



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

TESI DI LAUREA TRIENNALE GEOTECNICA

**STUDIO DEL DIMENSIONAMENTO DEL CAMPO SONDE
GEOTERMICHE DELLA RESIDENZA PER STUDENTI
FUSINATO (UNIPD)**

Relatore: Prof. Giorgia Dalla Santa

Laureando: Zin Samuele

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Sommario

Abstract	3
1. La geotermia	5
1.1 Andamento della temperatura nel terreno	6
2. Impianti geotermici	8
2.1 Terreni e proprietà termiche	9
2.2 Pompe di calore geotermiche	11
2.3 Sistemi a circuito aperto e chiuso	12
2.3.1 Circuiti chiusi: sonde geotermiche Orizzontali e Verticali	13
2.4 Temperature di esercizio	24
2.5 Vantaggi e svantaggi rispetto agli impianti tradizionali	25
2.6 Sostenibilità ambientale	26
3. Test di risposta termico	28
3.1 Thermal Response Test	28
3.1.1 Finalità del TRT e apparecchiatura	28
3.1.2 Linee guida per l'esecuzione del TRT	30
3.1.3 Esecuzione del TRT	31
3.1.5 Influenza del flusso d'acqua di falda	34
3.2 Distributed Temperature Sensing	35
3.2.1 Applicazione del DTS	37
3.2.2 Vantaggi e svantaggi	37
3.3 Confronto tra DTS e TRT	37
4. Caso studio Fusinato	40
4.1 Il progetto del campo sonde per la residenza Fusinato	44
4.1.1 Principali disposizioni normative	44
4.1.2 Inquadramento geologico e geomorfologico	45
4.1.3 Caratteristiche tecnico costruttive delle sonde geotermiche	52
4.2 Applicazione dei valori tabellati (da linee guida tipo <i>ASHRAE</i> o <i>VDI</i>)	58
5. Bibliografia	61
5.1 Materiale utilizzato e siti internet presi in considerazione:	61
Ringraziamenti	62

Abstract

Il concetto di sostenibilità ambientale ha assunto negli ultimi anni un ruolo cruciale nella progettazione degli edifici e degli impianti termici ad essi associati. Tra le varie tecnologie utilizzate per migliorare le prestazioni energetiche delle costruzioni troviamo soluzioni che permettono di sostituire gli attuali impianti di raffrescamento e riscaldamento ad aria con impianti che sfruttano il calore termico del sottosuolo.

Nel presente elaborato viene quindi trattato il concetto di geotermia, che deriva dai termini greci "geo" (terra) e "termia" (calore), indicando lo studio della distribuzione e dell'origine del calore all'interno della Terra. La geotermia si occupa della vasta quantità di calore presente nel sottosuolo terrestre, originato da processi naturali come il calore residuo della formazione della Terra e il decadimento radioattivo di elementi come uranio, torio e potassio.

Il calore geotermico si accumula nelle rocce e nelle acque sotterranee, creando riserve di energia che possono essere sfruttate per diverse applicazioni, inclusa la produzione di energia elettrica e il riscaldamento degli edifici. Il terreno diventa quindi una fonte inesauribile di calore e allo stesso tempo diventa un deposito di energia infinito; da questi presupposti nasce la necessità di individuare le aree più favorevoli per l'installazione degli scambiatori geotermici.

Attualmente, l'energia geotermica è considerata una risorsa di grande interesse per il suo potenziale di sviluppo sostenibile e per le favorevoli prospettive di sfruttamento del calore interno della Terra. Gli impianti geotermici sono classificati in base all'entalpia dei fluidi utilizzati, i quali trasferiscono il calore dalle rocce calde e profonde alla superficie. La geotermia si divide in tre classi principali: alta entalpia, media entalpia e bassa entalpia; ogni classe ha diverse applicazioni, dalla generazione di elettricità alla climatizzazione degli edifici.

Nel presente elaborato si trattano le varie tipologie di impianti geotermici, con focus particolare su sonde geotermiche, pompe di calore, vantaggi e svantaggi dei sistemi stessi, partendo dai concetti di variazione della temperatura all'interno del terreno.

Di fondamentale importanza, per la creazione di un sistema di sonde geotermico, risultano le caratteristiche del terreno, in particolare si analizzano alcuni dei test di risposta termica e le linee guida per una corretta valutazione delle proprietà del suolo. In riferimento a questo, vengono approfonditi Thermal Response Test e Distributed Temperature Sensing, due tecniche complementari per il monitoraggio delle condizioni termiche del sottosuolo e delle strutture geotermiche.

Superata questa prima introduzione si discutono i metodi di installazione delle sonde geotermiche, materiali e caratteristiche principali della realizzazione, facendo particolare riferimento al campo di geoscambio realizzato ai piedi della "ex casa dello studente Fusinato", edificio soggetto a riqualifica per tornare ad adempire alla sua funzione originaria. In primis ci si è soffermati su un'analisi dei contenuti preventivi, quali disposizioni planimetriche, fabbisogno energetico dell'edificio e bilanci energetici; per poi passare al campo sonde di nuova realizzazione il quale viene presentato attraverso la relazione tecnica realizzata dall'azienda progettista dell'impianto.

Attraverso il presente impianto è stato possibile eseguire due tipi di test: Thermal Response Test (TRT) e il Distributed Temperature Sensing (DTS). È stato realizzato il confronto del solo TRT con la stratigrafia del terreno ottenuta da un sondaggio puntuale in un sito a 1km di distanza dal cantiere di riferimento. Si sono confrontati gli andamenti di temperatura media al 1° e al 25° anno di funzionamento della sonda per poi

commentare i grafici forniti riguardo le potenze mensili erogate dalla pompa di calore; infine si è giunti alla conclusione che le sonde geotermiche scambiano calore con il terreno in maniera bilanciata evitando che ci sia un accumulo di calore nel terreno in estate o un eccessivo raffreddamento in inverno.

Infine, viene confrontata la conducibilità termica equivalente con la capacità termica ottenuta dall'applicazione di valori tabellati secondo le linee guida tipo VDI.

1. La geotermia

Il termine geotermia deriva dal greco “geo” (terra) e “termia” (calore), ed è un settore della geofisica che studia la distribuzione e l'origine del calore all'interno della Terra.

L'origine di questo calore è attribuito alla natura interna del nostro pianeta ed ai processi fisici che in esso hanno luogo. Tale calore è presente in quantità enorme e si dissipa con regolarità verso la superficie della terra attraverso acqua in fase liquida o in fase vapore; manifestazioni superficiali evidenti del calore interno al Pianeta sono l'attività vulcanica, i geysers e le sorgenti termali.

Il flusso di calore geotermico è quindi il calore che viene trasmesso dalla parte più interna del Pianeta verso gli strati più esterni, e dipende da zona a zona. Esso proviene principalmente da due fonti: il calore residuo dalla formazione del pianeta, che si trasferisce dal nucleo terrestre alla crosta terrestre, e il decadimento radioattivo di elementi come Uranio (U238, U235), Torio (T232) e Potassio (K40) presenti nel mantello terrestre. Questo calore si accumula nelle rocce e nelle acque sotterranee, creando riserve di energia termica che possono essere sfruttate per diverse applicazioni.

Meno rilevante in termini di quantità, ma importante per la parte superficiale della crosta terrestre, è il contributo dell'irraggiamento solare che varia a seconda delle stagioni. Esistono tre diversi processi che regolano il trasferimento di calore:

- *Conduzione*: regola il trasferimento di calore tra corpi in contatto fisico ed implica il semplice spostamento di calore, ma non di materia. Fisicamente si può pensare come il flusso di calore dovuto a vibrazione e collisione di molecole ed elettroni liberi all'interno di un solido o di un fluido. Le molecole in un dato punto di un sistema che si trovano a temperatura più alta vibrano più velocemente delle molecole di altri punti dello stesso sistema che sono a temperatura più bassa. Le molecole con movimento maggiore collidono con le molecole meno energizzate e trasferiscono parte della loro energia alle molecole meno energizzate delle regioni più fredde della struttura;
- *Convezione*: il calore è trasferito tramite dei flussi all'interno di un fluido. La convezione è lo spostamento dei volumi di una sostanza in una fase liquida o gassosa. Quando una massa di un fluido viene riscaldata, le sue molecole vengono disperse e la massa di quel fluido perde di densità. Per questo motivo, la massa riscaldata si sposterà verticalmente e/o orizzontalmente, mentre la massa di fluido più fredda e densa scenderà (le molecole a bassa energia cinetica spostano le molecole negli stati ad alta energia cinetica). Attraverso questo processo le molecole del fluido caldo trasferiscono continuamente calore verso i volumi del fluido più freddo;
- *Irraggiamento*: fenomeno predominante ad altissime temperature ma irrilevante negli impianti geotermici a bassa entalpia (trattati nel capitolo 2), è il trasferimento di calore per onde elettromagnetiche o fotoni. Non ha bisogno di un mezzo di propagazione. L'energia trasferita dalla radiazione si muove alla velocità della luce. Il calore irradiato dal Sole può essere scambiato tra la superficie solare e la superficie terrestre senza riscaldare lo spazio di transizione.

Il calore del sottosuolo può essere utilizzato per fini termici, ma anche per la produzione di energia elettrica; infatti, già nel 1904 a Lardello (Pisa) nasce la geotermia profonda, intesa come sfruttamento del calore endogeno della Terra per la produzione di energia elettrica. Attribuito al principe Piero Ginori Conti, il primo esperimento di termoelettricità consisteva nell'accensione di una serie di lampadine attraverso una dinamo azionata da una macchina a vapore alimentata da un soffione geotermico (*figura 1*). Nel 1913, sempre a Lardello; nasce la generazione di elettricità dal vapore geotermico per scopo commerciale. Da quel momento in poi gli studi riguardanti l'energia geotermica sono andati via via crescendo.



Figura 1 - Larderello 1904. La prima macchina (un motore alternativo accoppiato ad una dinamo), che ha prodotto elettricità sfruttando il vapore geotermico. A fianco, il Principe Piero Ginori Conti

Ai giorni nostri l'energia geotermica suscita particolare interesse, grazie alle potenzialità di sviluppo offerte, in funzione della disponibilità delle risorse utilizzate, e alle favorevoli prospettive presentate da alcuni sistemi di sfruttamento del calore interno della Terra. Gli impianti che sfruttano questa energia vengono classificati in base all'entalpia dei fluidi che portano il calore in superficie.

L'entalpia è una grandezza che esprime il contenuto energetico di un fluido e dipende dalla sua temperatura e pressione. La geotermia può essere divisa in tre diverse classi: ad alta, a media e a bassa entalpia (M. Ciardi e R. Cataldi, 1977):

- *ad alta entalpia ($T > 150^{\circ}\text{C}$):* sfrutta fluidi molto caldi e in pressione, utilizzati per generare elettricità. Un esempio sono i vapori ad alta temperatura della Valle del Diavolo di Larderello;
- *a media entalpia ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$):* I fluidi interessati non hanno una temperatura sufficientemente elevata per muovere le turbine di una centrale "tradizionale", ma possono comunque essere utilizzati per generare energia elettrica;
- *a bassa entalpia ($90^{\circ}\text{C} > T$):* sfrutta l'inerzia termica e la stabilità termica del suolo (primi 100-150 m), trattando temperature basse (generalmente comprese tra 10 e 20°C) e stabili durante tutto il ciclo annuale.

1.1 Andamento della temperatura nel terreno

All'interno del sottosuolo la differenza di temperatura tra le zone profonde, più calde, e quelle superficiali, più fredde, dà origine ad un flusso di calore geotermico dall'interno verso l'esterno della Terra, tendente a stabilire condizioni di uniformità termica. Il gradiente geotermico rappresenta l'aumento di temperatura con la profondità, dipende dal flusso geotermico locale e varia a seconda del contesto geologico e geodinamico¹.

¹ La geodinamica studia le forze che agiscono sulla superficie terrestre; esogene (agenti atmosferici, acque superficiali, ecc.) ed endogene (vulcanesimo, orogenesi, sismi); e si occupa dei movimenti lenti (bradisismi) e bruschi (terremoti) della crosta terrestre.

Le variazioni climatiche stagionali vanno ad influenzare la temperatura dei primi 15-20 metri di profondità, superato questo primo strato invece si trova una zona dove la temperatura si mantiene costante tutto l'anno. L'andamento dei vari profili di temperatura, in funzione della profondità e delle stagioni, sono visibili in *figura 2*, nella presente si può vedere come la temperatura tenda a stabilizzarsi per profondità dell'ordine dei 20m. Successivamente, all'aumentare ulteriore della profondità, la temperatura tende ad aumentare con un valore medio di circa $2,5/3^{\circ}\text{C}$ ogni 100m di profondità, in dipendenza del flusso di calore geotermico locale.

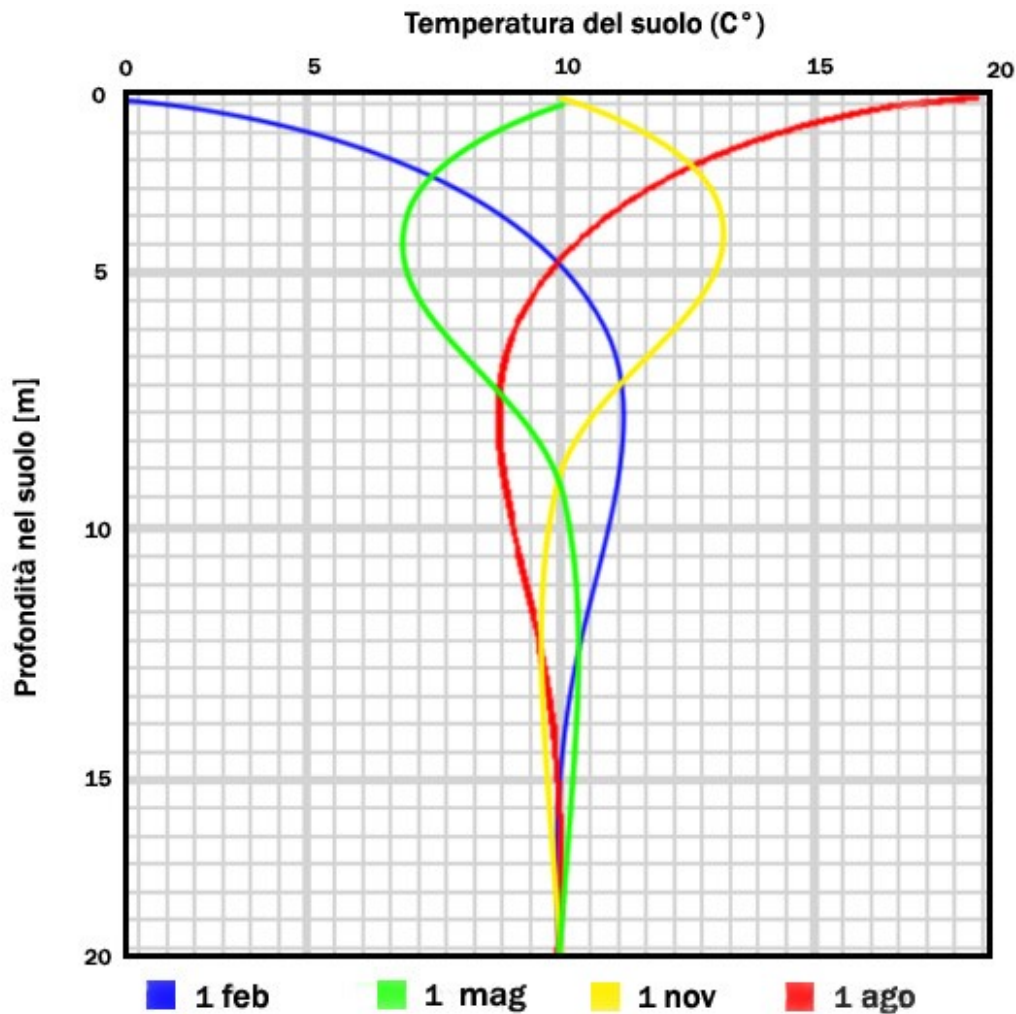


Figura 2 - Profili della temperatura del terreno in funzione della profondità

(www.expoclima.net)

Questa caratteristica di temperatura costante del terreno può essere sfruttata, attraverso delle sonde e delle pompe di calore geotermiche, per la climatizzazione degli edifici.

Le pompe di calore geotermiche rappresentano una delle soluzioni più avanzate ed efficienti per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici. Queste operano secondo un principio simile a quello delle pompe di calore tradizionali, ma utilizzano una fonte di calore diversa: non scambiano, infatti, calore con l'aria esterna, ma con il terreno e/o con l'acqua di falda ottenendo così maggiore efficienza di scambio termico.

2. Impianti geotermici

Un sistema geotermico può essere definito come *“un sistema fluido convettivo, che, in uno spazio confinato nella parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore dalla sorgente termica, al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)”* (Hochstein,1990).

L'energia geotermica, utilizzata in questi impianti sfruttando il sottosuolo ai fini energetici, è una risorsa che garantisce uno sviluppo sostenibile e rinnovabile. Un'altra importante distinzione è quella tra geotermia di alta entalpia e geotermia di bassa entalpia. Gli impianti geotermici ad alta entalpia traggono energia elettrica attraverso il calore emanato dal suolo terrestre, sfruttando anomalie geologiche che, in alcuni casi, possono arrivare a temperature di diverse centinaia di gradi. Gli impianti geotermici a bassa entalpia utilizzano il fatto che la temperatura del sottosuolo rimane costante per tutto l'arco dell'anno, grazie al flusso di calore geotermico; questa caratteristica si sviluppa a partire dalla profondità tra i -10 m e i -15 m. Per questa seconda tipologia di sistemi si hanno minori complicazioni nella fase di realizzazione della sonda in quanto si raggiungono profondità non troppo elevate; proprio per le caratteristiche appena citate, questi impianti risultano ottimi per applicazioni residenziali di taglia media e piccola.

Il calore nel sottosuolo si propaga per conduzione o per convezione, mentre la propagazione per irradiazione è solitamente trascurabile; a seconda del metodo di diffusione del calore, possiamo andare a distinguere impianti geotermici convettivi, che sfruttano l'acqua per il trasferimento del calore, e i sistemi conduttivi, nei quali non è presente un fluido vettore. L'impianto geotermico ha lo scopo di produrre acqua calda o fredda a partire da una pompa di calore accoppiata ad una “sorgente termica”; quest'ultima, in un impianto geotermico, può essere il suolo o l'acqua.

L'impianto geotermico di bassa entalpia è generalmente composto da una pompa di calore accoppiata ad una sorgente termica, per la climatizzazione di un edificio. La funzione di un impianto geotermico è quella di produrre acqua (ipoteticamente anche aria) calda o fredda a seconda della necessità, da inviare nell'impianto di climatizzazione interno all'edificio. Lo scambio tra sorgente e pompa di calore può essere effettuato in diversi modi, i più diffusi sono:

- sonde geotermiche verticali;
- acqua di falda;
- scambiatori orizzontali;
- geostrutture.

L'impianto geotermico permette la produzione di acqua calda per il riscaldamento invernale, e acqua fredda per raffrescare durante l'estate, inoltre è possibile produrre anche l'acqua calda sanitaria necessaria all'edificio: concentra quindi in un solo sistema le varie funzioni normalmente fornite separatamente da caldaie e condizionatori.

Il terminale d'impianto più adatto da utilizzare all'interno dell'edificio è quello rappresentato dai pannelli radianti a pavimento o a soffitto, proprio per la loro capacità di climatizzare l'ambiente sfruttando basse temperature e grandi superfici di scambio termico. Sono stati sviluppati recentemente nuovi fluidi refrigeranti da utilizzare all'interno delle pompe di calore, che permettono alle stesse di lavorare con performances elevate anche in presenza di terminali che sfruttano temperature elevate, o che comunque rendono gli impianti a pompa di calore sempre più versatili ed efficienti.

2.1 Terreni e proprietà termiche

Le proprietà termiche dei terreni sono fondamentali per il funzionamento efficace degli impianti geotermici, in quanto dalle proprietà termiche dei terreni dove è inserito lo scambiatore di calore a terreno dipende l'efficienza energetica dell'intero sistema. La comprensione e l'ottimizzazione di queste proprietà possono migliorare significativamente l'efficienza energetica dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento geotermico.

L'integrazione di conoscenze geotecniche e ingegneristiche è essenziale per sfruttare al meglio le risorse geotermiche disponibili e promuovere la sostenibilità energetica.

Le principali proprietà termiche dei terreni che influenzano il funzionamento delle sonde geotermiche includono la conduttività termica, la capacità termica, la diffusività termica e la resistenza termica. Di seguito, vengono esaminate in dettaglio ciascuna di queste proprietà e il loro impatto sulle sonde geotermiche.

- *Conduttività termica*: la conduttività termica (λ) è una misura della capacità di un materiale di condurre il calore. Nel contesto dei terreni, la conduttività termica varia notevolmente a seconda della composizione del terreno, del contenuto d'acqua, della densità e della temperatura. I terreni con alta conduttività termica, come quelli ricchi di minerali o saturi d'acqua, sono più efficienti nel trasferimento di calore rispetto ai terreni secchi o composti prevalentemente da materiali organici. Le sonde geotermiche beneficiano di una conduttività termica elevata del terreno circostante perché ciò permette un trasferimento di calore più efficiente tra il fluido all'interno della sonda e il sottosuolo. Questo è particolarmente importante in applicazioni che richiedono un elevato scambio di calore, come i sistemi di riscaldamento e raffreddamento geotermico.
- *Capacità termica*: la capacità termica è la quantità di calore necessaria per aumentare di un grado la temperatura di un'unità di massa di materiale. Nel caso dei terreni, la capacità termica dipende principalmente dal contenuto d'acqua e dalla composizione mineralogica. I terreni con alta capacità termica possono immagazzinare e rilasciare grandi quantità di energia termica, il che è vantaggioso per il funzionamento delle sonde geotermiche, soprattutto negli scambi a più lunga durata. Una maggiore capacità termica del terreno permette una stabilità termica superiore, riducendo le fluttuazioni di temperatura attorno alla sonda e migliorando l'efficienza del sistema geotermico. Questo è particolarmente utile in applicazioni a lungo termine dove è necessario mantenere una temperatura costante per periodi prolungati.
- *Diffusività termica*: la diffusività termica indica la velocità con cui un materiale risponde ai cambiamenti di temperatura. Un terreno con alta diffusività termica reagisce rapidamente ai cambiamenti di temperatura, permettendo un rapido trasferimento di calore tra la sonda geotermica e il terreno. Questo è utile in applicazioni che richiedono un riscaldamento o un raffreddamento rapido. Tuttavia, per applicazioni a lungo termine, una diffusività termica troppo elevata può causare fluttuazioni termiche indesiderate.
- *Resistenza termica*: la resistenza termica rappresenta la capacità di un materiale di resistere al flusso di calore. Nel contesto delle sonde geotermiche, una bassa resistenza termica del terreno circostante è preferibile per garantire un efficace scambio di calore. La resistenza termica è influenzata dalla composizione del terreno, dalla sua compattezza e dal contenuto d'acqua. Per ottimizzare le prestazioni delle sonde geotermiche, è importante minimizzare la resistenza termica tra la sonda e il terreno. Questo può essere ottenuto utilizzando materiali di riempimento con alta conduttività termica attorno alla sonda e migliorando il contatto termico tra la sonda e il terreno.

Altri elementi importanti, alcuni variabili nel tempo, che influenzano le proprietà termiche del terreno, sono:

- composizione del terreno: la composizione del terreno, inclusa la proporzione di sabbia, limo, argilla e materiali organici, determina le sue proprietà termiche, insieme alla granulometria e al grado di compattazione. I terreni sabbiosi, ad esempio, tendono ad avere una conduttività termica più alta rispetto ai terreni argillosi a causa della loro struttura granulare e della maggiore porosità. Tuttavia, i terreni argillosi possono trattenere più acqua, aumentando la capacità termica e la conduttività termica in condizioni sature.
- il contenuto d'acqua: il contenuto d'acqua del terreno è un fattore cruciale che influisce su tutte le proprietà termiche menzionate. L'acqua ha una conduttività termica e una capacità termica significativamente superiori rispetto all'aria; quindi, un terreno saturo d'acqua avrà una conduttività termica e una capacità termica maggiori rispetto a un terreno secco. Tuttavia, in condizioni di saturazione elevata, l'acqua può anche riempire gli spazi vuoti attorno alla sonda, riducendo la resistenza termica e migliorando l'efficienza dello scambio di calore. Nel capitolo 3.1.5 verrà trattata, in modo più dettagliato, l'influenza dell'acqua di falda, in alcuni casi quindi dotata anche di velocità, sul rendimento energetico delle sonde geotermiche.

Generalmente il sottosuolo mantiene una temperatura pressoché costante che nel territorio italiano si aggira tra i 12 e i 15°C per profondità comprese tra i -10 m e i -100 m. Il primo strato superficiale risente molto delle escursioni termiche dovute al cambio stagionale o più semplicemente al passaggio dal giorno alla notte; superati i -10 m di profondità la temperatura è in costante aumento (circa 3 °C ogni 100 m), questo gradiente termico varia in funzione del luogo considerato, della presenza di falde acquifere e dalle caratteristiche fisiche del terreno.

Il comportamento termico è influenzato dalla sequenza stratigrafica, dalla tipologia del terreno e le relative proprietà termiche associate che a loro volta dipendono da granulometria e mineralogia; a queste si aggiungono fattori come densità e contenuto d'acqua: all'aumentare della densità si riducono i vuoti tra i grani e di conseguenza aumenta la conduttività termica. Il grado di umidità, invece, è di difficile determinazione in quanto è molto variabile nel tempo a causa di fattori come: piovosità, evaporazione, presenza di vegetazione. Dato che la conducibilità dell'acqua è circa venti volte superiore a quella dell'aria le proprietà termiche del terreno possono variare nel tempo in relazione alle condizioni di utilizzo dello scambiatore geotermico; visto che il continuo scambio di calore modifica la temperatura del terreno nell'intorno, che a sua volta può influenzare il contenuto d'acqua. Piccoli abbassamenti di umidità provocano maggiori difficoltà nel trasferimento del calore: l'umidità si sposterà in zone del terreno con temperatura minore, quindi verso lo scambiatore in fase di riscaldamento e all'estremo opposto nella fase di raffreddamento.

La corretta determinazione delle proprietà termiche del terreno dove si vuole realizzare l'impianto geotermico è fondamentale per un buon dimensionamento e funzionamento dell'impianto a breve e a lungo termine. Essa può essere realizzata attraverso metodi a regime stazionario oppure a regime variabile. Questi ultimi risultano maggiormente versatili, veloci e di facile elaborazione; ad oggi uno dei metodi più utilizzati è quello del Ground Response Test (GRT), che verrà descritto nel Capitolo 3.

2.2 Pompe di calore geotermiche

Le pompe di calore (PDC) geotermiche rappresentano una delle soluzioni più avanzate ed efficienti per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici. Sono elementi che consumano energia elettrica per spostare il calore da un corpo più freddo (il terreno) ad un corpo più caldo (l'edificio, in inverno, e viceversa d'estate), operando secondo il Principio di Carnot inverso come le pompe di calore tradizionali. In questo caso però lo scambio di calore con il terreno e/o con l'acqua di falda, invece che con l'aria, risulta essere più efficiente perché la differenza di temperatura tra i due corpi è inferiore.

La PDC ha lo scopo di trasferire il calore tra il fluido termovettore (trattato al capitolo 2.3.1.6) e l'edificio: durante l'inverno, estrae calore dal terreno e lo trasferisce all'interno dell'edificio; durante l'estate il processo si inverte e il calore viene trasferito dall'edificio al terreno. (figura 3)

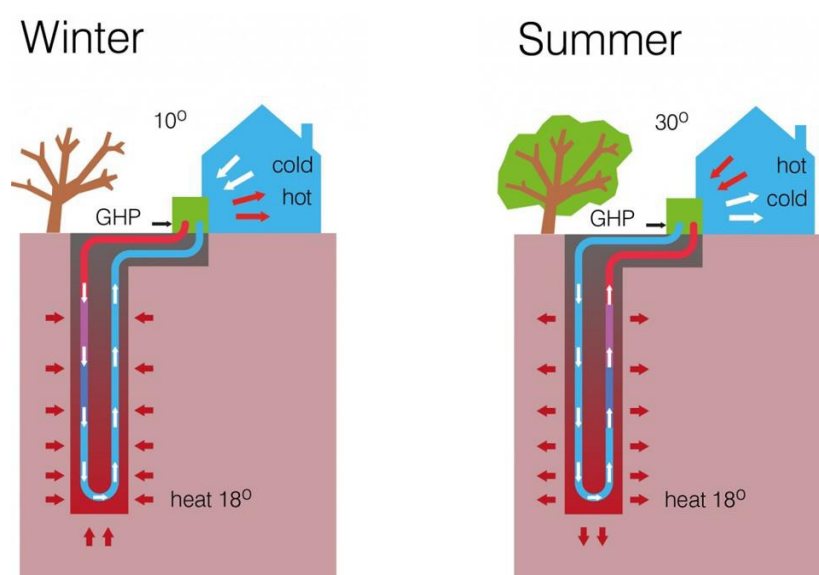


Figura 3 – Funzionamento invernale ed estivo di un sistema a circuito chiuso

(www.wordpress.com)

Questi sistemi vengono sfruttati sia in ambito residenziale che commerciale: nel primo caso si rivelano particolarmente adatti a case singole o edifici multifamiliari; in ambito commerciale, possono essere utilizzate per riscaldare e raffreddare uffici, scuole, ospedali e altre grandi strutture. Inoltre, possono essere integrate in sistemi di teleriscaldamento e teleraffreddamento, fornendo così un'efficace soluzione energetica per interi quartieri o complessi edilizi.

Nonostante i costi iniziali elevati e alcune limitazioni legate alla compatibilità del sito, i vantaggi delle pompe di calore in termini di efficienza energetica, sostenibilità ambientale e riduzione dei costi operativi le rendono una scelta eccellente per chi cerca un'alternativa verde e a lungo termine ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento tradizionali.

2.3 Sistemi a circuito aperto e chiuso

Gli impianti geotermici a sonde possono essere classificati in due principali categorie: sistemi a circuito chiuso e sistemi a circuito aperto. Entrambi i tipi di sistemi utilizzano il terreno o l'acqua sotterranea per scambiare calore, ma differiscono nel modo in cui lo fanno.

Sistemi a Circuito Chiuso

Nei sistemi a circuito chiuso, un fluido termovettore, costituito da sola acqua (meglio) o, solo dove necessario, da una miscela di acqua e antigelo tipo glicole in diverse percentuali, circola attraverso un sistema di tubi sepolti nel terreno. Il calore viene trasferito dal terreno circostante al fluido termovettore e questo lo rende disponibile in superficie alla pompa di calore. I sistemi a circuito chiuso possono essere costituiti da sonde verticali, orizzontali oppure a spirale (trattati nel capitolo 2.2.1).

Questi sistemi a circuito chiuso sono affidabili, in quanto duraturi nel tempo, ed hanno scarso impatto ambientale poiché non c'è scambio diretto di acqua con l'ambiente. Solitamente questi sistemi necessitano un costo di installazione iniziale elevato dovuto alle procedure di scavo e installazione e, solo per le sonde orizzontali, ampio spazio.

Sistemi a Circuito Aperto

Nei sistemi a circuito aperto l'acqua sotterranea viene prelevata da un pozzo di approvvigionamento, utilizzata per scambiare calore nella PDC e poi reiniettata in un altro pozzo di reiniezione o rilasciata in un corso d'acqua superficiale, a seconda della tipologia di corpo d'acqua e alla legislazione vigente. Questi sistemi sfruttano direttamente l'acqua di falda come mezzo di scambio termico.

I sistemi a circuito aperto tendono a essere più efficienti a causa del migliore scambio termico con l'acqua sotterranea, che ha una temperatura più stabile rispetto al terreno, poiché la risorsa termica costituita dall'acqua di falda, viene continuamente rinnovata e non subisce le variazioni di temperatura legate al funzionamento del sistema di scambio stesso. Tuttavia, questa efficienza dipende dalle caratteristiche della falda (spessore dell'acquifero, portata, temperatura).

Solitamente i costi di installazione sono inferiori rispetto ai sistemi a circuito chiuso, perché i pozzi da realizzare sono molto meno numerosi e solitamente meno profondi, inoltre l'efficienza termica è superiore grazie all'uso diretto dell'acqua sotterranea, avendo quindi uno scambio di calore in meno rispetto ai sistemi a circuito chiuso. La possibilità di realizzare questo tipo di impianto però dipende dalla presenza e dalle caratteristiche della falda sotterranea: si richiede una fonte affidabile, costante e abbondante la quale non deve essere contaminata e non deve essere alterato in modo permanente il livello di falda. Proprio per questi motivi sono necessari permessi ambientali e autorizzazioni per il prelievo e la reimmissione. Questi sistemi richiedono, inoltre, una manutenzione più frequente per evitare problemi di intasamento o contaminazione dei pozzi.

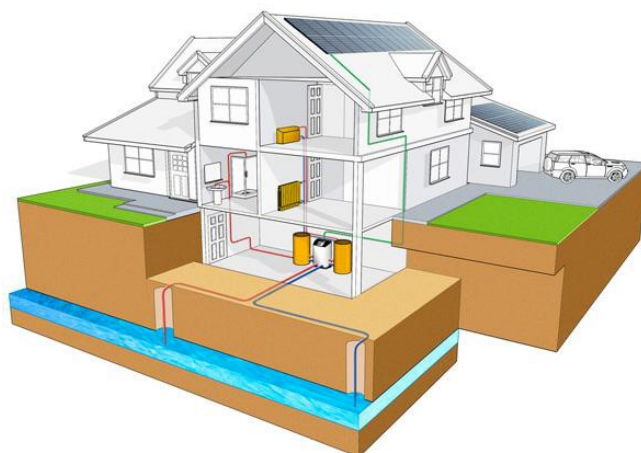


Figura 4 - Sistema a circuito aperto

(www.geonovis.com)

La scelta tra un sistema a circuito chiuso e un sistema a circuito aperto dipende da vari fattori, tra cui: la disponibilità di spazio, le caratteristiche del terreno, la qualità dell'acqua sotterranea e le esigenze specifiche dell'edificio. Entrambi i sistemi offrono vantaggi significativi in termini di efficienza energetica e sostenibilità, ma richiedono un'attenta valutazione delle condizioni locali e delle esigenze specifiche per garantire un funzionamento ottimale.

2.3.1 Circuiti chiusi: sonde geotermiche Orizzontali e Verticali

Esistono due tipi principali di sonde geotermiche: verticali e orizzontali. Entrambi i sistemi contribuiscono significativamente alla riduzione delle emissioni di gas serra e al risparmio energetico, rappresentando una parte importante della transizione verso un futuro energetico sostenibile. Con un'adeguata progettazione, installazione e manutenzione, le sonde geotermiche possono fornire una fonte affidabile ed ecologica di comfort termico per molte generazioni a venire.

La scelta tra sonde orizzontali e verticali dipende da un'analisi dettagliata del sito che considera vari fattori, tra cui la disponibilità di spazio, le caratteristiche del suolo, il clima locale e le esigenze energetiche dell'edificio. Un'analisi termica del suolo è essenziale per determinare la capacità del terreno di trasferire calore e per dimensionare correttamente il sistema.

Sonde Geotermiche Orizzontali:

Solitamente le sonde geotermiche orizzontali sono tubi di polietilene ad alta densità (HDPE) disposti in trincee scavate a una profondità compresa tra -1 e -2 metri. Queste tubazioni possono avere diverse configurazioni, come serpentine o a spirale, a seconda delle specifiche del sito e vengono distribuite all'interno del terreno; richiedono perciò superfici ampie che non sono sempre disponibili in ambito urbano e in lotti di dimensioni ridotte. Inoltre, a causa della posa superficiale delle sonde l'impianto sarà influenzato dalle variazioni stagionali riducendo, in alcuni casi, l'efficienza del sistema. Questa tipologia di sonda non richiede perforazioni profonde e la posa delle tubazioni risulta meno complessa e meno costosa rispetto a quella delle sonde verticali.

Le sonde geotermiche a spirale, sono una particolare tipologia di sonde geotermiche orizzontali, progettate per massimizzare la superficie di scambio termico tra il terreno e il fluido termovettore, offrendo una soluzione efficace in situazioni dove lo spazio è limitato, migliorando l'efficienza dello scambio termico rispetto ai sistemi lineari. L'efficienza delle sonde a spirale dipende dalle caratteristiche del suolo, come la conducibilità termica e la capacità termica. Terreni con scarsa conducibilità termica potrebbero ridurre l'efficienza del sistema. Essendo installate a profondità relativamente basse, le sonde a spirale possono essere influenzate dalle variazioni stagionali della temperatura del suolo più di quanto non accada con le sonde verticali. Nonostante l'ottimizzazione dello spazio rispetto ad altre configurazioni, le sonde a spirale richiedono comunque una superficie orizzontale significativa per l'installazione delle trincee. In *figura 5* è possibile vedere lo schema tipico di uno scambiatore orizzontale.

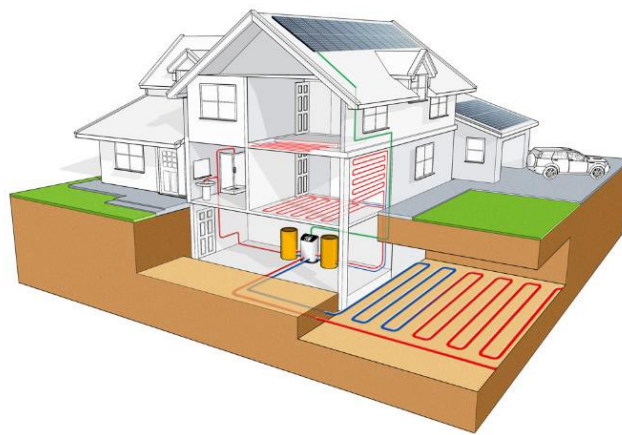


Figura 5 - Sistema a sonde orizzontali (SGO)

(www.geonovis.com)

Sonde Geotermiche Verticali:

La profondità delle sonde geotermiche verticali varia a seconda delle condizioni geologiche locali e delle esigenze energetiche dell'edificio; le temperature del suolo a profondità maggiori sono meno influenzate dalle condizioni superficiali e stagionali, garantendo un'efficienza termica stabile e prevedibile nel tempo, e quindi l'efficienza di scambio aumenta se si realizzano sonde più profonde possibili (fino a 120-150m), aumentando però così il costo di realizzazione del foro.

Nel pozzo viene posta una tubazione, tipicamente in polietilene ad alta densità, nella quale viene fatto circolare il fluido termovettore a base di acqua e glicole. Il foro del pozzo viene poi riempito con materiale ad elevata conducibilità termica per migliorare il trasferimento di calore tra terreno e fluido e sigillare le sonde.

Le sonde geotermiche verticali richiedono meno spazio in superficie rispetto alle sonde orizzontali, rendendole ideali per aree urbane e lotti di dimensione ridotte. I costi di installazione sono elevati a causa della realizzazione dei fori profondi con attrezzature specifiche e una valutazione geologica accurata. Eventuali interventi di manutenzione o riparazione delle sonde verticali possono risultare complesse e

molto più costose rispetto a quelle orizzontali. Questa tipologia di sonde è particolarmente adatta per edifici situati in aree urbane densamente popolate o in lotti di piccola dimensione dove lo spazio per le trincee orizzontali è limitato. In *figura 6* è possibile vedere lo schema tipico di uno scambiatore verticale.

Tra i -100 m e i -150 m la temperatura del sottosuolo si può approssimare come costante, in Pianura Padana risulta pari a circa 13 °C, salvo le situazioni a vocazione geotermica classica, dove è presente una anomalia geotermica, come nell'area dei Colli Euganei. Per estrarre calore dal sottosuolo mediante la sonda geotermica è sufficiente mettere acqua nella sonda ad una temperatura di 4-6 °C inferiore a quella del sottosuolo.

Le temperature di mandata e di ritorno della sonda sono funzioni di vari parametri: lunghezza della sonda, temperatura del sottosuolo, portata dei circolatori in pompa di calore e presenza o meno di falde. Altri fattori che influenzano le temperature del fluido, e quindi la quantità di calore scambiato con il terreno, sono: le ore di funzionamento, le ore di lavoro della pompa, energie in gioco durante la stagione invernale e la richiesta di acqua sanitaria calda.

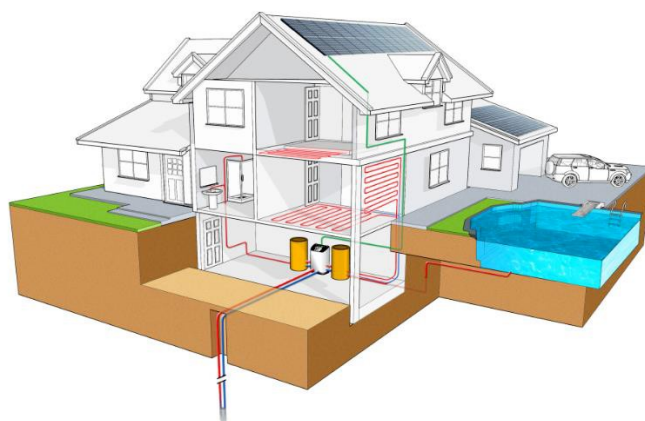


Figura 6 - Sistema a sonde verticali (SGV)

(www.geonovis.com)

La scelta tra le due tipologie dipende da una serie di fattori specifici del sito e delle esigenze energetiche dell'edificio. Le sonde orizzontali sono spesso preferite per i loro costi di installazione inferiori e la semplicità di posa, mentre le sonde verticali sono ideali per situazioni in cui lo spazio è limitato e l'efficienza termica stabile è prioritaria.

Sebbene entrambi i tipi di sonde geotermiche siano considerati ecologici, l'installazione delle sonde può avere impatti ambientali temporanei che devono essere gestiti attentamente: la rimozione di vegetazione, la modifica del paesaggio e il rischio di contaminazione delle falde acquifere sono considerazioni importanti. È essenziale seguire le normative locali e implementare misure di mitigazione per ridurre l'impatto ambientale.

Nella maggior parte dei casi gli impianti geotermici sono a circuito chiuso (closed loop) e tipicamente l'impianto verticale è sfruttato come soluzione standard in installazioni di tipo commerciale ed in edifici pubblici.

Le tipologie di scambiatori esistenti (figura 7) possono essere ad U (singola, doppia, tripla o quadrupla) oppure scambiatori coassiali (semplici o complessi).

La soluzione ad U è la scelta adottata maggiormente in quanto è un sistema affidabile ed è la tipologia che ha meno guasti. L'impiego delle sonde a doppia U garantisce la funzione di almeno un tubo in caso il secondo sia bloccato; inoltre, si ha una resistenza termica del pozzo minore in quanto la parte di cemento presente nel pozzo è inferiore e nei tubi di diametro minore il regime idraulico del fluido termovettore è altamente turbolento, garantendo coefficienti di scambio termico più elevati (L. Fanizzi, 2013).

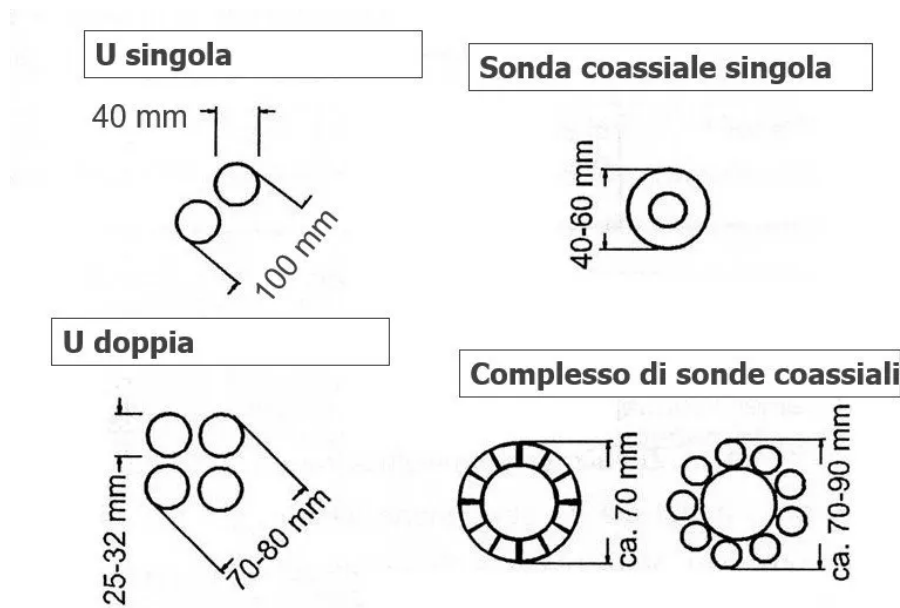


Figura 7 - Tipologie di scambiatori

(alessandrogaza.com)

2.3.1.1 Perforazione

I primi impianti non superavano generalmente i -50, -80 m di profondità per problemi tecnici ed economici, oggi invece, grazie all'evoluzione tecnologica, si arriva a -200 m di profondità.

Attualmente i metodi utilizzati per la realizzazione del foro per l'installazione delle sonde geotermiche sono rotazione a circolazione diretta di fango e perforazione ad aria.

Sia il fango che l'aria vengono pompate all'interno delle aste di perforazione, con il compito di lubrificare e raffreddare la trivella, convogliare all'esterno i frammenti di terra e roccia, esercitare una contro pressione per contenere la fuoriuscita dei fluidi di strato, sostenere le pareti del foro ed evitare che falde a diverso livello vengano in contatto tra loro.

La perforazione a circolazione diretta di fanghi bentonitici si adoperava in terreni teneri e con tendenza al franamento; essa consiste nell'iniezione ad alta pressione di una miscela acquosa di bentonite: il composto fangoso attraversa le aste, lo scalpello per poi risalire dal fondo del pozzo. I fanghi bentonitici vengono poi accumulati in una vasca dove vengono fatti decantare i materiali frantumati, mentre la sospensione

bentonitica resta in superficie e riprende il ciclo. Le caratteristiche dei fanghi vengono regolate in modo da evitare cedimenti all'interno del foro; inoltre, la viscosità deve permettere il trasporto dei detriti in superficie. Altre funzioni dei fanghi sono: il raffreddamento degli organi meccanici, la lubrificazione dello scalpello, sostenere lo scavo, creare uno strato sottile che impedisce alle acque delle falde superficiali di contaminare le falde più profonde. A seconda dei terreni da perforare possono essere utilizzati vari additivi (attapulgite per acquiferi salmastri, fluidificante, addensanti, colmatanti per sigillare gli strati fessurati).

La perforazione ad aria si utilizza per terreni rocciosi, duri o abrasivi: il fluido viene iniettato ad alta pressione nel terreno provocando una veloce risalita dei detriti ed una perfetta pulizia del foro, evitando così attriti e relativo surriscaldamento dello scalpello. L'aria compressa viene immessa a fondo foro attraverso le aste di perforazione, questo può avvenire attraverso tre tecniche differenti:

- a secco: l'aria solleva i detriti utilizzando pressioni elevate;
- miscelata a schiumogeno: l'aria solleva i frammenti, mentre la miscela di acqua e schiuma rimuove i detriti più grossi;
- miscelata a schiuma stabilizzata ed addensata: l'aria aggiunge volume, mentre la schiuma solleva i detriti e pulisce il foro.

2.3.1.2 Materiali

I primi scambiatori erano realizzati in rame, ma, nonostante le ottime proprietà di scambio termico, sono stati abbandonati poiché questi tubi inseriti nel terreno erano soggetti a corrosione. Oggigiorno il materiale maggiormente adoperato è il polietilene in quanto ha caratteristiche di flessibilità e può essere fuso per realizzare giunti più resistenti del tubo stesso. Negli ultimi anni si è diffuso l'utilizzo di tubazioni in polietilene reticolato, questo materiale presenta buone caratteristiche di scambio termico con il sottosuolo e maggiore resistenza alle crepe ed al propagarsi di fenditure, utilizzare questo materiale comporta un costo più elevato (S. Basta e F. Minchio, 2007).

L'impiego di tubi in PVC per il tratto sottoterra del circuito non è praticato a causa delle forti pressioni presenti in profondità e a causa delle temperature di esercizio (argomento approfondito al capitolo 2.4).

2.3.1.3 Diametri e spessori

Lo spessore del tubo che costituisce lo scambiatore dovrebbe essere il più piccolo possibile per favorire lo scambio termico, uno spessore maggiore viene impiegato nelle estremità delle tubazioni così da assicurare un'adeguata resistenza meccanica. D'altro canto, il diametro deve essere sufficientemente grande al fine di limitare la potenza di pompaggio necessario, ma abbastanza piccolo da assicurare un regime idraulico turbolento. Un diametro maggiore comporta un maggior costo del tubo e necessita una maggiore quantità di fluido termovettore (capitolo 2.3.1.6) con maggiore difficoltà di installazione.

Le singole sonde vengono raggruppate solitamente in gruppi da 6, collegate ad un pozzetto centrale. Per i collegamenti orizzontali, le giunzioni vengono realizzate tramite fusione termica, che permette di ottenere una saldatura più resistente del tubo stesso.

2.3.1.4 Piede di sonda

In un tubo ad U il punto più delicato è senza dubbio il piede o base dello scambiatore stesso; infatti, in questo punto avviene l'inversione del moto rispetto alla verticale del fluido termovettore e la pressione dovuta alla colonna d'acqua presente nel tubo è massima. A causa di problemi derivanti dalla saldatura solitamente si forniscono sonde già complete della parte terminale così da evitare eventuali perdite irreparabili.

2.3.1.5 Cementazione del preforo

Una volta che le sonde sono calate nel foro, quest'ultimo viene riempito con boiaccia cemento-bentonitica a partire dal fondo. Il materiale di riempimento viene immesso fino al piano campagna. È importante porre attenzione che non restino interstizi vuoti in quanto questo farebbe calare drasticamente lo scambio termico con il terreno circostante.

Gli interstizi d'aria attorno alle sonde geotermiche possono ridurre l'efficienza della sonda stessa per diversi motivi:

1. L'aria è un cattivo conduttore di calore rispetto ai materiali come il terreno o il cemento. Gli interstizi d'aria agiscono come un isolante termico, ostacolando il trasferimento di calore tra il terreno e il fluido all'interno della sonda geotermica.
2. La presenza di spazi vuoti riduce la superficie effettiva attraverso cui il calore può essere scambiato, diminuendo così l'efficienza del sistema.

Con questa operazione si assicura una completa adesione del sottosuolo alla parete della sonda e si ottimizza lo scambio energetico. La corretta cementazione permette una riduzione della differenza fra la pressione statica del fluido termovettore che circola nei tubi e la pressione all'esterno dei tubi stessi; consente, inoltre, di aumentare la profondità delle sonde. L'operazione di cementazione è estremamente delicata in quanto va ad influenzare in maniera drastica la resa della sonda. Una cementazione non corretta sarà visibile solamente con il passare degli anni. Inoltre, una corretta cementazione è fondamentale per motivi ambientali: garantisce di mantenere la adeguata separazione tra falde sovrapposte, se presenti, e permette di non avere sversamenti del fluido termovettore nel sottosuolo e nell'ambiente, nel caso di fessurazione del tubo.

È importante che ci sia un buon contatto termico tra terreno e scambiatori, i valori di resistenza termica di uno scambiatore dipendono dal materiale con cui sono realizzati, ma anche dal materiale di riempimento. Il materiale di riempimento deve essere:

- environmental friendly, ovvero compatibile con l'ambiente circostante poiché il materiale potrebbe venire in contatto con falde sottostanti;
- non solubile in acqua così da evitare alterazioni di eventuali falde intercettate;
- dotato di conduttività termica paragonabile a quella del sottosuolo con cui è a contatto (circa 2 W/mK);
- pompabile in sospensione acquosa;
- leggermente espansivo al fine di sigillare il preforo ed evitare il contatto tra falde di profondità diverse;
- debolmente elastico in modo da non fratturarsi;
- elevata fluidità in fase di posa così da evitare vuoti.

La bentonite o le miscele cementizie per le costruzioni non sono adeguate per la cementazione del preforo, in quanto non hanno le caratteristiche necessarie, e hanno conduttività termica inferiore a quella del terreno; questo ha portato allo sviluppo di nuovi materiali cementizi sviluppati appositamente, caratterizzati da elevata conducibilità termica, che hanno permesso la riduzione della lunghezza complessiva dei pozzi anche del 22-35% (S. Basta e F. Minchio, 2007).

Tra i vari materiali di riempimento del preforo, noti anche come materiali di sigillatura o grout, troviamo calcite o dolomite o pozzolana, sabbia e vari additivi per migliorare la conducibilità termica. L'aggiunta di

sabbia alle miscele di riempimento, in percentuali che possono arrivare fino al 15%, serve per migliorare la stabilità e ridurre gli effetti di ritiro volumetrico, inoltre la sabbia aumenta la conducibilità termica della miscela. Gli additivi sono fondamentali per ottimizzare le proprietà del riempimento, in particolare la conducibilità termica. Tra questi si possono trovare:

- Grafite: materiale estremamente conduttivo, che migliora lo scambio termico.
- Silice micronizzata: aumenta la conducibilità termica e riduce la viscosità della miscela.
- Fibre metalliche o minerali: rinforzano la miscela e aumentano la capacità termoconduttiva.
- Sali disciolti: alcuni composti, come i cloruri di sodio o di calcio, possono migliorare la trasmissione termica, ma devono essere utilizzati con cautela per evitare effetti corrosivi.

Tra i vari prodotti in commercio si possono trovare: FassaGEO100, THERMOCEM PLUS (HeidelbergCement), THERMOPLAST (Laviosa), CreteoinjectCC854 (Rofix).

È possibile utilizzare il materiale di risulta dello scavo per il riempimento del preforo nel caso questo abbia caratteristiche fisiche idonee a garantire un'adesione completa allo scambiatore. Questa pratica è ottima in caso ci sia un pozzo di emungimento d'acqua in vicinanza della sonda così da non diminuire la permeabilità. Per garantire continuità termica tra le sonde le pareti del pozzo, in sottosuoli rocciosi compatti ed impermeabili come il granito, come materiale di riempimento si potrebbe utilizzare anche l'acqua. Con l'aumento della temperatura l'acqua scambia per convezione e lo scambio complessivo risulta migliorato, come è stato dimostrato dal GRT (S. Basta e F. Minchio, 2007).

2.3.1.6 Fluido termovettore e principali fluidi

Prima di essere collegate alla pompa di calore, le sonde vanno riempite con il fluido termovettore. Il fluido termovettore può essere acqua solo nel caso in cui si abbia la certezza che le temperature del fluido non scendano al di sotto degli 0 °C, in caso contrario sarà necessario ricorrere all'utilizzo di altri fluidi con caratteristiche anticongelanti.

Ricordiamo inoltre che le sonde installate a profondità relativamente basse sono più suscettibili alle variazioni di temperatura stagionali. L'uso di antigelo risulterà quindi necessario per mantenere la fluidità e per prevenire il congelamento così da assicurare che il sistema funzioni in modo efficiente anche a basse temperature, evitando danni e rotture alle sonde. Inoltre, l'uso di antigelo dipende fortemente dalla temperatura iniziale del terreno stesso.

È importante che i componenti del sistema siano compatibili con il tipo di antigelo così da evitare degrado o corrosione dei materiali; la concentrazione deve essere adeguatamente calibrata per garantire la protezione dal congelamento senza compromettere l'efficienza termica.

Le caratteristiche fisiche tecniche di maggior importanza per i fluidi considerati sono: viscosità, colore specifico, punto di congelamento.

Per quanto riguarda le proprietà di scambio termico, l'acqua potabile è senz'altro la migliore, ma il suo impiego in Europa del nord, per esempio, è molto difficile a causa del congelamento. Gli anticongelanti attualmente in uso sono etanolo, metanolo, acetato di potassio e glicole propilenico. Tutti i fluidi sono generalmente soluzioni in acqua di un determinato composto chimico così da assicurare un punto di congelamento intorno ai -10 °C. Il fluido deve avere le seguenti caratteristiche: non tossico, non infiammabile, stabile, compatibile con i materiali degli altri componenti del sistema, a basso impatto ambientale, non corrosivo, economico, con bassa viscosità e con ottime caratteristiche di scambio termico. Fra i fluidi che soddisfano più di qualcuno delle precedenti caratteristiche troviamo vari anticongelanti di

cui l'uso più comune è il glicole propilenico. Le soluzioni saline sono non tossiche e non infiammabili, ma causano problemi di corrosione.

In caso di rottura della sonda, qualora questa intercetti falde potabili, vi è la possibilità di sversamento della soluzione a base di glicole. Per questo viene utilizzato glicole non tossico.

2.3.1.7 Collegamenti orizzontali

Una volta posate le sonde è necessario raccordare tutte le mandate e tutti i ritorni collegandoli poi alla pompa di calore. Per l'installazione di collegamenti orizzontali è necessario garantire un flusso omogeneo ed equilibrato in ogni sonda del circuito. Le sonde possono essere in serie o in parallelo. Queste configurazioni influenzano il modo in cui il fluido termovettore scorre attraverso il sistema, determinando l'efficienza termica e le prestazioni complessive. Il confronto tra le due tecnologie è riassunto in Tabella 1.

I collegamenti orizzontali tra una sonda e l'altra o tra le singole sonde il collettore vengono realizzati anch'essi in trincee, per permettere il ricoprimento con il terreno di almeno 1m, in modo da non avere eccessive dispersioni termiche.

- Collegamento in serie: il fluido termovettore scorre attraverso una sonda alla volta. Il fluido entra nella prima sonda, esce ed entra nella successiva, e così via fino a completare il circuito. La lunghezza complessiva del circuito deve essere limitata a causa delle elevate perdite di carico e della relativa diminuzione di pressione, rendendo questa configurazione meno adatta per sistemi di grandi dimensioni. La capacità di trasferimento del calore può diminuire con il passare del fluido attraverso più sonde poiché il fluido tende a riscaldarsi o raffreddarsi progressivamente, riducendo il gradiente termico.
- Collegamento in parallelo: in un collegamento in parallelo, il fluido termovettore viene diviso in più rami che scorrono simultaneamente attraverso diverse sonde. Un sistema di questo tipo avrà minori perdite di carico e migliore scambio termico in quanto ciascuna sonda lavorerà alla stessa temperatura, mantenendo un trasferimento di calore ideale. L'installazione del collegamento in parallelo risulta complesso in quanto si richiede bilanciamento del flusso tra i rami così da evitare il sovraccarico di una sonda rispetto ad un'altra.

<i>Caratteristica</i>	<i>Collegamenti in Serie</i>	<i>Collegamenti in Parallelo</i>
<i>Perdite di Carico</i>	<i>Alte</i>	<i>Basse</i>
<i>Efficienza Termica</i>	<i>Variabile</i>	<i>Alta</i>
<i>Complessità di Progettazione</i>	<i>Bassa</i>	<i>Alta</i>
<i>Costi di Installazione</i>	<i>Moderati</i>	<i>Elevati</i>
<i>Flessibilità di Espansione</i>	<i>Limitata</i>	<i>Alta</i>
<i>Controllo della Temperatura</i>	<i>Buono</i>	<i>Ottimo</i>

Tabella 1 - Confronto tra collegamento in serie e in parallelo

La scelta tra collegamenti in serie e in parallelo dipende da un'analisi approfondita del sito, considerando fattori come:

- **Dimensioni dell'impianto:** per impianti di grandi dimensioni, i collegamenti in parallelo sono spesso preferibili per mantenere l'efficienza.
- **Geologia del terreno:** la conducibilità termica del suolo può influenzare la scelta della configurazione.
- **Disponibilità di spazio:** la disposizione delle sonde nel terreno può essere influenzata dallo spazio disponibile e dalla topografia del sito.
- **Esigenze energetiche:** la domanda di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio può determinare il numero di sonde necessarie e la configurazione ottimale.

Entrambe le configurazioni devono considerare la gestione delle risorse idriche e la protezione delle falde acquifere in riferimento alle indicazioni dettate dalle normative locali.

2.3.1.8 Allestimento in cantiere

Per l'installazione delle sonde geotermiche verticali si procede con l'inserimento delle sonde in pozzi realizzati attraverso la macchina perforatrice; i detriti di roccia frantumata dallo scalpello risalgono attraverso le aste fino in superficie dove vengono scaricati in una vasca di raccolta. Raggiunta la profondità finale si estraiono le aste e si introducono nel foro le sonde geotermiche.

Nelle rocce compatte lo scambiatore, riempito precedentemente d'acqua, viene inserito nel pozzo e spinto dal suo stesso peso; la roccia dura è molto adatta per l'installazione di sonde geotermiche verticali in quanto è possibile la realizzazione di fori più piccoli e di conseguenza un elevato scambio termico.

In terreni argillosi o sabbiosi è necessario sostenere il foro con un casing durante le operazioni di scavo fino al completamento delle operazioni di sigillatura del foro. Per l'inserimento della sonda solitamente si applica una zavorra al piede della sonda così da facilitare l'inserimento dei tubi nel pozzo. Le sonde vengono portate in cantiere preassemblate e pronte per l'installazione, a seconda del tipo di sottosuolo la sonda va opportunamente zavorrata: può essere necessario aumentare la massa così da vincere la spinta archimedeica che viene a crearsi all'interno del foro, rendendo più agevole la calata della sonda.

In terreni particolarmente soffici è possibile procedere all'installazione diretta degli scambiatori attraverso un macchinario che permette l'installazione della sonda in trincea o in fango attraverso una pressa perforatrice; le profondità raggiungibili sono limitate (circa -10 m), ma è possibile evitare scavi e perforazioni (S. Basta e F. Minchio, 2007).

Le sonde geotermiche possono essere installate in qualsiasi posizione rispetto all'edificio che andranno a servire in quanto non è possibile realizzare alcuna manutenzione e quindi potrebbero anche essere posate al di sotto del perimetro dell'edificio stesso.

Alla fase di posa seguirà il collaudo, questo risulta necessario per assicurare la qualità dell'installazione, il corretto funzionamento dell'impianto e le prestazioni termiche.

Tra i vari test eseguibili troviamo:

1. **Verifica del Circuito Idraulico:** si controlla che il circuito idraulico della pompa di calore sia libero da aria e che il fluido circoli correttamente attraverso la sonda. Questo assicura che non ci siano bolle d'aria che potrebbero compromettere l'efficienza del sistema.
2. **Test di Pressurizzazione:** verifica l'integrità del circuito chiuso della sonda. Il sistema viene pressurizzato per rilevare eventuali perdite. La pressione viene mantenuta per un determinato periodo di tempo, e qualsiasi calo di pressione indica una perdita che deve essere riparata prima di procedere. Per sonde con profondità superiore a -100 m si provvede a caricarla con una pressione di 6 bar.

2.3.1.9 Dimensionamento delle sonde e conseguenze di errati dimensionamenti

Un dimensionamento accurato del campo sonde garantisce che il sistema geotermico sia in grado di soddisfare la domanda energetica dell'edificio in modo efficiente, evitando sovradimensionamenti o sottodimensionamenti che possono portare a inefficienze operative o costi eccessivi. L'accoppiamento tra sonde e terreno determina le prestazioni della sonda stessa.

Criticità derivante dal dimensionamento di questi impianti è la determinazione delle proprietà termiche del terreno e la modulazione del comportamento fisico dello scambiatore verticale. Alla base di un corretto dimensionamento delle sonde geotermiche troviamo analisi dettagliate riguardanti:

1. **Domanda energetica dell'edificio:** è fondamentale calcolare la quantità di energia necessaria per riscaldare e raffrescare l'edificio durante l'anno. Questo dipende dall'isolamento termico, dalla superficie e volume dell'edificio, dall'esposizione, dall'uso previsto e dalle condizioni climatiche locali.
2. **Proprietà termiche del suolo:** come già detto, la capacità del terreno di condurre e immagazzinare calore varia a seconda della composizione del suolo, della presenza di acqua e delle condizioni geologiche. Come verrà descritto nel paragrafo 3.1, è necessario eseguire test termici detti Thermal Response Test TRT o Ground Response Test (GRT) con lo scopo di determinare la conducibilità termica equivalente del sottosuolo e la resistenza termica della sonda.
3. **Tipo e dimensione della sonda:** esistono diverse tipologie di sonde, tra cui quelle verticali, orizzontali e a spirale. La scelta di queste varia a seconda di diversi fattori visti precedentemente al capitolo 1.1.2.

L'uso di software avanzati può facilitare il dimensionamento delle sonde geotermiche attraverso delle simulazioni termiche essenziali così da: verificare il comportamento termico del sistema nel corso delle stagioni e del tempo, valutare il bilancio energetico annuale e il coefficiente di prestazione (*Coefficient of Performance COP*) che indica l'efficienza della pompa di calore nel trasferire calore.

Per quanto riguarda l'influenza termica dello scambiatore nel terreno circostante, il continuo scambio termico che avviene con il terreno genera una sorta di bacino termico di forma cilindrica nel terreno, il fenomeno non è puramente conduttivo, ma contribuiscono il moto dell'acqua di falda e la diffusione del vapore acqueo nei suoli saturi. In presenza di movimento d'acqua significativo l'equilibrio è raggiunto con più facilità, la lunghezza finale deve soddisfare però alcune importanti condizioni: tanto più bassa la temperatura della sorgente termica, tanto peggiori sono le prestazioni energetiche e inferiore è la potenza termica utile resa dalla pompa di calore.

Un dimensionamento al risparmio causa temperature in ingresso troppo basse in inverno limitando il potenziale vantaggio del sistema geotermico rispetto all'aria esterna. Durante il periodo estivo per assicurare una copertura in raffrescamento adeguato è spesso necessario un sovradimensionamento; non è quindi facile determinare il corretto dimensionamento dello scambiatore. Risulta perciò necessario verificare il raggiungimento di un nuovo equilibrio sul lungo periodo per l'accumulo a terreno. La variabile determinante è l'energia netta complessivamente immessa o estratta in un determinato periodo e quindi il rapporto tra i fabbisogni termici che si verificano nelle due stagioni. Se i fabbisogni risultano bilanciati l'effetto di lungo periodo è nullo, se il fabbisogno di riscaldamento è superiore al fabbisogno di raffrescamento il terreno subirà un prelievo netto di energia: tanto più sarà elevato in rapporto al volume dell'accumulo a terreno, tanto maggiore sarà la diminuzione di temperatura media e il tempo necessario per andare a regime. Analogamente, se il fabbisogno estivo risulta superiore, si verificherà un progressivo incremento della temperatura del sottosuolo a causa del funzionamento pluriennale.

È importante considerare che, per gli impianti a sonde geotermiche, una progettazione errata o troppo spinta può provocare il congelamento del terreno intorno allo scambiatore e il relativo collasso del sistema.

Il congelamento del terreno è un fenomeno fisico che avviene quando la temperatura del fluido termovettore resta a lungo sotto lo zero. Il congelamento permanente del terreno potrebbe però portare al danneggiamento dello scambiatore dovuto all'aumentare del volume e della conseguente pressione.

Tra le varie cause di congelamento troviamo:

1. **Carico termico elevato:** se la quantità di calore estratta dal terreno supera quella che il terreno può naturalmente ripristinare, la temperatura del terreno può scendere gradualmente.
2. **Progettazione inadeguata:** un dimensionamento errato delle sonde, con una lunghezza insufficiente o un numero inadeguato di sonde, può portare a un eccessivo prelievo di calore.
3. **Condizioni geologiche:** terreni con temperature iniziali vicine allo zero risultano più suscettibili al congelamento.
4. **Uso continuo per riscaldamento:** nei climi freddi, l'uso prolungato dell'impianto per il riscaldamento senza periodi di bilanciamento termico può causare una diminuzione significativa della temperatura del terreno.

Effetti del Congelamento del Terreno:

1. **Diminuzione dell'efficienza:** nel lungo periodo, il congelamento del terreno riduce l'efficienza del sistema geotermico, poiché la pompa di calore deve lavorare di più per estrarre calore da un terreno freddo o congelato.
2. **Danni alle sonde:** il ghiaccio che si forma attorno alle sonde può esercitare pressioni meccaniche che potrebbero danneggiare i tubi o i collegamenti.
3. **Impatto ambientale:** il congelamento può alterare le caratteristiche fisiche e biologiche del suolo, influenzando negativamente l'ecosistema locale.

Prevenire il fenomeno è possibile attraverso:

1. **Dimensionamento adeguato:** un corretto dimensionamento delle sonde geotermiche è fondamentale per prevenire il congelamento. Questo include una valutazione accurata del carico termico dell'edificio e delle proprietà termiche del terreno.
2. **Sistema bilanciato:** progettare il sistema in modo che possa essere utilizzato sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Il raffrescamento durante i mesi estivi aiuta a reintegrare il calore nel terreno.
3. **Monitoraggio e manutenzione:** monitorare regolarmente la temperatura del terreno e le prestazioni del sistema permette di individuare e risolvere problemi prima che diventino critici.
4. **Utilizzo di antigelo:** l'uso di fluidi termovettori con antigelo può prevenire il congelamento all'interno dei tubi della sonda, ma non previene necessariamente il congelamento del terreno circostante.
5. **Distribuzione delle sonde:** disporre le sonde in modo uniforme e a una distanza sufficiente per minimizzare la sovrapposizione degli effetti.

Con le giuste precauzioni e strategie, è possibile mantenere le prestazioni ottimali del sistema geotermico garantendo la sua sostenibilità nel lungo termine.

2.3.1.10 *Interferenza tra le sonde geotermiche*

Lo scambiatore a terreno genera plume termico nel terreno nel suo intorno, dove in fase di funzionamento la variazione di temperatura indotta mostrano un tipico andamento ad imbuto. È necessario considerare l'effetto di interferenza termica tra diversi scambiatori; tale effetto comporta di norma un sovradimensionamento tanto più elevato quanto più vicini sono fra loro gli scambiatori in funzione della conduttività termica del sottosuolo, della profondità delle sonde e del grado di saturazione del terreno. La distanza indicativa per ridurre l'interferenza è non meno di 4,6 m per un clima freddo e non meno di 6,1 m per un clima caldo; in generale è consigliabile mantenere una distanza dai 7 - 8 m fino a -10 m (S. Basta e F. Minchio, 2007).

Tra le varie configurazioni troviamo quella a nido d'ape, in linea, a L, rettangolari chiuse o aperte, ad U. I software di simulazione consentono di valutare lo scambio termico al variare della configurazione.

Qualora l'obiettivo sia quello di enfatizzare fattori di accumulo termico per utilizzarlo in periodi diversi dell'anno è possibile ridurre la distanza fra le sonde. In questo caso, è necessario porre attenzione nella realizzazione di disposizioni troppo compatte in quanto la vibrazione posta da altri macchinari in funzione potrebbe causare deviazione dalla verticale dei pozzi.

La presenza di movimento significativo dell'acqua di falda ha effetti rilevanti: va prestata attenzione a non installare gli scambiatori sulla linea parallela alla direzione del moto poiché in tal caso l'effetto interferenza termica, di tipo negativo, sarebbe massimo. In generale il moto delle acque sotterranee tende a disperdere l'energia accumulata nel terreno su un volume più ampio, a valle idraulica degli scambiatori.

2.4 Temperature di esercizio

Le temperature di esercizio nelle sonde geotermiche sono un aspetto cruciale per il funzionamento efficiente degli impianti geotermici; queste variano a seconda del tipo di sistema, delle condizioni geologiche locali e dell'uso specifico dell'impianto.

Nei sistemi a circuito chiuso, le temperature di esercizio dipendono dalla temperatura del sottosuolo e si distinguono tra la fase di riscaldamento e quella di raffrescamento: prendendo come riferimento il sottosuolo in Pianura Padana, la temperatura del terreno per profondità superiori a -15 m si aggira intorno ai 14°C; durante l'inverno il fluido termovettore all'interno delle sonde geotermiche può entrare nel terreno a una temperatura di circa 8-10°C e uscirne a una temperatura leggermente più alta, solitamente tra -13 e 15°C; durante l'estate, invece, il fluido può entrare nel terreno a una temperatura di 20-30°C e uscirne a una temperatura leggermente inferiore, generalmente tra 15 e 25°C.

Nei sistemi a circuito aperto si utilizza direttamente l'acqua di falda; perciò, le temperature delle sonde variano meno rispetto a quelle dei sistemi a circuito chiuso, rimanendo tipicamente tra 10 e 15°C per tutto l'anno.

Tra i fattori che influenzano le temperature di esercizio si possono trovare:

1. **Proprietà termiche del suolo:** la conducibilità termica e la capacità termica del suolo influenzano significativamente la temperatura di esercizio delle sonde geotermiche. Terreni con alta conducibilità termica (ad esempio, terreni saturi d'acqua o rocce) sono più efficaci nello scambio di calore rispetto a terreni secchi o sabbiosi.
2. **Profondità delle sonde:** le sonde più profonde tendono ad avere temperature più stabili rispetto a quelle superficiali. A profondità maggiori, la temperatura del terreno è meno influenzata dalle variazioni stagionali della temperatura dell'aria, e lo scambio termico è più efficiente.

3. **Carico termico dell'edificio:** la quantità di calore che deve essere trasferita tra l'edificio e il terreno influisce sulle temperature di esercizio. Un carico termico elevato può abbassare significativamente la temperatura del fluido nel terreno durante l'inverno e aumentarla durante l'estate.

L'ottimizzazione delle temperature di esercizio è possibile attraverso:

1. **Progettazione adeguata:** un dimensionamento corretto delle sonde geotermiche è essenziale per mantenere le temperature di esercizio entro i limiti ottimali. Questo include la valutazione del carico termico e delle proprietà termiche del terreno.
2. **Utilizzo bilanciato:** progettare il sistema per essere utilizzato sia per il riscaldamento che per il raffrescamento aiuta a mantenere un bilancio termico nel terreno, evitando l'accumulo eccessivo di calore o freddo.
3. **Monitoraggio continuo:** monitorare le temperature del fluido termovettore e del terreno permette di individuare eventuali anomalie e di intervenire tempestivamente per ottimizzare le prestazioni del sistema.

2.5 Vantaggi e svantaggi rispetto agli impianti tradizionali

L'installazione di impianti geotermici risulta particolarmente vantaggiosa per i seguenti motivi:

- impianto: a livello impiantistico troviamo un'unica macchina silenziosa e dalle dimensioni contenute che consente riscaldamento e raffrescamento. La pompa di calore geotermica sostituisce la caldaia ed i gruppi frigo per il raffrescamento. L'impianto consente un recupero di spazio all'interno dell'edificio;
- sicurezza: non è necessario l'utilizzo di alcun combustibile e si azzerano i pericoli derivanti da perdite di gas o stoccaggi a rischio di incendio;
- ambiente: si ha l'assenza di emissioni di CO₂ e di altre sostanze nocive. Secondo il rapporto EPA gli impianti geotermici sono il sistema che "ha il più basso valore di emissioni di CO₂ fra tutte le tecnologie disponibili per la climatizzazione e il più basso impatto ambientale complessivo". Durante l'estate questi impianti non contribuiscono all'inquinamento termico in quanto smaltiscono il calore nel sottosuolo;
- manutenzioni pressoché nulle;
- equipaggiamento e gestione di facile utilizzo in quanto si tratta di una comune pompa di calore gestibile attraverso un semplice selettore;
- costi di gestione: basso consumo di corrente elettrica, manutenzioni limitate e raffrescamento passivo a costo zero;
- impatto visivo / inserimento architettonico: non è necessario installare antiestetici gruppi frigoriferi, lasciando lo spazio disponibile ad altro impiego. Risulta inoltre favorito il mantenimento dell'integrità dell'edificio in particolare in caso di restauri;
- isole termiche: per quanto riguarda la temperatura dell'aria, gli impianti geotermici hanno effetti positivi sul fenomeno delle isole termiche nelle grandi città, dovuto ad una scarsa ventilazione che non permette il ricircolo d'aria calda rilasciata dai condizionatori; d'altro canto, però, gli impianti geotermici possono contribuire a creare isole di calore nel sottosuolo, a seconda del loro utilizzo.
- durata degli impianti: di solito la progettazione viene effettuata considerando una vita utile di 25 anni;
- efficienza elevata: se il sistema è correttamente dimensionato, il rendimento è superiore a quello dei sistemi convenzionali ad aria o a combustibili fossili;

- acqua calda sanitaria: un sistema a pompa di calore può essere facilmente utilizzato per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria;
- notevoli potenzialità di sviluppo: questa tecnologia non è ancora ben sviluppata in Italia, con l'incremento della diffusione di questi impianti si ridurranno anche i costi e gli impianti geotermici diverranno un'alternativa sempre più concreta;

Tra i limiti che ostacolano la diffusione degli impianti geotermici assumono particolare importanza:

- costo iniziale più elevato: in un sistema residenziale abbiamo il 50-80% in più di un sistema convenzionale; in un sistema commerciale il costo aumenta del 20-40% in più di un'unità roof-top single zone a volume d'aria costante. È importante cercare di ridurre i costi iniziali mantenendo un buon dimensionamento in quanto un sovradimensionamento potrebbe rendere l'investimento non vantaggioso (S. Basta e F. Minchio, 2007);
- rendimenti dipendenti dalle sonde e dalle apparecchiature: la scelta di una pompa di calore non adatta o l'errato dimensionamento o l'imperizia nella posa delle sonde possono compromettere la convenienza del sistema;
- normativa poco chiara e differenziata tra le varie zone d'Italia
- numero limitato di progettisti qualificati: scarso numero di progettisti in grado di eseguire buoni impianti di questo tipo; è inoltre più comodo proporre una soluzione convenzionale più semplice;
- numero limitato di installatori: l'installazione degli impianti geotermici non è molto diffusa in Italia, inoltre manca l'integrazione tra i settori delle perforazioni e degli installatori di impianti di riscaldamento e raffrescamento.

2.6 Sostenibilità ambientale

In un mondo in cui le fonti di energia rinnovabili sono un tema di crescente interesse e rilevanza, gli impianti geotermici si stanno sviluppando sempre più in quanto sfruttano il calore naturale della Terra rispettando i valori di sostenibilità ambientale. Tra i vari vantaggi forniti da questa tecnologia si possono trovare:

1. Riduzione delle Emissioni di Gas Serra: uno dei principali vantaggi degli impianti geotermici è la significativa riduzione delle emissioni di gas serra rispetto ai combustibili fossili
2. Uso Efficiente delle Risorse Naturali: gli impianti geotermici utilizzano il calore intrinseco della Terra, una risorsa rinnovabile che non si esaurisce nel corso del tempo, disponibile 24 ore al giorno, 365 giorni l'anno, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche, garantendo una fonte energetica stabile e affidabile.
3. Impatto Ambientale Ridotto: gli impianti geotermici hanno un impatto ambientale relativamente basso. Non richiedono vasti spazi di terra, come gli impianti eolici o solari, e l'impatto visivo è minimo. Questa tecnologia permette, inoltre, la conservazione delle risorse idriche; infatti, negli impianti geotermici a ciclo chiuso, l'acqua utilizzata per il trasferimento di calore viene circolata in un circuito chiuso, riducendo il consumo di acqua. Negli impianti a circuito aperto, invece, l'acqua deve essere reiniettata nel sottosuolo, se possibile, garantendo una gestione sostenibile delle risorse idriche e una sostenibilità dell'impianto nel lungo periodo.
4. Riduzione dell'Inquinamento Locale: l'uso della geotermia per il riscaldamento e il raffreddamento di edifici riduce la dipendenza da combustibili fossili, come gas naturale e petrolio, che sono spesso associati a inquinamento atmosferico locale. La geotermia contribuisce quindi a migliorare la

qualità dell'aria nelle aree urbane, riducendo l'incidenza di malattie respiratorie e riducendo le emissioni dei gas serra.

L'impianto collegato al terreno deve comportare il raggiungimento di un equilibrio termodinamico sul lungo periodo, assestando il livello della temperatura del terreno su un valore accettabile e ambientalmente compatibile. La natura va a compensare il calore estratto dalla pompa di calore e va a neutralizzare l'impatto termodinamico dato dallo squilibrio riscaldamento-raffrescamento.

Per sistemi orizzontali lo scambiatore è relativamente vicino alla superficie e quindi la longevità del sistema è garantita, nella fase di riscaldamento, dall'apporto della radiazione solare e dalle precipitazioni. Per un sistema che scambia con acqua di falda, l'equilibrio è garantito dal ciclo idrogeologico.

3. Test di risposta termico

Nell'ambito della geotermia e dell'ingegneria del sottosuolo, la determinazione delle proprietà termiche è fondamentale per la progettazione, l'implementazione e la gestione degli impianti. Due tecniche chiave utilizzate per questo scopo sono il Thermal Response Test (TRT) e il Distributed Temperature Sensing (DTS). Sebbene entrambe siano fondamentali per la caratterizzazione termica del sottosuolo, differiscono significativamente in termini di metodologia, applicazioni e capacità.

3.1 Thermal Response Test

Definiti i fondamenti teorici negli anni '80, il primo Ground Response Test è stato effettuato in Svezia dal Eklöf e Gehlin nel 1995 con l'apparecchiatura sviluppata presso il laboratorio dell'Università di Lund, successivamente un apparato simile fu costruito e provato negli USA da Austin (Oklahoma State University) nel 1998. Nel 1999 viene sperimentato nei Paesi Bassi da Van Gelder un apparato che si differenziava da quelli precedenti in quanto prevedeva l'estrazione di calore dal sottosuolo, invece che il rilascio di calore, mediante una pompa di calore.

A partire dal 2001, a seguito delle esperienze effettuate nell'ambito dei progetti Annex² 12 e Annex 13 del programma ECES (Energy Conservation through Energy Storage programme) dell'IEA (International Energy Agency), sono state elaborate delle linee guida per definire con chiarezza le caratteristiche e le modalità di esecuzione del GRT (Sanner, 2005); in particolare questo test diventa routine nella progettazione di campi sonde. Attualmente tale test è definito nella sua procedura e nelle sue caratteristiche dalla normativa UNI 11466.2012.

3.1.1 Finalità del TRT e apparecchiatura

Come già anticipato, il principale metodo per determinare la conducibilità termica in sito è rappresentato dal Test di Risposta Termica. Le varianti del test differiscono in base alla modalità di funzionamento della resistenza (riscaldamento o raffreddamento), alle condizioni al contorno (flusso termico costante o temperatura in ingresso costante), al periodo di analisi (fase attiva o fase di recupero) e al sistema di misurazione (standard, migliorato o distribuito).

Lo strumento utilizzato per la misurazione è il Geothermal Response Test (GeRT), questo segue una procedura standard che sfrutta la misurazione dello scambio di calore che avviene attraverso la sonda geotermica, tra un fluido termovettore e il sottosuolo. Si misura e registra quindi, in funzione del tempo, la temperatura media del fluido termovettore (acqua) che scorre nello scambiatore installato (sonda geotermica), calcolato come differenza di temperatura tra mandata e ritorno al terreno, per un valore prefissato costante di temperatura in ingresso allo scambiatore (quindi costante impulso termico rilasciato nel sottosuolo) e costante portata di fluido termovettore.

L'apparecchiatura è composta da:

- circuito idraulico costituito da un circolatore ed una serie di valvole di regolazione, intercettazione e sicurezza;
- sistema di misurazione costituito da una sonda per il fluido e una per l'aria esterna, un misuratore di portata elettromagnetico e un trasmettitore di pressione;

² Gli Annex sono in genere collaborazioni tra vari paesi membri dell'IEA e coinvolgono ricerche condivise e lo sviluppo tecnologico.

- sistema di acquisizione e memorizzazione dati;
- uno scambiatore di calore;
- un circuito idraulico costituito da un circolatore, un vaso di espansione ed una serie di valvole di intercettazione sicurezza.

Il Ground Response Test (GRT) o Thermal Response Test (TRT) ha lo scopo di misurare il valore medio della conducibilità termica equivalente del sottosuolo e valutare la resistenza termica della sonda posata nel terreno fornendo, al contempo, la temperatura indisturbata del sottosuolo. Attraverso queste proprietà sarà poi possibile il corretto dimensionamento delle sonde geotermiche.

I risultati del test si riferiscono alle proprietà termiche del sistema scambiatore-sottosuolo, il quale è formato da:

- sottosuolo;
- materiale riempitivo;
- materiale, spessore e tipologia di sonda;
- fluido termovettore

Il TRT viene effettuato in una sonda geotermica pilota: il test inizia con l'accensione dell'unità di riscaldamento e la misurazione della temperatura del suolo indisturbata, successivamente una quantità definita di flusso termico viene immessa nella sonda e si provvede alla misura delle variazioni di temperatura del fluido termovettore in ritorno dal sottosuolo, determinando così lo scambio termico in quelle determinate condizioni. Dalla elaborazione delle temperature di ingresso e uscita del fluido termovettore della sonda si possono ricavare le caratteristiche del terreno e una serie di dati sperimentali sul comportamento degli scambiatori.

Il TRT si basa sull'emissione di una quantità di calore nota e costante e sulla misura della temperatura di mandata e ritorno.

Come si vede in *figura 8*, la macchina per eseguire il TRT è composta da:

- serbatoio con resistenze elettriche che ha il compito di trattenere il fluido e di riscaldarlo prima di immetterlo nel terreno,
- pompa di circolazione-inverter che fa circolare il fluido termovettore nel terreno regolando la portata in modo preciso. L'inverter permette di adattare la portata del fluido in base alle esigenze specifiche del test, garantendo una distribuzione uniforme del calore,
- misuratore di portata. Misurare la portata è fondamentale per calcolare con precisione il coefficiente di scambio termico del terreno,
- sonda di temperatura del fluido in entrata nello scambiatore a terreno. Misura la temperatura del fluido dopo essere stato riscaldato nel serbatoio e prima di entrare nelle tubazioni installate nel terreno.
- sonda di temperatura del fluido in uscita nello scambiatore a terreno. Misura la temperatura del fluido all'uscita del circuito del terreno, cioè dopo che il fluido ha trasferito parte del calore al terreno. La differenza tra la temperatura in ingresso e in uscita è fondamentale per determinare quanto calore è stato trasferito.
- sonda di temperatura interno box. Rileva la temperatura interna del box che contiene il macchinario, per monitorare eventuali variazioni che potrebbero influire sull'accuratezza del test o sull'integrità delle apparecchiature.

- sonda di temperatura nel serbatoio. Aiuta a garantire che il fluido venga riscaldato alla temperatura corretta e controlla che questa si mantenga costante nel tempo, prima di essere immesso nel circuito
- sonda di temperatura dell'aria esterna. Misura la temperatura ambientale all'esterno del sistema. Questo dato è importante poiché le condizioni ambientali possono influenzare il comportamento del terreno e, di conseguenza, i risultati del test. Inoltre, serve per calibrare i dati del test e compensare eventuali variazioni dovute all'ambiente esterno.
- unità di acquisizione-telecontrollo è un sistema che si occupa di raccogliere, monitorare e gestire i dati provenienti dai vari sensori e componenti del macchinario. Permette di acquisire i dati, elaborare e visualizzare i dati in tempo reale, regolare i parametri operativi, archiviare i dati raccolti, monitorare eventuali anomalie nel sistema.

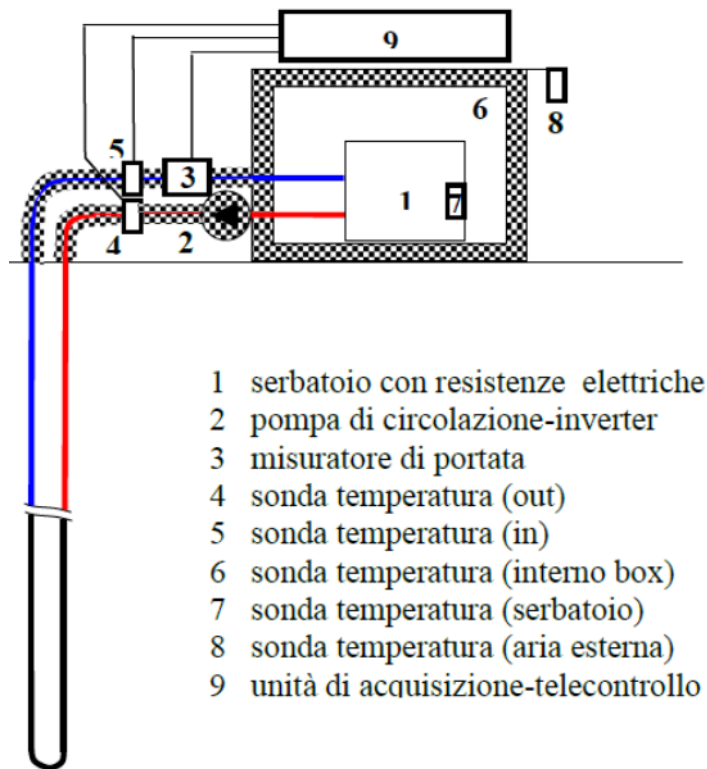


Figura 8 – Schema funzionale GEOgert

3.1.2 Linee guida per l'esecuzione del TRT

Sono state elaborate delle linee guida per definire con chiarezza le caratteristiche e le modalità di esecuzione del TRT. Affinché il TRT sia affidabile e venga eseguito correttamente è importante verificare i seguenti elementi:

- potenza termica emessa o stratigrafia del terreno più costante possibile durante la prova;
- rilevazione delle temperature di ingresso e uscita del fluido geotermico con adeguata accuratezza e frequenza temporale;

- adeguato isolamento termico dei tubi di collegamento esterni al terreno, per garantire che le dispersioni siano il minimo possibile
- durata di almeno 70 ore.

Le linee guida indicano come fondamentale la stabilità del flusso termico; è indifferente quindi riscaldare o raffreddare il terreno. La scelta migliore è cercare di sollecitare termicamente il terreno con valori, di temperatura e di portata, simili a quelli che si prevedono durante il normale esercizio dell'impianto.

3.1.3 Esecuzione del TRT

Il test inizia con la misurazione della temperatura del suolo indisturbata attraverso il dispositivo per il TRT in cui si attiva solo la pompa di circolazione del fluido, già presente all'interno della sonda. In questo modo viene misurata la temperatura del fluido che era in equilibrio termico con il terreno, e quindi si ricava la temperatura indisturbata (vedi *figura 9*).

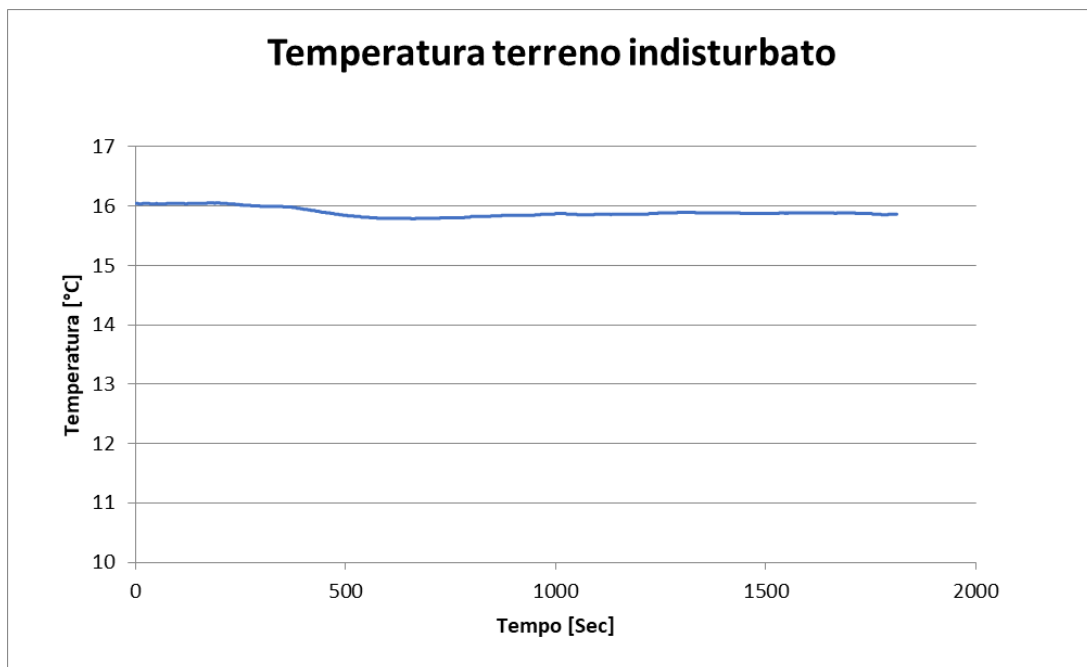


Figura 9 – Temperatura del terreno indisturbata

Successivamente il fluido termovettore viene riscaldato all'interno del serbatoio ad una potenza costante e viene pompato attraverso lo scambiatore così da sollecitare il terreno per un periodo tale da assicurare che il sistema sonda-terreno circostante raggiunga una situazione di equilibrio. Vengono misurate e registrate, con continuità o ad intervalli di 15 secondi: la portata in volume dell'acqua, la temperatura di mandata e la temperatura di ritorno dell'acqua, potenza elettrica assorbita dalle resistenze e dalla pompa di circolazione idraulica. In *figura 10* viene rappresentato il grafico temperatura tempo in cui si possono vedere gli andamenti di temperatura in entrata, in uscita e la differenza tra queste.

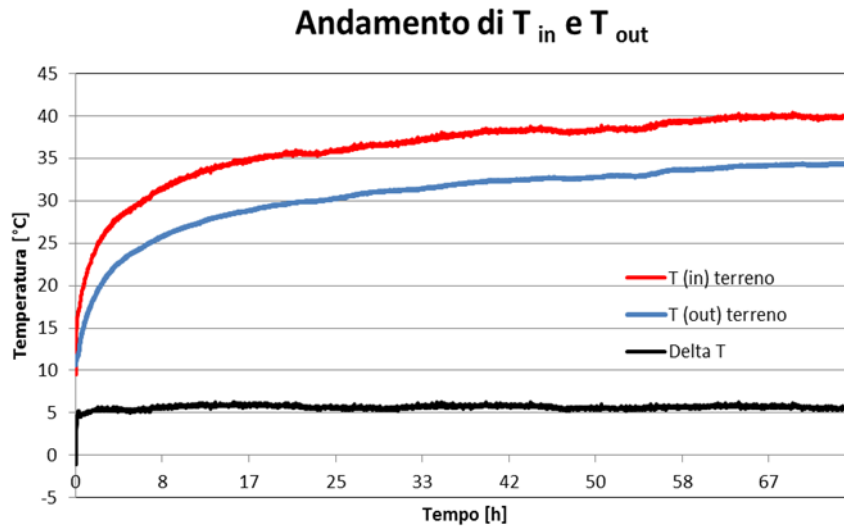


Figura 10– Andamento di temperatura in ingresso (rosso) ed in uscita (blu) dalla sonda, e della differenza tra le due temperature

Tramite l'analisi delle temperature del fluido termovettore misurate durante il TRT si determina la conducibilità termica equivalente. Questa viene calcolata combinando i dati di temperatura raccolti durante il TRT con un modello matematico di sorgente lineare di calore, (o line source theory), che descrive il trasferimento di calore nel terreno.

Nel modello della sorgente di calore lineare la sonda geotermica viene approssimata come una linea che emette calore in modo uniforme lungo tutta la sua lunghezza.

Secondo questo modello, l'evoluzione della temperatura del fluido all'interno della sonda (misurata in ingresso e uscita) nel tempo è legata alla conducibilità termica del terreno attraverso la seguente relazione:

$$T(t) = T_0 + \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

Dove: ρ

- $T(t)$ è la temperatura media del fluido in ingresso e in uscita misurata al tempo t ,
- T_0 è la temperatura iniziale del terreno,
- q è il carico termico applicato per unità di lunghezza della sonda (W/m),
- λ è la conducibilità termica equivalente del terreno (W/m·K),
- t è il tempo trascorso dall'inizio del test,
- t_0 è un tempo iniziale di riferimento,

Il parametro λ (conducibilità termica equivalente) viene ottenuto tramite una regressione lineare del grafico $T(t)$ in funzione del logaritmo del tempo $\ln(t)$, (vedi figura 11).

Tendenza della Temperatura - log t

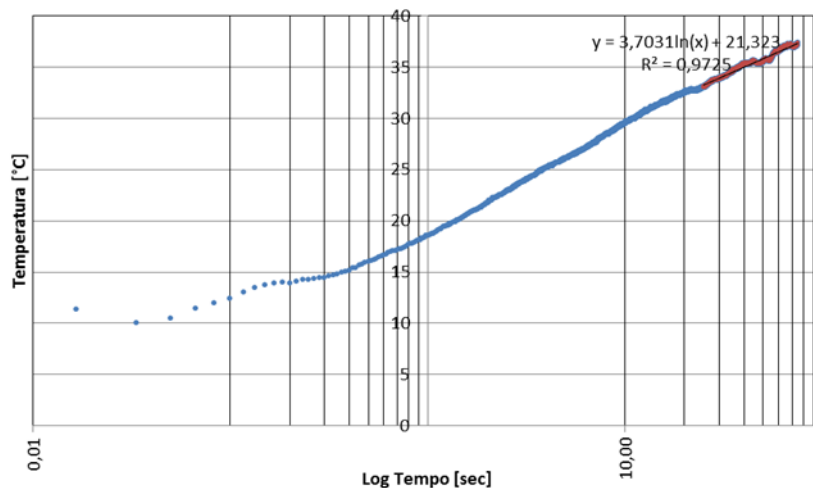


Figura 11– Andamento di temperatura media del fluido rispetto al logaritmo del tempo

Il termine "equivalente" viene usato perché la conducibilità termica calcolata tramite il TRT rappresenta una **media** che tiene conto di diversi fattori che influenzano la dissipazione del calore. Questi includono:

- Eterogeneità del terreno: Il terreno reale non è omogeneo, ma composto da strati con differenti proprietà termiche. La conducibilità termica equivalente è una media effettiva delle varie conducibilità dei diversi strati di terreno attraversati dalla sonda.
- Possibile presenza di acquiferi con moto di falda, che aumenta significativamente lo scambio termico in quello strato
- Effetti della sonda e del materiale di riempimento: Oltre al terreno, la sonda geotermica è circondata da un materiale di riempimento che ha una sua conducibilità termica. La conducibilità termica equivalente tiene conto non solo del terreno, ma anche di questi materiali circostanti, che possono influenzare il trasferimento di calore.

Lo scopo della prova consiste nella determinazione dei parametri caratteristici dell'insieme sonda-terreno misurando l'andamento nel tempo della temperatura media del fluido termovettore che scorre all'interno dello scambiatore.

Dalle misure ricavate si possono rilevare i parametri caratteristici del terreno, quali:

1. **Temperatura indisturbata del terreno:** temperatura iniziale del terreno
2. **Conducibilità termica del terreno:** misura di quanto il terreno conduce il calore. Un terreno con alta conducibilità termica è ideale per impianti geotermici efficienti.
3. **Resistenza termica della sonda:** misura della resistenza al trasferimento di calore tra il fluido di scambio e il terreno. Minore è la resistenza, migliore è il contatto termico tra la sonda e il terreno.

Le proprietà termiche del sottosuolo in generale non variano nel tempo, ad eccezione di casi in cui l'immissione di calore induce fenomeni di migrazione di acqua in strati di sottosuolo non completamente saturi. Tipicamente si carica il suolo per 50-70 ore, le prime ore non vengono considerate nei calcoli in quanto il flusso termico impiega del tempo per stabilizzarsi.

Witte, nella sua analisi degli errori nel Thermal Response Test, ha evidenziato diversi fattori che influenzano i risultati; tra questi ci sono errori sistematici e casuali, che possono derivare da sensori, dalla durata del

test, variazioni del tasso di iniezione di calore e la presenza di falde acquifere. Gli errori stimati per la conducibilità termica del terreno sono tipicamente intorno al 5%, mentre per la resistenza termica del foro possono arrivare fino al 10-15% (Oxford Academic).

Normalmente si osserva un notevole aumento della temperatura media del fluido termovettore durante le prime 12-24 ore. Questa prima parte del test, dove lo scambio termico avviene principalmente per superare le resistenze termiche dei materiali che costituiscono la sonda, infatti non deve essere utilizzata per determinare le proprietà termiche del sottosuolo. Dopo questo periodo transitorio, quando la situazione si stabilizza, significa che i tempi di acquisizione sono stati sufficienti, che la resistenza termica della sonda è stata superata e il sistema ha raggiunto condizioni stazionarie di scambio termico con il terreno circostante. Se, al contrario, c'è fluttuazione sarà necessario effettuare il test di maggior durata o ripetere la sessione di misura. Una crescita continua della curva indica la presenza di movimento significativo della falda sotterranea e il test risulta inattendibile.

3.1.5 Influenza del flusso d'acqua di falda

La presenza di acqua di falda nel sottosuolo può manifestare i propri effetti termici sulla resa dell'impianto a sonde verticali attraverso:

1. **Convezione naturale:** negli strati di terreno senza presenza di acqua nel sottosuolo o con acqua ma senza movimento di fluido, il trasferimento di calore avviene principalmente per conduzione, un processo relativamente lento. Solo nel caso in cui i vuoti tra i grani solidi sono abbastanza grandi, si creeranno moti convettivi all'interno dei vuoti, contribuendo allo scambio termico. In un mezzo poroso saturo, infatti, il riscaldamento del suolo innesca processi di convezione naturale, gli strati più caldi si mettono in movimento risalendo verso l'alto mentre quelli più freddi fruiscono verso il basso. L'intensità del fenomeno, tipicamente trascurabile, è dipendente dai gradienti termici nel terreno e dalla permeabilità orizzontale e verticale.
2. **Movimento dell'acqua:** Quando l'acqua di falda è in movimento, il trasferimento di calore avviene anche per convezione, quindi più rapidamente poiché l'acqua in movimento porta via il calore dalla sonda geotermica più rapidamente rispetto all'acqua ferma. Il flusso nell'acquifero rimuove il calore in eccesso, permettendo alla sonda di trasferire calore più rapidamente e mantenendo una differenza di temperatura costante che favorisce uno scambio di calore continuo e costante nel tempo.
3. **Elevata capacità termica dell'acqua:** l'acqua ha una capacità termica specifica più alta rispetto al terreno, questo significa che può assorbire e rilasciare grandi quantità di calore con variazioni minime di temperatura. Quando l'acqua è in movimento, questo effetto viene amplificato, permettendo un trasferimento di calore più efficiente.
4. **Minore resistenza termica:** la resistenza termica tra la sonda e il terreno circostante è ridotta dalla presenza di acqua in movimento, poiché il calore viene trasportato via più rapidamente dall'acqua rispetto al solo terreno.

Un ulteriore fattore da considerare nel dimensionamento dei sistemi è quindi la presenza di acqua di falda e acquiferi: dove è presente l'acqua la trasmissione del calore non è più puramente conduttiva, ma anche convettiva. Sebbene il TRT non sia in grado di identificare e mappare le falde acquifere, riesce ad evidenziare l'effetto della presenza di acqua di falda in movimento e quindi di un acquifero nella stratigrafia locale, attraverso:

1. **Temperature anomale:** le temperature del fluido di scambio in ingresso e in uscita vengono monitorate continuamente. Se c'è una falda in movimento, si osservano variazioni di temperatura del fluido termovettore maggiori, che non si verificherebbero in condizioni statiche, ad indicare quindi uno scambio termico complessivo più significativo. Se i dati mostrano che la temperatura del fluido in uscita dalla sonda non aumenta come previsto o che si stabilizza rapidamente, potrebbe indicare che il calore viene dissipato più rapidamente del previsto, suggerendo la presenza di acqua di falda in movimento.
2. **Simulazioni avanzate:** i software utilizzati per analizzare i dati del GRT possono simulare diverse condizioni del sottosuolo, incluse quelle con presenza di falde acquifere. Confrontando i dati reali con quelli simulati, possono essere identificate la presenza e l'effetto di acqua di falda in movimento.
3. **Valori anomali:** i valori di conducibilità termica e resistenza termica ottenuti dal GRT saranno differenti se c'è una falda in movimento. La conducibilità termica equivalente sarà più alta e la resistenza termica della sonda sarà inferiore rispetto a un terreno asciutto o statico.

3.2 Distributed Temperature Sensing

I test di risposta termica convenzionali sono in grado di fornire informazioni sulla conducibilità termica per i singoli strati geologici, nonostante l'identificazione della stratigrafia possa consentire l'ottimizzazione nel dimensionamento della sonda e delle geometrie del campo. La Distributed Temperature Sensing (DTS) è una tecnologia che è stata sviluppata recentemente e fornisce all'utente un metodo per misurare la distribuzione della temperatura o anche della deformazione lungo un cavo di fibra ottica, in applicazioni anche molto diverse come le sonde geotermiche, il monitoraggio delle arginature o di strutture di grandi dimensioni o delle frane, e può estendersi per diversi chilometri.

La fibra ottica può essere installata in modo permanente o temporaneo, e fornisce un quadro chiaro della temperatura lungo tutta la profondità della sonda. L'impulso luminoso, di durata di circa 10 ns, viene lanciato da un laser nella strumentazione di superficie o "*instrumentbox*" ed è caratterizzato da una lunghezza d'onda situata nell'infrarosso e appena oltre lo spettro visibile. L'indice di rifrazione della fibra è solitamente ben noto e determina la velocità e il rallentamento della luce nella fibra.

I sensori funzionano localizzando le perdite di segnale e le variazioni lungo la fibra analizzando il segnale retro diffuso o riflesso. Da una successiva analisi viene determinata la temperatura nel punto da cui ha avuto origine la retrodiffusione, si ottiene così il profilo di temperatura lungo il pozzo, effettuando più misurazioni nel tempo, si può mappare il comportamento temporale della temperatura. Se la fibra di vetro ha un indice di rifrazione maggiore dell'ambiente circostante, allora la luce all'interno della fibra può essere intrappolata e costretta a propagarsi attraverso la fibra. L'impulso di luce è sostanzialmente un sensore viaggiante che si muove attraverso la linea della fibra e trasmette informazioni sulla temperatura.

L'onda riflessa emette dei segnali, tra questi il più forte è detto picco o banda di Rayleigh che viene tipicamente filtrato e soppresso assieme all'altro picco dominante di Brillouin per poter recepire meglio le bande di Raman, onde più deboli derivanti da vibrazioni molecolari e atomiche. Questo ultimo segnale è quello utilizzato per la valutazione della temperatura, è sufficientemente forte e ha una dipendenza dalla temperatura unica.

Il segnale Raman è composto dalle cosiddette bande "*Stokes*" e "*Anti-Stokes*". La banda di *Stokes* ha lunghezze d'onda più alte e stabili con poca sensibilità alla temperatura, mentre la banda *Anti-Stokes* ha

lunghezze d'onda inferiori e presenta una sensibilità alla temperatura, dove maggiore è l'energia all'interno della banda, maggiore è la temperatura e viceversa. In *figura 12* si possono vedere le varie bande appena citate, mentre in *figura 13* si può vedere come variano i segnali appena considerati nello spazio.

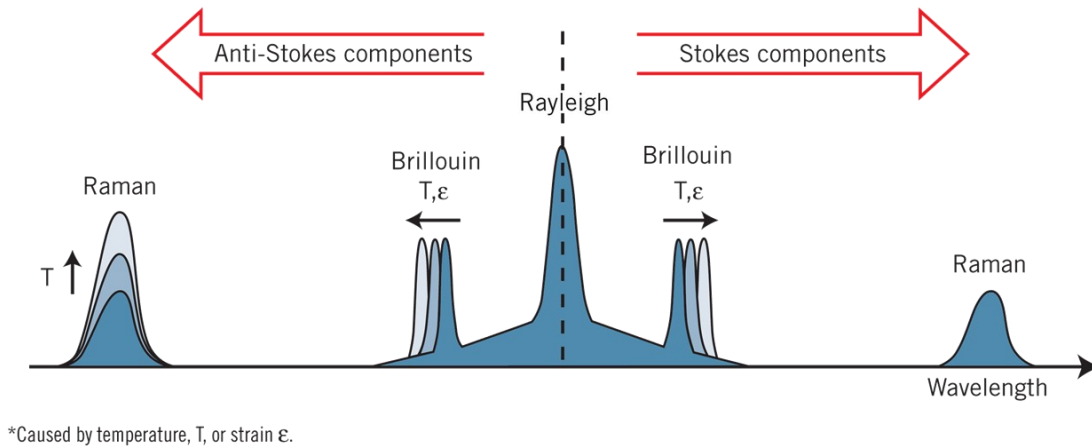


Figura 12–Gamma di lunghezze d'onda contenute nel segnale retrodiffuso

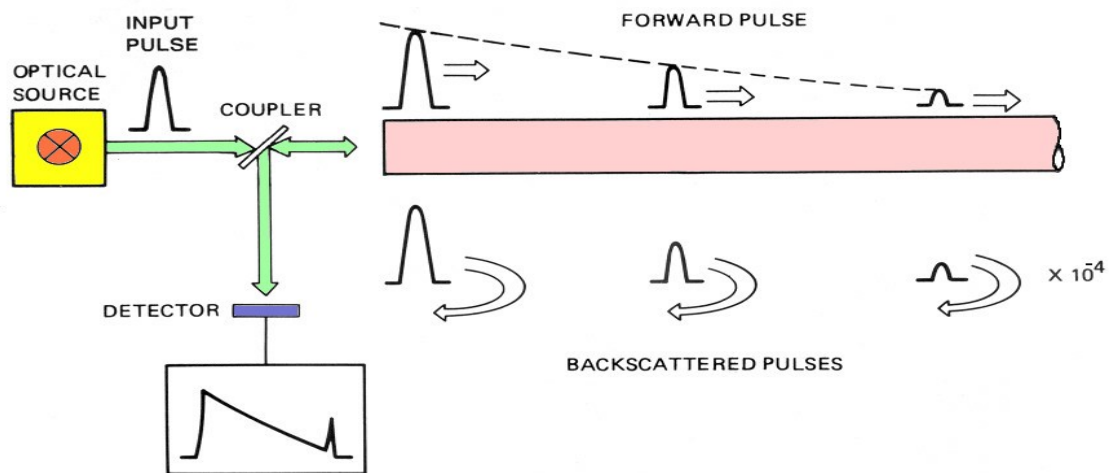


Figura 13– Gamma di lunghezze d'onda contenute nel segnale retrodiffuso

La temperatura $T(z)$ può essere correlata al rapporto tra i segnali *Anti-Stokes* e *Stokes* attraverso la seguente equazione:

$$T(z) = T_{ref} \left(1 + \frac{\Delta\alpha * z}{\ln \frac{C^+}{C^-}} + \frac{\ln \frac{I^-}{I^+}}{\ln \frac{C^+}{C^-}} \right)$$

Dove:

- $T(z)$: temperatura lungo la fibra alla profondità z [in K];

- Tref: temperatura di riferimento [k];
- $\Delta\alpha$: attenuazione differenziale tra segnali Anti-Stokes e Stokes retrodiffusi [m^{-1}];
- I^+ : intensità della banda Stokes;
- I^- : intensità della banda Anti-Stokes;
- C^+ e C^- : costanti relazionate alla sensitività di I^+ e I^- con la temperatura.

Effettuando più misurazioni nel tempo a profondità fisse si ottiene il comportamento temporale della temperatura.

Qualsiasi cambiamento nelle condizioni operative della fibra e della strumentazione DTS, come una variazione della temperatura ambientale, può alterare l'acquisizione dei dati. Inoltre, le misurazioni della temperatura dipendono dalla posizione della fibra all'interno del foro e dalla posizione relativa dei tubi che costituiscono la sonda geotermica. Poiché queste posizioni sono sconosciute e possono variare lungo la profondità del pozzo, vi sono alcuni errori intrinseci nel calcolo della temperatura media del fluido.

3.2.1 Applicazione del DTS

In generale, il DTS trova applicazione in vari campi grazie alla sua capacità di monitorare le temperature su grandi distanze in tempo reale. Alcune delle principali applicazioni includono:

- **monitoraggio di pozzi petroliferi:** per rilevare perdite di calore e ottimizzare la produzione;
- **gestione delle risorse idriche:** per monitorare la temperatura delle acque sotterranee e superficiali;
- **infrastrutture civili:** per il monitoraggio termico di ponti, dighe e altri elementi strutturali;
- **sistemi geotermici:** per il monitoraggio continuo delle condizioni termiche lungo gli scambiatori di calore verticali. Nel nostro caso, viene utilizzato per identificare le proprietà termiche di diversi livelli stratigrafici.

3.2.2 Vantaggi e svantaggi

Il DTS offre numerosi vantaggi rispetto ai metodi di monitoraggio tradizionali:

- **monitoraggio continuo:** fornisce dati in tempo reale lungo tutta la lunghezza della fibra ottica;
- **copertura estesa:** può coprire distanze di diversi chilometri rendendolo ideale per grandi installazioni;
- **alta risoluzione spaziale:** può rilevare variazioni di temperatura con alta precisione.

Limitazioni del DTS:

- **costo di installazione:** l'installazione delle fibre ottiche può essere costosa e richiedere competenze specializzate;
- **manutenzione:** la manutenzione delle fibre ottiche può essere complessa, soprattutto in ambienti difficili;
- **sensibilità alla curvatura:** la precisione delle misurazioni può essere influenzata dalla curvatura della fibra ottica.

3.3 Confronto tra DTS e TRT

Il TRT è principalmente utilizzato per determinare le proprietà termiche specifiche del terreno in un'area limitata e per un periodo di tempo definito, è essenziale per la progettazione iniziale e la valutazione della

capacità di scambio termico dei pozzi geotermici. Il DTS, invece, può essere utilizzato per identificare le proprietà termiche dei singoli livelli stratigrafici, ma anche per il monitoraggio continuo e distribuito delle variazioni di temperatura su lunghe distanze, è ideale per il monitoraggio a lungo termine e la gestione operativa di grandi sistemi e infrastrutture.

Il TRT offre una misura altamente precisa delle proprietà termiche del terreno, ma solo in una posizione specifica. Questo lo rende ideale per studi dettagliati di siti specifici. Il DTS, al contrario, fornisce una copertura estesa con alta risoluzione spaziale, consentendo il monitoraggio delle variazioni di temperatura lungo l'intera lunghezza della fibra ottica garantendo un livello di dettaglio puntuale superiore a quello del TRT, che al contrario offre un unico valore medio.

Il Thermal Response Test può essere costoso e richiedere un periodo di test prolungato, durante il quale l'attrezzatura deve essere dedicata esclusivamente al test; inoltre, l'interpretazione dei dati può richiedere competenze specializzate. Il DTS ha un costo di installazione iniziale elevato, ma, una volta installato, offre un monitoraggio continuo con costi operativi relativamente bassi. Il cavo è molto costoso e anche l'interrogatore. Inoltre, la delicatezza delle fibre ottiche può rappresentare un ostacolo aggiuntivo.

In *figura 14* si può vedere graficamente la differenza tra i due tipi di test, in particolare si può notare come il TRT dia una conducibilità termica omogenea su tutta la profondità, mentre il DTS permetta di individuare con maggior facilità le diverse proprietà termiche lungo la sequenza stratigrafica, ci saranno infatti dei picchi di conducibilità in prossimità di strati di sabbia o in presenza di falde acquifere caratterizzate da moto significativo di fluido.

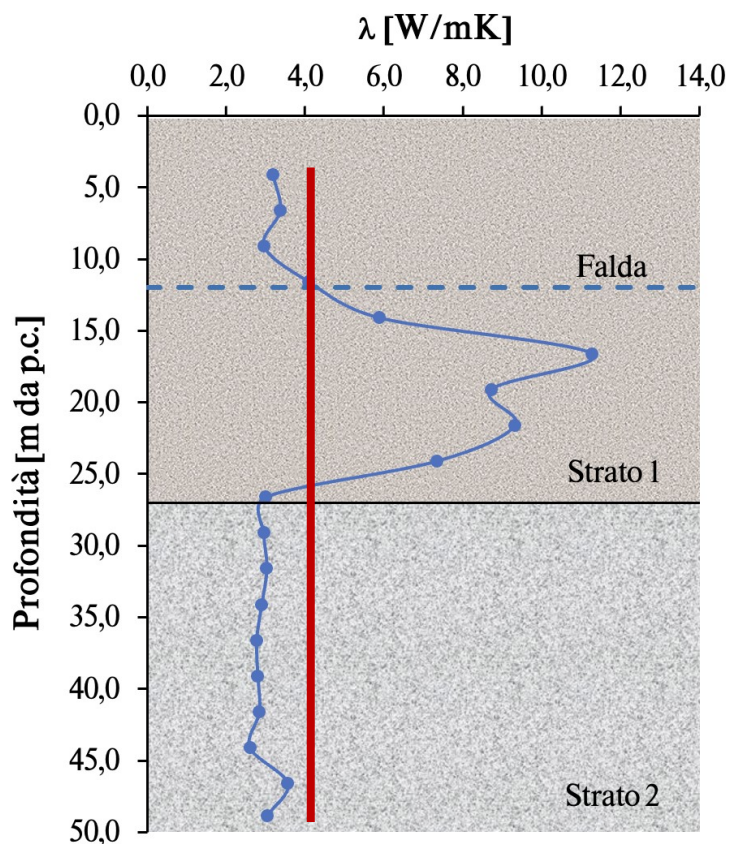


Figura 14 - Confronto della conducibilità termica equivalente ottenuta con il TRT (rosso) con la conducibilità termica ottenuta con il DTS (blu)

Conclusione

In sintesi, il Thermal Response Test e il Distributed Temperature Sensing sono due tecniche complementari per la caratterizzazione delle proprietà termiche del sottosuolo e delle strutture geotermiche. Il TRT è essenziale per la valutazione dettagliata delle proprietà termiche specifiche di un'area limitata e per la progettazione di impianti geotermici, ma fornisce un unico valore mediato per tutta la profondità analizzata. AL contrario, il DTS permette di distinguere le proprietà termiche dei singoli livelli stratigrafici.

La scelta tra TRT e DTS dipende dagli obiettivi specifici del progetto. In molti casi, l'uso combinato di entrambe le tecniche può fornire un quadro completo e dettagliato delle condizioni termiche, ottimizzando così la progettazione, l'implementazione e la gestione degli impianti geotermici e delle infrastrutture correlate.

4. Caso studio Fusinato

La Casa dello Studente Fusinato è un'iconica residenza universitaria situata a Padova, città nota per la sua lunga tradizione accademica e la prestigiosa Università, fondata nel 1222. L'edificio Fusinato è stato realizzato a partire dal 1922 e si colloca nel quartiere del Portello, una zona strategica per la vita studentesca, a breve distanza dal centro storico e dalle numerose facoltà universitarie situate in questa zona come visibile in figura 15.



Figura 15 – Localizzazione della Residenza Fusinato
(www.unipd.it)

Storia e motivazioni della costruzione

La Casa dello Studente Fusinato venne costruita negli anni Sessanta del Novecento, un periodo in cui l'Italia attraversava un'importante fase di espansione economica e urbanistica. In quegli anni, la popolazione studentesca dell'Università di Padova era in forte crescita, e si rendeva necessaria la creazione di nuovi spazi residenziali che potessero accogliere gli studenti provenienti da altre città e regioni. La costruzione di residenze studentesche come il Fusinato rispondeva all'esigenza di fornire alloggi a prezzi accessibili, in un contesto che favorisse lo studio e la vita comunitaria. L'edificio fu dotato di spazi comuni, come sale studio, aree ricreative e cucine condivise, in modo da creare un senso di comunità tra i residenti. Va inoltre considerato che la sua collocazione permetteva agli studenti di accedere facilmente ai luoghi di studio, alle biblioteche e alle varie strutture universitarie, favorendo un ambiente di vita accademica dinamico e stimolante.

Nel 1922 iniziano i lavori per la realizzazione di una residenza per gli studenti dell'Università di Padova; si tratta di un edificio dagli spazi innovativi quali spazi comuni adibiti a palestra e biblioteca, necessari a un'educazione integrale dei giovani. Questa costruzione rappresenta una tra le prime residenze polifunzionali laiche dedicata agli studenti universitari, una novità rispetto ai precedenti collegi cattolici che fino ad allora avevano costituito gli unici alloggi universitari. La Casa venne inaugurata nel 1935 (figura 16) e la sua funzione rimase tale e quale fino al 2005, anno in cui la residenza venne chiusa per motivi legati alla sicurezza e all'impossibilità di intervenire con importanti lavori di manutenzione (figura 17 e figura 18).

1932-1935

IL COLLEGIO



Figura 16 – Residenza Fusinato 1932-1935
(www.unipd.it)

IL COLLEGIO



LA MENSA

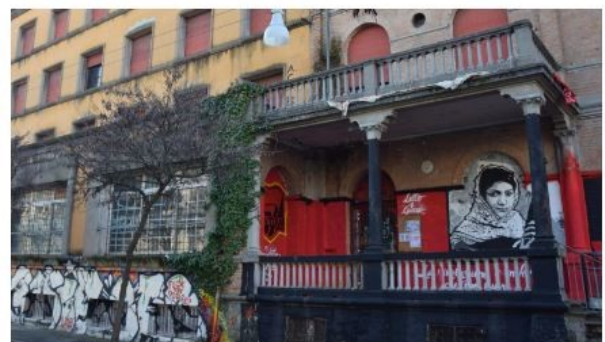


Figura 17 – Stato della Residenza Fusinato nel 2022
(www.unipd.it)

LA CORTE



GLI INTERNI



*Figura 18 – Stato della Residenza Fusinato nel 2022
(www.unipd.it)*

Nel 2016 la Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio per l'Area metropolitana di Venezia e per le province di Belluno, Padova e Treviso, inserisce la Casa dello Studente Fusinato tra i beni culturali dello Stato italiano. L'anno successivo l'Università di Padova presenta al MIUR un progetto di ristrutturazione che è stato recentemente approvato.

Il progetto di rifacimento

L'invecchiamento della struttura, insieme alle nuove esigenze degli studenti e alle normative moderne in materia di sicurezza e sostenibilità, ha reso necessario un progetto di rifacimento e ammodernamento dell'edificio. Questo progetto ha preso forma come parte di un più ampio programma di rinnovamento delle residenze universitarie di Padova, volto a migliorare la qualità della vita degli studenti e a rendere gli edifici più efficienti dal punto di vista energetico e ambientale.

Il progetto di rifacimento della Casa dello Studente Fusinato prevede una serie di interventi strutturali e funzionali. Tra questi, il miglioramento dell'isolamento termico e acustico, la sostituzione degli impianti elettrici e idraulici, l'adeguamento degli spazi comuni e l'installazione di nuovi sistemi di sicurezza. Particolare attenzione è stata data alla sostenibilità ambientale, con l'introduzione di impianti fotovoltaici e di un impianto geotermico che va a soddisfare quasi completamente il fabbisogno energetico dell'edificio. Vengono sfruttati, inoltre, materiali eco-compatibili integrati con la progettazione di spazi verdi all'interno e intorno all'edificio (*figura 19 e figura 20*).

COM'E'



COME SARA'



Figura 19 – Confronto tra stato precedente alla ristrutturazione della Residenza Fusinato e progetto (www.unipd.it)

COM'E'



COME SARA'

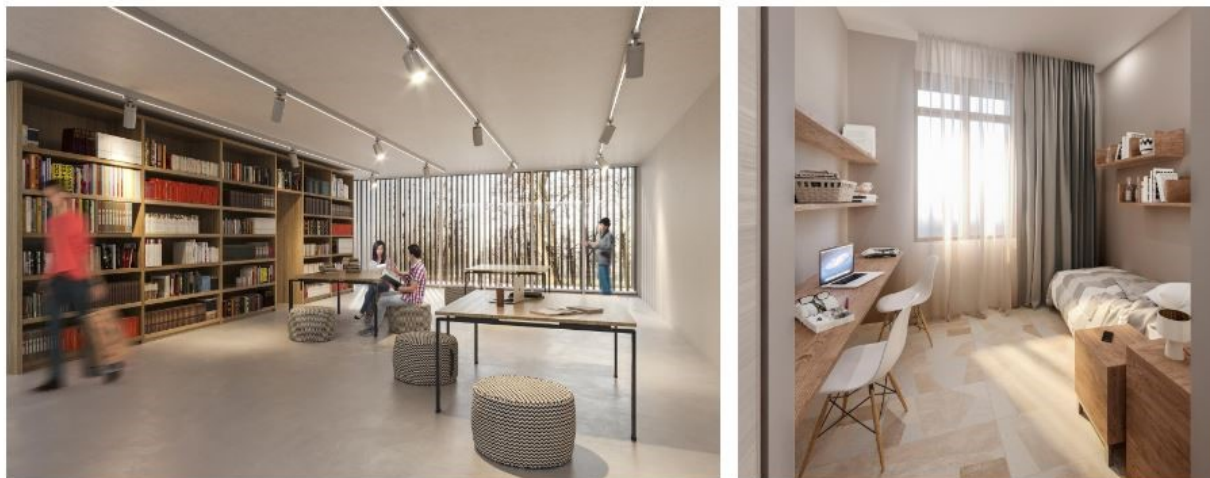


Figura 20 – Confronto tra stato precedente alla ristrutturazione della Residenza Fusinato e progetto (www.unipd.it)

Un altro aspetto importante del rifacimento riguarda l'accessibilità. Il nuovo progetto mira a rendere la Casa dello Studente Fusinato accessibile a tutti, indipendentemente dalle condizioni fisiche degli studenti, con l'installazione di ascensori e rampe, e l'adattamento degli spazi interni per soddisfare le esigenze di chi ha mobilità ridotta.

Oltre agli interventi strutturali, il rifacimento della Casa dello Studente Fusinato prevede anche una riprogettazione degli spazi interni per renderli più adatti alle nuove esigenze degli studenti. Verranno create nuove sale studio, dotate di moderne attrezzature tecnologiche, spazi comuni più ampi e confortevoli, e aree ricreative che favoriscano l'interazione sociale e lo scambio culturale. L'obiettivo è quello di creare un ambiente stimolante, che supporti non solo lo studio, ma anche il benessere psicofisico degli studenti. La

tempistica di realizzazione del progetto è di circa 3 anni e il numero di posti alloggio che saranno realizzati è pari a 187. In *figura 21* sono visibili dei render dell'interno della Residenza.



*Figura 21 – Spazio polifunzionale e stanza d'alloggio della Residenza
(www.unipd.it)*

Impianto geotermico

Il sistema di climatizzazione prevede l'estrazione e reimmersione dal sottosuolo di calore attraverso circuito chiuso, costituito da sonde geotermiche verticali, collegato alla pompa di calore, che provvede a fornire l'energia termica e frigorifera necessaria alla climatizzazione invernale ed estiva dell'edificio, ed ha il compito di produrre acqua calda sanitaria.

Il progetto del campo sonde è stato svolto da un'azienda esterna, per UNIPD, che ha fornito i documenti di progetto sui quali si è svolto il presente elaborato. Il presente lavoro di tesi si è basato su una prima analisi dei documenti pervenuti, quali relazione tecnica, stratigrafia di dettaglio, carta idrogeologica, disposizione planimetriche e schede tecniche dei materiali e delle relative componenti dell'impianto; successivamente si sono analizzati i dati ottenuti con il TRT e si sono confrontati con un'analisi di conducibilità termica basata sull'applicazione di valori tabellati (da linee guida tipo VDI o ASHRAE).

4.1 Il progetto del campo sonde per la residenza Fusinato

Si riporta in seguito parte della relazione tecnica, realizzata dall'azienda appaltante, in riferimento al campo sonde di geoscambio presso "ex casa dello studente Fusinato".

4.1.1 Principali disposizioni normative

Le principali disposizioni normative che regolano la realizzazione delle sonde geotermiche sono riportate nel presente elenco:

- D. Lgs. 152/06 – Norme in materia ambientale

- D. Lgs. 04/08 – Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del D. Lgs. 152/06, recante norme in materia ambientale
- Legge 4 agosto 1984, n. 464 – Norme per agevolare l’acquisizione da parte del Servizio Geologico della Direzione Generale delle Miniere del Ministero dell’Industria, del commercio e dell’artigianato di elementi di conoscenza relativi alla struttura geologica e geofisica del sottosuolo nazionale
- Deliberazione del Consiglio Regione Veneto n.107 del 5 novembre 2009 – Piano di tutela delle acque
- Deliberazione della Giunta Regionale Veneto n. 842 del 15 maggio 2012 – Piano di tutela delle acque, DCR n. 107 del 05/11/2009, modifica e approvazione del testo integrato delle Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Tutela delle Acque.
- Deliberazione della Giunta Regionale Veneto n. 1534 del 03/11/2015 – Modifiche ed adeguamenti del Piano di Tutela delle Acque (PTA) – artt. 33, 34, 37, 38, 39, 40, 44 e Allegati E, F (vista dal DGR n.51/CR del 20/07/2015)

4.1.2 Inquadramento geologico e geomorfologico

Come si può vedere in *figura 22*, l’area oggetto d’indagine si dispone centralmente all’interno della città di Padova, in un contesto fortemente antropizzato. La quota del terreno risulta compresa tra 11 m e 12 m s.l.m.

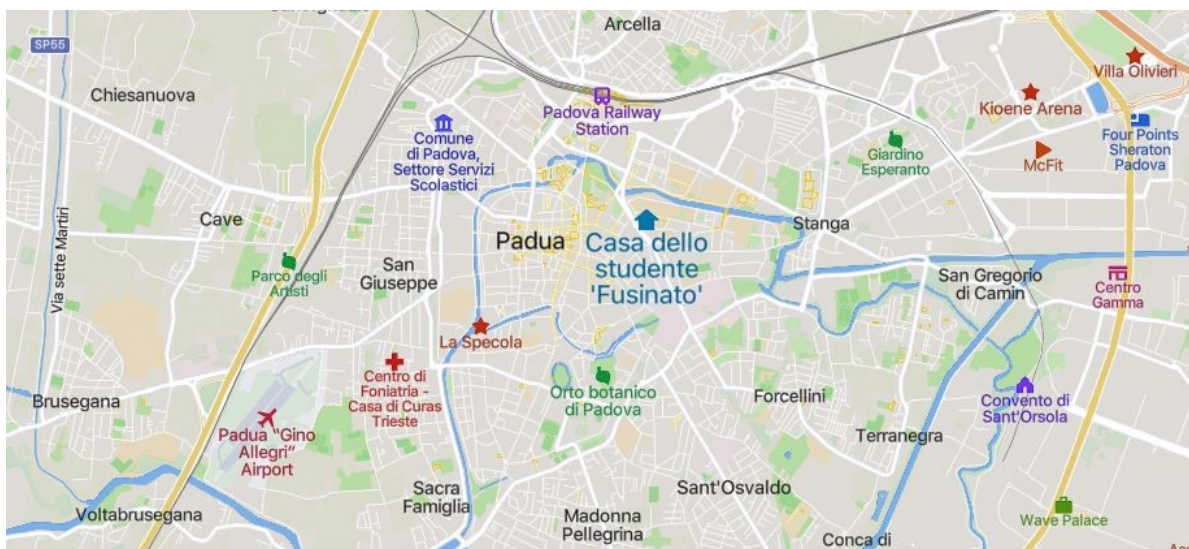


Figura 22 – Collocazione della Casa dello studente Fusinato

(mapcarta.com)

Il sottosuolo è composto da depositi alluvionali di granulometria variabile, dovuti all’azione combinata dei corsi d’acqua prealpini che scorrevano in questa zona durante l’epoca quaternaria (in particolare il fiume Brenta). La composizione di questi sedimenti varia e si differenzia abbastanza rapidamente procedendo da ovest verso est; generalmente si incontrano alternanze di terreni sabbiosi e limoso sabbiosi, con terreni argillosi.

Inquadramento stratigrafico di dettaglio

Per ottenere un andamento stratigrafico più dettagliato si sono sfruttate le informazioni di un pozzo presente nel catasto ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (*figura 23*). L'archivio è nazionale ed è reperibile liberamente al sito ISPRA e cataloga tutte le indagini del sottosuolo atte allo sfruttamento delle acque del sottosuolo e regolarmente concesse da ISPRA.

Il pozzo rilevato nel sito ISPRA dista circa 1 km ad Ovest rispetto al sito indagato. Nonostante la mancanza di dati in questa porzione del comune di Padova si può comunque affermare che, salvo ovvie variazioni locali, in sito insistono alternanze anche marcate di livelli granulari e coesivi, a tratti anche torbosi, che permettono l'esistenza di una serie di falde artesiane sovrapposte.

Codice: 165851
Regione: VENETO
Provincia: PADOVA
Comune: PADOVA
Tipologia: PERFORAZIONE
Opera: POZZO PER ACQUA
Profondità (m): 220,00
Quota pc sim (m): 2,00
Anno realizzazione: 1993

STRATIGRAFIA

Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica
1	0,00	20,00	20,00		TERRENO ARGILLO SABBIOSO
2	20,00	28,00	8,00		SABBIA MEDIA
3	28,00	50,00	22,00		ARGILLA E STRATI DI TORBA
4	50,00	80,00	30,00		SABBIA MEDIA
5	80,00	173,00	93,00		SABBIA FINE CON STRATI DI TORBA
6	173,00	186,00	13,00		SABBIA MEDIA
7	186,00	197,00	11,00		ARGILLA SABBIOSA
8	197,00	210,00	13,00		SABBIA GROSSA
9	210,00	220,00	10,00		ARGILLA

Figura 23 – Stratigrafia pozzo preesistente

(Relazione tecnica "TRT Casa dello Studente A. Fusinato")

La stratigrafia riportata all'interno della Relazione tecnica "TRT Casa dello Studente A. Fusinato" è in coerenza con la Carta litologica del PTCP della Provincia di Padova, visibile in *figura 24*. Infatti, si può ben notare come il sito interessato si disponga in una zona di depositi alluvionali fini costituiti prevalentemente da sabbie, argille, limi e torbe

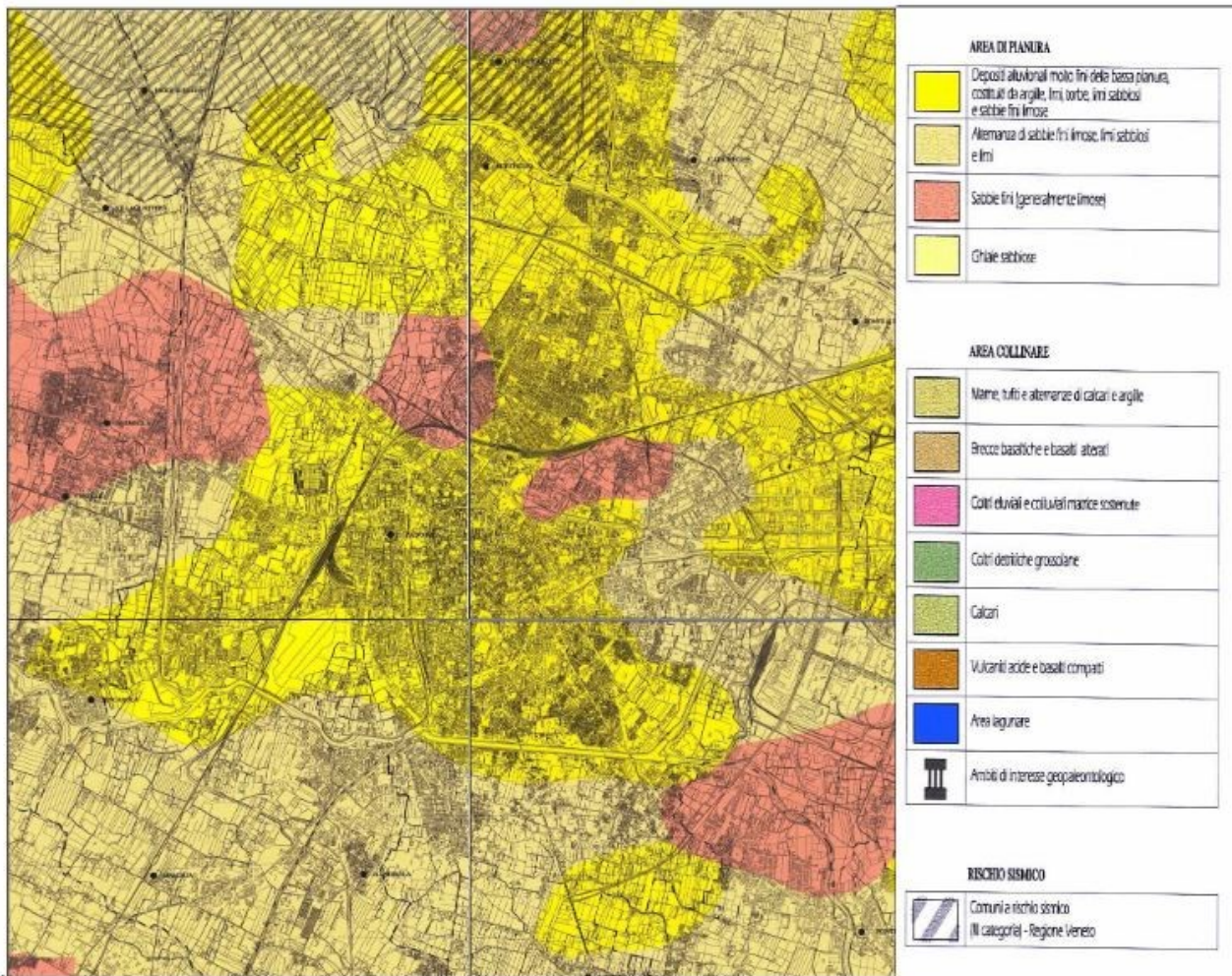


Figura 24 – Estratto della Carta litologica della Provincia di Padova

(www.padovanet.it)

Si riporta di seguito un estratto della Carta della fragilità del PAT (Figura 25) Padova nella quale si evidenzia che il sito si pone in area idonea ai fini geologici e senza particolari elementi di fragilità.

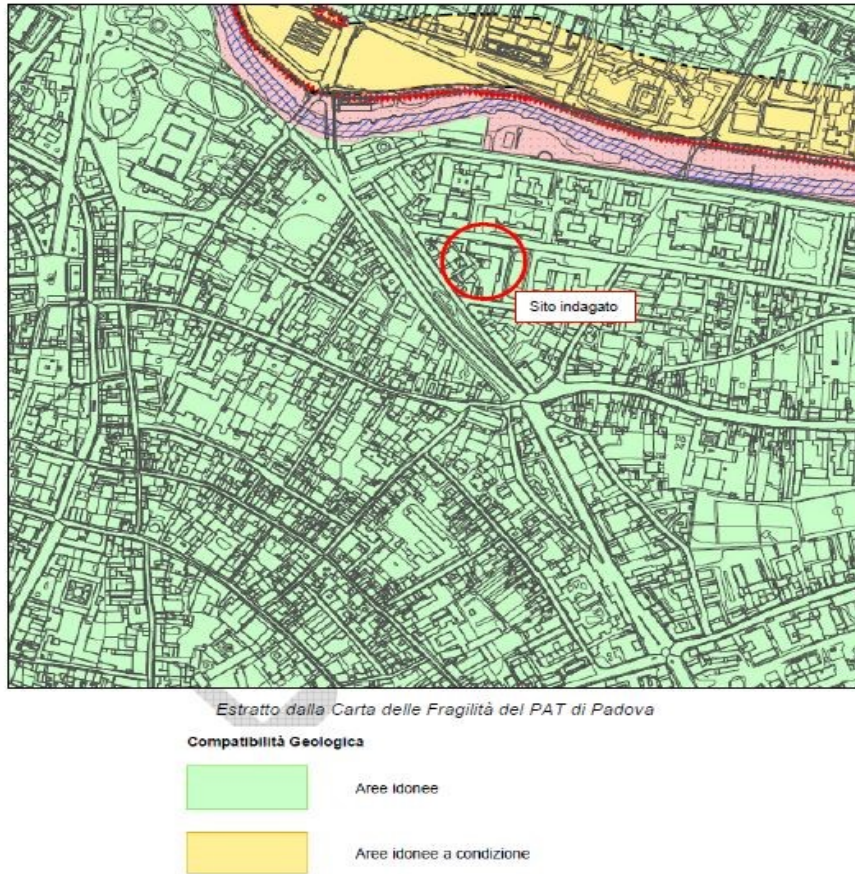


Figura 25 – Carta delle fragilità (PAT)

(Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

Idrogeologia

Passando all’aspetto idrogeologico, l’area considerata si inserisce all’interno di un sistema multifalda con alternanza di livelli permeabili e non permeabili, perciò vengono a formarsi acquiferi freatici ed artesiani che sicuramente andranno ad influenzare la conducibilità termica del suolo e di conseguenza influenzeranno le sonde geotermiche del caso studio. La prima falda, che ha profondità media di 2m dal p.c. (figura 26), è ricaricata prevalentemente da acque meteoriche, mentre le falde sottostanti sono perlopiù in pressione in acquiferi prevalentemente sabbiosi, separati da strati argillosi. Queste documentazioni ci permettono di confermare la presenza degli acquiferi nella stratigrafia in oggetto e di valutare la loro influenza sulla conducibilità termica.

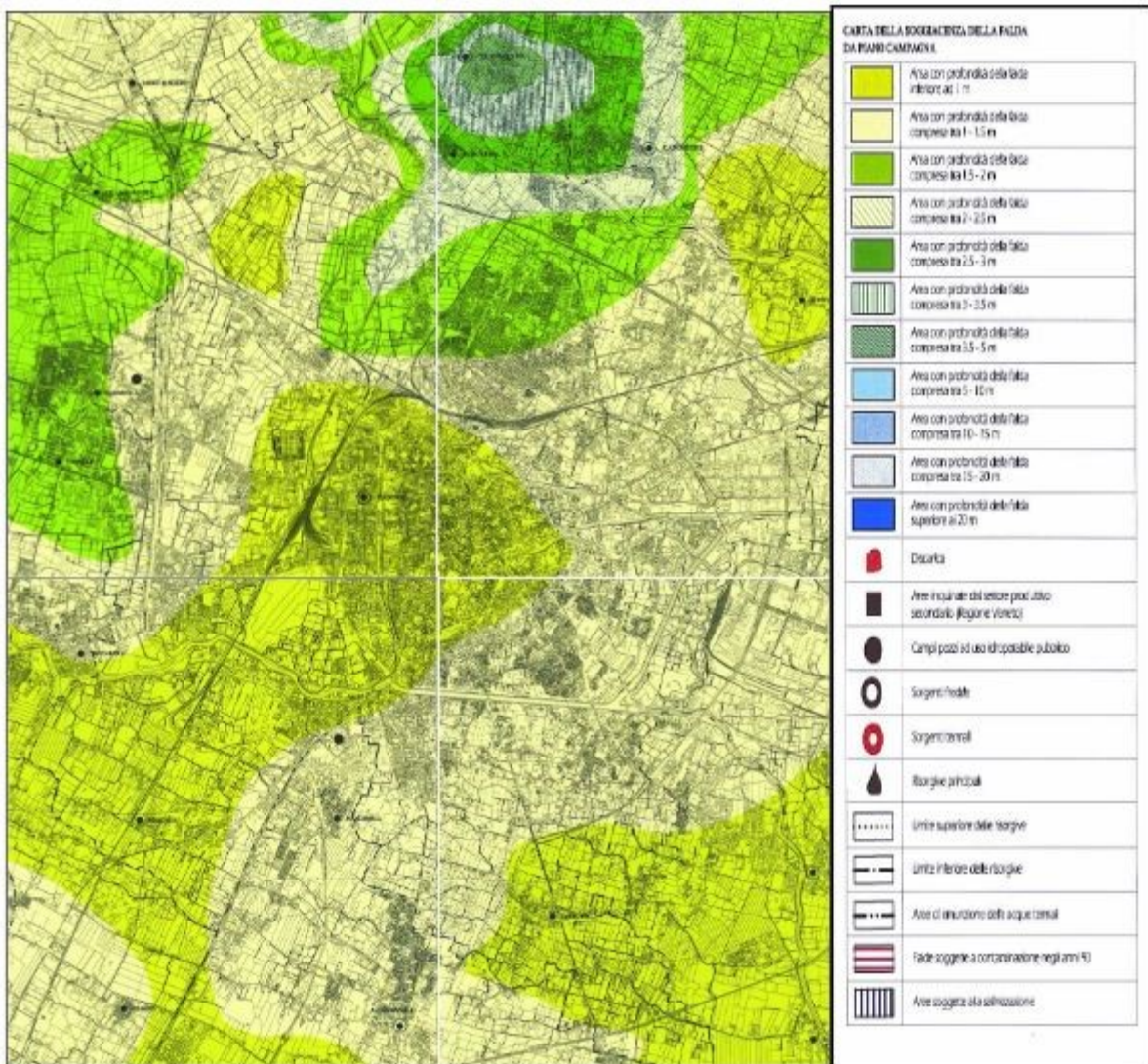


Figura 26 – Estratto della Carta Idrologica della Provincia di Padova

(www.padovanet.it)

Si riportano in seguito l'andamento della temperatura delle acque sotterranee (figura 27) e l'andamento della conducibilità termica delle acque sotterranee (figura 28).

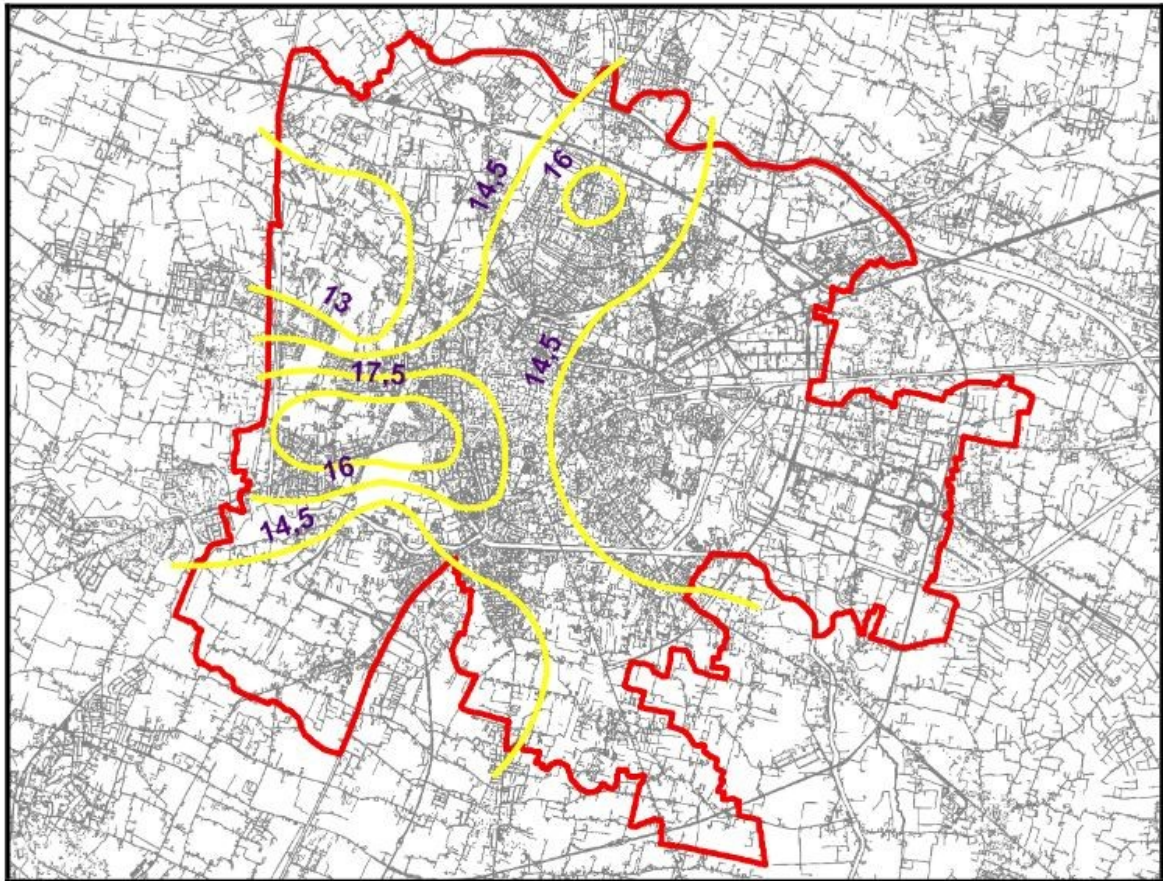


Figura 27 – Andamento delle temperature delle acque sotterranee - pozzi di monitoraggio 2007

(www.padovanet.it)

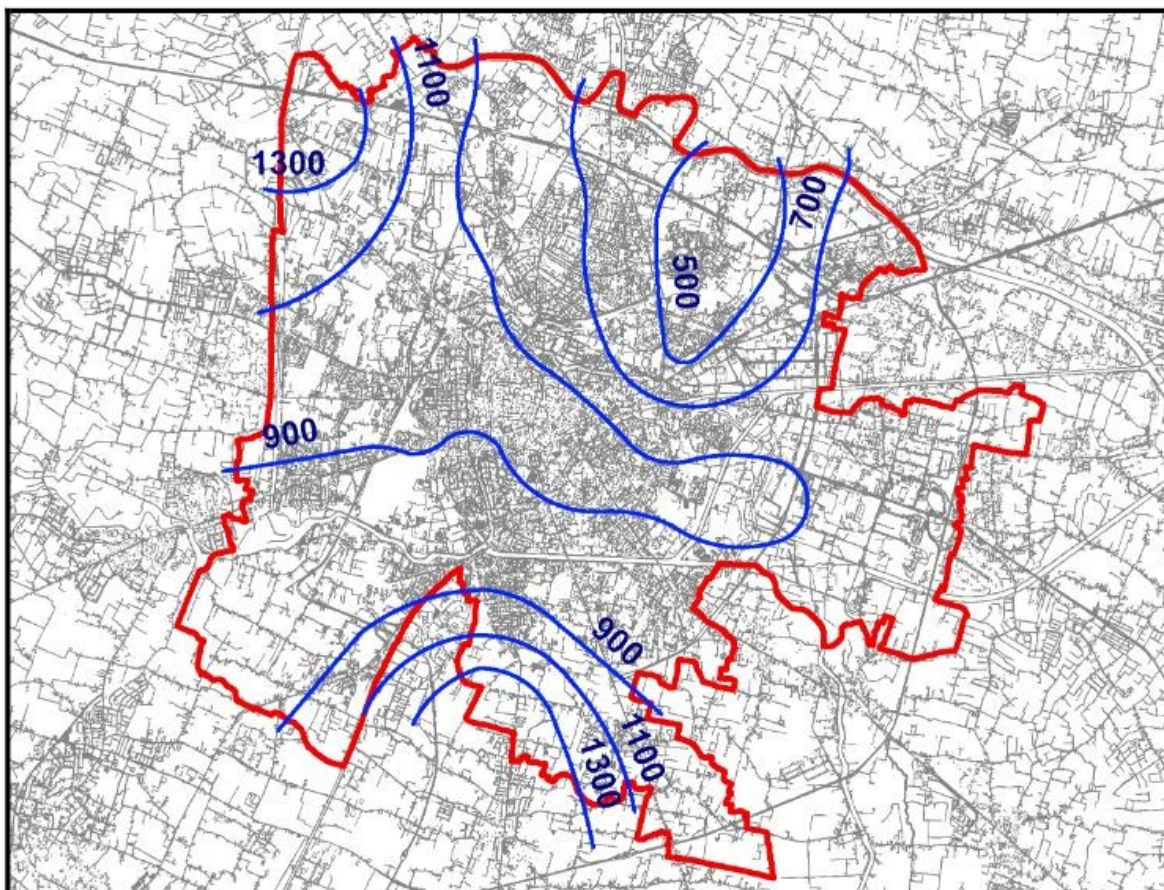


Figura 28 – Andamento della conducibilità delle acque sotterranee in microsimens/cm - pozzi di monitoraggio 2007

(www.padovanet.it)

Le temperature delle acque sotterranee di gran parte del territorio sono incluse fra i 13 e i 14.5° C. Aumentano in aree urbanizzate e nell'area presso l'aeroporto; la conducibilità (legata al carico salino) varia maggiormente (da 500 a 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a causa di un'alimentazione delle acque dolci da parte del fiume Brenta.

Analizzando la Carta idrogeologica della pianura della Regione Veneto, si può notare che la direzione di deflusso generale, nella porzione di territorio in cui si colloca l'edificio Fusinato, ha direttrice NW-SE, con gradienti idraulici modesti e variabili tra 0.4‰ e 0.6‰. Questa direzione di deflusso è localmente e periodicamente variabile a seconda dell'azione esercitata dai corsi d'acqua che attraversano l'area considerata.

Geotermia

Come confermato dal PAT, l'area considerata cade all'interno di una zona a gradiente geotermico standard, ovvero in una zona in cui non sono presenti anomalie geotermiche generate da fenomeni di tipo geologico profondo. L'ambito territoriale di Padova è da considerare appunto una zona a gradiente geotermico standard in cui si inserisce però una sorta di contaminazione termica derivante dal termalismo euganeo; nonostante questo però l'area considerata si presta in modo ottimale allo sfruttamento geotermico: la

presenza di acqua favorisce lo scambio termico e il terreno è facilmente perforabile grazie alla sua granulometria fine.

4.1.3 Caratteristiche tecnico costruttive delle sonde geotermiche

Test termico TRT

Al fine di perfezionare il dimensionamento del campo sonde geotermico, è stato predisposto un Test di Risposta Termica del terreno, così da calcolare la conducibilità dal punto di vista termico della verticale interessata tramite una sonda pilota preventivamente realizzata e che, successivamente, è diventata parte del campo sonde finale. In *figura 29* è visibile la temperatura del terreno indisturbata, mentre in *figura 30* sono visibili le temperature di entrata ed uscita dalla sonda.

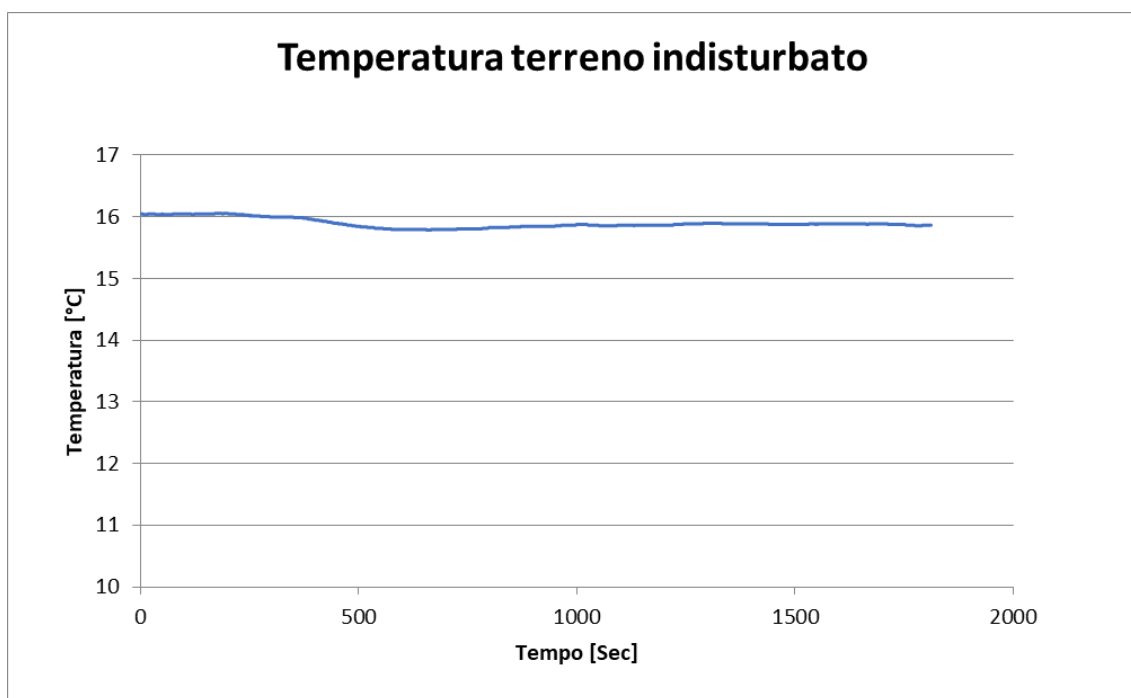


Figura 29 – Temperatura del terreno indisturbata

(Relazione tecnica "TRT Casa dello Studente A. Fusinato")

Trend di Temperature

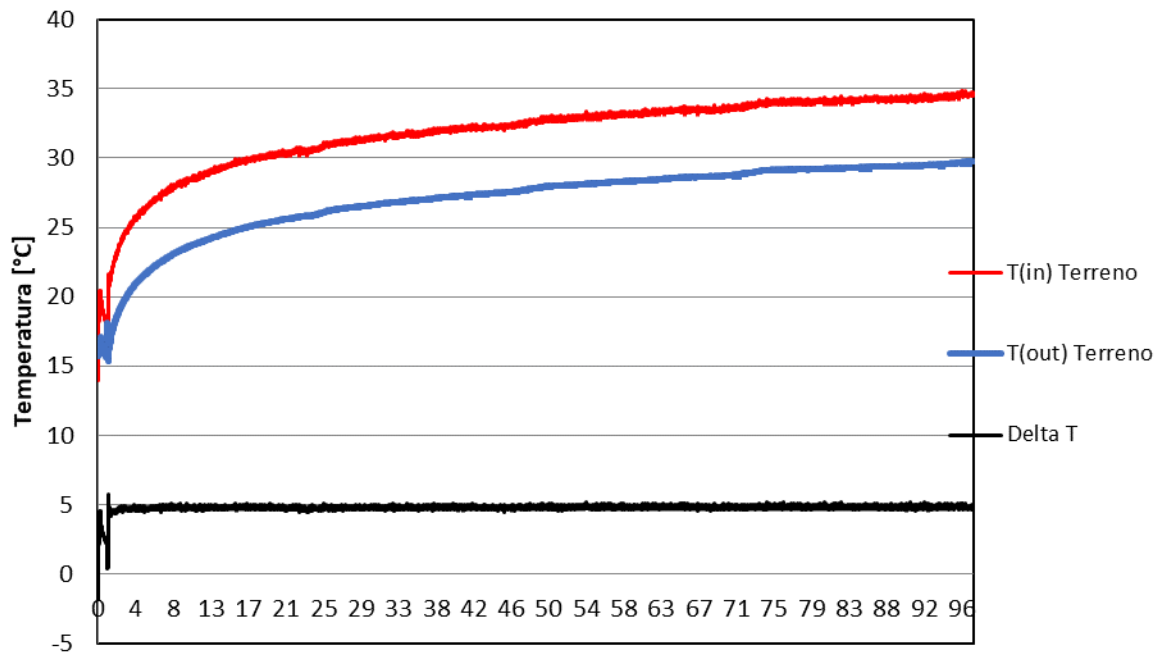


Figura 30 – Andamento di temperatura in ingresso (rosso) ed in uscita (blu) dalla sonda, e della differenza tra le due temperature

(Relazione tecnica "TRT Casa dello Studente A. Fusinato")

I dati ottenuti riguardanti la temperatura media del fluido, visibili in *figura 31*, vengono poi elaborati mediante l'utilizzo della "line source theory".

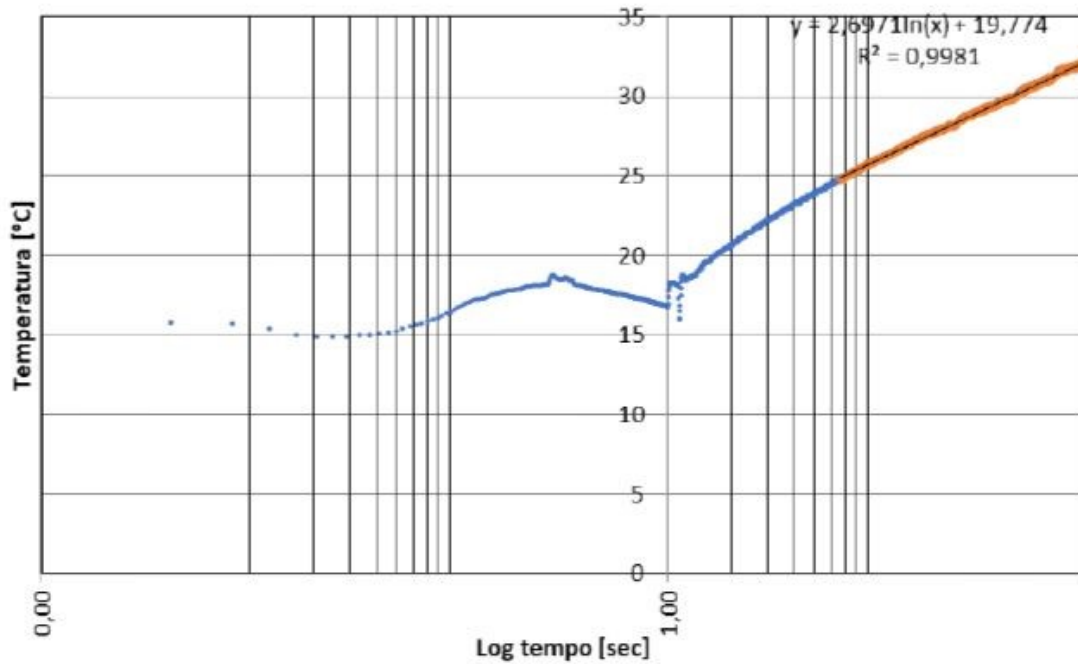


Figura 31 – Andamento di temperatura media del fluido rispetto al logaritmo del tempo
 (Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

Dall’esecuzione del test si sono ottenute le seguenti caratteristiche del terreno:

Conducibilità termica del terreno 1,70 W/mk. Una conducibilità termica del terreno di 1,7 W/mK è un valore tipico per alcuni tipi di terreno, come ad esempio la sabbia; può variare in base alla composizione del terreno, al contenuto di acqua, alla densità e ad altri fattori.

Temperatura terreno indisturbato in superficie 15,78°C.

In figura 32 è visibile la stratigrafia ricavata dal pozzo situato a 1km di distanza dal sito con il valore di conducibilità termica equivalente ricavata dal TRT.

Stratigrafia del terreno con conducibilità termica equivalente

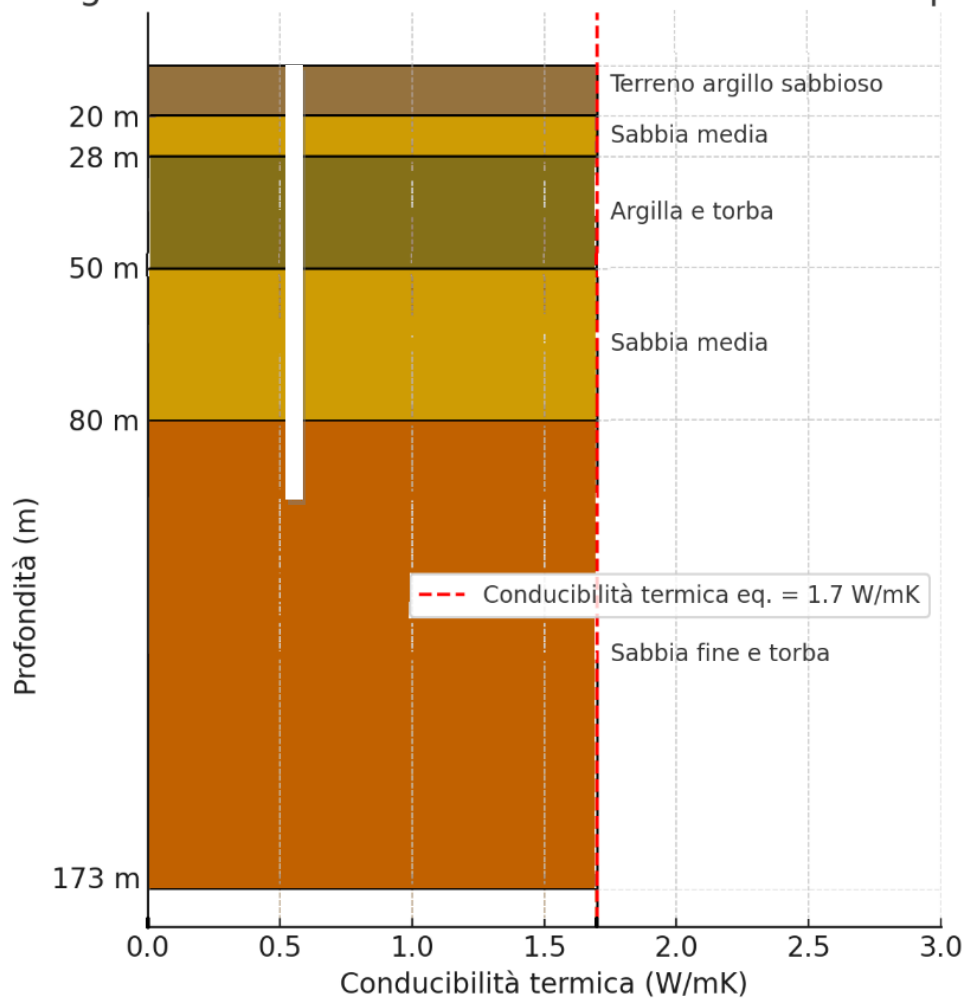


Figura 32 – Stratigrafie e andamento della conducibilità media equivalente del sito interessato. Il rettangolo bianco rappresenta la sonda geotermica in via di realizzazione di 100m di lunghezza.

Oggetto e scopo del lavoro

Sono stati considerati i parametri di funzionamento esecutivi del campo di geoscambio, da realizzare presso l'edificio Residenza Fusinato. È stato simulato, mediante software EED bulding physics vers. 3.22, il funzionamento delle sonde evidenziando le temperature medie circolanti all'interno dello scambiatore, al fine di prevederne il comportamento fino a 25 anni di funzionamento (visibile in figura 33). L'andamento al 25° anno è ben differente rispetto all'andamento dopo il 1° anno (figura 34) che risulta più costante e lineare, implicando una minor resa dell'impianto nei primi anni.

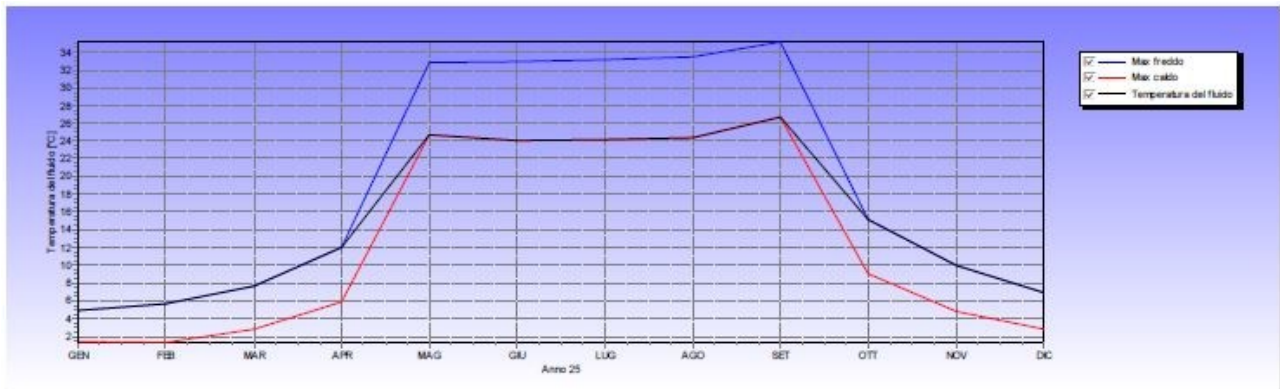


Figura 33 –Andamento al 25° anno della Temperatura media IN/OUT dal campo di geoscambio
(Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

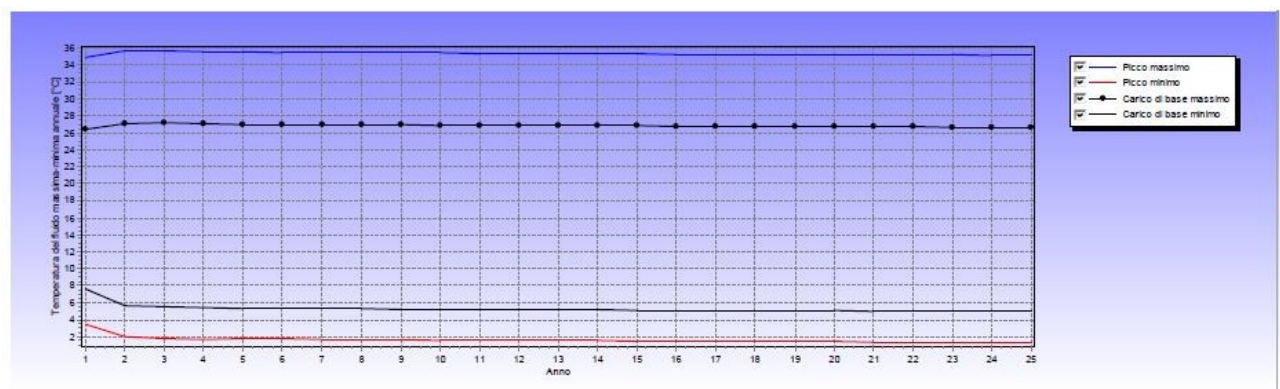


Figura 34 –Andamento al 1° anno della Temperatura media IN/OUT dal campo di geoscambio
(Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

Fabbisogno energetico dell’edificio soddisfatto dalla pompa di calore geotermica

Dallo studio dei fabbisogni annuali si evince che l’impianto geotermico è in grado di soddisfare solo parzialmente il fabbisogno energetico dell’edificio (figura 35); perciò, è necessaria la presenza di una pompa di calore aria/acqua monoblocco esterna a servizio dei picchi di fabbisogno energetico non soddisfatto dall’impianto geotermico.

Il campo sonde è quindi dimensionato per il soddisfacimento del 90% dei fabbisogni energetici invernali dell’edificio, e del 50% di quelli estivi. Le sonde geotermiche scambiano calore con il terreno in maniera bilanciata: durante l’inverno estraggono calore per riscaldare l’edificio, mentre in estate lo restituiscono. Un utilizzo controllato e bilanciato del sistema geotermico, ad esempio con sistemi di gestione termica automatizzati, impedisce che il terreno venga utilizzato in modo eccessivo per lunghi periodi senza avere il tempo di recuperare. Si possono monitorare e regolare l’uso della sonda, evitando che ci sia un accumulo di calore nel terreno in estate o un eccessivo raffreddamento in inverno.

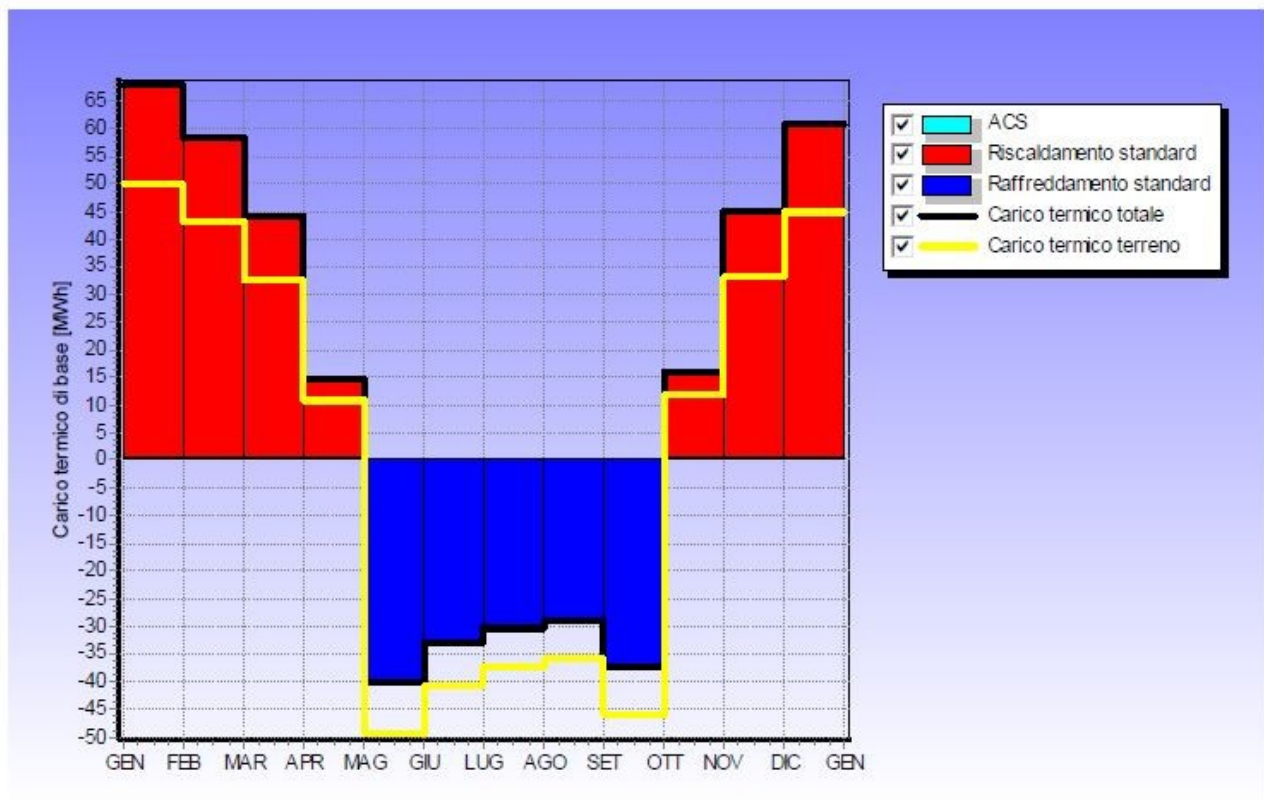


Figura 35 – Potenze mensili erogate dalla pompa di calore

(Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

Caratteristiche della pompa di calore

Marca AERMEC Modello NXP06002L-MU

Potenza termica nominale B5 / W45 151,7 kW, COP B5 / W45 3,91 (COP misura l’efficienza della pompa di calore in riscaldamento)

Potenza frigorifera nominale B35 / W7 142,1 kW, EER B35 / W7 6,0 (EER misura l’efficienza della pompa di calore in raffreddamento)

Tipologia di refrigerante R 410°

Realizzazione delle sonde

Le 30 perforazioni, la cui disposizione è visibile in *figura 36*, verranno eseguite con rivestimento continuo del foro attraverso camicia provvisoria metallica, avranno profondità, a partire dal piano campagna, pari a -100 m e un diametro pari a 152 mm. All’interno dei sondaggi verranno installate le sonde geotermiche per il riscaldamento dell’edificio residenziale, queste disteranno di almeno 3 m dai confini e ad almeno 7 m da altre sonde geotermiche verticali.

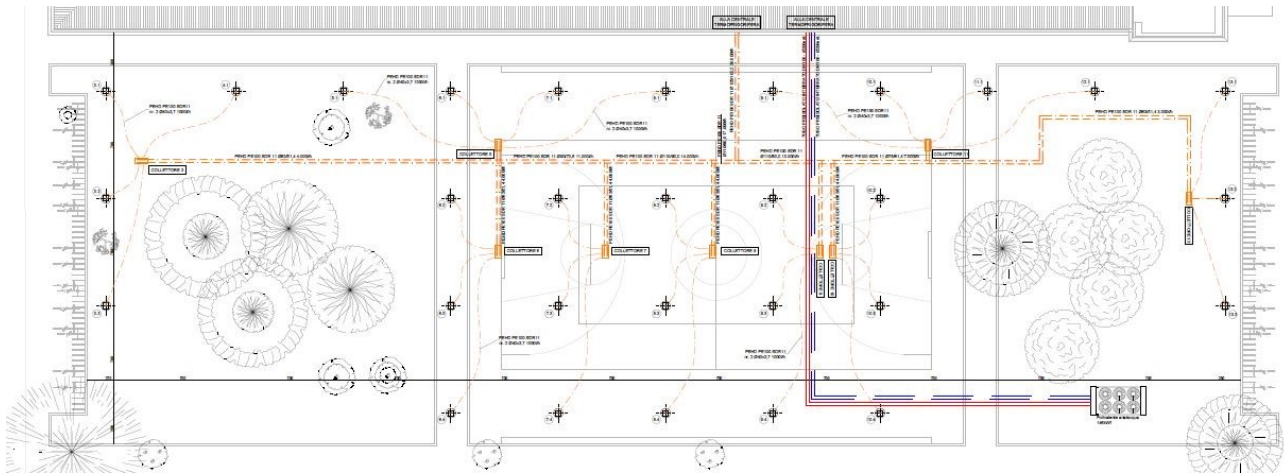


Figura 36 – Planimetria dell’insediamento con punti di installazione delle sonde geotermiche

(Relazione tecnica “TRT Casa dello Studente A. Fusinato”)

Le sonde verranno realizzate con Polietilene PE-RC, tubazione a 4 circuiti di cui 2 mandate e 2 ritorni, avranno geometria verticale a doppia U, all’interno di queste si sfrutterà come fluido termovettore una miscela di acqua e glicole monopropilenico, in miscela 80/20, con temperatura di congelamento pari a -8°C circa.

Durante la sigillatura tramite cementazione dei fori di perforazione sarà necessario porre attenzione a garantire una impermeabilizzazione ottimale, attraverso l’iniezione a pressione a partire dal fondo foro di una malta cementizia a conducibilità migliorata apposta per il riempimento delle perforazioni per geotermia.

4.2 Applicazione dei valori tabellati (da linee guida tipo *ASHRAE* o *VDI*)

L'applicazione dei valori tabellati forniti dalle linee guida internazionali, come quelle dell'*ASHRAE* (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) o del *VDI* (*Verein Deutscher Ingenieure*), è molto comune nella progettazione e utile per una prima stima della conducibilità termica equivalente dei terreni di cui è nota la stratigrafia, e a volte nei progetti semplici viene utilizzato per evitare lo svolgimento delle prove in situ (come il TRT). La valutazione eseguita con questo metodo permetta anche di fare una valutazione dei risultati ottenuti dal TRT per confronto diretto, come in questo caso.

Queste linee guida forniscono valori standardizzati per parametri termici che possono essere utilizzati come riferimento durante la progettazione di impianti geotermici o quando non sono disponibili dati sperimentali specifici per il sito di interesse.

I valori tabellati devono essere scelti con accuratezza scegliendo tra valori massimi, minimi e consigliati e andando ad ipotizzare e verificare, se possibile, lo stato di saturazione e lo stato di consolidamento e densità.

Si va a calcolare la conducibilità termica equivalente, sfruttando la media pesata della conducibilità su ogni strato, utilizzando i valori tabellati da linee guida *VDI* e si confronta il risultato trovato con il valore ottenuto attraverso il TRT.

Conducibilità termica equivalente secondo tabella VDI di figura 37:

	Type of rock	Thermal conductivity λ in W/(m·K)		Volume-related specific heat capacity $\rho \cdot c_p$ in MJ/(m ³ ·K)	Density ρ in 10 ³ kg/m ³	
			recommended value			
Unconsolidated	clay/silt, dry	0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0	
	clay/silt, water-saturated	1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2	
	sand, dry	0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2	
	sand, moist	1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2	
	sand, water-saturated	2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3	
	gravel/stones, dry	0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2	
	gravel/stones, water-saturated	1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3	
	till/loam	1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3	
	peat, soft lignite	0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1	
Sedimentary rock	clay/silt stone	1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6	
	sandstone	1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7	
	conglomerate/breccia	1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7	
	marlstone	1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6	
	limestone	2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7	
	dolomitic rock	3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7	
	sulphate rock (anhydrite)	1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0	
	sulphate rock (gypsum)	1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4	
	chloride rock (rock salt, potash)	3,6–6,1	5,4	1,2	2,1–2,2	
	anthracite	0,3–0,6	0,4	1,3–1,8	1,3–1,6	
	Magmatic rock	tuff	1,1	1,1		
vulcanite, acid to intermediate		e.g. rhyolite, trachyte	3,1–3,4	3,3	2,1	2,6
		e.g. latite, dacite	2,0–2,9	2,6	2,9	2,9–3,0
vulcanite, alkaline to ultra-alkaline		e.g. andesite, basalt	1,3–2,3	1,7	2,3–2,6	2,6–3,2
plutonite, acid to intermediate		granite	2,1–4,1	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0
		syenite	1,7–3,5	2,6	2,4	2,5–3,0
plutonite, alkaline to ultra-alkaline	diorite	2,0–2,9	2,5	2,9	2,9–3,0	
	gabbro	1,7–2,9	2,0	2,6	2,8–3,1	
Metamorphic rock	slightly metamorphic	clay shale	1,5–2,6	2,1	2,2–2,5	2,4–2,7
		chert	4,5–5,0	4,5	2,2	2,5–2,7
	moderately to highly metamorphic	marble	2,1–3,1	2,5	2,0	2,5–2,8
		quartzite	5,0–6,0	5,5	2,1	2,5–2,7
		mica schist	1,5–3,1	2,2	2,2–2,4	2,4–2,7
		gneiss	1,9–4,0	2,9	1,8–2,4	2,4–2,7
		amphibolite	2,1–3,6	2,9	2,0–2,3	2,6–2,9
Other materials	bentonite	0,5–0,8	0,6	~3,9		
	concrete	0,9–2,0	1,6	~1,8	~2,0	
	ice (-10 °C)	2,32		1,87	0,919	
	synthetics (HD-PE)	0,42		1,8	0,96	
	air (0 °C to 20 °C)	0,02		0,0012	0,0012	
	steel	60		3,12	7,8	
	water (+10 °C)	0,59		4,15	0,999	

Figura 37 – Tabella con conducibilità termiche secondo linee guida tipo VDI

Nel nostro caso quindi, la sequenza stratigrafica e i valori utilizzati sono riportati in *tabella 2*:

	<i>tipologia di terreno</i>	<i>da (m)</i>	<i>a (m)</i>	<i>spessore livello (m)</i>	<i>conducibilità termica (min)</i>	<i>conducibilità consigliato (min)</i>	<i>conducibilità termica (max)</i>
<i>livello 1</i>	<i>terreno argillo sabbioso</i>	<i>0</i>	<i>20</i>	<i>20</i>	<i>1,6</i>	<i>3</i>	<i>2,2</i>
<i>livello 2</i>	<i>sabbia media</i>	<i>-20</i>	<i>-28</i>	<i>8</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>2,4</i>
<i>livello 3</i>	<i>argilla e torba</i>	<i>-28</i>	<i>-50</i>	<i>22</i>	<i>1</i>	<i>2,7</i>	<i>1,8</i>
<i>livello 4</i>	<i>sabbia media</i>	<i>-50</i>	<i>-80</i>	<i>30</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>2,4</i>
<i>livello 5</i>	<i>sabbia fine e torba</i>	<i>-80</i>	<i>-100</i>	<i>20</i>	<i>1,8</i>	<i>2,7</i>	<i>2</i>
				<i>conducibilità termica equivalente</i>	<i>1.66</i>	<i>2.15</i>	<i>2.87</i>

Tabella 2 – Valori diversi di conducibilità medie equivalenti associati alla stratigrafia

- **valori massimi:** 2,87 W/mk
- **valori minimi:** 1,66 W/mk
- **valori raccomandati:** 2,15W/mk

Si può quindi concludere che il valore di conducibilità termica ottenuto attraverso il TRT è molto simile a quello trovato applicando i valori minimi tabellati da linee guida VDI, quindi un po' basso: questo indica che i vari strati non sono caratterizzati da buoni valori di conducibilità termica (sabbie non dense) e l'assenza di flussi di falda significativi nei livelli sabbiosi attraversati. Il valore di conducibilità termica equivalente comunque è in accordo con quello ricavato per il dimensionamento del campo sonde geotermiche al Campus Beato Pellegrino UNIPD, situato a Padova a circa 1200m di distanza, dove per una sonda di 120m di lunghezza si è ricavato una $\lambda_{eq} = 1.68W/(m \cdot K)$ (Dalla Santa et al., 2022).

5. Bibliografia

- Dalla Santa G., Pasquier P., Schenqto L., Galgaro A., (2022). Repeated ETRTs in a complex stratified geological setting: high-resolution thermal conductivity identification by a multiple linear regression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(4), 04022007
- Basta S. e Minchio F., "Geotermia e pompe di calore"
- Ciardi M. e Cataldi R., "Il calore della Terra: Contributo alla Storia della Geotermia in Italia", 1977
- De Carli M., Roncato N., Zarrella A., Zecchini R. "Energia dal terreno"
- Fanizzi L., "Depurazione biologica avanzata: Teoria e pratica dei processi", 2011
- Dell'Olio G. "Geotermia e pompe di calore"
- Mary H. Dickson e M. Fanelli "Geothermal Energy: Utilization and Tannexechnology"
- S., Gehlin. "Thermal Response Test-Method, Development and Evaluation"
- Sanner B. "Shallow geothermal energy", *GHC Bulletin*, 2001

5.1 Materiale utilizzato e siti internet presi in considerazione:

- G. Dalla Santa "Geotecnica per la difesa del Territorio 2023-24 – Elementi base di geotermia di bassa entalpia"
- *Relazione tecnica "TRT Casa dello Studente A. Fusinato"*
- *IEA ECES Annex, Thermal Response Test for Underground Thermal Energy Storages* – www.iea.org
- E. Pandeli, F. Tassi, O. Vaselli - www.acquesotterranee.net
- B. Focaccia - www.unionegeotermica.it
- Oxford Reference - www.oxfordreference.com
- Residenza Fusinato - www.unipd.it/sites/unipd.it/files/20190228%20conferenza%20stampa.pdf
- hal.science/hal-03516867v1/file/properties_peg.pdf
- www.unionegeotermica.it/pdfiles/La-Geotermia-Studio-07.pdf

- expoclima.net
- geonovis.com
- alessandroga.com
- www.padovanet.it/urbanistica/PATmapcarta.com
- researchgate.net
- www.sigeaweb.it/documenti/gda-supplemento-2-2021.pdf
- <http://www.fisicatecnica.altervista.org>

Ringraziamenti

Studiare Ingegneria non è stata certo una passeggiata, ma eccomi qua a godermi la ricompensa, a dire che ce l'ho fatta!

Penso ai sacrifici fatti per portare avanti il mio percorso di studi, all'ansia prima di ogni esame, alla paura di non farcela e ho capito che, se sono arrivato qui oggi, è anche grazie alle persone che mi sostengono e mi spronano a dare il meglio di me ogni giorno, persone che sono entrate nella mia vita e in un modo o nell'altro l'hanno resa unica.

Il primo ringraziamento va a miei genitori, Giusy e Roberto, per il loro essere amore puro e incondizionato, per avermi accompagnato, e a volte spinto, lungo questo ripido e tortuoso percorso; grazie a loro che non mi hanno mai lasciato solo e che si sono messi in prima linea per me, anche quando forse non lo meritavo.

Poi devo ringraziare mia sorella, Denise, per avermi aperto la strada nella vita e nell'università. Grazie a lei per tutti i consigli riguardo questo percorso di studi che ci accomuna, grazie per il sostegno dato e per essermi stata a fianco nei periodi di difficoltà.

Un grazie anche al resto della mia famiglia, ai miei nonni, ai miei nipoti e a chi ne è diventato parte in questi ultimi anni.

E poi, se è vero che gli amici sono la famiglia che ti scegli, io devo essere stato davvero fortunato. Un grazie ai miei amici storici e a tutti coloro che si sono aggiunti a questo bellissimo gruppo.

Un grazie a tutti i miei amici universitari, grazie per tutti i caffè bevuti assieme, per le corse in mensa, per aver passato giornate infinite a studiare in biblioteca, per aver condiviso con me questo percorso di gioia e al contempo agonia.

Grazie a tutti coloro che hanno voluto condividere un pezzo della loro strada con me e un grazie ancora più speciale a chi mi sta ancora accompagnando con amore incondizionato.

Grazie alla Professoressa Giorgia Dalla Santa per avermi dato l'opportunità di lavorare su questo progetto e per avermi aiutato a raggiungere il mio obiettivo accademico.

E infine, direi che l'ultimo ringraziamento va a me, per non aver mollato anche quando sembrava essere troppo difficile continuare e ora che questa lunga e tortuosa scalata è finita posso sedermi in attesa di iniziarne una prossima.