medi di densità apparente definiti rientrano nei range dei valori di riferimento riportati in letteratura [3] (Tabella 9).

| Densità apparente (kg/m³) | |
|---|-----------|
| TUFO | 1100-2300 |
| BASALTI | 2700-3300 |
| PORFIDO | 2450-2700 |
| POMICI | 500-1100 |

Tabella 9: Densità apparente di alcune rocce vulcaniche [3]

3. CARATTERIZZAZIONE DELLA FALDA FREATICA CON I DATI PIEZOMETRICI

Una formazione idrogeologica è composta da una o più unità litostratigrafiche che consentono lo stoccaggio e la circolazione delle acque sotterranee. Tra le caratteristiche principali di queste formazioni vi è il coefficiente di permeabilità, che indica la capacità di un materiale di essere attraversato da un fluido.

La misurazione del livello piezometrico nel corso delle stagioni permette di caratterizzare la falda freatica e il suo comportamento nelle tre dimensioni spaziali, oltre a stimare la permeabilità (anche detta conducibilità idraulica) K e la porosità efficace n_e in relazione ai litotipi attraversati. I livelli idrostatici degli acquiferi, siano essi liberi o confinati, mostrano oscillazioni durante l'anno idrologico in risposta al tempo di ricarica-drenaggio o a variazioni dell'immagazzinamento [4]. L'andamento annuale del livello piezometrico permette così di valutare i cambiamenti di alimentazione all'infiltrazione delle piogge efficaci, di monitorare le variazioni nella riserva idrica sotterranea e di analizzarne l'evoluzione nel tempo.

In base alla permeabilità, le formazioni idrogeologiche possono essere distinte in permeabili e impermeabili. Le formazioni permeabili consentono un deflusso dell'acqua sotterranea che può variare da qualche metro a migliaia di metri all'anno. Queste includono ghiaie, sabbie grossolane e medie, calcari fratturati e carsici e vulcaniti fessurate, e danno luogo ad acquiferi liberi o confinati. Al contrario, le formazioni impermeabili presentano velocità di flusso molto basse (pochi cm o mm all'anno), e comprendono materiali come limo, argilla, marne e scisti. La Tabella 10 riporta i valori massimi e minimi della conducibilità idraulica (espressi in m/s) dei principali litotipi.

| Litotipi | | Conducibilità idraulica K (m/s) | |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| | | Valore min | Valore max |
| Rocce ignee | Andesite | $3 \cdot 10^{-9}$ | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| | Basalto fratturato | $4 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-2}$ |
| | Basalto non fratturato | $2 \cdot 10^{-11}$ | $4 \cdot 10^{-7}$ |
| | Tufo | $3 \cdot 10^{-9}$ | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| | Altre rocce ignee fratturate | $1 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ |
| | Altre rocce ignee non fratturate | $1 \cdot 10^{-13}$ | $1 \cdot 10^{-10}$ |
| Rocce metamorfiche | Fratturate | $8 \cdot 10^{-9}$ | $3 \cdot 10^{-4}$ |
| | Non fratturate | $3 \cdot 10^{-14}$ | $2 \cdot 10^{-10}$ |
| Rocce sedimentarie | Arenaria | $3 \cdot 10^{-10}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ |
| | Argillite | $1 \cdot 10^{-13}$ | $2 \cdot 10^{-9}$ |
| | Calcare | $1 \cdot 10^{-9}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ |
| | Dolomia | $1 \cdot 10^{-9}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ |
| | Evaporite | $1 \cdot 10^{-12}$ | $1 \cdot 10^{-10}$ |
| | Marna | $1 \cdot 10^{-11}$ | $1 \cdot 10^{-8}$ |
| Terreni | Argilla | $1 \cdot 10^{-11}$ | $5 \cdot 10^{-9}$ |
| | Ghiaia | $3 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| | Limo | $1 \cdot 10^{-9}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| | Sabbia fine | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| | Sabbia media | $1 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ |
| | Sabbia grossa | $1 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ |

Tabella 10: Valori minimi e massimi della conducibilità idraulica K per alcuni litotipi (modificata da [4])

Nei terreni permeabili, l'acqua si infiltra nel sottosuolo principalmente in direzione verticale. Quando la quantità di acqua di infiltrazione supera quella pellicolare trattenuta dai granuli e raggiunge uno strato impermeabile, si forma una zona di saturazione che si sviluppa in orizzontale. Un terreno permeabile è drenante se i pori sono comunicanti tra di loro.

La velocità effettiva o reale di circolazione dell'acqua v_e è definita come:

$$v_e = \frac{K \cdot i}{n_e} \quad (2)$$

dove n_e è la porosità efficace (adimensionale o percentuale) del materiale costituente il serbatoio idrico naturale (Tabella 11).

| | | Porosità efficace n_e (adimensionale) |
|--------------------|---------------------|--|
| Litotipi | | Valore medio |
| Rocce ignee | Andesite | 0,01 |
| | Basalto | 0,08 |
| | Gabbro | 0,005 |
| | Granito | 0,01 |
| | Tufo | 0,21 |
| Rocce metamorfiche | Anfibolite | <0,01 |
| | Gneiss | <0,01 |
| | Marmo | <0,01 |
| | Quarzite | <0,01 |
| | Scisto | 0,26 |
| Rocce sedimentarie | Arenaria | 0,2 |
| | Argillite | 0,02 |
| | Calcarea | 0,14 |
| | Dolomia | 0,07 |
| | Evaporite | 0,005 |
| | Marna | 0,12 |
| | | |
| Terreni | Argilla | 0,06 |
| | Ghiaia fine | 0,18 |
| | Ghiaia grossa | 0,21 |
| | Limo | 0,2 |
| | Sabbia e ghiaia | 0,2 |
| | Sabbia fine | 0,25 |
| | Sabbia medio-grossa | 0,3 |
| | | |

Tabella 11: Valori medi di porosità efficace n_e per alcuni litotipi (modificata da [4])

Dopo aver effettuato le operazioni di spurgo dei piezometri (Figura 19a), in ognuno di essi è stato installato il sensore per la rilevazione del livello freatico e della temperatura, collegato con un cavo al datalogger per la registrazione dei dati (Figura 19b).

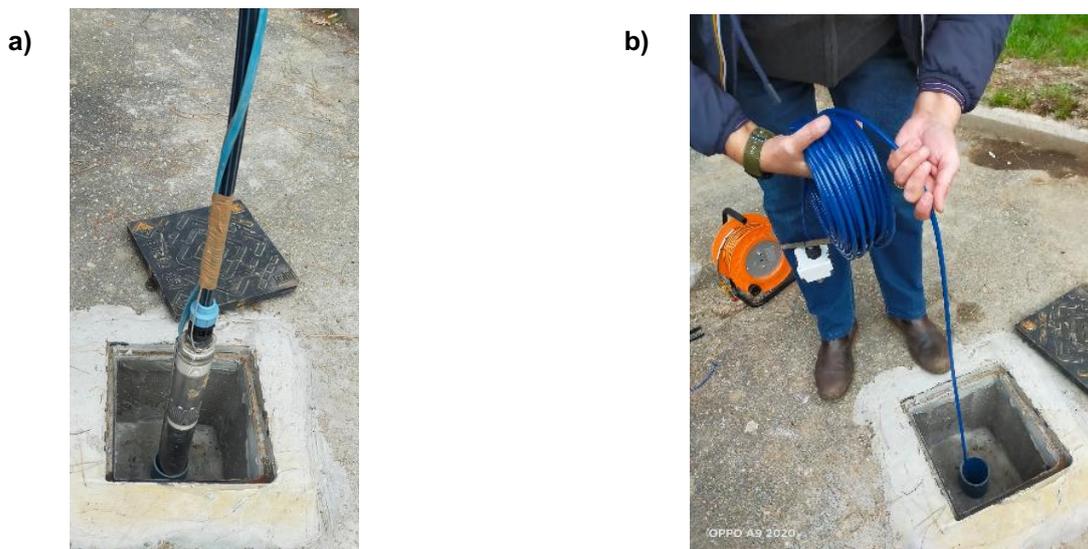


Figura 19: a) inserimento della pompa per le operazioni di spurgo dei piezometri; b) installazione del sensore di livello e temperatura nel piezometro

In dettaglio, il sensore installato è il “piezometro con datalogger”, modello LV615-RL (SIM STRUMENTI S.N.C.), le cui caratteristiche tecniche sono riportate nella Figura 20a. Il cavo elettrico di collegamento, portante e schermato, è fissato al sensore stesso permettendone l’inserimento e il recupero. La misura della pressione idrostatica è direttamente proporzionale all’altezza del liquido sopra il sensore stesso. All’interno del cavo un tubicino collega la camera di riferimento del trasduttore con l’atmosfera, per compensare le variazioni di pressione atmosferica: ne risulta una misura di pressione relativa.

Nel modello RL, l’unità di acquisizione dati MYLOG si trova in testa e il cavo elettrico di collegamento viene fornito della lunghezza desiderata. L’unità di acquisizione dati è alloggiata all’interno di un corpo cilindrico in acciaio inossidabile (Figura 20b).

a)

| Caratteristiche tecniche | |
|-------------------------------|--|
| Modello | LV615-AS1-FS* LV615-AS2-FS* LV615-RL-FS* |
| Sensore | Piezoeltrico |
| Fondo scala disponibili | da 0.05 a 1.0 bar ogni 0.05bar da 1 a 10 bar ogni 0.5 bar |
| Sovrapressione | 150% FS |
| Linearità | 0.25% FS |
| Errore termico totale | < 0.04% / °C |
| Stabilità lungo termine | <0.2% FS (1 anno) |
| Isolamento | >100MΩ |
| Protezione | IP68 IP68 IP61 |
| Sensore di temperatura | Aggiungere -TM alla sigla dello strumento |
| Campo di misura | -10 ÷ 105°C |
| Precisione | 0.1°C |
| Datalogger | MYLOG |
| Canali | 2 |
| Convertitore | 16bit |
| Ingresso | CH1 Piezometro 4-20mA CH2 Temperatura 0-2V |
| Funzione tempo reale | ✓ |
| Controllo batteria | ✓ |
| Funzione Warm Up | ✓ |
| Velocità di com. | 9600, 57600baud |
| Intervallo di lettura | Programmabile da 1min a 24ore |
| Memoria per canale | 64.000 dati oltre a data e ora |
| Materiale contenitore | INOX / PVC |
| Generale | |
| Alimentazione | Pacchetto batterie 3x3.6V 1200mAh |
| Consumo | 0.01mA standby 20mA collegamento; 30mA lettura |
| Durata media | In standby 7anni Con una lettura ogni ora 2.5 anni |
| Temp. di funzionamento | -20 ÷ +70 °C |
| Peso | Mod. -AS1 -RL Sensore 0.325 Kg / Datalogger 0.480Kg Mod. -AS2 0.610Kg |
| Dimensioni | Mod. -AS1 -RL Sensore Ø25x145mm / Datalogger Ø25x260mm Mod. -AS2 Ø25x300 mm |



Figura 20: a) caratteristiche tecniche del “piezometro con datalogger”; **b)** Vista d’insieme del “piezometro con datalogger” modello LV615-RL

Gli intervalli di acquisizione sono stati programmati ogni 12 ore, così da disporre di due misure al giorno (alle 00:00 e alle 12:00). L’unità MYLOG fornisce tutti i dati di parametrizzazione che vengono memorizzati al suo interno, nonché lo stato della batteria. I dati vengono salvati in una memoria FLASH in grado di memorizzare 128.000 dati, comprensivi di data e ora. Per la visualizzazione e lo scarico dei dati sul computer si utilizza il software VEDO, appositamente sviluppato per la gestione delle unità di acquisizione dati MYLOG. Nella Figura 21 sono riportati i certificati di calibrazione e taratura dei due piezometri con datalogger.

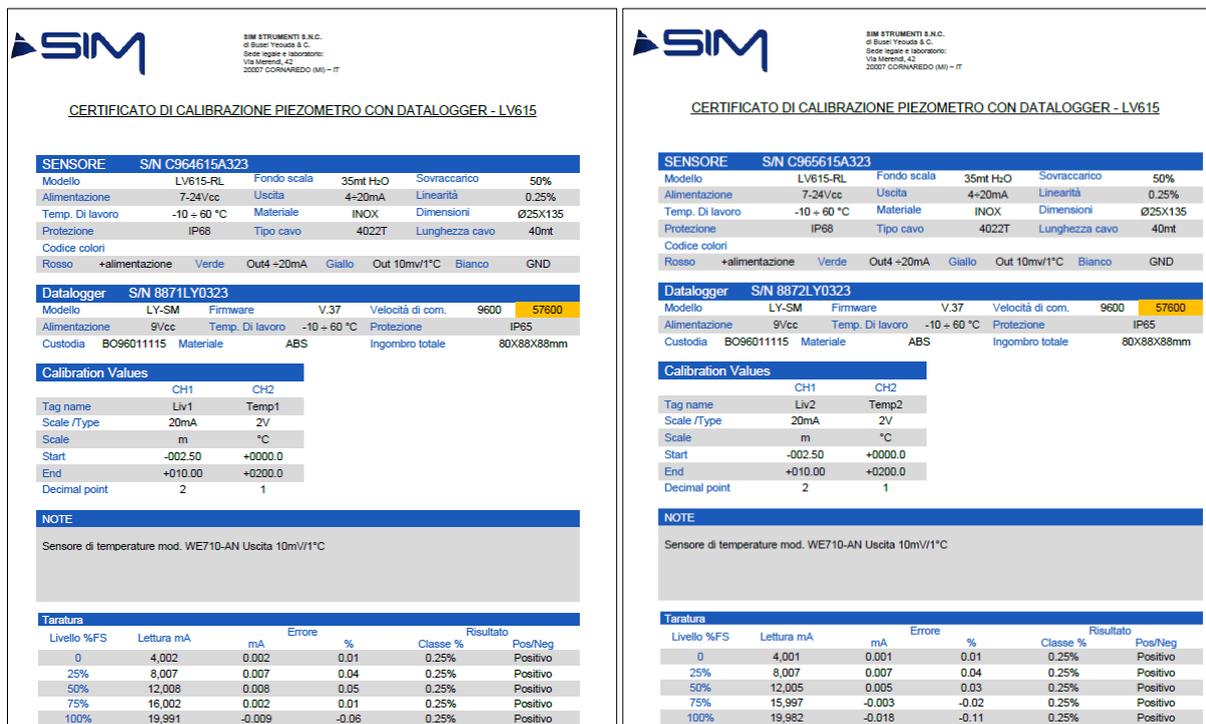


Figura 21: Certificato di calibrazione dei due piezometri con datalogger (SIM STRUMENTI, mod. LV615-RL)

3.1 Determinazione della permeabilità degli strati sottostanti il C.R. Casaccia

Nel 2008, nel C.R. Casaccia è stata condotta una campagna di monitoraggio commissionata dalla Società di Gestione degli Impianti Nucleari (Sogin) [5], finalizzata a indagare la possibile presenza di radionuclidi nella falda acquifera, mediante l'installazione di piezometri.

Durante questa campagna, sono state effettuate prove di tipo Lefranc nel sottosuolo per determinare la loro permeabilità. Tali prove prevedono l'immissione di acqua all'interno di un foro di sondaggio specificamente preparato, seguita dall'osservazione nel tempo delle sue variazioni di livello e dalla misura degli assorbimenti. A partire da una profondità prestabilita, viene realizzato un tratto filtrante soltanto in corrispondenza dello strato di terreno del quale si vuole ricavare la conducibilità idraulica; per tutto il tratto non interessato dalla prova, le pareti del foro devono essere rivestite con una tubazione. Le prove sono state condotte con diversi livelli di carico idraulico, immettendo acqua in quantità tale da generare un gradiente idraulico adeguato per ottenere una buona curva abbassamento-tempo, fino al ristabilimento del livello di falda statico.

La formula per il calcolo della permeabilità media è la seguente:

$$K = \frac{A}{c} * (t_2 - t_1) * \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

dove:

K = permeabilità in m/s;

A = area della sezione trasversale del rivestimento in cui avvengono le misure dei livelli espressa in m²;

h_1 e h_2 = altezza dei livelli rispetto all'altezza della falda negli istanti t_1 e t_2 ;

C = coefficiente di forma dipendente dal diametro della "tasca" filtrante e dalla lunghezza del tratto indagato.

È stata così determinata la permeabilità per i seguenti litotipi:

- lave leucitiche poco fratturate: $K = 1,27 \cdot 10^{-7}$ m/s;
- tufo rosso a scorie nere e tufi sabbiosi: $K = 3,39 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La sequenza litostratigrafica in esame è caratterizzata da una notevole variabilità della permeabilità, sia orizzontale che verticale. Questa variabilità è influenzata dalle differenti fasi vulcaniche, dalla gradazione dei prodotti di ricaduta e dalle modifiche topografiche dovute all'accumulo di materiali piroclastici, nonché dal grado di fratturazione e alterazione delle rocce litoidi.

La circolazione idrica sotterranea nel sistema vulcanico è condizionata dall'andamento morfologico della superficie di separazione tra le vulcaniti e i più antichi sedimenti marino-continentali, sui quali si sono sviluppati gli edifici vulcanici. Il letto del sistema acquifero è rappresentato dal basamento prevulcanico, un substrato costituito dalle formazioni argillose marine plio-pleistoceniche. Nella parte inferiore del sistema vulcanico è presente un'estesa e potente falda, caratterizzata da uno spessore compreso tra 100 e 150 metri, che funge da serbatoio di rilevanza regionale.

Nel sottosuolo del C.R. Casaccia si osservano contrasti netti, sia laterali che verticali, al flusso delle acque sotterranee; i tufi rossi a scorie nere e i tufi granulari/sabbiosi sono caratterizzati da buona permeabilità, e sono interposti ad altri materiali a bassa permeabilità, come le piroclastiti, i tufi argillosi e le lave non fratturate. Di conseguenza, per le diverse litologie attraversate nei sondaggi PZ1 e PZ2 (Tabelle 12 e 13) i valori di permeabilità considerati sono i seguenti:

- basalto: $K = 1,27 \cdot 10^{-7}$ m/s (da [5]);

- tufi sabbiosi anche con presenza di litici (bombe) sparsi, a granulometria variabile, assenza di argillificazione, pozzolane: $3,39 \cdot 10^{-5}$ m/s (da [5]);
- tufo argilloso e piroclastite: $3,00 \cdot 10^{-9}$ m/s (da [4]);
- ignimbrite: $3,00 \cdot 10^{-5}$ m/s (da [4]);
- tufo sabbioso argilloso: $1,50 \cdot 10^{-5}$ m/s (valore medio da [4]).

Inoltre, è stata calcolata la portata unitaria (q) attraverso i diversi strati, tenendo in considerazione sia la permeabilità del litotipo sia il gradiente idraulico. Conoscendo i livelli di soggiacenza in PZ1 e PZ2 (rispettivamente 25,30 m e 26,21 m dal boccapozzo, come indicato nella Tabella 1) e la distanza di 100 m tra i due punti di indagine, si è ottenuto un gradiente idraulico di $9,10 \cdot 10^{-3}$, corrispondente a 9 mm ogni 100 m. Assumendo un valore di porosità efficace (n_e) di 0,21 per i tufi e di 0,08 per il basalto, è stata calcolata la velocità effettiva (v_e) dell'acqua in ciascuna formazione.

| PZ1 | K (m/s) | Grado di permeabilità | q(m/s) | v _e (m/s) |
|--|----------|-----------------------|----------|----------------------|
| Ignimbrite | 3,00E-05 | MEDIO | 2,73E-07 | 1,30E-06 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 1,30E-10 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 5,73E-12 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Piroclastite | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 5,73E-12 |
| Tufo sabbioso argillificato | 1,50E-05 | MOLTO BASSO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Lave | 1,27E-07 | BASSO | 1,16E-09 | 9,25E-11 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |

Tabella 12: Valori di permeabilità K, portata unitaria (q) e velocità effettiva (v_e) nel piezometro PZ1

| PZ2 | K (m/s) | Grado di permeabilità | q(m/s) | v_e (m/s) |
|--|----------------|------------------------------|---------------|----------------------------|
| Ignimbrite | 3,00E-05 | MEDIO | 2,73E-07 | 1,30E-06 |
| Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 1,30E-10 |
| Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Tufo marrone chiaro a granulometria fine con argillificazione | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 5,73E-12 |
| Tufo sabbioso molto chiaro | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigio scuri. Assenza di litici | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Piroclastite | 3,00E-09 | MOLTO BASSO | 2,73E-11 | 5,73E-12 |
| Tufo sabbioso argillificato marrone scuro | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana, con matrice anche argillosa e presenza di litici eterometrici (bombette) | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Lave | 1,27E-07 | BASSO | 1,16E-09 | 1,02E-08 |
| Tufo terroso sabbioso marrone, che passa a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |
| Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa, scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine | 1,50E-05 | MEDIO | 1,37E-07 | 2,87E-08 |
| Tufi a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile | 3,39E-05 | MEDIO | 3,08E-07 | 6,48E-08 |

Tabella 13: Valori di permeabilità K, portata unitaria (q) e velocità effettiva (ve) nel piezometro PZ2

3.2. Dati piezometrici e correlazione con i dati di precipitazione mensile

I sensori, installati nei piezometri PZ1 e PZ2 alla profondità di 35 m, rilevano ogni 12 ore i livelli statici della falda acquifera e la temperatura. In PZ1 il valore medio mensile della soggiacenza rimane sostanzialmente invariato durante l'intervallo di tempo analizzato (dal 24 marzo al 31 maggio 2023, Tabella 14). Inoltre, non si registrano variazioni significative del livello in relazione alle precipitazioni giornaliere (Tabella 15), rilevate con i pluviometri situati nel C.R. Casaccia. Nel piezometro PZ1, nel periodo considerato, la soggiacenza varia tra 25,26 m e 25,32 m dal boccapozzo, mentre la temperatura della falda acquifera rimane costante a 18,2 °C.

| marzo-23 | Precipitazioni giornaliere (mm) | maggio-23 | Precipitazioni giornaliere (mm) |
|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| 24/3/23 | 0 | 1/5/23 | 3 |
| 25/3/23 | 0 | 2/5/23 | 2.4 |
| 26/3/23 | 0.2 | 3/5/23 | 0.2 |
| 27/3/23 | 2 | 4/5/23 | 0 |
| 28/3/23 | 0 | 5/5/23 | 0 |
| 29/3/23 | 0 | 6/5/23 | 0 |
| 30/3/23 | 0 | 7/5/23 | 0 |
| 31/3/23 | 0 | 8/5/23 | 0 |
| | | 9/5/23 | 0 |
| | | 10/5/23 | 13.8 |
| | | 11/5/23 | 0 |
| | | 12/5/23 | 0 |
| | | 13/5/23 | 4.6 |
| | | 14/5/23 | 1.6 |
| | | 15/5/23 | 1.8 |
| | | 16/5/23 | 6 |
| | | 17/5/23 | 21 |
| | | 18/5/23 | 4.6 |
| | | 19/5/23 | 3.4 |
| | | 20/5/23 | 2.4 |
| | | 21/5/23 | 2.6 |
| | | 22/5/23 | 8.8 |
| | | 23/5/23 | 0 |
| | | 24/5/23 | 0 |
| | | 25/5/23 | 1.4 |
| | | 26/5/23 | 0 |
| | | 27/5/23 | 0 |
| | | 28/5/23 | 0 |
| | | 29/5/23 | 19.8 |
| | | 30/5/23 | 0 |
| | | 31/5/23 | 0 |
| aprile-23 | Precipitazioni giornaliere (mm) | | |
| 1/4/23 | 0 | | |
| 2/4/23 | 0 | | |
| 3/4/23 | 0 | | |
| 4/4/23 | 0 | | |
| 5/4/23 | 0.8 | | |
| 6/4/23 | 0.2 | | |
| 7/4/23 | 1 | | |
| 8/4/23 | 19 | | |
| 9/4/23 | 0 | | |
| 10/4/23 | 0 | | |
| 11/4/23 | 0 | | |
| 12/4/23 | 0 | | |
| 13/4/23 | 1 | | |
| 14/4/23 | 0.6 | | |
| 15/4/23 | 39.6 | | |
| 16/4/23 | 3 | | |
| 17/4/23 | 0 | | |
| 18/4/23 | 10.2 | | |
| 19/4/23 | 0 | | |
| 20/4/23 | 0 | | |
| 21/4/23 | 0 | | |
| 22/4/23 | 0 | | |
| 23/4/23 | 0 | | |
| 24/4/23 | 6 | | |
| 25/4/23 | 0 | | |
| 26/4/23 | 0 | | |
| 27/4/23 | 0 | | |
| 28/4/23 | 0 | | |
| 29/4/23 | 0 | | |
| 30/4/23 | 6.8 | | |

Tabella 15: Valori di precipitazione giornaliera rilevati nel C.R. Casaccia tra il 24 marzo e il 31 maggio 2023

Nel piezometro PZ2, la soggiacenza media mensile ha evidenziato una diminuzione, passando da -26,17 m nel mese di marzo a -26,21 m in maggio 2023 (Tabella 16).

Per quanto riguarda la temperatura, quella misurata a -35 m dal p.c. risulta leggermente superiore (18,6 °C) rispetto a PZ1 (18,2 °C). Inoltre, nel medesimo intervallo temporale, la temperatura rilevata dal cavo di fibra ottica posizionato esternamente alla sonda geotermica nel pozzo 1 (17,4 °C) è di poco più di un grado inferiore rispetto a quella registrata nel piezometro PZ2. Questa discrepanza è attribuibile ai fenomeni di scambio termico predominanti e, probabilmente, anche ai differenti contesti di misura. All'interno del pozzo, il calore si trasferisce prevalentemente per conduzione attraverso le rocce e il materiale di riempimento (cemento bentonitico), mentre nella falda acquifera il trasferimento termico

4. CONCLUSIONI

Nel marzo 2023 sono state effettuate due perforazioni a carotaggio continuo attrezzate a piezometri, con l'obiettivo di monitorare le variazioni del livello della falda e la temperatura nell'area circostante il campo geosonde, realizzato nel 2021 all'interno del C.R. ENEA-Casaccia. Le perforazioni, distanti circa 100 metri l'una dall'altra, sono state spinte entrambe fino a una profondità di 45 metri dal piano campagna. Il gradiente idraulico calcolato tra i due piezometri è risultato pari a 9 mm ogni 100 metri. Nel contesto in esame, la superficie piezometrica presenta un andamento sub-orizzontale, e tra PZ1 e PZ2 esiste un dislivello topografico di 1 metro.

Le perforazioni sono state condotte a carotaggio continuo per ricostruire e correlare le due successioni stratigrafiche, consentendo di caratterizzare l'assetto litologico nell'area del campo geosonde. Misure dirette di conducibilità termica sono state effettuate sulle carote appena estratte, in quanto rappresentative della condizione effettiva di confinamento nel sottosuolo. I dati acquisiti sono stati confrontati con i valori di conducibilità termica lungo la verticale, riferiti al sondaggio geognostico S1 del campo geosonde, ottenuti con misurazioni a posteriori in laboratorio. Tutti i campioni a quota stratigrafica superiore rispetto alle lave sono stati sottoposti a essiccazione in stufa ventilata per simulare le condizioni insature del sottosuolo, mentre quelli prelevati sottofalda sono stati immersi in un becher con acqua per circa 24 ore. La conducibilità termica media rilevata per ogni litotipo nei tre sondaggi (S1, PZ1 e PZ2), fino a 45 m di profondità, è stata costante a $0,90 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, confermando la validità delle analisi di laboratorio.

Inoltre, dopo aver misurato l'altezza di ogni provino, conoscendo il diametro costante di 8 cm, è stato calcolato il volume. Ogni campione è stato pesato e, noto il volume, è stata determinata la densità. Infine, è stato calcolato il calore specifico, considerando la densità nota e assumendo un valore di capacità termica volumica pari a $2,2 \cdot 10^6 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$ per le rocce magmatiche fratturate e non fratturate, e di $2,5 \cdot 10^6 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ per le lave. È stato riscontrato che i valori di densità e calore specifico riportati per il sondaggio S1, fino a 20 metri di profondità, non riflettono le reali condizioni di confinamento nel terreno, mostrando una notevole discordanza rispetto a PZ1 e PZ2. Tuttavia, tra 20 e 45 metri, i valori di questi parametri sono stati considerati rappresentativi e mediati tra i tre sondaggi. Al di sotto di tale profondità i dati fanno riferimento esclusivamente al sondaggio S1, poiché PZ1 e PZ2 terminano a 45 metri dal piano campagna. Le informazioni raccolte lungo il profilo verticale, fino a 85 metri di profondità, permetteranno di modellizzare il campo termico reale con l'ausilio di software specifici.

Infine, dopo aver ricavato la permeabilità delle diverse litologie lungo la verticale e noto il gradiente idraulico, è stata calcolata la portata unitaria attraverso i vari strati. Assumendo un valore di porosità efficace di 0,21 per materiali tufacei e 0,08 per la lava, è stata determinata la velocità effettiva dell'acqua all'interno di ciascuna litologia.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] VDI 4640/1 (2000). Thermal use of the underground, Fundamentals, approvals, environmental aspects. Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

[2] Comin-Chiaramonti P., Mazzucchelli M. Elementi di Petrografia Applicata. Plinius, 2017. <https://doi.org/10.19276/plinius.2017.03020>

[3] Jakosky J.J. Exploration geophysics. Trija Publishing Company, Newport Beach, California, 1961. 1195 pp

[4] Gorla M. Pozzi per acqua. Manuale tecnico di progettazione. Dario Flaccovio Editore, 2010. ISBN: 8857900444, XX-662 pp

[5] Caratterizzazione idrogeologica e radiometrica del sito Casaccia propedeutica allo smantellamento dei serbatoi Waste-A e Waste-B. Elaborato NP VA 0148 - Impianto Casaccia Opec. Relazione tecnica

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
gennaio 2025