



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione del campo geotermico

Anna Carmela Violante, Marco Proposito

REALIZZAZIONE DEL CAMPO GEOTERMICO

Anna Carmela Violante, Marco Proposito (ENEA)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – II° annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: pompe di Calore

Linea di attività: Sistemi complessi di PdC integrate: Studio teorico/sperimentale di componentistica innovativa. Progettazione preliminare e realizzazione di "HiL"

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 INQUADRAMENTO GENERALE.....	7
3 TECNICHE DI PERFORAZIONE UTILIZZATE.....	10
4 SONDE GEOTERMICHE VERTICALI.....	15
5 SONDAGGIO GEOGNOSTICO.....	19
6 TEST RISPOSTA TERMICA.....	27
6.1. TEMPERATURA INDISTURBATA DEL TERRENO.....	33
6.2. PROVA DI FLUSSO.....	35
6.3. RISULTATI GRT.....	36
7 FIBRE OTTICHE DTS INSTALLATE NEI POZZI.....	39
8 CURVA CARATTERISTICA DEL CIRCUITO IDRAULICO.....	44
9 SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO.....	49
10 CONCLUSIONI.....	52
11 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	54
12 ACRONIMI.....	54

Sommario

In seguito allo studio preliminare di fattibilità geo-litologico ed idrogeologico, condotto nel primo anno, è stato possibile individuare l'area idonea allo sfruttamento della risorsa termica del terreno. Da una prima ricostruzione, è stato possibile effettuare un dimensionamento di massima, assumendo il valore di conducibilità termica dei terreni attraversati, nonché la resa termica dei pozzi per metro lineare di sonda installata.

Nel secondo anno, è stato realizzato il campo geosonde, caratterizzato dall'installazione di sonde geotermiche in quattro pozzi, a diversa profondità, ad andamento verticale, a circuito chiuso e configurazione double U. I pozzi sono stati effettuati nella zona adiacente l'Edificio F40, ubicato nel C.R. Enea Casaccia, sito in Roma, via Anguillarese 301, Foglio Catastale 26, Particella 15, Santa Maria di Galeria (RM).

La perforazione del pozzo 1, è stata condotta a carotaggio continuo, fino alla profondità di 100 m. Lo scopo di tale sondaggio geognostico è stato quello di individuare e caratterizzare i litotipi presenti in successione stratigrafica e pertanto individuare il valore corrispondente della conducibilità termica in [W/mK], che verrà verificato successivamente dal test di risposta termica (GRT) e dai profili termici verticali del sottosuolo acquisiti dal sistema DTS (Distributed Temperatures Sensor) a fibra ottica, basato su effetto Raman, presente in ogni pozzo. Inoltre, sul pozzo 1, è stato condotto il Ground Response Test (GRT), al fine di definire la temperatura indisturbata del terreno, la conducibilità termica media delle rocce attraversate e la resistenza termica delle sonde. Le perforazioni degli altri tre pozzi sono state eseguite a distruzione di nucleo. Durante la perforazione del quarto pozzo, alla profondità di 30 m si è verificata la perdita del martello fondo foro, pertanto, non è stato possibile proseguire la perforazione, ma si è reso necessario abbandonare lo stesso, ed effettuare una nuova perforazione a 3 m di distanza. Il foro abbandonato, non è stato interessato dall'installazione di sonde geotermiche, ma utilizzato per inserire un cavo di fibra ottica, fino alla profondità di 26 m (pozzo 5), direttamente amalgamato all'interno della malta cementizia di riempimento. Tali misure evidenzieranno il valore effettivo di temperatura corrispondente al litotipo attraversato ad una data profondità, costituendo, pertanto, il riferimento per gli altri quattro pozzi, nei quali si risente del flusso all'interno delle sonde geotermiche.

Le sonde geotermiche, nel pozzo 1, sono state installate fino alla profondità di 70 m, e non fino a 100 m come previsto, in quanto si sono verificati problemi di sgrottamento a fondo foro causate dalle sabbie.

Le fibre ottiche di tipo DTS (Distributed Temperatures Sensor) sono state inserite, nei quattro pozzi, contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche, e permetterà di acquisire in maniera distribuita la temperatura lungo l'intero tratto del pozzo con una risoluzione di temperatura fino a 0,1°C e una risoluzione spaziale di due metri.

Ciò permetterà il monitoraggio del campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde stesse, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo. Sarà interessante capire se il terreno possa essere considerato come un serbatoio termico, e se il calore stoccato durante i mesi estivi possa accumularsi per essere utilizzato durante i mesi invernali.

In ultimo, sono state definite le caratteristiche del circuito idraulico, in termini di portata distribuita tra le sonde, le perdite di carico distribuite e concentrate, considerando una configurazione parallela tra le due coppie di sonde per ogni pozzo fino al collettore. E' stato concepito lo schema funzionale tipo e redatto il computo metrico dell'impianto, evidenziando il sistema di controllo e di monitoraggio.

1 Introduzione

L'area interessata dalle perforazioni ricade all'interno del C.R. ENEA-Casaccia, sito in prossimità dell'intersezione tra la via Braccianese (Claudia) e la Via Anguillarese, nei pressi dell'abitato di Osteria Nuova. Essa si localizza su di un versante degradante verso sud-est e sud-ovest, tra i fossi "Rosciolo" e "Fossetto", tributari in destra idrografica del fiume Arrone. L'area di studio ricade nel Foglio 364161 della Carta Tecnica Regionale del Lazio, in scala 1: 5.000, coordinate UTM WGS84 33T 276742 m E 4657533 m N, indicata con il pallino rosso in Figura 1.

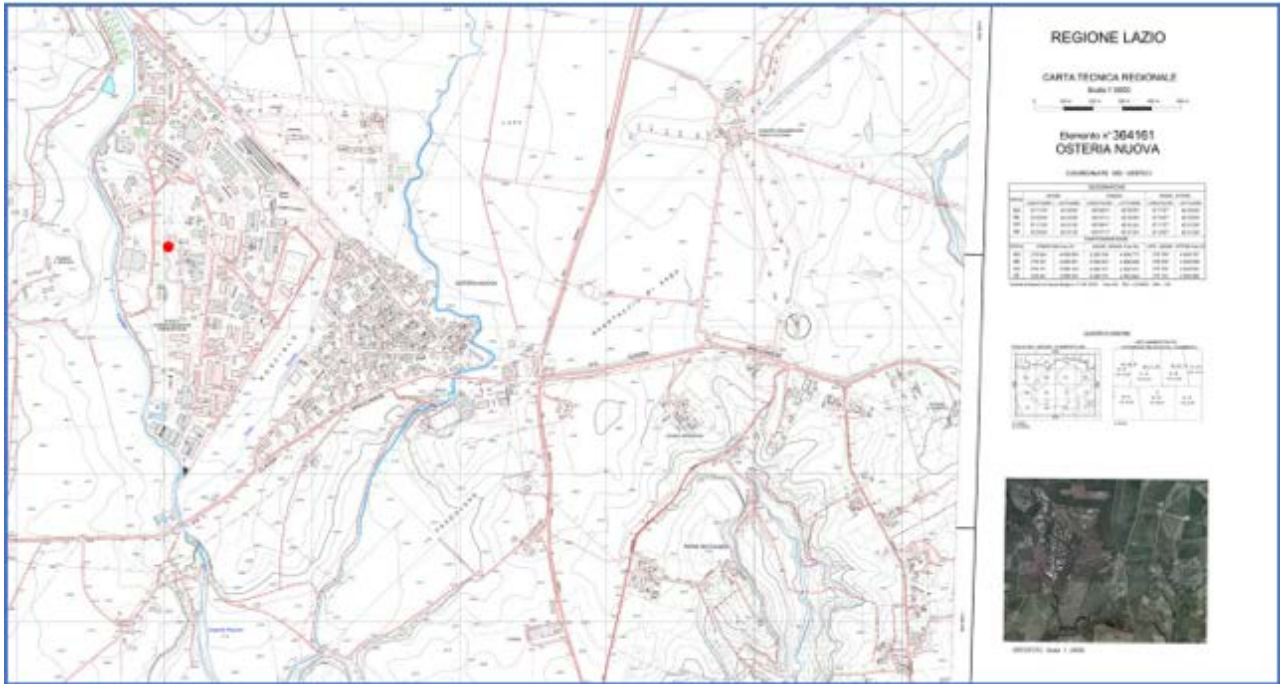


Figura 1. Foglio 364161 della Cartografia Tecnica Regionale del Lazio, in scala 1: 5.000 (in rosso ubicazione dell'area di studio)

In particolare, sono state eseguite cinque perforazioni e l'installazione di sonde geotermiche ha interessato quattro pozzi ad andamento verticale, a diversa profondità (85m, 70m, 50m, 35m) ubicate nel piazzale adiacente la porta carraia della hall dell'edificio F40 (Figura 2).

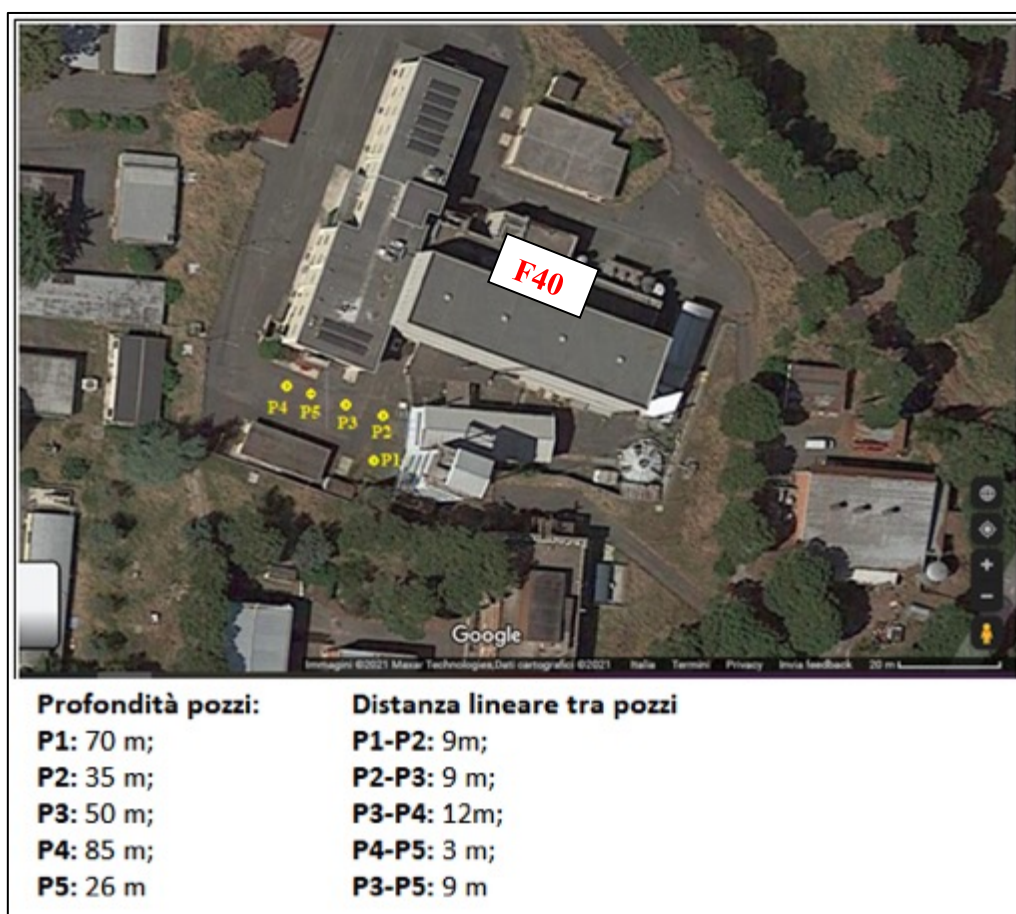


Figura 2. Ubicazione pozzi. Vista dall’alto

La messa in posa delle sonde geotermiche verticali in polietilene PN16, a circuito chiuso, con configurazione double U, è stata effettuata nel pozzo 1, 2, 3 e 4. Il pozzo 5, inizialmente doveva essere il pozzo 4, ma alla profondità di 30 m si è verificata la perdita del martello a fondo foro, per cui si è stati costretti ad abbandonare il pozzo. Pertanto in questo pozzo non sono state poste le sonde geotermiche ma il solo cavo di fibra ottica, fino alla profondità di 26 m, direttamente annegato nella malta cementizia, per le misure effettive delle temperature corrispondenti ai litotipi attraversati. Il pozzo 5 dista nove metri dal pozzo 3 e tre metri dal pozzo 4. La perforazione del pozzo 1, è stata effettuata a carotaggio continuo fino alla profondità di 100 m, al fine di ricostruire l’assetto litostratigrafico locale. Le sonde geotermiche sono state inserite fino alla profondità di 70 m, in quanto si ha avuto il problema di occlusione del fondo foro causato dallo sgrottamento delle sabbie. Inoltre, sul tale pozzo, è stato effettuato il Ground Response Test (GRT), della durata di 72 ore, al fine di definire con certezza il valore di conducibilità termica media dei terreni attraversati, nonché la temperatura indisturbata del sottosuolo e la resistenza termica delle sonde geotermiche. Gli altri quattro pozzi sono stati effettuati a distruzione di nucleo. La distanza reciproca tra i pozzi 1 - 2 e 2 - 3 è di 9 m, con disposizione a L (intersezione tra il pozzo 1 e i pozzi 3, 4 e 5 disposti sulla stessa linea del pozzo 2) e la distanza dal boccapozzo del pozzo 3 al 4 è di 12 m. Successivamente al carotaggio pari a 101 mm di diametro, il foro di ogni pozzo è stato alesato con tricono e vasche di recupero fino al diametro di 148 mm a circolazione d’acqua e predisposto all’installazione delle sonde geotermiche fornite in cantiere in PEAD PN16 in rotoli da 100 m. Le sonde sono state calate nei pozzi di perforazione tramite una zavorra del peso di 43 Kg, opportunamente agganciata alle sonde. Al fine di vincere la spinta idrostatica della falda, le sonde sono state riempite di acqua. Ad installazione effettuata, tramite il tubo getto inizialmente predisposto nel pozzo, è stata effettuata l’iniezione di malta cementizia costituita da una miscela di cemento e bentonite al 12%.

La bentonite conferisce alla miscela bassa permeabilità, permette l’isolamento dalle acque, e conferisce inoltre elevata elasticità al cemento e quindi scarsa fessurazione durante il “tiraggio”.

Ogni coppia di sonde geotermiche di ogni pozzo (16 tubi in totale) è stata convogliata all'interno dei moduli di cemento prefabbricati (35x35), opportunamente disposti in cavedi, fino al sito prescelto per l'installazione del collettore modulare. All'interno delle stesse trincee passano anche le fibre ottiche di ogni pozzo poste all'interno di corrugati, fino alla sala controllo. Ogni pozzo è dotato di pozzetti carrabili. In seguito, i tubi disposti nelle trincee sono stati avvolti da geotessile, e successivamente i cavedi riempiti di cemento fino al p.c.

2 Inquadramento generale

L'area di studio è compresa nel Distretto Vulcanico Sabatino, che si estende su di una vasta area del Lazio centro-settentrionale (Figura 3). Dal punto di vista strutturale, il Distretto Sabatino si è impostato su una struttura a graben [1] costituita da una vasta area sub-pianeggiante in cui affioravano sedimenti argilloso-sabbiosi di facies continentale e marina [2]. La struttura era limitata verso occidente dai rilievi dei Monti della Tolfa e dai domi acidi del Distretto vulcanico Tolfa-Ceriti-Manziana, la cui attività era da poco terminata, verso oriente dai rilievi sedimentari meso-cenozoici del Monte Soratte e dei Monti Cornicolani. Dati di sondaggi profondi indicano che nel settore centrale del graben principale erano presenti alti strutturali secondari, costituiti da rocce sedimentarie meso-cenozoiche, come quello di Cesano-Baccano attualmente sepolto sotto circa 200 m di prodotti vulcanici.

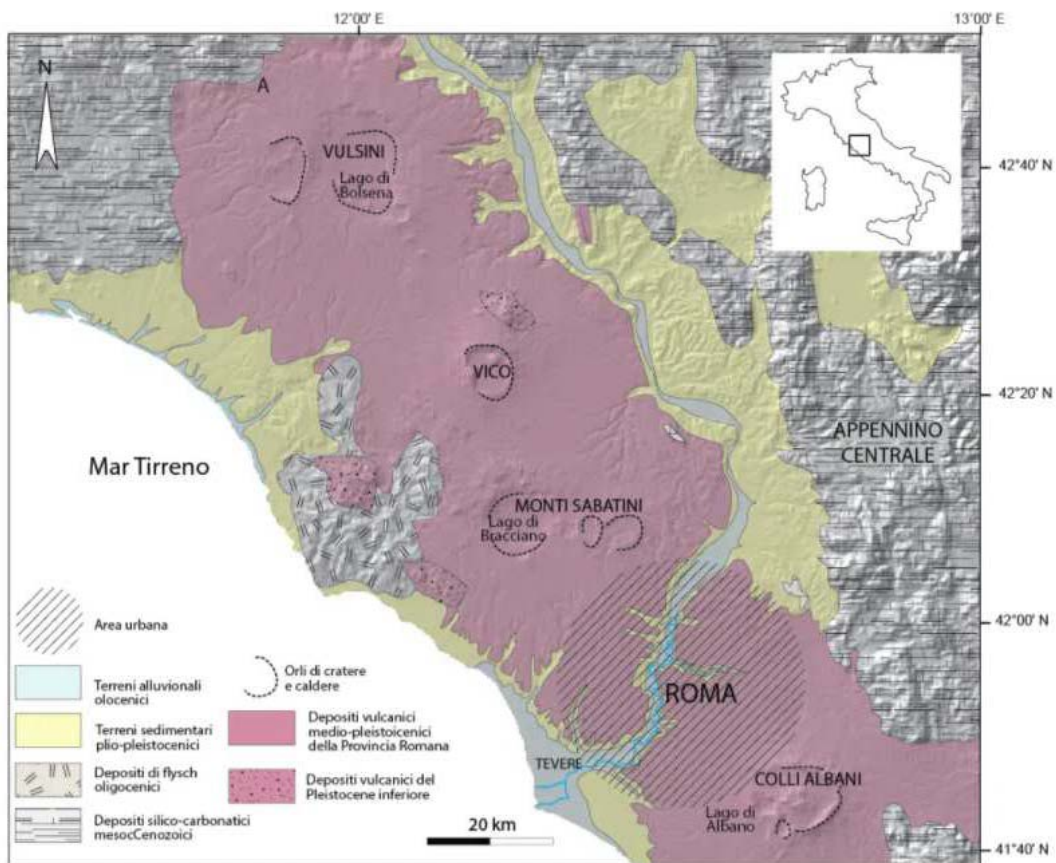


Figura 3. Aree vulcaniche laziali (da [3] modificata)

La struttura principale, con andamento prevalente NNW-SSE, si è imposta in seguito alla tettonica distensiva post-miocenica, conseguente all'evoluzione del bacino tirrenico [4]. Il complesso assetto strutturale è confermato, in superficie, dalla disposizione e dispersione dei prodotti dei centri eruttivi, sparsi su una vasta area, circa 1.600 km². L'attività vulcanica del Distretto Sabatino, di natura esplosiva, inizia circa 0,6 m.a. fa nel settore orientale a ridosso del Monte Soratte, dove si erige il primo edificio

vulcanico, Morlupo-Castelnuovo di Porto [1], ormai non più distinguibile. A tale fase appartengono la maggior parte dei prodotti, da trachitici a fonolitici, affioranti nel settore più orientale del Distretto. Successivamente l'attività migra verso ovest, con la formazione di un nuovo apparato centrale. Il maggiore centro oggi riconoscibile, ascrivibile a questa fase, è rappresentato dall'edificio vulcanico di Sacrofano in attività tra 0,5 e 0,36 m.a [1], situato poco ad est della dorsale di Baccano-Cesano, allora localizzata a quote elevate. Questo edificio è il più importante di tutto il Distretto Sabatino, sia per il volume di materiali eruttati, sia per la durata dell'attività. Probabilmente, erano attivi nello stesso periodo altri centri di emissione come Morlupo, ma la copertura dei prodotti successivi li rende oggi irriconoscibili. A questa prima fase di attività esplosiva dell'apparato vulcanico di Sacrofano, viene messa in relazione la deposizione dei "Tufi stratificati varicolori di Sacrofano" (parte basale delle "Piroclastiti di Sacrofano" [1], accumulatasi intorno a 0,5 m.a. fa (Figura 4). Contemporaneamente all'attività esplosiva, secondo gli Autori citati, tutta l'area Sabatina era interessata da un'attività fessurale con messa in posto di colate piroclastiche che, nella parte occidentale del Distretto Sabatino, sono rappresentate dal "Complesso dei Peperini Listati". Successivamente, intorno a 0,45 m.a., l'attività si concentra nel settore orientale e meridionale. Alcuni Autori [5] ascrivono a questa fase la messa in posto della colata piroclastica del "Tufo rosso a scorie nere" [1].

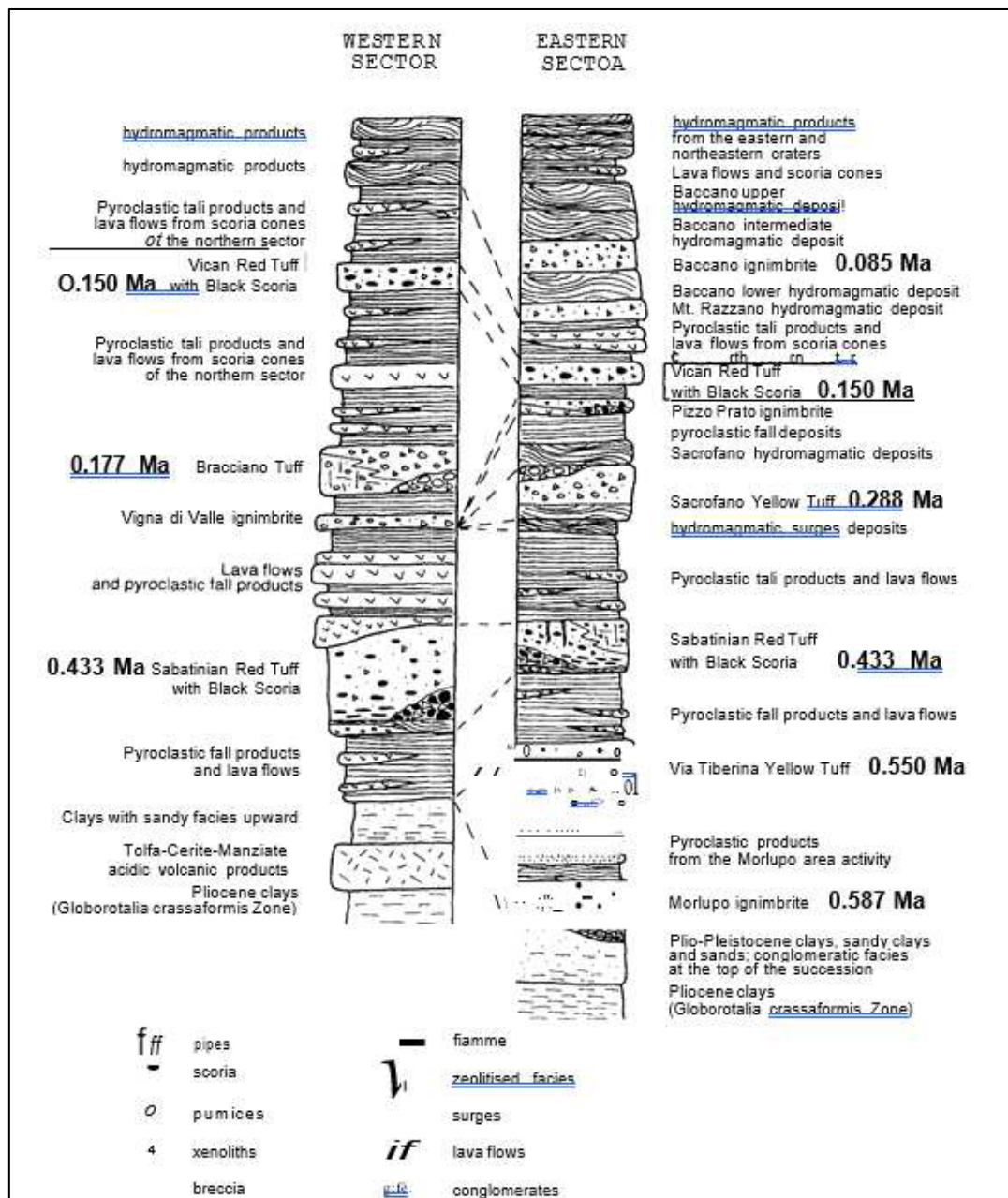


Figura 4. Schema stratigrafico del Distretto Vulcanico Sabatino [1]

Il “Tufo rosso a scorie nere” a chimismo alcalino-trachitico, è presente su quasi tutta l’area del Distretto Sabatino, con caratteri omogenei e spesso con notevoli spessori nelle aree paleomorfologicamente depresse.

A partire da circa 0,4 m.a. fa, l’apparato vulcanico di Sacrofano ebbe una nuova fase di attività parossistica, che diede origine ad ingenti quantità di prodotti di ricaduta. In un breve intervallo di tempo fu emesso circa il 15% dei prodotti dell’intero Distretto Sabatino, caratterizzati da un chimismo sottosaturo a forte componente potassica (tefritico-fonolitico e fonolitico-tefritico). Questa intensa attività, è messa in relazione da vari Autori con gli effetti del massimo stress della tettonica distensiva che in quel periodo controllava l’evoluzione del margine tirrenico della penisola. L’attività delle faglie regionali favorì l’ingente svuotamento delle camere magmatiche che causarono il collasso vulcanico-tettonico della conca del Lago di Bracciano e lo sprofondamento dell’alto strutturale di Baccano-Cesano [1].

A questa fase è possibile ricondurre la messa in posto dei “Tufi stratificati varicolori de’ La Storta” [6], che corrispondono alla parte alta delle “Piroclastiti di Sacrofano” [1]. In questo periodo l’attività vulcanica è

presente in tutti i settori del Distretto Sabatino: a N ed a S dell'attuale Lago di Bracciano, cospicue colate laviche furono emesse, da fratture di carattere regionale causate dal collasso vulcanico-tettonico della conca del Lago di Bracciano e da coni di scorie allineati lungo le stesse fratture. Queste colate risultano oggi intercalate a diverse altezze stratigrafiche nei Tufi stratificati varicolori de' La Storta. Alla fase parossistica dell'apparato vulcanico di Sacrofano segue la sua attività finale, a carattere essenzialmente idromagmatico con l'emissione, intorno a 0,36 m.a. fa, della colata piroclastica superiore [1] ed il suo collasso calderico.

Dal punto di vista idrogeologico, l'apparato vulcanico sabatino è caratterizzato da un esteso acquifero che ha sede nei prodotti vulcanici. Nella zona collinare sabatina si evidenzia la presenza di una falda basale, di rilevanza regionale, che circola nelle vulcaniti sabatine nella zona settentrionale e nelle formazioni sedimentarie quaternarie nella parte meridionale (complesso vulcanico-sedimentario). È stata considerata generalmente libera, anche se è nota la presenza di modeste falde sospese soprattutto nei livelli vulcanici (che aumenterebbero il grado di protezione della falda di base).

E' possibile distinguere i seguenti complessi idrogeologici:

- **Complesso delle lave, dei laccoliti e dei coni di scorie.** Il complesso è caratterizzato da valori di permeabilità mediamente elevata, ma sono presenti livelli cineritici e paleosuoli, anche di grande estensione, che determinano forti contrasti del valore di permeabilità verticale.
- **Complesso delle pozzolane.** Depositi di colata piroclastica generalmente massivi e caotici spesso litoidi. La permeabilità è variabile ma generalmente elevata per porosità. L'intercalazione di paleosuoli e orizzonti zeolitizzati determina contrasti di permeabilità che possono dare luogo a falde sospese o effimere.
- **Complesso dei tufi stratificati e delle facies freatomagmatiche.** Tufi stratificati, tufiti e tufi terrosi. Sono compresi depositi diatomiferi e lacustri, livelli di pomici e lapilli da grossolani a cineriti finissime e prodotti di alterazione. Nel complesso sono inclusi i prodotti delle manifestazioni eruttive finali costituite da breccie piroclastiche e tufi a varia granulometria. La permeabilità del complesso è mediamente bassa nell'ambito di uno schema di circolazione regionale.
- **Complesso delle sabbie:** costituito in ambiente marino e di transizione con livelli argillosi e localmente ghiaiosi, a permeabilità bassa.
- **Complesso dei depositi terrigeni:** Comprende il flysh oligocenico e le argille plioceniche e pleistoceniche. Il complesso è caratterizzato da una permeabilità assai bassa ed assolve alle funzioni di acquiclude nei confronti degli acquiferi sovrastanti.

3 Tecniche di perforazione utilizzate

La perforazione è stata eseguita con la trivella Beretta T44-GT (Figura 5), costituita da [7]:

- una testa rotante, battente, ad azionamento idraulico, a cui è collegata la batteria delle aste e la punta di perforazione;
- una torre di perforazione, dotata di un binario e di una catena per l'avanzamento della testa. In testa alla colonna è montato un organo per la movimentazione delle aste;
- una serie di ganasce, necessarie per la movimentazione delle aste, e dei rivestimenti;
- un quadro di comando,
- un corpo della macchina montato su cingoli.



Figura 5. Trivella Beretta T44/GT

L'avanzamento della perforazione avviene grazie alla disgregazione della roccia per azione meccanica, indotta dalla rotazione, dalla percussione e dalla pressione sulla punta. Quando la testa arriva a fine corsa, è necessario bloccare le aste tramite una coppia di ganasce (Figura 6), ruotare in senso inverso la testa per svitarla dall'asta, alzare la testa, inserire una nuova asta, riavvitare e infine riaprire le ganasce. Le aste, costituite da tubi metallici (Figura 7), subiscono il maggiore sforzo meccanico e presentano un diametro ridotto rispetto allo spessore delle pareti del foro. Su ciascun capo del tubo sono ricavati i filetti, necessari per congiungere le diverse prolunghe. Le aste utilizzate presentano una lunghezza pari a tre metri e un diametro di 76mm. Il pozzo 1 è stato effettuato a carotaggio continuo, per il prelievo del materiale, è stato utilizzato un carotiere del diametro di 101 mm (Figura 8). La perforazione è avvenuta a circolazione diretta di fluido con vasca di recupero (Figura 9), ovvero l'acqua è stata pompata all'interno delle aste di perforazione cave. La circolazione all'interno del foro è avvenuta dal basso verso l'alto, ciò ha permesso di lubrificare e raffreddare la trivella di perforazione, convogliare all'esterno i frammenti di roccia scavati, esercitare una contro pressione al fondo per contenere la fuoriuscita dei fluidi di strato ed evitare il rischio di eruzione di un pozzo (Blow Out), sostenere le pareti del foro, ed evitare che più falde venissero in contatto [8].

Successivamente al carotaggio continuo pari a 101 mm di diametro, il foro è stato alesato con tricono (Figura 10) fino al diametro di 148 mm a circolazione d'acqua e predisposto all'installazione delle sonde geotermiche fornite in cantiere in PEAD PN16 in rotoli da 100 m.

Gli altri quattro pozzi sono stati effettuati a distruzione di nucleo. È stata effettuata la perforazione ad aria compressa e martello fondo foro (Figura 11), che consiste nell'usare aria come fluido di estrazione. La rotazione è impressa dalla testa rotante della perforatrice mentre la percussione è azionata direttamente a fondo foro dalla stessa aria utilizzata per il raffreddamento del martello e per il trasporto dei detriti in superficie.

L'aria iniettata ad alta pressione nel terreno, produce una risalita tempestiva dei detriti e al contempo una perfetta pulizia del foro. Si è optati per tale metodologia di perforazione in quanto sono presenti terreni duri e compatti (lave e materiale tufaceo). È stata utilizzata acqua, aria miscelata a schiumogeno (Foamex TX). L'aria solleva i detriti, mentre la miscela di acqua e schiuma li rimuove velocemente.



Figura 6. Avanzamento delle aste di perforazione fino a fine corsa, coppia di ganasce per il blocco delle aste



Figura 7. Aste di perforazione



Figura 8. Carotiere per il prelievo del materiale



Figura 9. Vasca di recupero acqua di circolazione diretta



Figura 10. Tipo di tricono usato per l'alesatura del foro fino a 148 mm



Figura 11. Perforazione ad aria compressa miscelata a schiumogeno e martello fondo foro

4 Sonde geotermiche verticali

Le sonde geotermiche utilizzate, nel caso studio, hanno andamento verticale, lunghezza variabile e sono composte da una coppia di tubazioni a circuito chiuso, con configurazione double U (ovvero due tubi di mandata e due di uscita).

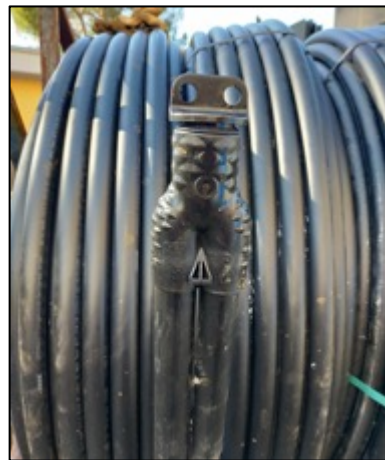
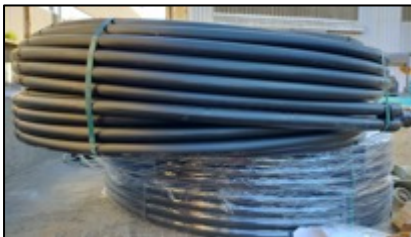
La sonda è un componente semplice dell'impianto, costituita da tre elementi fondamentali [7]:

- tubazioni;
- piede;
- materiale di riempimento.

E tre materiali ausiliari alla posa:

- tubo di iniezione;
- zavorra;
- distanziali.

Tubazioni: le sonde sono in polietilene, con diametro esterno di 32 mm (Figura 12). Il polietilene fa parte delle poliolefine, ovvero è un materiale composto solo da carbonio e idrogeno tramite il processo di polimerizzazione dal petrolio. Questo materiale plastico risulta maneggevole, flessibile e resistente alla corrosione. Gode di ottime caratteristiche meccaniche, di stabilità a lungo termine e presenta una ridotta scabrezza interna a cui consegue una bassa resistenza idraulica. Nello specifico sono state utilizzate tubazioni PN 16 che presentano un ottimo compromesso tra resistenza meccanica e scambio termico. Il campo di utilizzo del polietilene spazia da -60°C a $+70^{\circ}\text{C}$, e non rischia shock termici all'interno di questo campo di temperatura. Il diametro utilizzato è il D_e (diametro esterno) 32 mm, configurazione doppia U.



c)

Figura 12. Sonde geotermiche in polietilene PN 16, double U, c) piede della sonda)

La U di raccordo tra le tubazioni di mandata e ritorno al fondo della sonda geotermica prende il nome di piede della sonda. Il piede della sonda double U viene ancorato al peso zavorrato, di circa 43 kg (Figura 13), pronto per essere inserito all'interno del foro di perforazione. Contestualmente alle sonde geotermiche è stato inserito il tubo di iniezione cementizia, a perdere. La zavorra è necessaria per contrastare le spinte di galleggiamento qualora il foro sia pieno d'acqua. Ha la funzione di guida del piede all'interno del foro, e riduce il rischio di impuntamento contro le pareti del foro lungo la discesa.

Materiale di riempimento: è stata utilizzata la malta cementizia. Tramite il tubo getto in polietilene, messo in posto contemporaneamente alla messa in posa delle sonde geotermiche, è stata effettuata l'iniezione di malta cementizia costituita da una miscela di cemento e bentonite al 12%, dal basso verso l'alto (Figura 14).

La conducibilità della miscela cementizia, da letteratura, è pari a 1,2 W/mK, uguale alla conducibilità termica media dei terreni calcolata dal test Ground Response Test, effettuato sul pozzo 1.



a)



b - c)



d) tubo malta cementizia a perdere



e) tubo malta cementizia a perdere

Figura 13. a) Piede della sonde geotermica assemblata al peso zavorrato; b-c: peso zavorrato; d) calata in pozzo; e) tubo di malta cementizia nel pozzo



Figura 14. Cementazione del foro con malta cementizia

Distanziali: sono piccoli stampi in plastica di forma atta a mantenere in posizione corretta il pacchetto dei tubi di cui sono composte le sonde (Figura 15). Possiede quattro sedi per le tubazioni principali e una per il tubo di iniezione della malta cementizia. Sono ad incastro, per cui vengono fissati durante la posa delle sonde, man mano che si scende in profondità. Nel nostro caso, è stata scelta una interdistanza di posa di circa un metro.



Figura 15. Distanziale utilizzato

Infine, le coppie di sonde geotermiche double U di ogni pozzo (16 tubi in totale) sono state incanalate all'interno di canaline di cemento prefabbricati (35x35), opportunamente disposti in cavedi, fino al sito prescelto per l'installazione del collettore modulare. All'interno delle stesse trincee passano anche i fasci delle fibre ottiche provenienti dai cinque pozzi, opportunamente poste all'interno di corrugati, fino alla

sala controllo (Figura 16). Ogni pozzo è dotato di pozzetti carrabili. In seguito, i tubi disposti nei cavedi sono stati coperti da geotessile, e successivamente riempiti di cemento fino al piano strada (Figura 17).



Cavo fibre ottiche



Ingresso cavi fibre ottiche nella sala controllo



Uscita di ogni coppia di tubi per ogni pozzo al collettore

Figura 16. Sonde geotermiche e corrugato contenente la fibra ottica raccordati nei cavedi orizzontali fino al sito prescelto del collettore, adiacente la sala controllo



Figura 17. Vista dall'alto campo geosonde

5 Sondaggio geognostico

La stratigrafia locale è stata ricostruita dalle evidenze del sondaggio geognostico effettuato nel pozzo 1 fino alla profondità di 100 m. Il sondaggio ha attraversato la successione vulcanica sabatina, caratterizzata da una alternanza di tufi da terrosi a litoidi e lave tefritico-fonolitiche da fratturate (parte alta) a compatte (parte bassa). Infine, dopo aver attraversato la Formazione dei Tufi Varicolori di Sacrofano (parte basale della successione Sabatina), la parte basale del carotaggio ha interessato la serie sedimentaria continentale appartenente al "Galeriano" (sabbie limose) fino ad intestarsi nella parte alta delle argille plio-pleistoceniche di origine marina. Il materiale oggetto di carotaggio continuo è stato conservato in circa 20 cassette catalogatrici (da Figura 18 a Figura 22). Nell'area di studio, la falda principale si attesta intorno ai 114 m s.l.m. e a 34 m di profondità dal p.c, ovvero alla base delle lave tefritico-fonolitiche. La temperatura misurata con termofreatimetro si attesta, a foro libero, a circa 17 °C. Tale temperatura trova riscontro con il valore registrato nello stesso pozzo 1 (profondità di 70m), durante il Ground Response Test (GRT) registrando una temperatura media all'equilibrio del terreno indisturbato pari a 17.67 °C.

La successione stratigrafica è descritta di seguito, partendo dai termini più antichi fino ai più recenti (Figura 23):

- **substrato prevulcanico (da 47 a 64,5 m s.l.m.; da 82,5 m a 100 m):**

- **argille-limose:** dello spessore di 6,5 m; si presentano consistenti, debolmente plastiche, di colore prevalentemente grigio - verdastre subordinatamente marrone chiaro e avana. Tra 95.30 a 96.60 m presenta di materiale organico vegetale nerastro.

- **sabbie limose:** dello spessore di 11 m; si presentano incoerenti, di colore da marrone-giallastro a grigio.

Questi sedimenti sono riconducibili ad un ambiente deposizionale costiero con frequenti passaggi a facies di laguna, evolutosi tra il Pliocene superiore ed il Pleistocene inferiore;

- **tufi varicolori di Sacrofano (da 64,5 a 76 m s.l.m.; da 71 m a 82,5 m):** dello spessore di 11,5 m. I tufi si presentano incoerenti, di colore variabile da rossastri a marrone chiaro. Sono costituiti da cenere grossolana, subordinatamente fine, con diffusi lapilli e pomici gialle spesso organizzati in livelli a diversa granulometria dello spessore da centimetrico a decimetrico, livelli vulcano-clastici rimaneggiati. Diffusi i cristalli di leucite alterata in analcime e frammenti di cristalli di pirosseno. I primi metri della successione vulcanica sono caratterizzati dalla presenza di epivulcaniti costituite da ceneri vulcaniche fini e limi argillosi con minerali vulcanici, potrebbero essere correlati con i con i "Tufi stratificati varicolori di Sacrofano";

- **tufo rosso a scorie nere (da 76 a 92 m s.l.m.; da 55 m a 71 m):** dello spessore di 16 m. Costituito da lapilli e pomice nere immerse in matrice cineritica grossolana, poco coerente di colore da giallo a marrone-rossastro;
- **tufo superiore (da 92 a 104 m s.l.m.; da 43 a 55 m):** dello spessore di 12 m. I tufi si presentano di colore marrone scuro con lapilli e scorie, presenza di bombe vulcaniche. Nella parte alta i tufi si presentano di colore rossastro ricchi di materiali femici e presenza di lapilli. Nel complesso è caratterizzato da un'alternanza di strati e lenti di natura eterogenea, costituito in prevalenza da materiale vulcanico di origine piroclastica. Spesso sono presenti frequenti ed improvvisi passaggi verticali e laterali tra un litotipo e l'altro, il che conferisce una certa complessità anche dal punto di vista della circolazione delle acque sotterranee. La parte bassa di questa unità è correlabile con i "Tufi stratificati varicolori de' La Storta", mentre non è da escludere che le facies granulari stratificate talora presenti al tetto dell'unità possano essere attribuite a fasi idromagmatiche successive;
- **tufi granulari (da 104 a 110,5 m s.l.m.; da 36,5 m a 43 m):** dello spessore di 6,5 m. Il tufo granulare si presenta di colore da grigio a verdastro argillificato, organizzato in livelli a diversa granulometria, dai lapilli alla cenere grossolana e, subordinatamente, fine. All'interno di questo litotipo sono riconoscibili abbondanti pomice gialle e scorie nere di piccole dimensioni;
- **pozzolane (da 110,5 a 113,5 m s.l.m.; da 33,5 m a 36,5 m):** dello spessore di 3 m. Pozzolane di colore marrone scuro da grossolane a fini con lapilli e piccoli livelli di litoidi nerastrati (0,5-1 cm).
- **lave leucitiche (da 113,5 a 124,5 m s.l.m.; da 22,5 m a 33,5 m)** (Figura 24): dello spessore di 11 m. Alla base lave leucitiche di colore grigio a frattura concoide, con cristalli translucidi di leucite (Figura 8). La parte alta si presenta maggiormente fratturata con evidenti depositi di ferro e manganese. Presenti concrezioni di cristalli di sale, per circolazione di acque. Alla profondità di circa 29 m dal p.c. risulta molto più compatta e meno fratturata. Presenti piccoli livelli intermedi di piroclastiti con granulometria media di colore marrone.
- **piroclastiti (da 124,5 a 130 m s.l.m.; da 17 m a 22,5 m):** dello spessore di 5,5 m. Alla base è presente un livello litoide di pozzolane cementate di colore verdastro, con inclusi di leucite. La piroclastite si presenta granulare e di colore nerastra, con lapilli e rare bombe laviche in matrice di cenere grossolana. Alla profondità di 20 m dal p.c. aumenta la granulometria e sono presenti lapilli e blocchi litoidi con presenza di cristalli di leucite.
- **tufi terrosi (da 130 a 146,5 m s.l.m.; da 0,50 m a 17 m):** dello spessore di 16,5 m. Nella parte basale il tufo si presenta a granulometria grossolana di colore marrone intenso con all'interno pomice giallastre, e inclusioni lapidee coerenti. Frequenti scorie nere carboniose, presenza di argillificazione. Nella parte alta il tufo terroso è di colore da marrone a marrone chiaro a diversa granulometria, al letto mediamente grossolana passante a fine verso la base. Diffusi inclusi litici da 0,5 a 1,5 cm di diametro, presenza di leucite analcimizzata, presenza di alterazione diffusa per argillificazione. Rari piccoli livelli cementati.



Figura 18. Materiale di carotaggio raccolto in cassette catalogatrici (da 0 m a 20 m)



Figura 19. Materiale di carotaggio raccolto in cassette catalogatrici (da 20 m a 40 m)



Figura 20. Materiale di carotaggio raccolto in cassette catalogatrici (da 40 m a 60 m)

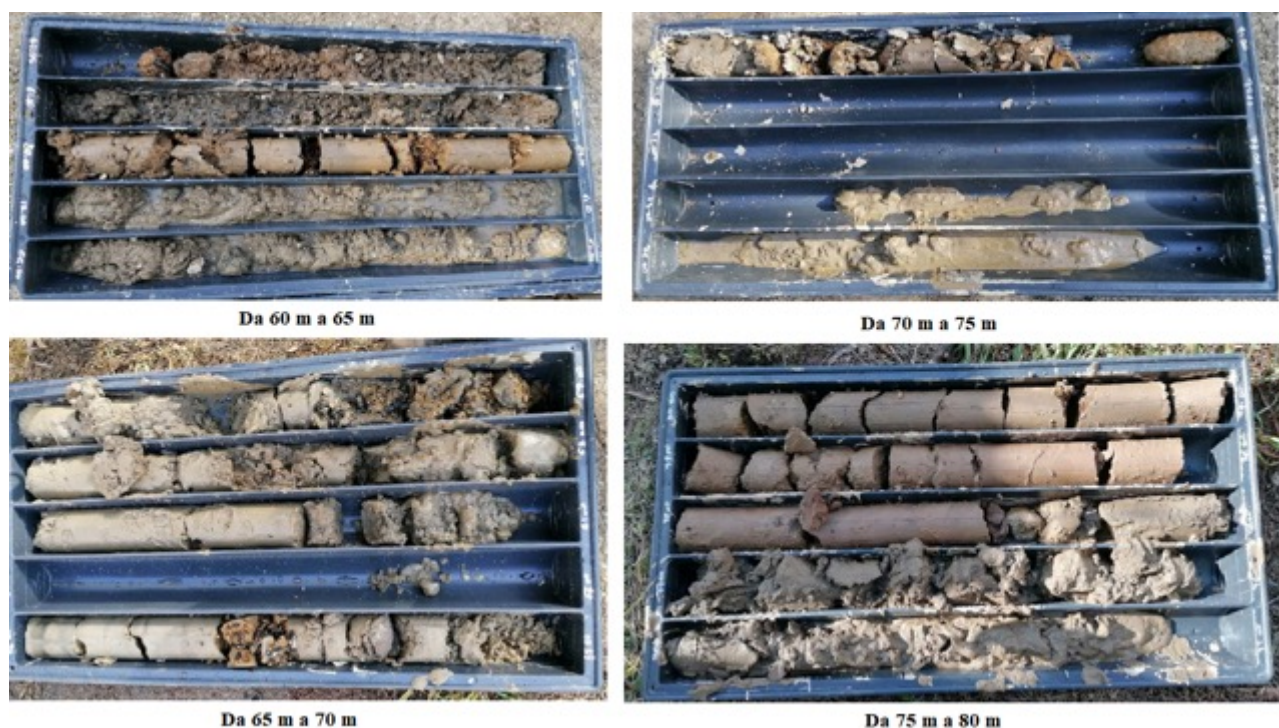


Figura 21. Materiale di carotaggio raccolto in cassette catalogatrici (da 60 m a 80 m)



Figura 22. Materiale di carotaggio raccolto in cassette catalogatrici (da 80 m a 90 m)



Servizi Tecnici per
l'ingegneria & l'ambiente

MISE-ENEA

ENEA - Centro Ricerche Casaccia (RM)

SONDAGGIO **POZZO 1**

PROJECT INFORMATION	DRILLING INFORMATION
PROGETTO Campo Geotermico	MACCHINA Beretta
LOCALITA' ENEA - Centro Ricerche	METODO Carotaggio continuo
LAVORO 125-24-2021	DIAMETRO 101 mm
GEOLOGO Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE 100 m
IMPRESA PERFOR SRL	QUOTA 147 m s.l.m.
DATA 15-02-2021	

NOTE:

Materiale in 20 cassette catalog.

■ Campione indisturbato □ Campione rimaneggiato
▼ Livello freatico

Pag. 1 di 3






Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
147				0
146		(147.00 - 146.50) Asfalto e riempimento costituito da massetto in cemento.		-1
145				-2
144		(146.50 - 137.00) Tufo terroso da marrone a marrone chiaro a diversa granulometria al tetto mediamente grossolana passante a fine verso la base. Diffusi inclusi litici da 0.5 a 1.5 cm di diametro, presenza di leucite analcimizzata, quindi presenza di alterazione diffusa per argillificazione. Rari piccoli livelli cementati.		-3
143				-4
142				-5
141				-6
140				-7
139				-8
138				-9
137				-10
136		(137.00 - 130.00) Tufo terroso di granulometria grossolana marrone intenso con interno pomice giallastre a granulometria grossolana con inclusi lapidei mediamente coerente. frequenti scorie nere carboniose presenza di argillificazione.		-11
135				-12
134				-13
133				-14
132				-15
131				-16
130				-17
129		(130.00 - 125.00) Piroclastite granulare nerastra, con lapilli e rare bombe laviche (18.80-19.00) in matrice di cenere grossolana alla profondità di 20.00 m aumento della granulometria e lapilli e blocchi litici con cristalli di leucite.		-18
128				-19
127				-20
126				-21
125		(125.00 - 124.50) Livello litoide di pozzolane cementate verdastre con inclusi leucitici. Probabile livello oggetto di cementazione per idrotermalismo??		-22
124				-23
123				-24
122		(124.50 - 113.50) Lave leucitiche grigie a frattura concoide, con cristalli traslucidi di leucite. La parte sommitale si presenta maggiormente fratturata con evidenti depositi di Ferro e Manganese e concrezioni di cristalli di sale per evidente circolazione di acque. Alla profondità di circa 29.00 m risulta molto più compatta e con minor fratturazione. Piccoli livelli intermedi piroclastici con granulometria media di colore marrone tra 23.50-23.70 e 25.50-25.70.		-25
121				-26
120				-27
119				-28
118				-29
117				-30
116				-31
115				-32
114				-33
113		(113.50 - 110.50)		-34

PROJECT INFORMATION		DRILLING INFORMATION	
PROGETTO	Campo Geotermico	MACCHINA	Beretta
LOCALITA'	ENEA - Centro Ricerche	METODO	Carotaggio continuo
LAVORO	125-24-2021	DIAMETRO	101 mm
GEOLOGO	Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE	100 m
IMPRESA	PERFOR SRL	QUOTA	147 m s.l.m.
DATA	15-02-2021		

NOTE:
Materiale in 20 cassette catalog.

■ Campione indisturbato □ Campione rimaneggiato
 ➤ Livello freatico

Pag. 1 di 3

Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
112		Pozzolane di colore marrone scuro molto grossolane a fini con lapilli e piccoli livelli di 0.5-1 cm litoidi nerastri.		-35
111				-36
110		(110.50 - 104.00) Tufi granulari da grigio a verdastri argillificati.....		-37
109				-38
108				-39
107				-40
106				-41
105				-42
104				-43
103		(104.00 - 95.20) Tufi rossastri ricchi di minerali femici e lapilli		-44
102				-45
101				-46
100				-47
99				-48
98				-49
97				-50
96				-51
95		(95.20 - 92.00) Tufi di colore marrone scuro con lapilli e scorie presenza di bombe vulcaniche.		-52
94				-53
93				-54
92		(92.00 - 76.00) Tufo rosso a scorie Nere		-55
91				-56
90				-57
89				-58
88				-59
87				-60
86				-61
85				-62
84				-63
83				-64
82				-65
81				-66
80				-67
79				-68




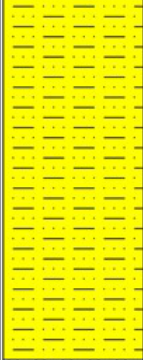
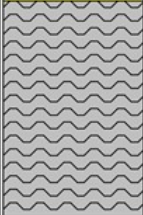
PROJECT INFORMATION		DRILLING INFORMATION		
PROGETTO	Campo Geotermico	MACCHINA	Beretta	
LOCALITA'	ENEA - Centro Ricerche	METODO	Carotaggio continuo	
LAVORO	125-24-2021	DIAMETRO	101 mm	
GEOLOGO	Geol. A. FABRIZI	PROF. TOTALE	100 m	
IMPRESA	PERFOR SRL	QUOTA	147 m s.l.m.	
DATA	15-02-2021			
NOTE: Materiale in 20 cassette catalog.		■ Campione indisturbato □ Campione rimaneggiato		
		✚ Livello freatico	Pag. 1 di 3	
Prof. s.l.m.	Litologia	DESCRIZIONE	Piezometro	Falda
78		(76.00 - 64.50) Tufi Varicolori di Sacrofano grossolani, con colori variabili da rossastri a marrone chiaro. Presenza di piccole pomici giallastre.		-69
77				-70
76				-71
75				-72
74				-73
73				-74
72				-75
71				-76
70				-77
69				-78
68	-79			
67	-80			
66	-81			
65	-82			
64		(64.50 - 53.50) Limi sabbiosi mediamente grossolani ma omogenei di colore avana-marroni con fiamme oca. Origine continentale mediamente addensati. a 92.60 passaggio con granulometria decrescente verso le argille plio-pleistoceniche grigie di origine marina. I limi sfumano verso le argille con una sequenza quasi lineare.		-83
63				-84
62				-85
61				-86
60				-87
59				-88
58				-89
57				-90
56				-91
55				-92
54	-93			
53		(53.50 - 47.00) Argille plio-pleistoceniche grigio verdastre omogenee e plastiche. livello organico vegetale nerastro tra 95.30 e 95.60		-94
52				-95
51				-96
50				-97
49				-98
48				-99
47	-100			

Figura 23. Successione litostratigrafica del pozzo 1



Figura 24. Lava tefritico – fonolitica

6 Test risposta termica

Il Test di Risposta Termica (o Ground Response Test) è una prova di risposta del terreno ad una sollecitazione termica, finalizzato alla valutazione delle proprietà termotecniche del terreno stesso.

Il test si effettua tramite una sonda geotermica e serve per determinare alcune proprietà termiche del terreno, quali:

- temperatura indisturbata,
- conducibilità termica (λ);
- resistenza termica della sonda (R_b).

La prova va eseguita imponendo al sistema sonda geotermica-terreno, a mezzo di resistenze elettriche, un flusso termico controllato e costantemente misurato. La prova viene condotta su una sonda pilota che al termine del test sarà parte integrante del campo sonde previsto. Nel caso studio, la prova è stata effettuata sul pozzo 1.

Il test è stato effettuato tramite l'apparecchiatura portatile GEOgert 2.0 (Figura 25), per testare le sonde geotermiche (prova in pressione, test di flusso, misura della temperatura indisturbata del terreno).



Figura 25. Strumentazione GEOgert 2.0 (I modulo)

GEOgert 2.0: è costituita da due moduli (Figura 26).

Il modulo di misura (Figura 25) comprende:

- un circuito idraulico costituito da un circolatore ed una serie di valvole di regolazione, intercettazione e sicurezza;
- un sistema di misurazione costituito da due sonde di temperatura PT100 per il fluido, una sonda di temperatura PT100 per l'aria esterna, un misuratore di portata elettromagnetico e un trasmettitore di pressione piezoresistivo;
- un sistema di acquisizione e memorizzazione dati.

Il secondo modulo è specifico per l'esecuzione del GRT e comprende (Figura 26):

- un boiler dotato di tre resistenze elettriche (due da 3,5 kW e 1 kW);
- un circuito idraulico costituito da un circolatore, un vaso di espansione ed una serie di valvole di intercettazione e sicurezza.



Figura 26. Due moduli della strumentazione GEOgert 2.0

Di seguito si riporta il datasheet della macchina (Tabella 1) e le schede tecniche degli strumenti principali di misura (Tabella 2).

Datasheet minimale della macchina

- **Sonde:** Singola o doppia U, adattabile a sonde concentriche
- **Diametri:** De25, De32, De40 e De50 mm, adattabile ad altri diametri
- **Materiali:** Precaricati i dati relativi a HDPE PN16, HDPE PN10, HDPE-RC PN16; adattabile agli altri materiali
- **Produttore sonda:** Indifferente
- **Lunghezza sonde:** da 20 a 500 m di standard
- **Massima pressione di test di tenuta:** 16 bar
- **Massima portata in GRT:** 2300 l/h
- **Potenza elettrica massima modulo GRT:** 8 kW
- **A/D converter:** 24 bit
- **Frequenza di campionamento:** da 2 secondi in su
- **Precisione misura scambio termico:** 1-3% a seconda della configurazione
- **Procedure di misura automatizzate:**
 - Pressione: ex SIA 384:6/2010; UNI 11467:2012;x legge Regione Lombardia
 - Flusso: UNI 11467:2012; ex SIA 384:6/2010
 - GRT: UNI 11467:2012; ex legge Regione Lombardia
- **Comunicazione tra i moduli:** wireless
- **Comunicazione telefonica:** GSM con scheda SIM
- **Allacciamento elettrico:**
 - Modulo 1: presa CEI 230 V 16A (industriale blu monofase)
 - Modulo 2: presa CEI 400 V 32A pentapolare (industriale rossa piccola 5 poli)

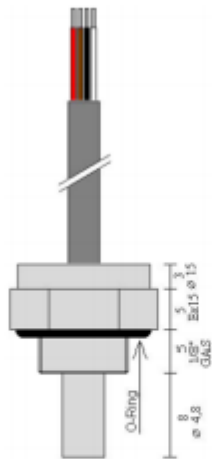
Tabella 1. Datasheet della macchina

Misuratore di portata elettromagnetico



Descrizione generale	Misuratore di portata elettromagnetico
Range temperatura ambiente	-40... +60°C
Range temperatura di stoccaggio	-50... +70°C
Pressione massima di esercizio	16 bar
Errore massimo di misura	± 0,2 % dal valore di misura + 1 mm/s

Sonda di temperatura



Descrizione generale	Sonda a immersione, a elevatissima precisione, per misura della temperatura
Tipo di sensore	RTD PT100 cl. 1/3 DIN
Range di temperatura	55/+110°C
Tempo di risposta (in liquido agitato)	≤ 10 sec.
Resistenza di isolamento	≥ 20MΩ
Risoluzione	< 0.01 °C

Trasmittitore di pressione



Valore di fondo scala (VFS)	25 bar, relativi
Sovrappressioni	90 bar, relativi
Precisione (% del VFS)	≤ 0,25
Calibrazione	Su punti limite secondo DIN 16086
Ripetibilità	≤ 0,15% VFS
Deriva termica	≤ 0,03%VFS/°C
Deriva annuale	≤ 0,2%VFS
Temperatura del fluido di processo	-25 ... +85 °C
Temperatura ambiente	-25 ... +85 °C
Temperatura stoccaggio	-25 ... +85 °C
Tempi di risposta (10...90%)	< 3 ms
Campo di temperatura compensato	0... +80°C
Sensore di misura	Piezoresistivo
Liquido di riempimento	Olio siliconico

Tabella 2. Schede tecniche degli strumenti di misura

Il test è durato di 72 ore, in accordo con le norme UNI - Geotermia 11467:2012 e la SIA 384/6:2010, e ha permesso di misurare costantemente la potenza scambiata dalla sonda con il terreno. Inoltre, una prima fase di misurazione è stata condotta senza l'utilizzo delle termoresistenze; ciò ha permesso di valutare la temperatura media del terreno indisturbato, valutandone così l'influenza delle eventuali falde.

Misurata la potenza totale fornita al fluido termovettore attraverso le resistenze elettriche e la pompa, e note le temperature di ingresso e di uscita delle sonde, è stato possibile determinare il coefficiente di scambio termico per unità di lunghezza della sonda (W/mK).

Data la natura vulcanica dei terreni presenti nel sottosuolo, è stata stimata una capacità termica volumica pari a 2,6 MJ/(m³K).

Procedura di cantiere

La strumentazione per il test è stata posizionata in prossimità delle sonde verticali del pozzo 1, in data 12/04/2021. Si è proceduti all'allacciamento dei tubi e al riempimento del circuito con acqua.

I tubi di raccordo della strumentazione sono stati connessi alle due coppie di sonde getermiche (Figura 27), dopodichè è stata testata la connessione tra pc e datalogger per l'acquisizione a intervalli regolari di 17 sec. E' stata effettuata l'analisi della "temperatura indisturbata del terreno" e un "il test di flusso" al fine di verificare il corretto funzionamento della sonda geotermica di prova.

La temperatura di riferimento per il terreno è stata determinata mediante circolazione di acqua senza immissione di calore. In seguito alla prova di tenuta idraulica, è stata determinata la potenza massima della caldaia (7.5 kW_t), valore assunto simile al comportamento reale della pompa di calore. In seguito all'elaborazione dei dati, si osserva che la potenza termica realmente fornita al fluido è stata di **3,7 kW_t**.

Il sistema fornisce una potenza termica costante e nota al flusso, e contemporaneamente, registra le informazioni circa la temperatura del fluido stesso in ingresso e uscita della sonda geotermica. La macchina di prova utilizzata (di proprietà Unigeo srl) è dotata di 3 resistenze che consentono di modulare la potenza elettrica del boiler, in modo da potersi adattare al meglio a sonde geotermiche di diversa lunghezza.



TIPO DI SONDA (4 tubi)	Doppia U
PROFONDITA' [m]	70
DIAMETRO DEI TUBI [mm]	32
DIAMETRO PERFORAZIONE [mm]	180
MISCELA DI RIEMPIMENTO FORO	Cemento e Bentonite
DENSITA' GRADUING	Circa 1.500 Kg/m ³
DATA DI CEMENTAZIONE	22/02/2021



Figura 27. Apparecchiatura strumento GEOgert 2.0 collegata alle sonde geotermiche del pozzo 1 e caratteristiche delle sonde

Basi teoriche

La differenza tra la temperatura in ingresso e uscita dalla sonda dipende dallo scambio termico con il terreno, ovvero dalla conducibilità dei terreni attraversati, dal materiale di riempimento e dal materiale di cui è costituita la sonda. Viste le caratteristiche geometriche del sistema, il corpo emettitore di calore (il tubo riempito con il fluido termovettore) viene di norma assimilato ad un filo di lunghezza infinita. In

queste condizioni, il trasferimento di calore intorno alla sorgente avviene principalmente secondo la modalità radiale (ipotesi di sorgente termica lineare) ed è governato dall'Equazione 1) [9] che riguarda l'evoluzione nel tempo della temperatura media del fluido circolante in sonda:

$$T_f(t) - T_m = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln(t) + Q \left[R_b^* + \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln\left(\frac{4a}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \right] \quad 1)$$

Dove:

- $T_f(t)$: temperatura media del fluido in funzione del tempo t , in °C;
- T_m : temperatura indisturbata del terreno, in °C;
- t : tempo in s;
- Q : potenza termica lineare iniettata nella sonda, in W/m;
- r_b : raggio della perforazione, in m;
- a : diffusività termica del terreno, in m^2/s , calcolata come $\lambda / (\rho \cdot C)$ dove ρ è la densità in kg/m^3 del suolo, C è la capacità termica massica in J/kg/K;
- γ : costante di Eulero, pari a 0,5772;
- λ : conducibilità termica del terreno, in W/m/K;
- R_b^* : resistenza termica della perforazione, in m^2K/W .

È evidente come la temperatura del fluido dipenda linearmente dal logaritmo del tempo secondo un coefficiente angolare definito dal parametro ϕ come da Equazione 2 [10]:

$$\phi = \frac{Q}{4\pi\lambda} \quad 2)$$

Determinazione in situ delle variabili

Nella Equazione 1 tutte le grandezze sono determinabili "in situ" con semplici procedure, a parte le due incognite, che sono la conducibilità termica del terreno (λ), e la resistenza termica della sonda posata nel foro (R_b^*).

Le altre variabili vengono determinate con la seguente procedura:

- $T_f(t)$: viene calcolata come media aritmetica istantanea tra la temperatura del fluido di ingresso e quella di uscita dalla sonda;
- T_m : viene stabilita all'inizio del test con la misura della temperatura indisturbata del terreno;
- a : stimata sulla base di valori medi di conducibilità, densità e capacità termica riscontrabili in letteratura in base ai dati geologici del sito;
- Q : misurata tramite contatore di energia elettrica consumato dalla resistenza del boiler, in W/m.

Poiché l'onda termica si muove nel terreno con velocità molto bassa, sono stati esclusi i primi risultati ottenuti, in quanto sono imputabili al materiale di riempimento e non al terreno. Non essendo perfettamente nota la posizione delle tubazioni nel foro, si assume come tempo minimo significativo quello necessario affinché l'onda termica attraversi un percorso almeno pari al raggio del foro di perforazione. Tale tempo è espresso dalla relazione 3):

$$t > \frac{5r_b^2}{a} \quad 3)$$

Misurato l'andamento delle temperature in ingresso e uscita nel tempo, e rappresentatolo su piano logaritmico, è possibile determinare ϕ e p dall'equazione 4):

$$T_f(t) = \phi \ln(t) + p \quad 4)$$

Si utilizza il coefficiente ϕ per trovare il valore effettivo di conducibilità λ_{eff} tramite l'Equazione 2. Il valore della conducibilità λ_{eff} consente infine di stimare la resistenza termica effettiva della sonda posata e cementata R_b^* , utilizzando la seguente relazione 5) ricavata dall'Equazione 1:

$$R_b = \frac{1}{Q} (T_f - T_m) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\lambda}{r_b^2}\right) - \gamma \right) \quad 5)$$

Validità dei risultati

Il test direttamente effettuato in situ presenta due vantaggi fondamentali rispetto a un test effettuato in laboratorio su campioni di terreno. Uno è la stima sul campo della resistenza termica della sonda; l'altro risiede nel fatto che i risultati contemplano intrinsecamente l'influenza dell'acqua di falda, altrimenti impossibile da stimare. La presenza di una massa d'acqua nel terreno provoca, in presenza di calore, un moto convettivo che va a lambire le pareti della perforazione migliorandone indubbiamente il coefficiente di scambio termico.

La velocità del flusso dell'acqua dipende principalmente dal gradiente idraulico e dalla conducibilità idraulica (misurata in m/s) del tipo di suolo attraversato. La conducibilità termica calcolata con il test è quella effettiva della sonda; essa rappresenta il valore medio di conducibilità del terreno intorno al foro, includendo l'eventuale influenza delle falde acquifere, delle fratture nel sottosuolo, ecc.

La resistenza termica della sonda non dipende solo dai materiali utilizzati ma anche dalle condizioni di posa (disposizione dei tubi all'interno del foro, franamenti con conseguente aumento del diametro reale di perforazione, riempimento poroso o non completo). Pertanto, per tali ragioni si considera un fattore di sicurezza del 10 % sui risultati.

6.1. Temperatura indisturbata del terreno

La misura della temperatura indisturbata del terreno viene eseguita facendo circolare il fluido termovettore all'interno della sonda senza attivare le resistenze elettriche. Pertanto, l'acqua raggiunge l'equilibrio termico con ciò che la circonda e, quindi, circa alla stessa temperatura del terreno (Tabella 3). A questa misura viene accoppiato il profilo termico lungo la sonda e dalle due sequenze di dati si risale infine al valore cercato (Figura 28).

Profilo di temperatura	
<u>Durata totale della prova:</u>	8.0 min
<u>Tempo di campionamento:</u>	2 s
Risultati circuito 1:	
Temperatura media discesa	17.39 °C
Temperatura media totale	17.58 °C
Risultati circuito 2:	
Temperatura media discesa	17.65 °C
Temperatura media totale	17.71 °C

Tabella 3. Profilo di temperatura

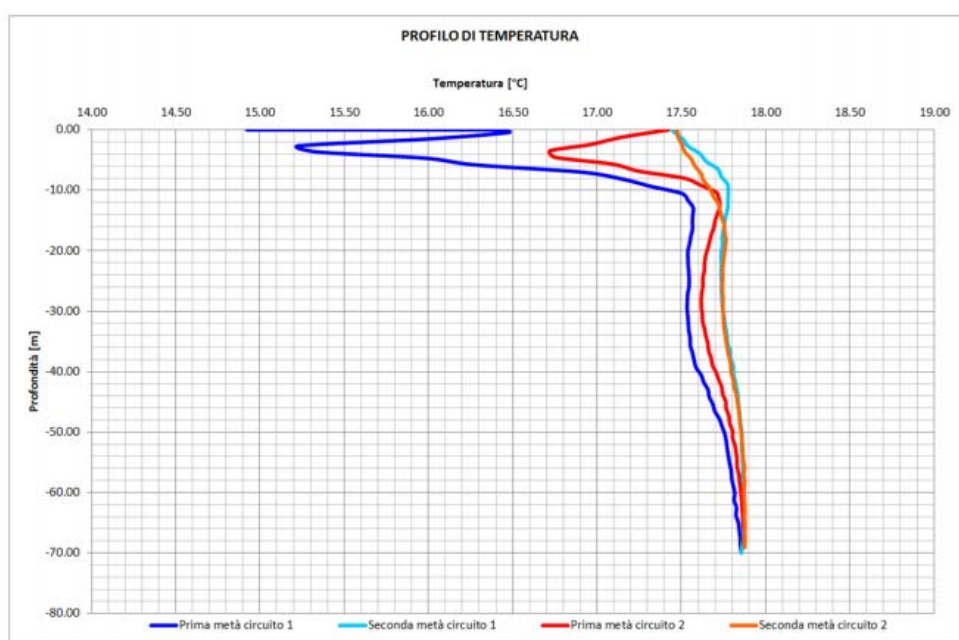


Figura 28. Profilo di temperatura nel circuito delle due sonde

Di seguito, si riporta l'andamento della temperatura indisturbata del terreno in funzione del tempo (Figura 29). La durata totale della prova è stata di 6,7 min e il tempo di campionamento ogni 2 s.

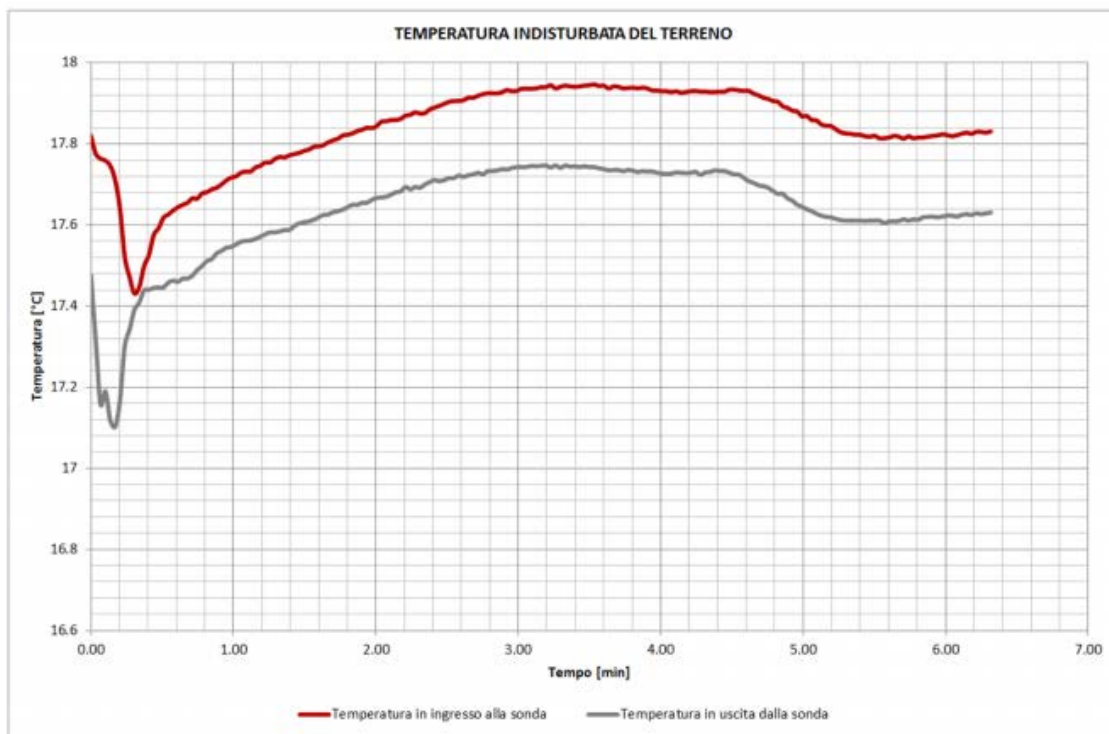


Figura 29. Andamento della temperatura indisturbata del terreno in funzione del tempo registrata all'interno della sonda

I risultati evidenziano una temperatura in ingresso pari a 17.85°C, e una temperatura in uscita pari a 17.67°C.

Dall'analisi globale dei risultati il valore che meglio rappresenta il livello termico del terreno è **17,67 °C**. Questo sarà assunto come valore della temperatura indisturbata.

6.2. Prova di flusso

Si tratta di una prova atta a verificare che il comportamento fluidodinamico del circuito idraulico installato corrisponda con quello valutato per via teorica. La presenza di ostruzioni o deformazioni che riducono la sezione di passaggio dei fluidi nel tubo comporta un disturbo al movimento maggiore del teorico; una profondità di posa inferiore alla dichiarata permette invece un più agevole passaggio del fluido. Attraverso la ricostruzione della curva caratteristica del circuito idraulico è possibile determinare con buona approssimazione la lunghezza reale delle tubazioni e accertare che la sezione di passaggio del fluido sia libera. A livello pratico il cuore del test, in accordo con la UNI 11467:2012 e la SIA 384/6:2010, consiste nella misura della caduta di pressione della singola U della sonda a condizione di flusso costante. La misura viene ripetuta per diversi gradini di portata e i dati acquisiti vengono confrontati con quelli attesi a livello teorico per il tipo di tubo in esame (con riferimento ai grafici dettagliati nella norma SIA). Se ne ricava anche una stima di lunghezza della sonda che viene confrontata con il valore inserito dall'utente ad inizio acquisizione e, se le differenze sono eccessive, lo strumento segnala la presenza di criticità. I dati elaborati dalla prova di flusso sono riportati in Tabella 4.

Gradino di portata	200 l/h
Portata minima di prova	400 l/h
Risultati circuito 1:	
Durata della prova sul circuito 1	circa 4.0 Min
Numero di misure effettuate	4
Lunghezza media del circuito	74 m
Esito della Prova (norma SIA)	Corrispondenza: 100%
Risultati circuito 2:	
Durata della prova sul circuito 1	circa 4.0 Min
Numero di misure effettuate	4
Lunghezza media del circuito	72 m
Esito della Prova (norma SIA)	Corrispondenza: 100%

Tabella 4. Dati elaborati dalla prova di flusso

I risultati della prova indicano che la sonda geotermica di prova è stata installata correttamente, c'è assenza di ostruzioni o deformazioni che riducono la sezione di passaggio dei fluidi nel tubo (Figura 30). Considerando i valori di precisione strumentale la lunghezza dichiarata della sonda geotermica di prova posata (70m) è stata verificata. Inoltre, il valore di corrispondenza per la norma SIA=100% è da considerarsi ottimo.

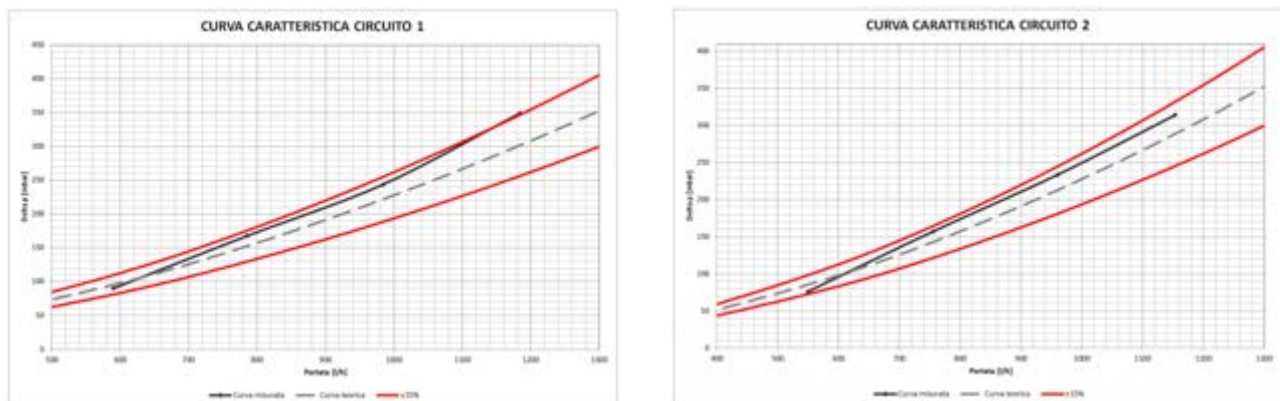


Figura 30. Curva caratteristica nei due circuiti

6.3. Risultati GRT

La prova ha avuto il giorno 12/04/2021 ed è finita il giorno 15/04/2021. La durata del test è stata di 72 h 06 min 39 sec.

Sono stati considerati i seguenti parametri:

- Potenza elettrica impostata a quadro: 7,5 KW;
- Potenza media reale fornita: 6,7 KW
- Potenza minima reale fornita: 5,9 KW;
- Potenza massima reale fornita: 6,9 KW;
- Tempo minimo significativo: 4,81 h;
- Portata media: 1,234 l/h.

L'andamento logaritmico delle temperature del fluido nella sonda, in funzione del tempo, calcolato è regolare (Figura 31).

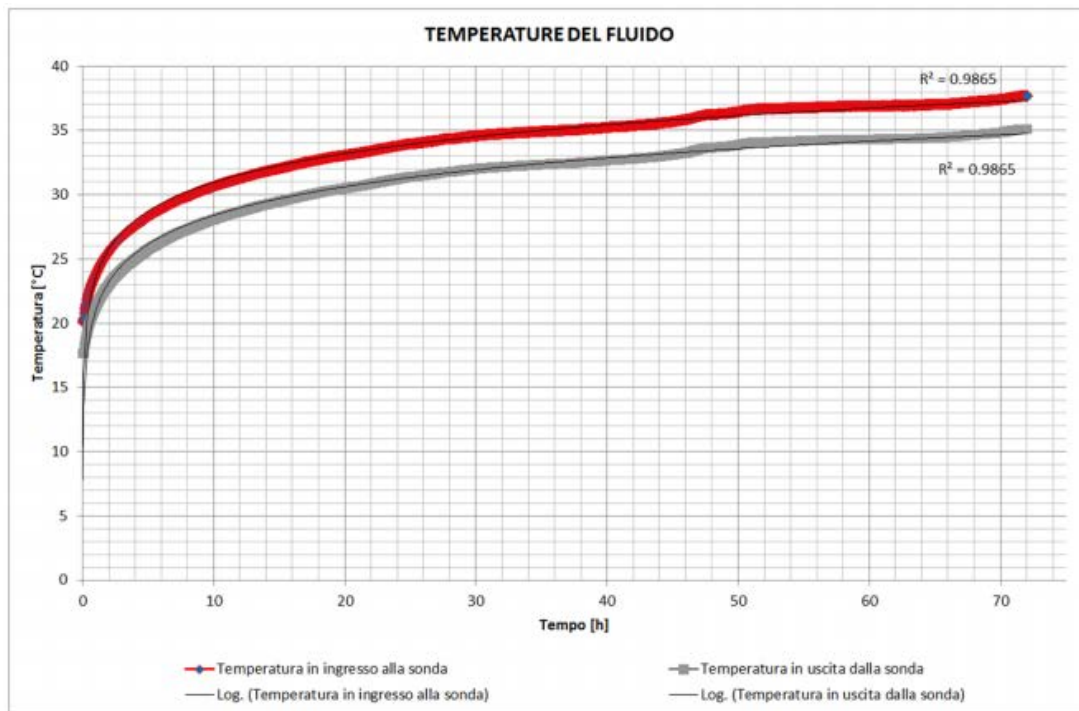


Figura 31. Andamento della temperature del fluido nella sonda in funzione del tempo

L'andamento medio della temperatura in funzione logaritmica del tempo, per il calcolo della conducibilità termica del terreno, è regolare. L'indice di dispersione è contenuto, come si nota dal coefficiente di determinazione R^2 che, essendo prossimo a 1, indica un buon grado di corrispondenza tra i valori reali e quelli stimati della linea di tendenza (Figura 32).

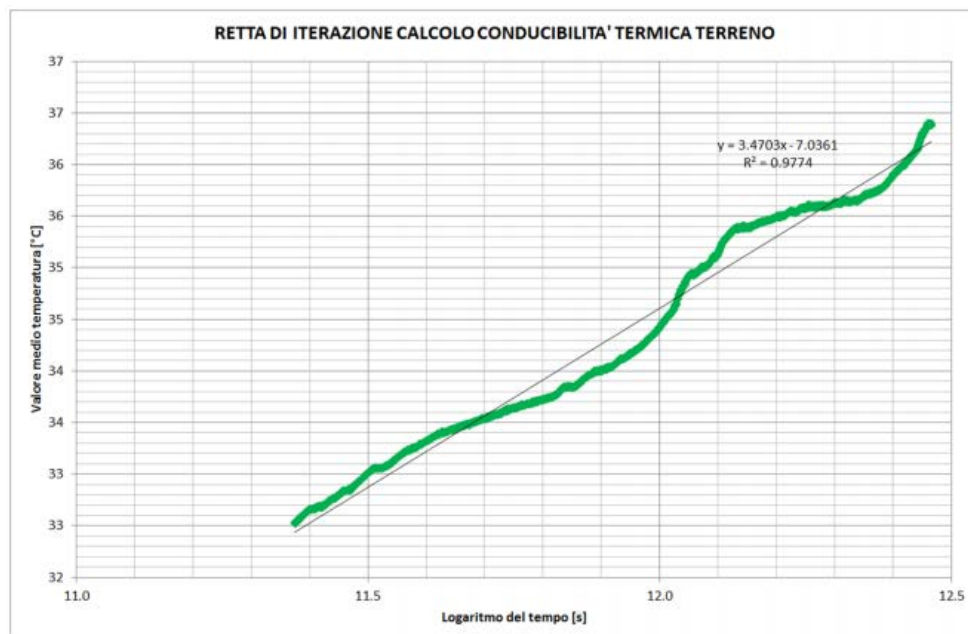


Figura 32. Retta di interazione per il calcolo della conducibilità termica del terreno

Per quanto riguarda il calcolo di **conducibilità termica del terreno**, a parte il primo tratto caratterizzato da oscillazioni iniziali, alla fine della prova l'andamento termico tende a stabilizzarsi fino al valore risultante pari a **1,21 W/mK** (Figura 33).

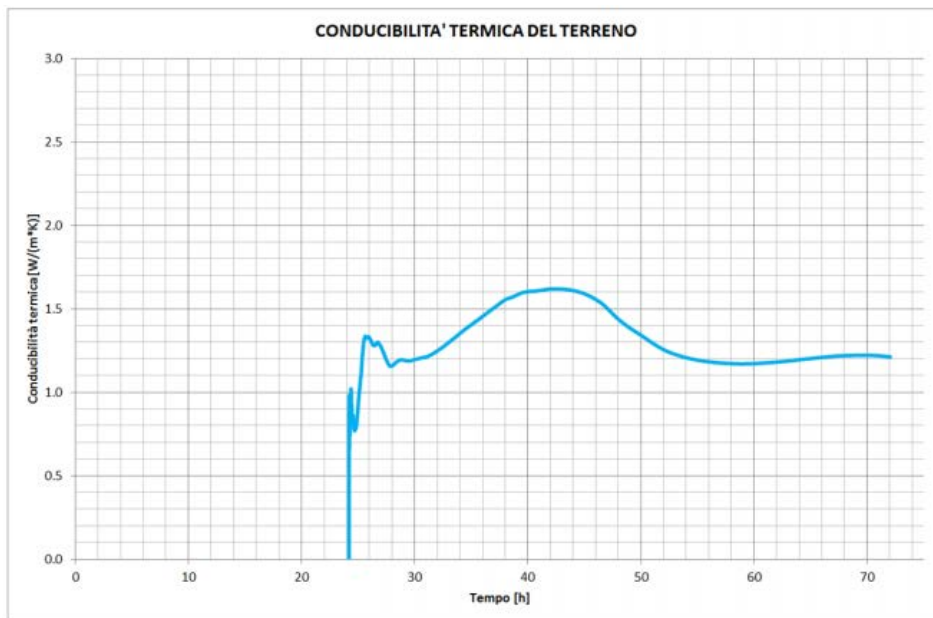


Figura 33. Andamento della conducibilità termica del terreno

È stato calcolato il valore della resistenza termica della sonda (R_b^*) pari a **0,1204 mK/W**, mostrando un valore minimo di 0,1151 mK/W e massimo di 0,1268 mK/W (Figura 34). Il valore della resistenza termica della sonda posata dipende da fattori legati alla realizzazione della perforazione, al suo diametro finale (180mm) e al materiale che circonda la sonda stessa (cemento e bentonite). Tale valore è relativamente basso e quindi buono, tipico delle sonde geotermiche realizzate con la malta utilizzata, testimoniando la buona messa in opera della sonda geotermica e l'assenza di eccessivi sgrottamenti e irregolarità del diametro della perforazione eseguita.



Figura 34. Andamento della resistenza termica della sonda pozzo 1

7 Fibre ottiche DTS installate nei pozzi

L'utilizzo delle fibre ottiche come sensori e sistemi di misura costituisce una tecnologia in forte sviluppo, in quanto dimostrano di potersi adattare a molteplici situazioni. Le fibre ottiche infatti possono misurare grandezze diverse a seconda di come vengono trattate.

Le fibre ottiche di tipo DTS (Distributed Temperatures Sensor), applicate al caso studio, permettono di conoscere il profilo termico verticale del sottosuolo a diverse profondità. Il sistema DTS, soluzione migliore per ottenere questo tipo di informazione, acquisisce per effetto Raman. I valori di temperatura vengono rilevati in modo distribuito lungo tutto il tratto di fibra, metro per metro, con una risoluzione spaziale fino ad 1 m e una risoluzione termica pari a 0,1°C.

Effetto Raman: le tecniche utilizzate per misure distribuite sono basate sul meccanismo di diffusione della luce che avviene all'interno della fibra. La risoluzione spaziale è ottenuta mediante la tecnica della riflettometria ottica nel dominio del tempo, nella quale vengono lanciati impulsi di luce nella fibra ottica e vengono misurate le variazioni dell'intensità retro-diffusa, causate dalla grandezza presa in considerazione, in funzione del tempo [11]. In particolare, un fascio di luce che incide su una molecola, consente, alle vibrazioni e alle rotazioni molecolari, di modulare la luce che vi si propaga all'interno. Una parte del fascio di luce incidente viene diffusa elasticamente, ossia con la medesima frequenza (*effetto Rayleigh*), una percentuale di luce subisce una diffusione anelastica (*effetto Raman*); viene cioè diffusa con una frequenza più alta o più bassa di quella originaria. Se il fotone emesso si trova ad avere un'energia maggiore del fotone incidente, la molecola deve fornire l'energia extra richiesta, il che può accadere solo se la molecola è già in uno stato eccitato. Il numero delle molecole che sono eccitate dipende direttamente dalla temperatura assoluta e, perciò, la quantità di radiazione che viene riflessa ad una energia più alta può essere utilizzato per misurare la temperatura assoluta. La radiazione con un'energia maggiore di quella originale (lunghezza d'onda più corta) è conosciuta come luce anti-Stokes, mentre quella con un'energia minore è conosciuta come luce Stokes (Figura 35). La differenza di energia tra i fotoni incidenti e quelli diffusi anelasticsearchamente corrisponde ai livelli energetici vibrazionali della molecola diffondente e l'analisi dello spostamento delle righe spettrali dovuto ad effetto Raman può dunque fornire il valore della temperatura.

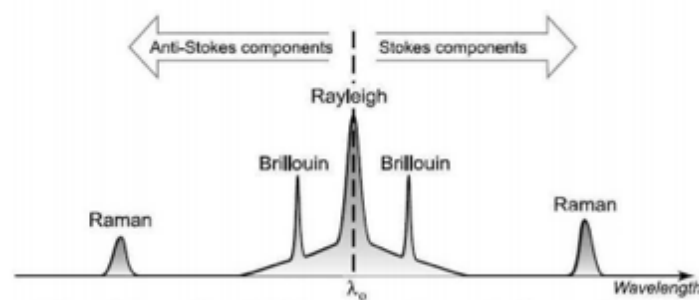


Figura 35. Spettro della luce diffusa in una fibra ottica

Nello specifico, la fibra installata, è stata prodotta dalla Società Svizzera Smartec, ed è la DiTeSt Ordinary Temperature Sensing Cable (Figura 36). Le fibre ottiche installate hanno una guaina esterna in poliammide (Nylon) e l'anima in acciaio 316 L. All'interno di ogni cavo si trovano quattro fibre ottiche utilizzabili per le misure, ognuna di 9 μm . Il range di temperatura operativa di questo modello è -40°C $+85^{\circ}\text{C}$. Il tubo centrale è sigillato ermeticamente e contiene 4 fibre insensibili alla piegatura con un rivestimento in acrilato a doppio strato per aumentare le prestazioni di micro piegatura. Offre un'elevata resistenza alla trazione, resistenza allo schiacciamento, impermeabilità laterale, resistenza chimica e all'abrasione ed eccellente protezione dai roditori.



Figura 36. Fibra di tipo DiTeSt Ordinary Temperature Sensing Cable (Smartec)

Di seguito si riporta i range di temperatura (Tabella 5), i dati tecnici (tabella 6), e le caratteristiche delle fibre installate (Tabella 7).

Temperature range	
Operating temperature:	-40 °C to +85 °C
Storage temperature:	-40 °C to +85 °C
Installation temperature:	-10 °C to +50 °C
Short-term temperature (max 1 h):	-50 °C to +150 °C

Tabella 5. Range di temperatura della fibra di tipo DiTeSt Ordinary Temperature Sensing Cable (Smartec)

Technical Data	
Outer diameter:	3.8 mm
Weight:	26 kg/km
Max crush resistance:	800 N/cm
Max tensile strength:	1300 N (installation)
Max tensile strength:	900 N (operation)
Min bending radius:	80 mm (with tensile)
Min bending radius:	60 mm (without tensile)
Hydrostatic pressure:	300 bar

Tabella 6. Dati tecnici della fibra di tipo DiTeSt Ordinary Temperature Sensing Cable (Smartec)

Fiber Types	
Fiber support:	SMF 9 / 125 μ m ITU-T G.652.D compliant
Fiber attenuation (cabled @ 20 °C):	\leq 0.36 dB @ 1310 nm \leq 0.25 dB @ 1550 nm
Number of fiber:	4

Tabella 7. Caratteristiche della fibra di tipo DiTeSt Ordinary Temperature Sensing Cable (Smartec)

Nel caso studio, le fibre ottiche sono state inserite, in ogni pozzo (Figura 37), all'interno di un tubicino predisposto, contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche (Figura 38).

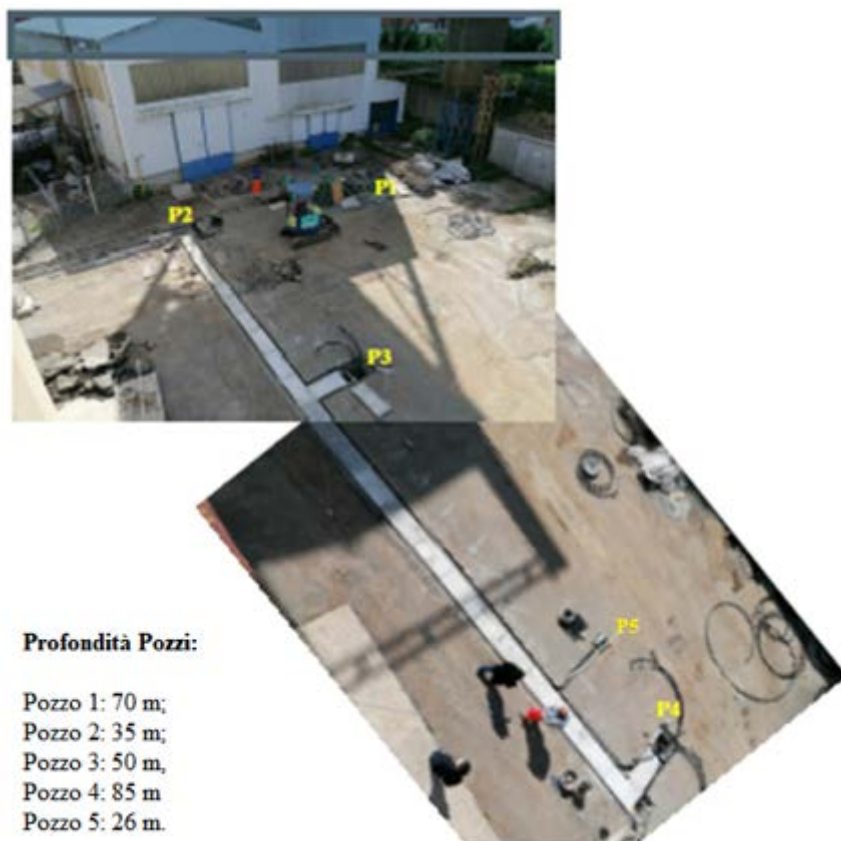


Figura 37. Vista dall'alto del campo geosonde e ubicazione dei pozzi geotermici con relative profondità



Figura 38. Assemblaggio del tubicino contenente la fibra ottica alle sonde geotermiche nel pozzo geotermico

Le fibre ottiche installate reagiscono alle variazioni di temperatura del sottosuolo, e permetteranno di acquisire dati in maniera distribuita con una frequenza bimetrica sulla verticale, rendendo così possibile la profilazione termica del sottosuolo alle diverse profondità. Oltre al cavo di fibra presente nei quattro pozzi,

è stata impiantata un'altra all'interno di un quinto pozzo, direttamente immersa nella malta cementizia, fino alla profondità di 26 m (pozzo 5). Il dato di temperatura rilevato in tale pozzo, sarà riferito ai soli litotipi attraversati in funzione della profondità, senza risentire degli scambi di calore tra sonda geotermica e terreno. Pertanto, questi dati saranno considerati di riferimento per stimare i delta di temperatura alle stesse profondità, tra le due configurazioni.

Le fibre, raccordate nelle trincee orizzontali insieme alle sonde geotermiche, arrivano poi alla centralina DiTemp Light DTS (Figura 39), posta nella sala controllo, che legge, interpreta e memorizza i dati misurati dai sensori di temperatura. Questa unità di lettura, collegata al patch panel a cui vengono collegati i cinque cavi di fibre, assicura stabilità delle misure nel tempo e permette di effettuare calibrazioni periodiche. L'interfaccia utente messa a disposizione permette di configurare il sistema, effettuare misure di temperatura, cambiare il range di misura, creare zone, impostare intervalli di acquisizione, impostare operazioni matematiche di media, impostare misure automatiche e memorizzare i dati provenienti dalle fibre ottiche in formato ASCII.

Lo scopo ultimo è il monitoraggio del campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde stesse, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo. Sarà interessante capire se il terreno possa essere considerato come un serbatoio termico, e se il calore stoccato durante i mesi estivi possa accumularsi per essere utilizzato durante i mesi invernali.

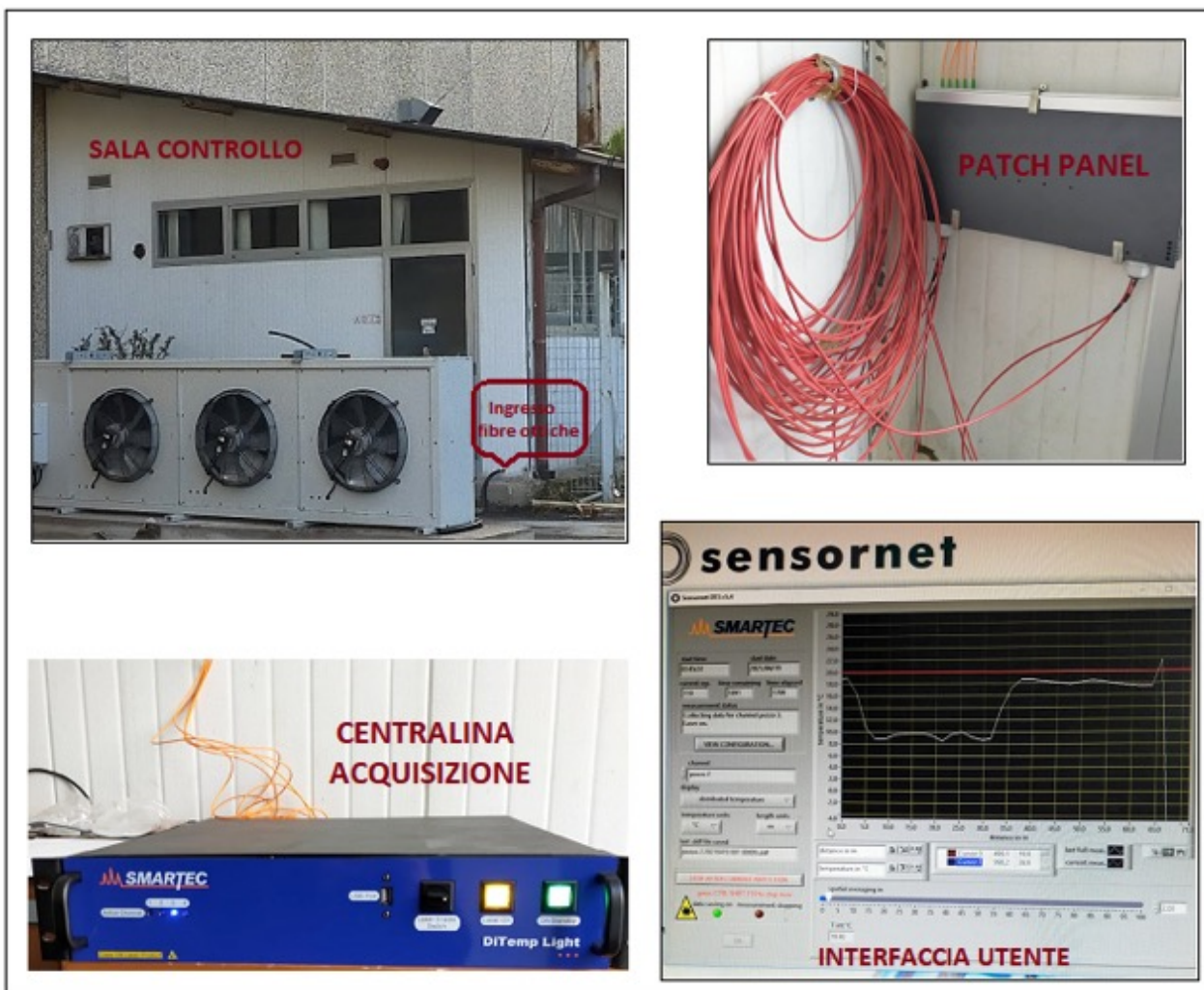


Figura 39. Sala controllo, patch panel, centralina di acquisizione D1 Temp Light (Smartec) e interfaccia utente

8 Curva caratteristica del circuito idraulico

Il circuito idraulico è una rete di tubazioni in cui scorre un fluido in ricircolo. Il circuito è definito quindi dalle caratteristiche geometriche, dai materiali di costruzione delle tubazioni e dalle proprietà fisiche del fluido. Poiché il circuito è chiuso, per instaurare un moto, è necessario l'ausilio di pompe o circolatori, che contrastino le perdite di carico per attrito. I punti di derivazione o di confluenza prendono il nome di nodi, e le tratte di tubo comprese tra un nodo e un altro sono definiti rami.

La caratterizzazione del circuito dal punto di vista idraulico consiste nel definire il comportamento di ciascun tratto di tubo, come variano le perdite di carico in ciascun tratto di tubo in funzione della portata.

Ciascuna pompa o circolatore ha una propria curva caratteristica di funzionamento che, come per il circuito, rappresenta la variazione della prevalenza (H) impressa al fluido con la Q . Normalmente il punto di funzionamento viene individuato graficamente (Figura 40), rappresenta l'intersezione tra la curva caratteristiche del circuito e della pompa.

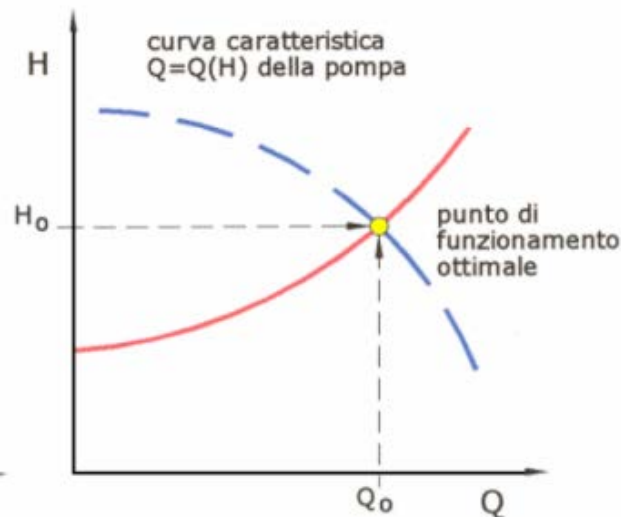


Figura 40. Determinazione grafica del punto di funzionamento ottimale

Quando ci troviamo di fronte ad un sistema ramificato di tubature è necessario imporre le seguenti condizioni di equilibrio, analoghe ai principi di Kirchhoff in elettrotecnica [7]:

- equazione di continuità al nodo: la somma delle portate in ingresso e in uscita a ciascun nodo deve essere nulla;
- equazione di equilibrio delle maglie: la somma delle perdite di carico di ciascuna maglia (ogni possibile tragitto chiuso) deve essere nulla.

Calcolo delle perdite di carico

Le perdite di carico rappresentano perdite di pressione causate dagli attriti che si oppongono al moto di un fluido.

E' possibile avere:

- attrito tra il fluido e la superficie della parete della tubazione. Si tratta di una perdita di carico continua, in quanto si manifestano lungo i tratti lineari dei condotti. Si parla di perdite di carico distribuite.
- attrito legato all'interazione tra le particelle fluide per cambi repentini di direzione. Sono eventi localizzati ai punti della tubatura con geometria irregolare (curve, valvole, filtri, derivazioni, nodi). Si parla di perdite di carico concentrate.

Le perdite di carico totali sono date dalla somma delle perdite di carico concentrate e di quelle distribuite (Figura 41).

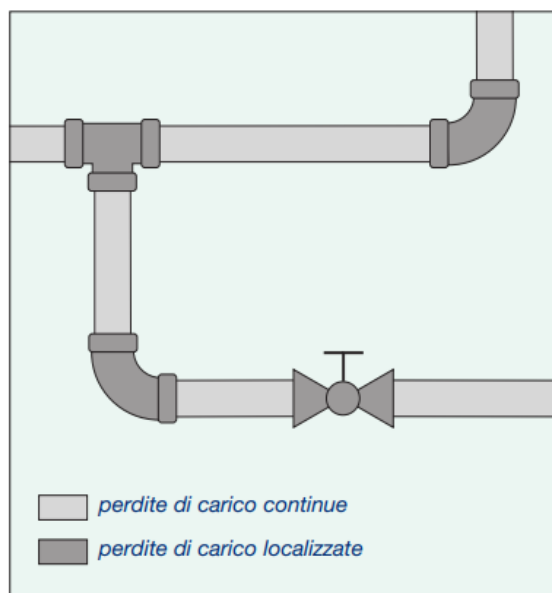


Figura 41. Esempio perdite di carico continue e localizzate [12]

Perdite di carico distribuite o continue

Le perdite di carico distribuite sono quelle che si manifestano all'interno del condotto, dovute all'attrito viscoso tra il fluido e le pareti del condotto. Tale parametro è influenzato dalla natura delle superfici di contatto, indicato in letteratura dalla scabrezza (ϵ). La scabrezza dipende, quindi, dalle caratteristiche del tubo, dal processo di lavorazione e può variare nel tempo a causa di incrostazioni, ossidazione delle pareti etc. Pertanto, le perdite di carico distribuite dipendono dalle caratteristiche del moto.

Per fluido incomprimibile e moto permanente in un tubo piano, la formula per il calcolo della perdita di carico è espressa dalla formula di Darcy - Weisbach:

$$Ah = \lambda L \frac{v^2}{2dg}$$

dove:

Ah è la perdita di carico in termini di altezza (m);

g è l'accelerazione di gravità (m/s^2);

L è la lunghezza del condotto (m);

d è il diametro del condotto (m);

v è la velocità media del fluido all'interno del condotto (m/s);

λ (oppure indicato con la lettera f) è definito numero di resistenza o fattore di attrito, dipende dalla scabrezza e dal numero di Reynolds (adimensionale).

Diversi autori hanno studiato il numero di resistenza nel corso della prima metà del secolo scorso.

Nikuradse ha evidenziato che:

- in condizioni di moto laminare: il numero di resistenza è inversamente proporzionale al numero di Reynolds:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Ne consegue che la perdita di carico è direttamente proporzionale alla velocità del fluido:

$$Ah = \left(\frac{32 \mu L}{g \rho w d^2} \right) v$$

- in condizioni di moto turbolento in tubi lisci:

per valori del numero di Reynolds inferiori a 105, il numero di resistenza è espresso dalla formula di Blasius:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

da cui la perdita di carico è:

$$Ah = \left(\frac{0,3164}{\left(\frac{vd\varphi w}{\mu} \right)^{0,25}} \right) L \frac{v^2}{2 dg} \alpha v^{1,75}$$

- per moto turbolento in tubo scabro si applica la formula di Prandtl-vonKarman:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log_{10} \frac{r}{\varepsilon} + 1,74$$

r è il raggio interno del tubo. In questo caso la perdita di carico è proporzionale al quadrato della velocità e non dal numero di Reynolds.

Perdite di carico concentrate o localizzate

Possono essere calcolate con uno dei seguenti metodi [12]:

- metodo diretto, utilizza coefficienti che dipendono dalla forma e dalle dimensioni dei pezzi speciali;
- metodo delle portate nominali, ricorre, per ogni pezzo speciale, al valore della sua portata nominale: cioè alla portata che corrisponde ad una perdita di pressione unitaria predefinita (ad esempio 1 bar);
- metodo delle lunghezze equivalenti, sostituisce, ad ogni pezzo speciale, un tratto di tubo lineare in grado di dare le stesse perdite di carico.

Generalmente, per il dimensionamento delle tubazioni e delle pompe si ricorre al metodo diretto e le perdite di carico concentrate possono essere calcolate come segue:

$$Ah_{concentrate} = \lambda \frac{L_e}{d} * \frac{v^2}{2} = \xi \frac{v^2}{2}$$

da cui:

$$L_e = \frac{\xi}{\lambda} d$$

dove:

ξ = perdita di carico localizzata;

v = velocità del fluido (m/s)

In unità di misura pratiche (mm c.a.) risulta:

$$Ah_{concentrate} = \xi \varphi \frac{v^2}{2 * 9,81}$$

Determinazione della curva caratteristica del circuito: caso studio

Come già detto, le perforazioni hanno interessato la zona carrabile adiacente l'edificio F40. La distanza reciproca tra i pozzi è di 9 metri (pozzo 1 – pozzo 2; pozzo 2 – pozzo 3) e di 12 m (pozzo 3 – pozzo 4).

La distanza dal punto di intersezione (pozzo 2) tra i quattro pozzi disposti ad L al collettore è di 13 m; e di 5 m la distanza dal collettore alla PdC / chiller (Figura 42). I doppi tubi (mandata e ritorno) di ogni pozzo corrono parallelamente nelle canaline di raccordo fino alla postazione del collettore. Pertanto a quest'ultimo arrivano complessivamente 16 tubi, ciò permetterà di monitorare ogni coppia in ogni pozzo.

Per il calcolo delle perdite di carico distribuite sono stati considerati i seguenti tratti:

- Tratto sonde - pozzo intersezione 2;
- Tratto pozzo intersezione 2 – collettore;
- Tratto collettore -chiller.

La portata del fluido che invierà la pompa al circuito sonde è stata determinata come segue:

$$Q = \frac{W}{A_t \cdot e_v \cdot c_s \cdot \rho}$$

dove:

W è la potenza termica di scambio fra terreno e sonda in watt;

A_t è la differenza di temperatura della soluzione fra ingresso e uscita nella sonda in estate e viceversa in inverno;

c_s è il calore specifico del fluido;

ρ è la densità del fluido.



Figura 42. Ubicazione pozzi geotermici e relative distanze

Considerando i valori riportati nella tabella 8 riferiti ad una potenza richiesta di 13 kW, assunta una variazione di temperatura all'evaporatore pari a 3 °C, e considerando una miscela di acqua e glicole etilenico al 20% in peso; si determina una portata del fluido pari a 4 m³/h. Dato che la configurazione delle sonde (d_e 32 mm; e d_i 26 mm) è double U, la portata deve essere assunta pari alla metà, ossia 2 m³/h (0,555 l/s).

Potenza W	13000	
A_t evaporatore °C	3	
calore specifico c (J/(kg°C))	3820	GLICOLE
densità fluido a 0°C (kg/m ³)	1035	ETILENICO

Tabella 8. Valori considerati per il calcolo della portata del fluido

La velocità (m/s) del flusso si determina come segue:

$$Q = 0,785 \cdot d^2 \cdot v$$

La velocità del fluido è direttamente proporzionale alla portata del fluido e al diametro del tubo al quadrato. Per determinare il fattore di attrito λ (f), considerando il flusso turbolento, si applica la seguente formula:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

$$Re = \frac{d \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

A questo punto, per ogni tratto considerato (Tabella 9 – Tabella 10), sono state determinate le perdite di carico distribuite come segue:

$$Ah = \lambda \cdot \rho \left(\frac{L_{tubi}}{d} \right) \cdot \frac{v^2}{2}$$

Per il calcolo della portata nei quattro pozzi, è stata considerata la lunghezza totale dei tubi (solo una coppia andata e ritorno) sia in foro che nel tratto orizzontale. Inoltre la portata che arriva al punto di intersezione (pozzo 2) pari a 2 m³/h è stata distribuita tra tutti i quattro pozzi, tenendo conto della diversa profondità a cui sono state inserite le sonde geotermiche e le distanze orizzontali tra gli stessi. Chiaramente, questa simulazione di portata è stata fatta considerando i quattro pozzi contemporaneamente in esercizio.

Tratto collettore-Chiller		Tratto pozzo intersezione 2 – Collettore	
lunghezza tubi totale (m)	5	lunghezza tubi totale (m)	13
diametro tubi (m)	0.026	diametro tubi (m)	0.026
portata (m ³ /h)	2	portata (m ³ /h)	2
v (m/s)	1.05	v (m/s)	1.05
λ	0.024	λ	0.024
Ah distribuite (kPa)	2,66048	Ah distribuite (kPa)	6,91725

Tabella 9. Valori delle perdite di carico distribuite nel tratto collettore - Chiller e nel tratto punto di intersezione 2 – Collettore

Tratto Pozzo 1 - Pozzo intersezione 2		Tratto Pozzo 2 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	149	lunghezza tubi totale (m)	70
diametro tubi (m)	0.026	diametro tubi (m)	0.026
ρ (kg/m ³)	1035	ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0.001	μ (pa*s)	0.001
portata (m ³ /h)	0.43206	portata (m ³ /h)	0.66531
v (m/s)	0.22617	v (m/s)	0.34826
λ	0.035776	λ	0.032116
Ah distribuite (kPa)	5,42727	Ah distribuite (kPa)	5,42727
Tratto Pozzo 3 - Pozzo intersezione 2		Tratto Pozzo 4 - Pozzo intersezione 2	
lunghezza tubi totale (m)	105	lunghezza tubi totale (m)	191
diametro tubi (m)	0.026	diametro tubi (m)	0.026
ρ (kg/m ³)	1035	ρ (kg/m ³)	1035
μ (pa*s)	0.001	μ (pa*s)	0.001
portata (m ³ /h)	0.52771	portata (m ³ /h)	0.37490
v (m/s)	0.27623	v (m/s)	0.19624
λ	0.034032	λ	0.037389
Ah distribuite (kPa)	5,42727	Ah distribuite (kPa)	5,28903

Tabella 10. Perdite di carico distribuite nei tratti pozzi (1-2-3-4) – pozzo intersezione 2

Le perdite di carico distribuite da ognuno dei quattro pozzi fino al chiller sono pari a 69.5 kPa (7.1 Hm). Per il calcolo delle perdite di carico concentrate si ricorre alla seguente formula:

$$Ah_{concentrate} = \lambda \frac{Le}{d} * \frac{v^2}{2}$$

da cui:

$$Le = \frac{\xi}{\lambda} d$$

Poiché il rapporto $\frac{\xi}{\lambda}$ varia poco, si può ritenere Le indipendente dalla velocità del fluido.

Le perdite di carico concentrate tra il collettore e il chiller sono pari a 0, in quanto non sono presenti alcun tipo di restrizioni. Nel tratto tra il pozzo intersezione 2 e il collettore sono presenti solo 16 curve a 90°, ma determinano un valore pari a 0 in termini di perdite di carico concentrate. Le perdite di carico concentrate per i quattro pozzi sono pari a 0, presentano solo 4 gomiti a 90° in corrispondenza di ogni pozzo. Pertanto, nel calcolo totale si considerano solo le perdite di carico imputabili al chiller, dato fornito dalla casa costruttrice. Nel caso specifico, per una macchina da 15 kW, dai manuali delle case costruttrici, è stato assunto un valore di perdita di carico concentrata pari a 23 kPa.

Pertanto le perdite di carico totali ($Ah_{distribuite} + Ah_{concentrate}$), nonché il valore della prevalenza della pompa è uguale a 92.5 kPa, ossia 9.4 Hm.

9 Sistema di controllo e monitoraggio dell'impianto

L'impianto geotermico, almeno per il momento, è stato concepito per il solo scopo di ricerca scientifica al fine di caratterizzare l'evoluzione stagionale del campo termico. Durante la prima annualità, sono stati determinati i carichi di picco e i parametri legati alla pompa di calore per un'utenza di tipo ufficio di superficie pari a 140 m², ubicato nel comune di Roma (GG 1415), considerando 10 ore giornaliere di funzionamento dell'impianto (Tabella 11). Affinché il campo termico non subisca variazioni di temperatura, è necessario che la temperatura in uscita della pompa di calore sia mantenuta costante, circa 1°C in inverno e circa 30°C in estate per non apportare variazioni influenti che potrebbero compromettere la produttività del campo termico stesso.

	Riscaldamento	Raffrescamento
Carico di Picco richiesto (kW)	13.45	13.69
Potenza termica /frigorifera PdC (kW)	14.81	15.15
COP/EER	3.75	5.37
T ingresso PdC (°C)	5	23.6
T uscita PdC (°C)	1.04	30.04
Potenza Termica prelevata/riversata dal/al terreno (kW)	9.86	16.24
Fabbisogno energetico (kWh/a)	9522.6	6516.4
Fabbisogno Elettrico PdC (kWh/a)	2539.4	1213.5
h funzionamento	708	476

Tabella 11. Carichi termici e parametri legati alla pompa di calore

E' stato realizzato lo schema funzionale dell'impianto e redatto il computo metrico (Figura 43 e Tabella 12).

Le componenti di chiusura dell'impianto previste sono:

- due collettori a 8 diramazioni ciascuno, ossia uno di mandata e uno di ritorno. Ognuno dei due collettori dotato di sensori di pressione. Su ogni ramo di raccordo con le sonde geotermiche dovranno essere presenti sensori di temperatura di tipo PT100. Sul collettore di mandata, su ogni tubo, dovranno essere collocati i sensori di portata, viceversa ai tubi in uscita dal collettore occorre prevedere dei regolatori di portata al fine di monitorare la stessa all'interno delle sonde geotermiche;
- serbatoio di accumulo da 500 l dotato di resistenza elettriche ad immersione da 13 kW, chiaramente dotato di sensori di temperatura per monitorare la stessa sia internamente che esternamente al serbatoio. È necessario, durante l'estate riscaldare l'acqua prima di essere inviata nel circuito sonde, in quanto è previsto un salto termico di circa 7°C, tra ingresso e uscita dal circuito;
- chiller di potenza nominale frigorifera pari a 13 kW, dotato di elettropompa di circolazione da 2000 l/h (2m³/h) e 100 kPa;
- vaso di espansione PN5 bar da 24 l.

LEGENDA	
	Pompa di circolazione
	Valvole a sfera per intercettazione
	Valvole per regolazione della portata
	Valvola a 3 vie modulante
	Valvola di sicurezza
	Sensore di temperatura
	Sensore di pressione
	Sensore di portata
	Filtro a Y
	Giunto antivibrante
	Vaso di espansione

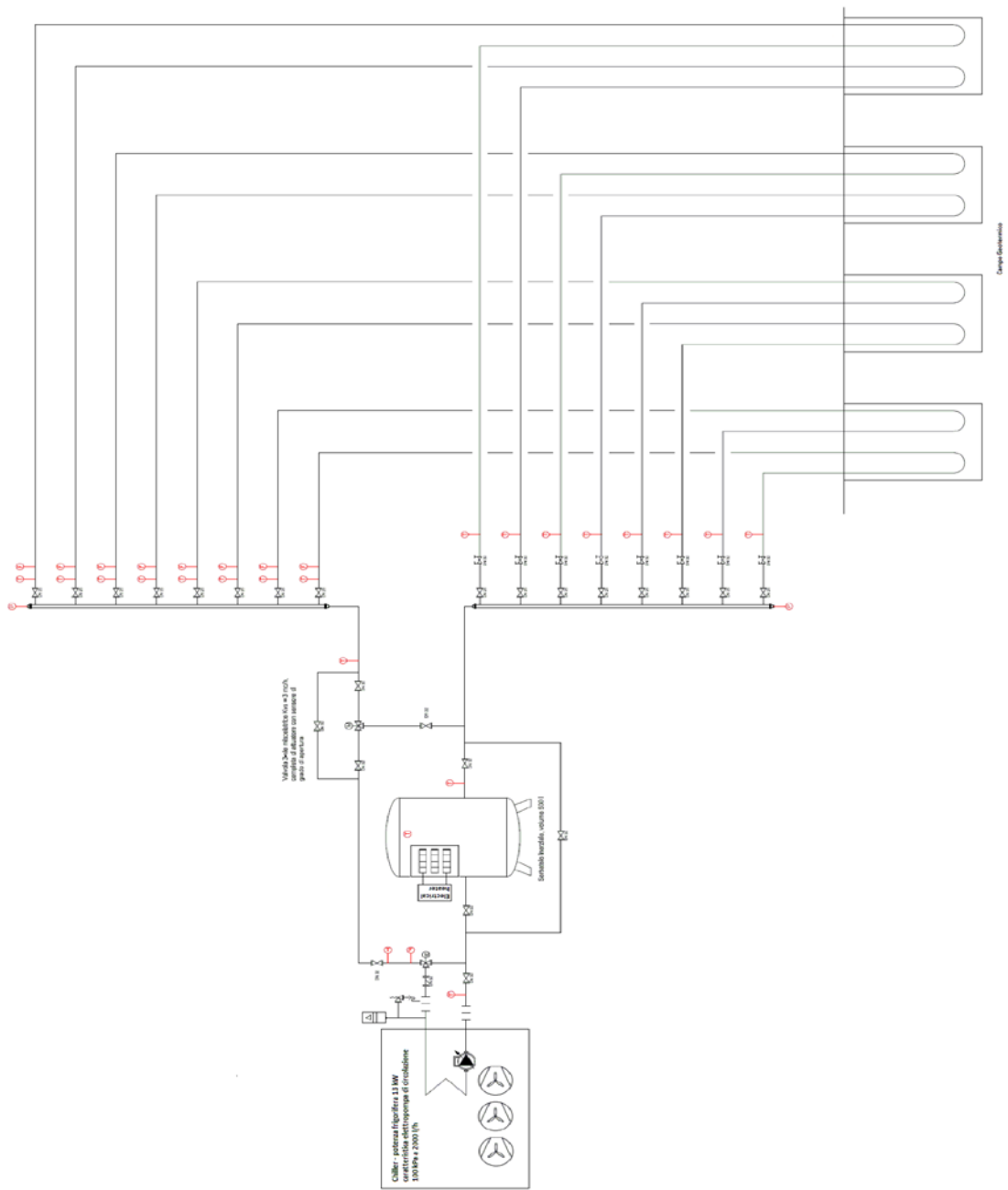


Figura 43. Schema funzionale dell'impianto

Descrizione	u.m.	q.tà
Chiller potenza nominale (EN 14511:2018) raffreddamento 13 kW	num	1
Serbatoio inerziale, volume 500 l	num	1
Collettore DN 65, ingresso di testa DN32, 8 diramazioni, connessione per manometro	num	2
Gruppo di carico acqua completo di filtro e riduttore di pressione	num	1
valvola di taratura Kvs = 4 mc/h	num	8
valvola a sfera DN 25	num	16
valvola a sfera DN 32	num	8
Filtro a Y DN 32	num	1
Giunti antivibranti DN 32	num	2
Valvola 3-vie miscelatrice Kvs = 3 mc/h, completa di attuatore con sensore di grado di apertura	num	2
Valvola di sicurezza DN15 PN 5 bar	num	1
Vaso di espansione PN 5 bar, 24 litri	num	1
Sensore di temperatura	num	21
Manometro, fondoscala 10 bar	num	2
Termometro	num	1
Sensore di portata, fondoscala 1000 l/h	num	8
Sensore di portata, fondoscala 3000 l/h	num	1
Resistenze elettriche ad immersione per serbatoi da 6 kW ciascuno, tipo GK 6,0 KW 1" ½ Ener Green, tensione alimentazione 230V	num	2
Resistenze elettriche ad immersione per serbatoi da 2,8 kW ciascuno, tipo GK 6,0 KW 1" ¼ Ener Green, tensione alimentazione 230V	num	1

Tabella 12. Computo metrico

10 Conclusioni

Nell'anno in corso è stato realizzato il campo geosonde, caratterizzato dall'installazione di sonde geotermiche in quattro fori (85 m, 70 m, 50 m, 35 m), ad andamento verticale, a circuito chiuso e configurazione double U. I pozzi sono stati effettuati nella zona adiacente l'Edificio F40, ubicato nel C.R. Enea Casaccia (RM), ad un'altitudine di 147 m s.l.m. La stratigrafia locale è stata ricostruita dalle evidenze del sondaggio geognostico effettuato nel pozzo 1 fino alla profondità di 100 m. Il sondaggio ha attraversato la successione vulcanica sabatina, caratterizzata da una alternanza di tufi da terrosi a litoidi e lave tefritico-fonolitiche da fratturate (parte alta) a compatte (parte bassa). Infine, dopo aver attraversato la Formazione dei Tufi Varicolori di Sacrofano (parte basale della successione Sabatina), la parte basale del carotaggio ha interessato la serie sedimentaria continentale appartenente al "Galeriano" (sabbie limose) fino ad intestarsi nella parte alta delle argille plio-pleistoceniche di origine marina. Inoltre, sul pozzo 1 è stato condotto il test di risposta termica (GRT), della durata di 72 ore, al fine di definire la temperatura indisturbata, la conducibilità termica del terreno, e la resistenza della sonda. La **capacità termica volumica** stimata per l'area in esame è di **2,6 MJ/(m³K)**; tale valore è tipico delle litologie piroclastiche. Dal test, si evince che la **temperatura media misurata del terreno** risulta essere pari a **17,67° C**; si tratta di un valore tipico per il sottosuolo presente nella zona in esame che, se pur la profondità massima raggiunta dalla sonda geotermica non è elevata (70 m), è caratterizzata da un alto termico per la vicinanza di apparati vulcanici spenti. Il valore di **conducibilità termica del terreno** calcolato è pari a **1,21 W/(m*K)**. Il dato di **resistività termica della sonda**, indice della qualità dell'accoppiamento terreno – malta, è tanto migliore quanto più è

basso. I risultati ottenuti, indicano un valore pari a **0,1204 mK/W**. Il valore della resistenza termica della sonda posata dipende da fattori legati alla realizzazione della perforazione, dal suo diametro finale (180 mm) e dal materiale che circonda la sonda stessa (cemento e bentonite); tale valore è relativamente basso, tipico delle sonde geotermiche realizzate con la malta utilizzata, testimoniando la buona messa in opera della sonda geotermica e l'assenza di eccessivi sgrottamenti e irregolarità del diametro della perforazione eseguita. Sulla base del Test di Flusso effettuato, la sonda geotermica di prova è stata installata correttamente, in assenza di ostruzioni o deformazioni che riducono la sezione di passaggio dei fluidi nel tubo. Considerando i valori di precisione strumentale e la lunghezza della sonda geotermica di prova pari a 70 m, il valore di corrispondenza per la Norma SIA = 100% è da considerarsi ottimo.

Le perforazioni degli altri tre pozzi sono state eseguite a distruzione di nucleo. Durante la perforazione del quarto pozzo, alla profondità di 30 m si è verificata la perdita del martello fondo foro, pertanto, si è reso necessario abbandonare lo stesso, ed effettuare una nuova perforazione a 3 m di distanza. Il foro abbandonato, non è stato interessato dall'installazione di sonde geotermiche, ma utilizzato per inserire un cavo di fibra ottica, fino alla profondità di 26 m (pozzo 5), direttamente amalgamato all'interno della malta cementizia di riempimento. I valori di temperatura rilevati rappresenteranno il riferimento per gli altri quattro pozzi, nei quali si risente del flusso all'interno delle sonde geotermiche. Le sonde geotermiche, nel pozzo 1, sono state installate fino alla profondità di 70 m, e non fino a 100 m come previsto, in quanto si è verificato il fenomeno di sgrottamento a fondo foro causato dalle sabbie.

Inoltre, all'interno dei quattro pozzi sono state inserite, contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche, le fibre ottiche di tipo DTS (Distributed Temperatures Sensor). Sarà possibile acquisire in maniera distribuita la temperatura lungo l'intero tratto del pozzo con una risoluzione di temperatura fino a 0,1°C e una risoluzione spaziale di due metri, al fine di monitorare il campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde stesse, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza del sistema sonde-terreno nel tempo.

In ultimo, sono state determinati i parametri idraulici in termini di **portata** complessiva richiesta dall'impianto (**2 m³/h**), di portata distribuita tra le sonde dei quattro pozzi, nonché le **perdite di carico distribuite totali (69.5 kPa)** e **concentrate (23 kPa)**, assumendo un andamento parallelo delle sonde stesse fino al collettore.

A tal fine, il valore delle perdite di carico totali ($Ah_{distribuite} + Ah_{concentrate}$), ossia il valore della **prevalenza** dell'elettropompa è uguale a **92.5 kPa** (9.4 Hm). Inoltre, è stato realizzato lo schema funzionale dell'impianto e redatto il computo metrico, evidenziando il sistema di controllo e di monitoraggio.

11 Riferimenti bibliografici

- [1] D. De Rita, R. Funiciello, L. Corda, A. Sposato, U. Rossi (1993) Volcanic Units. In: Di Filippo, M., (Ed.), Sabatini Volcanic Complex, Quad. Ric. Sci. 114, Progetto Finalizzato Geodinamica C.N.R., Roma, 33–79;
- [2] G. Buonasorte, M. G. Carboni e M. A. Conti (1991) Il substrato Plio-Pleistocenico delle vulcaniti sabatine: considerazioni stratigrafiche e paleoambientali". Bollettino della Società Geologica Italiana, Volume n. 110, pp.35–40;
- [3] F. Marra, C. Castellano, L. Cucci, F. Florindo, M. Gaeta, B.R. Jicha, D.M. Palladino, G. Sottili, A. Tertulliani, C. Tolomei (2020) Monti Sabatini and Colli Albani: the dormant twin volcanoes at the gates of Rome. Scientific Reports: 10:8666: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65394-2>;
- [4] E. Locardi E. & E. Sommovilla (1974) I vulcani sabatini nell'evoluzione della struttura regionale: Mem.Soc.Geol.It.13/2:455-468;
- [5] M. Bertini, C. D'Amico, M. Deriu, S. Tagliavini, L. Vernia (1971) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 143 «Bracciano». Serv. Geol. d'Italia, 77 pp;
- [6] P. P. Mattias P.P, U. Ventriglia (1970) La regione vulcanica dei Monti Sabatini e Cimini. Mem. Soc. Geol. It., 9, (3), pp.331-384;
- [7] Delmastro R., Noce G. (2011) Manuale di geotermia a sonde verticali: Biblioteca Tecnica Hoepli, pp.516, ISBN 978-88-203-4539-6;
- [8] S. Basta e F. Minchio (2007) Geotermia e pompe di calore - Guida pratica agli impianti di climatizzazione, pp.354, Editore S. Basta, Verona;
- [9] J. Claesson e P. Eskilson (1987) Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes", Tesi di dottorato, Department of Mathematical Physics. University of Lund, Sweden;
- [10] C. Eklöf, S. Gehlin (1996) TED - a mobile equipment for thermal response test. MSc-thesis 1996:198E, LuTH, 62 p.;
- [11] R. Limina (a.a. 2009 - 2010) Sensori distribuiti in fibra ottica- Distributed Optical Fiber Sensing- Tesi di laurea- Facoltà di Ingegneria- Università degli studi di Padova.
- [12] Caleffi. Idraulica. Le perdite di carico negli impianti. Il dimensionamento dei miscelatori, n.28. Giugno 2005

12 Acronimi

GRT Ground Response Test