

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

DICMA

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali

TESI DI LAUREA

in

Geostatistica Applicata Ls

**SISTEMI PER LA CLIMATIZZAZIONE MEDIANTE
POMPE DI CALORE GEOTERMICHE
E PALI ENERGETICI**

CANDIDATO:
Verrone Alessio

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Bruno Roberto
CORRELATORE:
Ing. Tinti Francesco

Anno Accademico 2008/09

Sessione III

INDICE

Introduzione.....	4
1. La geotermia a bassa entalpia per la climatizzazione degli edifici	7
1.1 Lo scenario energetico attuale.....	7
1.2 La geotermia a bassa entalpia, una fonte di energia non convenzionale	12
1.3 Situazione geopolitica	17
2. Introduzione al sistema di pali energetici e pompe di calore geotermiche.....	27
2.1 Le pompe di calore geotermiche: teoria.....	27
2.2 Geoscambiatori nei pali di fondazione: i pali energetici	34
2.2.1 Vantaggi della tecnologia.....	40
2.2.2 Effetto sulla statica dei pali	44
3. La simulazione di un sistema di pali energetici.....	45
3.1 Raccomandazioni per la realizzazione di impianti con pali energetici.....	45
3.2 Lo strumento di simulazione PILESIM2	50
3.2.1 Parametri in uscita da PILESIM2	58

4. Caratterizzazione di un sistema di geoscambio mediante pali energetici	63
4.1 Principali parametri geologici e idrogeologici del terreno	63
4.2 Modalità di trasmissione del calore in un sistema di pali energetici	70
4.3 La resistenza termica dei pali energetici	80
4.4 Capacità di scambio termico di un sistema di pali energetici.....	85
4.5 Capacità di stoccaggio specifica di un sistema di pali energetici	90
4.6 Test di Risposta Termica (TRT)	92
5. Progettazione di un sistema di climatizzazione geotermico per un edificio unifamiliare di nuova costruzione.....	95
5.1 Relazione geologico-tecnica del sito in esame	95
5.1.1 Premessa.....	95
5.1.2 Modello geologico del sito.....	97
Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici	97
Idrologia e idrogeologia	98
Indagini geognostiche	99
5.1.3 Risultati delle indagini e interpretazione litostratigrafia.....	105
5.1.4 Interazione suolo-strutture	107
Fondazioni alla base	
Pali di fondazione.....	109
Stima della capacità portante per carico verticale di un palo mediante formule statiche.....	111

6. Analisi tecnico-economico-finanziaria	117
6.1 Dimensionamento statico dei pali di fondazione	117
6.2 Dimensionamento energetico dei pali di fondazione.....	119
6.3 Analisi costi-benefici.....	124
6.4 Analisi di sensitività.....	138
6.5 Aspetti ambientali	148
Considerazioni finali	151
Bibliografia.....	154

Introduzione

La casa è il luogo in cui trascorriamo gran parte della nostra esistenza; per renderla confortevole, piacevolmente calda in inverno e fresca d'estate abbiamo bisogno di tanta, troppa energia.

Per riscaldare le proprie abitazioni gli italiani bruciano ogni anno circa 14 miliardi di metri cubi di gas, 4,2 milioni di tonnellate di gasolio e 2,4 milioni di tonnellate di combustibili solidi, con la conseguente emissione di 40 milioni di tonnellate di CO₂ nell'ambiente. In estate d'altra parte, per mantenere vivibile il clima delle nostre case, si accendono una decina di milioni di condizionatori: solamente tra il 2000 e il 2006 ne sono stati venduti 9 milioni.

I consumi degli impianti di condizionamento con potenza inferiore ai 7 kW raggiungono gli 11 TWh l'anno, con emissioni pari a 6 milioni di tonnellate di CO₂, e fanno sì che negli ultimi anni la domanda elettrica di punta estiva abbia ormai superato quella invernale. Più che consumo sarebbe più corretto parlare di spreco. L'uso poco accorto dell'energia in casa è un problema che colpisce tutti i paesi industrializzati, ma soprattutto il nostro; l'Italia infatti è prima in Europa per perdite di energia nelle abitazioni attraverso tetti, pareti perimetrali e finestre (il 17,5% dell'energia sprecata nelle case europee è dovuta proprio a quelle italiane) ed è penultima per spessore dei materiali che isolano le abitazioni: solo in Belgio le case sono meno efficienti. Per costruire edifici più rispettosi dell'ambiente e meno colabrodo basterebbe utilizzare le regole della bioarchitettura, grazie a cui è possibile risparmiare una grossa quantità di energia e ridurre drasticamente le bollette per il riscaldamento e l'elettricità. Lo possono testimoniare le seimila famiglie che in tutta Europa vivono in case passive, edifici che garantiscono un ambiente confortevole in tutte le stagioni, in inverno così come in estate, senza l'uso di impianti attivi di riscaldamento o di

condizionamento. Ciò significa che per riscaldare le case non si usano gasolio, carbone o gas naturale, ma solamente energie pulite, come l'energia solare e quella geotermica.

La provincia autonoma di Bolzano, tanto per citare un esempio virtuoso nel nostro Paese, con il progetto "Casa clima oro" ha da tempo deciso di classificare il consumo energetico delle loro abitazioni in classi di efficienza (vedi figura 1), come si fa per gli elettrodomestici.

Dal gennaio 2005 tutti i nuovi edifici costruiti in Alto Adige devono garantire un consumo annuo inferiore ai 7 litri di gasolio al metro quadro per il riscaldamento, cioè devono essere almeno di classe C; sette litri di gasolio è quanto consuma un edificio male isolato a Roma, dove il clima è certamente più clemente che nelle Alpi.



Figura 1. Classi di efficienza energetica

Oggi a Bolzano sono più di 500 le case certificate, di cui il 10% a 3 litri (classe A), ovvero con un consumo massimo di 30 kWh per metro quadro; ciò significa che un appartamento di 100 m² in classe A farà spendere per il suo riscaldamento 160 euro all'anno contro i 1500-2000 di una casa tradizionale; un risparmio notevole!

La certificazione energetica è divenuta obbligatoria dai primi di Luglio del 2009 con la firma del *decreto attuativo sulla certificazione energetica degli edifici*. Questo decreto segue il DPR n°59 del 2 aprile 2009, che ha stabilito i requisiti energetici minimi per i nuovi stabili e per le attività di ristrutturazione di quelli esistenti, e definisce oltre alle linee guida nazionali anche gli strumenti di raccordo tra Stato e Regioni. I benefici di questa certificazione sono di far conoscere all'acquirente quanto consuma la casa

che si sta per comprare; una casa con appartenenza ad una classe bassa sarà inizialmente più costosa, ma di sicuro molto meno nel lungo termine sul piano dei consumi.

Negli ultimi tempi, l'aumento della sensibilizzazione dell'opinione pubblica sul riscaldamento globale e i problemi di inquinamento ambientale hanno finalmente aperto ampi scenari al settore dell'edilizia sostenibile, incoraggiando lo sviluppo di nuovi metodi rinnovabili per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici.

In questa trattazione ci soffermeremo su uno di questi “nuovi metodi puliti”, una specifica applicazione della geotermia di superficie: parleremo di pali energetici; modalità operativa ancora poco diffusa a livello nazionale, ma che ha riscontrato un grande sviluppo in paesi europei non troppo lontani dal nostro, come Svizzera, Austria e Germania.

In particolare sarà sviluppata la progettazione di un sistema di climatizzazione con pompa di calore geotermica accoppiata a pali energetici, ovvero pali di fondazione dotati internamente di scambiatori di calore, per un tipico fabbricato italiano unifamiliare ubicato nella pianura bolognese.

Questo studio verterà inizialmente su un'analisi geotecnica/strutturale delle fondamenta, per poter valutare la lunghezza dei pali; in secondo luogo si passerà alla progettazione dell'impianto geotermico e si concluderà con una valutazione di fattibilità tecnica ed economica.

Inoltre, per valutare le performance del sistema termico e il potenziale di utilizzo dei pali energetici si farà ricorso all'utilizzo di uno strumento di simulazione: il software PILESIM2, realizzato dal Dr. Pahud, responsabile per la ricerca sull'energia geotermica presso il Dipartimento Ambiente, Costruzioni e Design (DACD) della SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana).

1. LA SOLUZIONE GEOTERMICA PER LA CLIMATIZZAZIONE DEGLI EDIFICI

1.1 Lo scenario energetico attuale

Se al giorno d'oggi in Italia e negli altri paesi industrializzati abbiamo accesso a una quantità apparentemente illimitata di energia, lo dobbiamo, oltre che al lavoro di scienziati e inventori, anche al petrolio e alle altre fonti fossili che nel trascorrere dell'ultimo secolo hanno portato ad un netto miglioramento nel progresso e nella vita dell'uomo; dal confort domestico, ai trasporti etc...

Tuttavia, è altrettanto vero che l'utilizzo incondizionato di queste fonti non rinnovabili ha traghettato l'umanità verso una serie di emergenze ambientali e sanitarie, nonché socio-economiche: aumento della CO₂ in atmosfera con conseguente effetto serra che sta sconvolgendo i climi e le specie viventi, intere foreste erose dalle piogge acide, innumerevoli morti da smog, ma anche frequenti conflitti politici per il controllo delle risorse petrolifere e nuove forme di colonialismo.

I consumi energetici nel frattempo stanno incrementando ad un ritmo elevato, soprattutto grazie al contributo di quei paesi in via di sviluppo (su tutti Cina e India) con un tasso di crescita economica notevolmente superiore a quello della media mondiale. L'aumento dei prezzi registrato negli ultimi anni, culminato con il picco del 2008, ha messo in evidenza quanto essi siano sensibili agli squilibri del mercato nel breve termine ed hanno inoltre reso l'opinione pubblica più consapevole del fatto che le risorse di petrolio (e di gas naturale) sono limitate.

Infatti, checché se ne dica, una risorsa fossile non rinnovabile, è destinata ad esaurirsi, e se poi il quantitativo utilizzato supera quello che viene estratto, allora la velocità con cui si esaurisce tende logicamente ad

umentare. Secondo le stime di alcuni geologi, il genere umano ha già consumato la metà dei circa 2000 miliardi di barili che giacevano nel sottosuolo prima dell'era industriale; se si considera che questa risorsa impiega milioni di anni per generarsi e che il suo consumo è di 25 miliardi di barili l'anno, le riserve dovrebbero essere sufficienti a garantire il fabbisogno dell'umanità per alcuni decenni.

Sarà forse tra 20 o 50 anni, ma in questo secolo dovremo imparare a sopravvivere senza petrolio, sarebbe meglio prepararsi già da subito e pensare ad una valida alternativa prima che sia troppo tardi.

Se non invertiamo questa rotta negativa c'è il serio rischio che in un futuro non troppo lontano ci si possa imbattere in una crisi energetica mondiale senza precedenti; appare dunque naturale pensare che, in circostanze simili, si debbano intensificare gli sforzi in ambito scientifico, tecnologico e industriale, per accelerare ovunque la crescita ed il massimo impiego possibile delle risorse rinnovabili e non convenzionali, di cui la geotermia fa parte. Occorre ovviamente che il Governo Italiano e le Istituzioni coinvolte nei problemi dell'energia prendano pienamente atto di questa opportunità e ne favoriscano lo sviluppo con azioni decise e incentivi finanziari appropriati. Una più veloce transizione verso un sistema dell'energia a basso contenuto di carbonio potrebbe finalmente portare a rispettare gli accordi del Protocollo di Kyoto, che impegna i paesi industrializzati a ridurre le emissioni di gas serra in media del 5,2% per il periodo 2008-2012 rispetto ai livelli del 1990. Le emissioni italiane invece che diminuire del 6,5% rispetto al 1990, sono cresciute del 12,1% in quindici anni; ciò significa che il nostro paese con tutta probabilità, dovrà pagare delle sanzioni alquanto salate: sulla borsa delle emissioni la CO₂ viene pagata sui 20 € a tonnellata e noi siamo lontani dagli obiettivi di Kyoto di circa 100 milioni di tonnellate.

Seguendo i trends attuali, le emissioni di anidride carbonica legate al consumo di energia e degli altri gas ad effetto serra aumenteranno inesorabilmente, portando ad un rialzo della temperatura media globale di 6°C nel lungo periodo. Per frenare queste tendenze è necessaria un'azione urgente e decisa.

La XV Conferenza delle Parti, che si è tenuta a Copenhagen nel novembre del 2009, ha rappresentato un'opportunità di straordinaria importanza per negoziare una serie di accordi e normative contro il cambiamento climatico globale per il periodo successivo al 2012 (ultimo anno del primo periodo previsto dal Protocollo di Kyoto), anche se non ha sortito i risultati sperati.

Oggi solo una minima parte dell'energia che si consuma nel mondo proviene da fonti pulite, come sole, vento e calore terrestre: lo 0,5%; mentre l'81% dell'energia mondiale è di origine fossile (35% petrolio, 25% carbone e 21% gas naturale), il 6% da nucleare, il 10% da legno, biomasse e rifiuti, il 2,5% da grande idroelettrico.

Valori percentuali che fanno riflettere se si considera l'elevato valore ambientale ed economico delle fonti rinnovabili: non producono rifiuti difficili da smaltire, riescono a portare energia nelle aree isolate e rurali, senza dimenticare che favoriscono la creazione di nuovi posti di lavoro.

Tuttavia già da qualche tempo si riscontrano numerosi segnali di un'attenzione nuova verso queste fonti di energia, dal fotovoltaico in Germania all'eolico in Danimarca, tanto per citare alcuni esempi.

A dare un'ulteriore spinta al settore dell'energia verde è stata la Commissione europea che il 23/10/08 ha adottato un importante pacchetto su energia e clima, con obiettivi vincolanti per tutti gli stati membri al 2020: portare al 20% la quota di rinnovabili nel consumo energetico, ridurre di almeno il 20% le emissioni di gas serra e ridurre del 20% i consumi con interventi di efficacia energetica.

Il consumo lordo totale di energia in Italia nel 2006 è stato di circa 200 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP, L'OCSE definisce il TEP come equivalente a 41,868 GJ o 11,630 MWh.), di cui l'87% costituito da combustibili fossili (soprattutto petrolio e gas naturale, ed in minor parte il carbone), il 6% da energia elettrica importata ed il 7% da fonti non convenzionali o rinnovabili di energia.

Tra le fonti non convenzionali, la frazione geotermica è stata lo 0,6% del totale, percentuale costituita per oltre quattro quinti dalla produzione di elettricità e per il resto dagli usi diretti del calore naturale.

Nella tabella 1 si riportano i dati relativi al *consumo interno lordo di energia* * negli anni 2007 e 2008.

* il *consumo interno lordo di energia* è dato dalla somma dei quantitativi di fonti primarie prodotte, di fonti primarie e secondarie importate e dalla variazione delle scorte presso produttori e importatori, diminuita delle fonti che vengono esportate.

milioni di t.e.p. e quote	2007		2008		2008/2007
consumo interno lordo di energia (3)	194,2	100,0%	192,0	100,0%	- 1,1 %
di cui:					
prodotti petroliferi	82,5	42,5%	79,4	41,4%	- 3,9 %
gas naturale	70,0	36,0%	70,0	36,5%	+ 0,0 %
solidi	17,2	8,9%	17,0	8,9%	- 1,2 %
rinnovabili	14,3	7,4%	16,9	8,8%	+ 15,4 %
elettricità primaria (saldo estero)	10,2	5,3%	8,7	4,5%	- 17,2 %

Tabella 1. Consumo interno lordo di energia (fonti: Relazione generale sulla situazione economica del Paese - Ministero dello Sviluppo Economico, "Bilancio energetico nazionale").

Nel biennio di riferimento si nota una diminuzione nel consumo dei prodotti petroliferi del 3,9%, un valore stabile per il gas naturale (+0,0%), una diminuzione dell'1,2% nell'utilizzo del carbone, l'elettricità importata dall'estero invece subisce un netto calo (-17,5%) mentre le rinnovabili registrano un buon incremento: dal 7,4% nel 2007 all'8,8% nell'anno successivo, per un aumento percentuale del 15,4%.

Tra le fonti rinnovabili, nel biennio 2007/08 il geotermico volto perlopiù alla produzione di elettricità si è mantenuto stabile sui 5500 GWh.; rispetto a fotovoltaico, eolico e biomasse è risultato il settore con il tasso di sviluppo più basso anche se, in un mercato che nel prossimo futuro dovrà necessariamente puntare su un sistema energetico eco-compatibile, si prevedono incoraggianti prospettive la geotermia, soprattutto nei suoi usi diretti, grazie anche al dinamico sviluppo delle pompe di calore geotermiche.

Alla Tavola Rotonda, riunitasi il 25/09/09 al *Geothermal Expo* di Ferrara per indicare gli obiettivi e le proposte di azione al 2020 per lo sviluppo della geotermia in Europa e in Italia, tutti i partecipanti sono stati concordi nel ritenere possibile per gli usi diretti, un tasso di crescita annuale del 10 % fino al 2020.

Mentre per l'Europa gli obiettivi sono di passare dagli attuali 10000 MWt installati a 30000-40000 MWt, per l'Italia si tratterà di incrementare la potenza termica installata fino a 4000-6000 MWt (max) a fronte degli attuali 850 MWt .

Tra le proposte d'azione, volte ad incrementare l'impiego di questa tecnologia pulita nel nostro Paese, sono emerse quelle di:

- Aggiornare a livello nazionale e regionale le regole e le procedure sull'ottenimento di permessi e concessioni per la perforazione di pozzi e lo sviluppo della geotermia, al fine di accelerare l'esecuzione dei progetti geotermici;
- Impostare un "Piano di Sviluppo Geotermico Nazionale", da cui trarre linee-guida della geotermia;
- Fissare per legge un programma decennale di incentivi, per favorire lo sviluppo di risorse geotermiche di ogni tipo;
- Impostare un programma nazionale di RES (Renewable Energy Source) nel settore della geotermia (coordinato a livello centrale ma

svolto in parte a livello regionale), per quantificare il potenziale dei differenti tipi di risorsa geotermica esistenti nelle varie regioni, e per delineare le basi scientifiche dello sviluppo della geotermia a fini pratici.

1.2 La Geotermia, una fonte di energia non convenzionale.

Il termine “*Geotermia*” deriva dal greco “geos = terra” e “thermos = calore”, da cui il significato letterale “Calore della Terra”. Per energia geotermica si intende dunque quella contenuta sotto forma di calore nel sottosuolo, la cui unica ed evidente manifestazione è la temperatura.

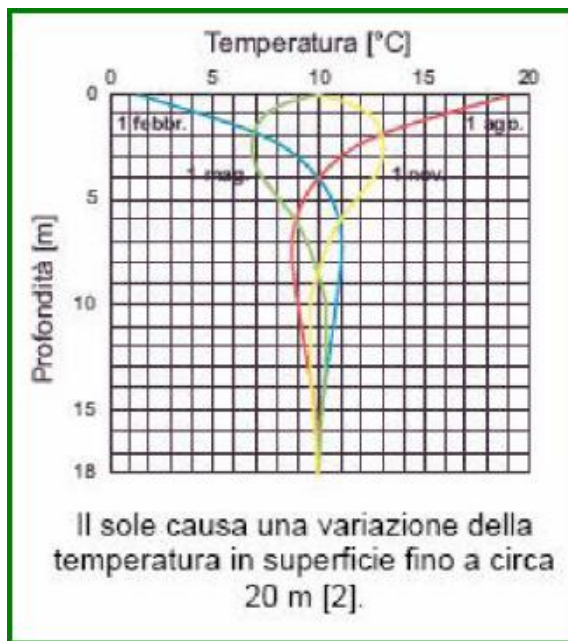


Figura 2. Profili della temperatura del terreno in funzione della profondità.

Fino a 15-20 m. di profondità, la temperatura della crosta terrestre può essere influenzata dalle variazioni climatiche stagionali; al di sotto di tale profondità invece, si riscontra una zona di omotermia dove appunto la temperatura si mantiene costante tutto l’anno per effetto del bilanciamento tra il flusso di calore che proviene dal nucleo e dal mantello terrestre, gli apporti di energia solare alla

superficie terrestre e, talvolta, ma non necessariamente, il contributo dell’energia apportata dalle acque sotterranee.

In figura 2 è possibile osservare i vari profili della temperatura in funzione della profondità; si nota che, sebbene in prossimità della superficie l’andamento di questi profili risulta molto diverso a seconda delle stagioni, ognuno di essi si assesta su valori costanti ad una profondità di circa 15 m.

Nella maggior parte delle regioni italiane, indipendentemente dal tipo di roccia, dall'assetto geologico-strutturale e dalla stratigrafia, in queste zone la temperatura disponibile è compresa tra i 12° e i 16°; continuando a scendere in profondità la temperatura aumenta mediamente di 3°C ogni 100 m. secondo il gradiente geotermico. Solitamente il calore immagazzinato nelle rocce a 500 m. è di circa 25-30 °C e di 35-45 °C a 1000 m.; in casi meno comuni può raggiungere e superare persino i 200°C.

Esistono varie tipologie di *sistemi geotermici* (intesi come qualunque risorsa sotterranea con la quale è possibile scambiare calore). Inizialmente venivano considerati solamente quelli idrotermali, con un serbatoio in cui il calore si propaga per convezione a seguito dei moti convettivi dei fluidi contenuti e che possono essere ad acqua dominante (con contenuto energetico inferiore) o a vapore dominante (con contenuto energetico molto elevato).

I fluidi (acqua e/o vapore) possono raggiungere spontaneamente la superficie dando luogo a manifestazioni geotermiche naturali come le sorgenti calde, i geysers e le fumarole, oppure rimanere confinati dentro il serbatoio per effetto di una copertura dei terreni impermeabili e possono essere reperibili solamente in seguito alla realizzazione di pozzi.

Questi sistemi sono comunemente detti “*ad alta entalpia*” e sono sfruttati per la produzione di energia elettrica: il primo sfruttamento del calore terrestre per produrre elettricità ebbe luogo a Larderello in Toscana ad opera del Principe Piero Ginori Conti negli anni 1904-05, mentre il primo impianto geotermoelettrico commerciale (250 kW_e) fu installato nel 1913.

L'altra tipologia di sistemi è quella a “*bassa entalpia*”, attraverso la quale qualsiasi edificio, in qualsiasi luogo della terra, può riscaldarsi e raffrescarsi senza l'uso della classica caldaia d'inverno e del gruppo frigo d'estate.

Il terreno, come abbiamo già accennato, a causa della sua moderata inerzia termica, già a basse profondità risente poco delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali al punto che la sua temperatura può essere considerata costante per tutto l'anno.

La macchina che permette di sfruttare questa fonte di calore pressoché infinita è la *pompa di calore*, dispositivo che, funzionando sulla base di un normale ciclo frigorifero (più comunemente a compressione con alimentazione elettrica), preleva il calore dalla sorgente a temperatura più bassa, il terreno, e lo trasferisce a quella più alta, che nel nostro caso è l'impianto di riscaldamento. Potendo invertire il ciclo, può essere naturalmente utilizzata per la climatizzazione estiva; in questo caso il terreno viene impiegato per raffreddare l'abitazione, avendo accumulato freddo nel corso dell'inverno (si realizza al contempo una ricarica termica). Lo scambio di calore avviene mediante una serie di tubi in polietilene, che sono disposti nel terreno secondo diverse configurazioni impiantistiche (vedi figura 3); la scelta del tipo di disposizione da utilizzare è determinata sulla base delle condizioni geologiche presenti in sito e dello spazio disponibile, e deve tener conto anche delle condizioni di tipo edile e strutturale.

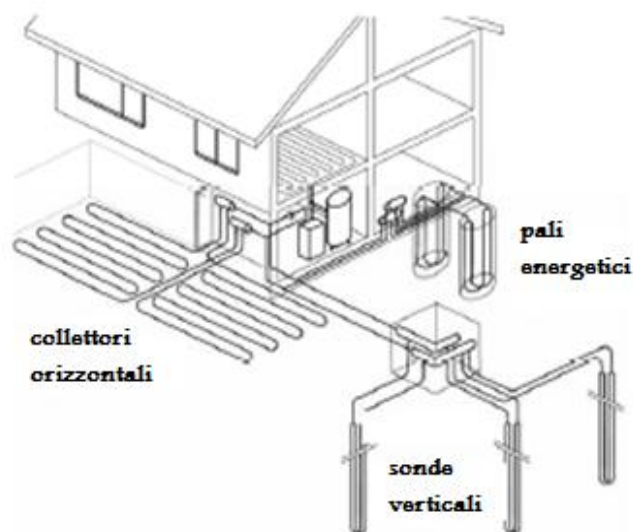


Figura 3. Possibili configurazioni impiantistiche degli scambiatori di calore.

Le soluzioni sono essenzialmente tre:

- Le *sonde geotermiche verticali*, scambiatori di calore verticali con lunghezze tipiche da 50 a oltre 350 m.,
- Le *serpentine nel terreno*, scambiatori di calore posti orizzontalmente a 1-2 m. di profondità in terreni sciolti,
- I *pali energetici*, scambiatori di calore integrati negli elementi di fondazione di costruzioni palificate con profondità tipica di alcune decine di metri.

Le tipologie appena citate si interfacciano attraverso *circuiti idraulici chiusi*, all'interno dei quali circola un fluido termovettore che può essere acqua o una miscela di acqua e glicole.

Esiste tuttavia anche una soluzione a *circuito aperto* che consiste nello sfruttamento del calore della falda freatica.

Dopo aver estratto l'acqua sotterranea attraverso l'emungimento di un pozzo, una pompa di calore trattiene la sua energia e fornisce una temperatura sufficiente per il riscaldamento delle abitazioni. Una volta raffreddata, l'acqua viene reimpressa in falda mediante un secondo pozzo o, in alternativa, iniettata nella rete comunale d'approvvigionamento idrico.

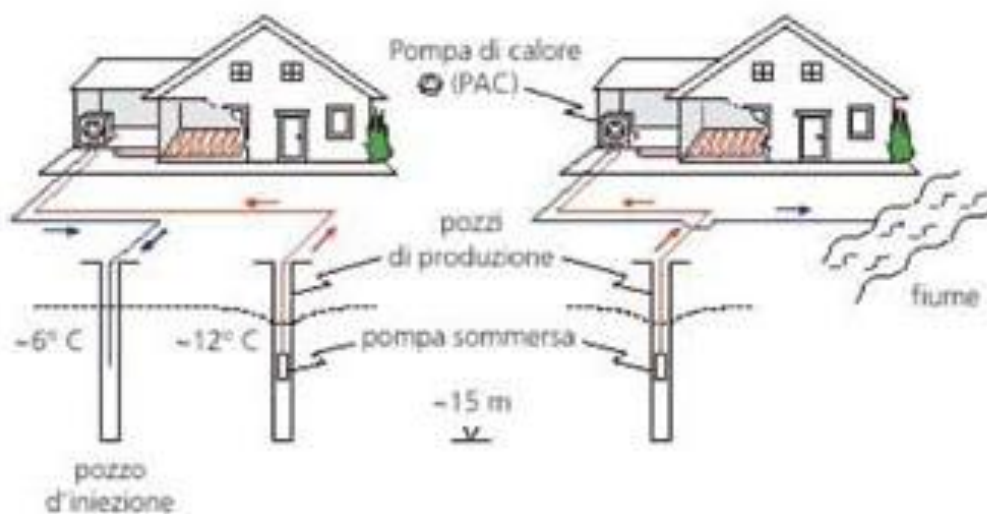


Figura 4. Soluzioni a circuito aperto.

Pur presentando indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, può rappresentare un rischio potenziale per le falde idriche sotterranee durante

la terebrazione dei pozzi, qualora vengano compromesse le barriere idrauliche naturali che separano le falde profonde da quelle superficiali e vengano portate in contatto tra loro acque di diversa qualità, provocando la miscelazione idrochimica e talora la contaminazione delle prime.

I rischi non sono legati solo alla fase realizzativa, ma anche a quella gestionale e riguardano:

- possibili contaminazioni chimiche delle acque reimmesse in falda dovute ad eventuali perdite del circuito idraulico,
- modificazioni quali-quantitative delle specie chimiche disciolte nelle acque sotterranee indotte dalla variazione termica,
- modificazioni del contenuto microbiologico delle acque sotterranee,
- alterazioni nella dinamica delle falde, specie a fronte di prelievi e scarichi di rilevante entità o in numero elevato.

E' opportuno ricordare che le acque sotterranee sono una risorsa preziosa per soddisfare bisogni essenziali, tra i quali, in primis, quello idropotabile.

L'inquinamento termico può comportare un cambiamento del chimismo delle acque sotterranee poiché con il variare della temperatura varia la capacità di dissoluzione dell'acqua dei minerali che attraversa; i più sensibili sono anche i più solubili come il ferro, il calcio e gli idrogenocarbonati che potrebbero modificarne la composizione chimica.

1.3 Situazione geopolitica

L'obiettivo europeo per il 2020 di coprire il 20% del fabbisogno energetico attraverso l'utilizzo di energie rinnovabili, può essere raggiunto solamente con un significativo aumento della loro capacità nel settore della climatizzazione degli ambienti.

La distribuzione di queste tecnologie per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici come solare termico, biomassa e geotermia devono però andare di pari passo con un sostanziale miglioramento nell'efficienza del consumo di energia sia per usi residenziali che nei processi industriali.

A tal proposito, nuovi regolamenti europei stanno rendendo più severi i requisiti di rendimento energetico negli edifici di nuova costruzione (direttiva 11-09-08), compreso l'utilizzo obbligatorio di fonti rinnovabili che saranno integrate nei processi di costruzione già dalle prime fasi di progettazione. In questo modo è presumibile che la loro richiesta sul mercato subirà una crescita sempre maggiore nel prossimo futuro.

L'obiettivo finale è quello di sviluppare il concetto di "Net Zero Energy Building", ovvero edifici che attraverso l'uso di tecnologie avanzate per il recupero di RES (Renewable Energy Source) producono una quantità di energia primaria che li rende autosufficienti e svincolabili dal sistema energetico della rete locale.

Per quanto riguarda l'uso efficiente delle risorse energetiche naturali, i sistemi di stoccaggio dell'energia termica giocano un ruolo molto importante nella sostituzione di tecnologie convenzionali per la climatizzazione degli ambienti con risorse rinnovabili o pompe di calore alimentate con quest'ultime.

Il palo energetico non è altro che un dispositivo che utilizza la capacità termica del terreno intorno a sé come serbatoio di calore o di freddo

(sistema che può essere usato per “UTES”: per lo stoccaggio di energia termica nel terreno); per questo motivo rappresenta una grande innovazione tecnologica per caricare e scaricare i cosiddetti accumuli termici stagionali per un gran numero di immobili in tutto il mondo.

Non vi è alcuna limitazione geografica per il loro impiego perché, come abbiamo già accennato, la risorsa termica è disponibile dappertutto a qualche decina di metri di profondità; inoltre, accoppiando una pompa di calore al terreno (sistema GSHP: Ground Source Heat Pump), si rende possibile lo sfruttamento di questa quantità di calore stoccato.

Tra i differenti settori geotermici, l'industria delle pompe di calore geotermiche è attualmente il più dinamico.

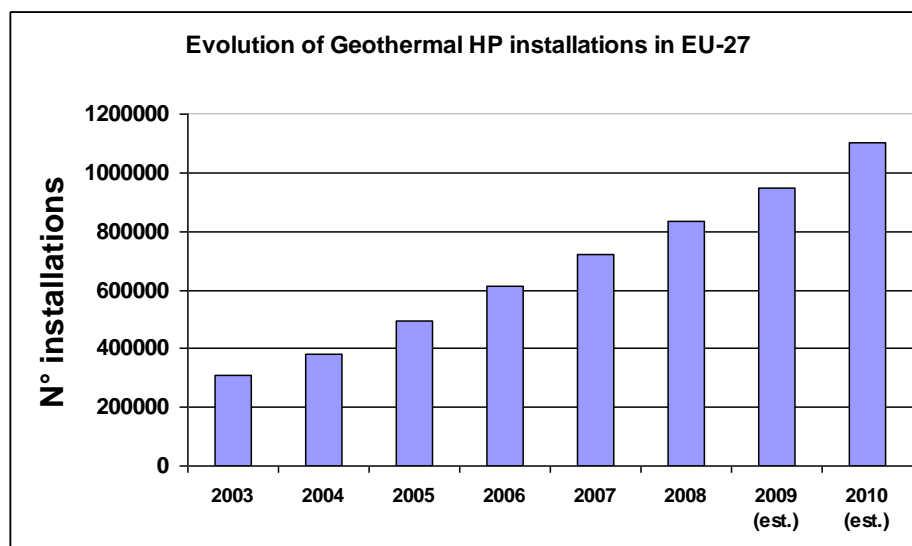


Figura 5. Evoluzione delle installazioni di pompe di calore geotermiche in Europa.

La genesi della loro diffusione risale agli anni '50 negli Stati Uniti e in Canada, successivamente sono arrivate in Europa e si sono sviluppate nei vari paesi in modo più o meno marcato a seconda delle leggi, delle politiche e della cultura ambientale locale; in particolare hanno riscosso un grande successo in Svezia e Svizzera.

Il successo scandinavo è da imputare sia a motivi economici (basso costo dell'energia), sia a motivi più propriamente tecnici (proprietà termiche favorevoli del terreno); si stima che in questo paese siano attualmente

installati circa 60000 sistemi GSHP con una capacità produttiva di 350 MW termici.

E' tuttavia la Svizzera il paese più virtuoso con la più elevata concentrazione di pompe di calore in rapporto alla popolazione (1 GSHP ogni 4 case mono o bifamiliari), grazie soprattutto ad una legislazione che tende a limitare le emissioni di CO₂.

La maggior parte di queste pompe di calore è accoppiata a sistemi geotermici verticali (SGV), si stima che in questo Paese siano installati circa 25000 impianti con sistema SGV, con una capacità produttiva superiore a 300 MW termici.

Tuttavia esistono vari esempi di sistemi GSHP accoppiati a pali energetici; sono in funzione una trentina di installazioni di geostrutture energetiche, quasi tutte situate nel nord-est del Paese, in ragione della vicinanza d'impres specializzate in questo settore, particolarmente in Austria.

Tanto per citare qualche realizzazione: l'aeroporto "Dock Midfield" di Zurigo (figura 6), un edificio di 500 m di lunghezza per 30 m di larghezza che poggia su 440 pali di fondazione gettati in loco, del diametro di 0.9-1.5 m, ancorati in uno strato morenico ad una profondità di 30 m circa.



Figura 6. Panoramica dell'aeroporto Dock Midfield di Zurigo

Un totale di 315 pali sono equipaggiati a pali energetici per contribuire al riscaldamento e al raffreddamento dell'edificio, che è in funzione dall'autunno del 2003. Circa il 75% dell'energia termica per la climatizzazione del terminal dell'aeroporto proviene dai pali energetici.

Il sistema è stato monitorato per una durata di due anni, al termine dei quali si è visto che il bilancio energetico e in particolare che i fabbisogni

energetici annuali per la climatizzazione sono risultati prossimi ai valori stabiliti durante la fase di progettazione; inoltre le prestazioni termiche del sistema sono apparse molto buone.

Questo fatto conferma la necessità e l'utilità di una progettazione dettagliata e curata di questo tipo di sistema e di una procedura di dimensionamento basata su studi dettagliati, i quali includono due test di risposta geotermica e delle simulazioni termiche dinamiche dell'edificio e del sistema con pali di fondazione energetici.

Un altro esempio che merita di essere menzionato è il centro scolastico di Fully nel Vallese, di cui è riportata una diapositiva nella figura 7 di fianco.



Figura 7. Visuale dell'edificio scolastico di Fully nel Vallese costruita secondo lo standard Minergie.

La volontà di costruire un edificio di tipo Minergie (marchio registrato Svizzero che

contraddistingue le costruzioni nuove e quelle ristrutturate che hanno un consumo energetico molto basso: lo standard richiede che il consumo generale di energia non superi il 75 % di quello di un edificio medio e che l'impiego di fonti fossili non superi il 50 %) e la natura del terreno, hanno indotto a fondare questo centro scolastico di venti aule su pali equipaggiati con scambiatori termici.

Questi pali sono stati scavati, centrifugati ed equipaggiati a sonde geotermiche con un riempimento di sabbia umida. Gli scambi termici con l'edificio sono minimi e la ricarica termica è assicurata dall'evacuazione di cariche interne nella stagione calda; ciò permette di rinfrescare l'edificio tramite un circuito idraulico integrato nelle solette. Associato ad un sistema di riscaldamento, questo dispositivo assicura rendimenti elevati alla pompa di calore.

Le principali caratteristiche del sistema a pali energetici impiegato in questo impianto sono riportate nella tabellina numero 2 di fianco.

Nelle vicine Austria e Germania invece, si contano più di 350 geostrutture energetiche, la cui potenza installata varia da qualche decina di kW per piccoli immobili, fino a 800 kW per grandi edifici industriali.

In Austria una stima dei dati più recenti mostra la presenza di 15000-

20000 unità di GSHP; si tratta per lo più di impianti diffusi con potenze medie intorno ai 15 kW termici anche se non mancano casi di successo come il centro convegni multifunzionale di Dombin dotato di pali energetici, che vanta un totale di 65 km di tubi predisposti per lo scambio termico i quali sono in grado di fornire 800 kW per il riscaldamento o il raffreddamento.

In Germania, in seguito alla seconda crisi del petrolio che portò ad un significativo incremento dei costi dell'energia, ci fu un boom nel settore delle pompe di calore geotermiche nei primi anni '80 con circa 22000 unità vendute.

Nel decennio successivo i prezzi dei combustibili fossili si livellarono e così questa nuova tecnologia subì un collasso netto (meno di 500 unità vendute nel 1990); per evitare un nuovo crollo nella domanda, l'associazione tedesca degli ingegneri VDI, sulla base di una iniziativa di un gruppo di scienziati, decise di sviluppare linee guida tecniche per l'utilizzo termico del sottosuolo.

Tipo di edificio	Minergie
Superficie di riferimento energetico	2635 m ²
Volume netto riscaldato	7018 m ³
Utilizzo dell'energia	Riscaldamento e Raffreddamento
Messa in funzione	Febbraio 2000
Fabbisogno di energia per il riscaldamento	92225 kWh/a
Fabbisogno di energia per il raffreddamento	50000 kWh/a
Numero di pali equipaggiati	41
Profondità media	23,2 m
Scambiatore nei pali	Tubo a doppia U
Portata per palo	310 l/h
Potenza specifica estratta dai pali	50 W/m
Energia specifica estratta annualmente	75 kWh/m
Potenza della pompa di calore al condensatore	56 kW
Coefficiente di lavoro annuo	3,7

Tabella 2. Principali caratteristiche del sistema impiegato nel centro scolastico di Fully nel Vallese.

Queste linee guida VDI 4640 sono generalmente riconosciute come standard di ingegneria ed hanno i seguenti obiettivi:

- descrivere gli sviluppi attuali e futuri dello stato dell'arte;
- rappresentare potenziali documenti di lavoro e un supporto alle decisioni;
- elaborare criteri di valutazione;
- promuovere lo scambio di esperienze e il trasferimento della tecnologia;
- ottenere un riconoscimento giuridico speciale per esempio attraverso l'adozione di leggi, decreti e regolamenti;
- compilare norme europee o internazionali essendo utilizzate come documenti di base.

Nella sezione 7.1 della seconda parte (“Ground source heat pump systems”) si tratta il tema dei pali di fondazione come scambiatori di calore (progetto, pali prefabbricati o di cemento gettati in-situ, connessioni dei pali).

La terza parte si occupa invece di UTES “Underground Thermal Energy Storage”; un tema che non ha ancora penetrato il mercato nello stesso modo delle pompe di calore geotermiche, ma che tuttavia risulta avere un elevato potenziale in termini di risparmio energetico e di uso efficiente dell'energia.

Tanto per citare qualche esempio, la città di Francoforte annovera diverse imponenti realizzazioni come la “Main Tower” (vedi figura 8) che consta di 112 pali energetici di 30 m di lunghezza e 1,5 m di diametro all'interno dei quali sono contenuti un totale di 80000 m di tubi scambiatori. Tale costruzione dispone sotto di essa di un



Figura 8. La Main Tower di Francoforte

volume termico di stoccaggio di 150000 m³ che le garantisce una potenza di 500 kW. Con la stessa tecnologia sono state realizzate la Torre Galileo e la Torre IG Metall (Mainforum).

Anche nel Regno Unito si contano numerosissime realizzazioni con sistemi di pali energetici accoppiati a pompa di calore, soprattutto a Londra; l'ampia diffusione di questa tecnologia è da attribuire alla stretta collaborazione tra la Cementation Skanska Ltd, una delle più grandi compagnie di costruzioni nel mondo, leader del mercato dei pali di fondazione sul territorio britannico e la Geothermal International Ltd, leader europeo nel campo degli impianti geotermici.

Nel 2001 hanno iniziato insieme ad utilizzare pali energetici su un progetto al Kerble College di Oxford e da allora vantano un vastissimo “know-how” in materia; i lavori messi a punto nella capitale sono molteplici come ad esempio la “Westminster Academy” costruzione strutturata su 260 pali energetici scavati con tecnica Rotary fino alla profondità di 15-20 m i quali forniscono una potenza di riscaldamento di 331 kW e di raffreddamento di 120 kW; oppure il “North Kent Police HQ”, edificio che rende disponibili le potenze di 830 kW per il riscaldamento e 1350 kW per il raffreddamento grazie ai suoi 280 pali lunghi 15 m e 80 pozzi di 100 m di profondità.

La realizzazione più prestigiosa però sorge accanto ad una delle più celebri cattedrali, la “St Paul’s Cathedral”; si tratta dell’ “One New Change”, un monumento moderno mozzafiato che ospita i più prestigiosi uffici di Londra.



Figura 9. Un particolare di un palo equipaggiato con tubi scambiatori dell' "One New Change".

Questa maestosa opera è fondata su 219 pali energetici e sfrutta anche dei pozzi a circuito aperto; tale sistema è in grado di garantire una potenza di 1638 kW per il riscaldamento e ben 1742 kW per il raffrescamento.



Figura 10. Visuale aerea dell'edificio completato, all'ombra della cattedrale.

Impianti GSHP sono diffusi, anche se con densità inferiori, in Olanda, Belgio, Francia e Polonia; in questi paesi però si sta diffondendo maggiormente la tecnologia alternativa dell'ATES (sistemi di stoccaggio dell'energia termica nell'acquifero), soprattutto in Olanda che ne è uno dei leader mondiali.

Oltre ai paesi europei, anche in Oriente paesi come Giappone e Cina si stanno muovendo molto nel settore geotermico, soprattutto nel campo dei pali energetici, spesso utilizzati per ricavare nel sottosuolo dei serbatoi termici di stoccaggio.

I pochi impianti realizzati in Italia sono perlopiù ubicati nella fascia alpina al confine con Austria e Svizzera, un mercato comunque di nicchia nemmeno lontanamente confrontabile con quello dei sopra citati paesi diventati casi di eccellenza a livello mondiale.

Il fatto che questa fonte di energia sia ancora poco conosciuta e sfruttata proprio in Italia, dove il sottosuolo è tra i più caldi d'Europa e gli impianti sono meno costosi rappresenta un paradosso.

Basti solamente pensare che al di sotto della città di Roma, tra i 30 e i 60 m di profondità e in alcuni punti anche a molto meno, si “nasconde” uno

strato di 10÷40 m di ghiaia satura la cui temperatura, intorno ai 18÷19°C, si mantiene costante per tutto l'anno.

La Geothermal International Italia, partner italiana dell'omonima società inglese citata precedentemente, utilizzando la tecnologia e l'esperienza che quest'ultima ha sviluppato realizzando centinaia di progetti in Europa, si è recentemente costituita per offrire sul mercato italiano impianti di riscaldamento e raffreddamento geotermici; è una delle poche società in Italia a proporre gli energy piles.

La loro prima realizzazione avverrà proprio nella città di Roma, sul progetto dell'architetto Renzo Piano. In sostituzione delle "Torri dell'Eur", ex-sede dell'Agenzia delle Entrate, sorgerà un nuovo edificio destinato ad ospitare uffici, negozi e spazi residenziali, che poggerà su 314 pali di fondazione equipaggiati con scambiatori di calore.

La GI Italia nel frattempo ha in agenda una serie di incontri con il Gruppo Trevi di Cesena, che rappresenta il partner tecnologico di riferimento nel campo delle opere ingegneristiche relative al sottosuolo, nella ricerca e sviluppo delle risorse idriche ed energetiche, per possibili collaborazioni future.

Un'altra azienda impegnata in questo campo sul nostro territorio è la tedesca Rehau, che si occupa principalmente della produzione di materiali polimerici (i tubi per collettore RAUGEO collect PE-Xa e PE-Xa plus sono particolarmente adatti per essere integrati nei pilastri energetici).

Gli esperti Rehau sono costantemente impegnati nello studio del risparmio energetico nell'edilizia e mettono a disposizione di enti esterni le proprie conoscenze tecniche supportandoli in tutte le fasi di progettazione, pianificazione ed esecuzione.

In Italia hanno partecipato ad alcune realizzazioni in Trentino Alto Adige e hanno collaborato su un progetto di pali energetici con l'Università di Padova, successivamente virato su un SGV.

L'azienda Energy Resource di Ancona detiene invece un brevetto internazionale sulle sonde elicoidali da poter integrare nei pali di fondazione; una configurazione alternativa alle più tradizionali sonde a doppio U, che garantisce l'ottimizzazione della geometria dello scambiatore (maggiore superficie disperdente e maggiore lunghezza di tubazione per ogni metro lineare di palo).

La diffusione di questi sistemi di climatizzazione nei Paesi europei citati in precedenza conferma sicuramente la maturità tecnica di queste tecnologie e la presenza di aziende che forniscono “chiavi in mano” le sonde geotermiche o gli impianti completi, costituisce una garanzia non solo sulla realizzabilità, ma soprattutto sull'affidabilità di questi impianti che rappresentano un'occasione importante per sfruttare l'energia in modo intelligente e consapevole.

2. INTRODUZIONE AL SISTEMA DI PALI ENERGETICI E POMPE DI CALORE GEOTERMICHE

2.1 Le Pompe di calore geotermiche: teoria

Il cuore dei sistemi GSHP (Ground Source Heat Pump) è rappresentato dalla pompa di calore geotermica, dispositivo che opera attraverso lo stesso principio del frigorifero e del condizionatore d'aria, ma con un ciclo inverso.

Tale macchina, attraverso uno speciale fluido frigorifero che circola in un circuito interno chiuso, permette di prelevare il calore da una sorgente fredda a bassa temperatura (il terreno) e rilasciarlo ad una temperatura più alta (l'impianto di riscaldamento, per esempio pannelli radianti adagiati nel massetto della pavimentazione).

Se il sistema è bivalente, invertendo il ciclo con una valvola, la pompa di calore può essere utilizzata anche per la climatizzazione estiva, con il terreno impiegato per raffreddare l'abitazione. Per la generalità dei casi, si può sostenere che in quest'ultima configurazione si ha convenienza economica, mentre tale convenienza si riduce notevolmente quando la pompa viene utilizzata per la sola produzione di acqua calda sanitaria o per il solo riscaldamento.

Il trasferimento di calore non avviene in modo spontaneo, ma richiede l'introduzione nel ciclo di una certa quantità di lavoro che per queste macchine coincide con l'energia elettrica assorbita dal compressore.

I sistemi pompa di calore-terreno GSHP sono molto convenienti dal punto di vista energetico, non solo per l'utente finale ma anche per il sistema energetico globale, in quanto con 1 KWh di energia elettrica si producono almeno 4 KWh di energia termica, quindi una quantità superiore rispetto a quella che si è consumata.

Inoltre, più piccola è la differenza di temperatura tra il sottosuolo e la casa, minore sarà l'energia necessaria al funzionamento della pompa di calore, quindi maggiore sarà il risparmio.

Lo schema riportato in figura 11 rappresenta il funzionamento della macchina; risulta palese come questa permetta di ottenere energia in modo efficiente: infatti per produrre il 100% dell'energia per il riscaldamento è necessario consumarne solo il 25%, mentre il restante 75% viene ricavato dal terreno.

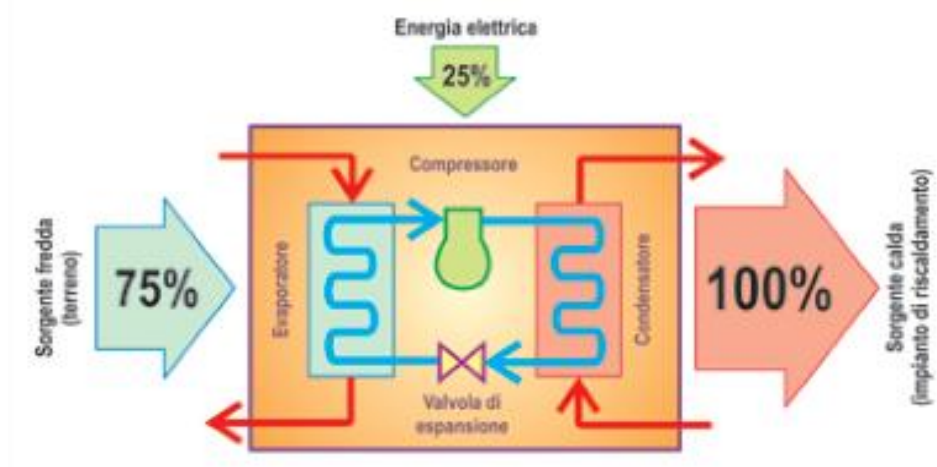


Figura 11. Schema impiantistico che mostra il funzionamento della pompa di calore.

La pompa di calore in sé è costituita da un circuito chiuso, percorso da uno speciale fluido termovettore (liquido refrigerante R407C, una miscela che non contiene cloro e quindi presenta un potenziale di effetto serra inferiore all'ormai bandito freon R22) che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato liquido o di vapore. I componenti principali all'interno di questo circuito chiuso sono:

- un *evaporatore*, ovvero uno scambiatore di calore a piastre in acciaio inox che, assorbendo il calore dalla sorgente fredda fa evaporare il fluido frigorifero;
- un *compressore*, che attraverso l'energia elettrica comprime il fluido allo stato di gas elevandone temperatura e pressione;

- un *condensatore*, ovvero un secondo scambiatore di calore la cui funzione è quella di riportare il fluido frigorifero da vapore a liquido cedendo il calore generato alla sorgente calda (impianto di riscaldamento);
- una *valvola di espansione*, che abbassa la pressione e la temperatura del fluido refrigerante chiudendo il ciclo.

L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo termodinamico della pompa di calore: utilizzando l'energia del compressore (elettrica), il fluido termovettore, nell'evaporatore, assorbe calore dalla fonte esterna a disposizione e, tramite il condensatore, lo cede all'ambiente da riscaldare.

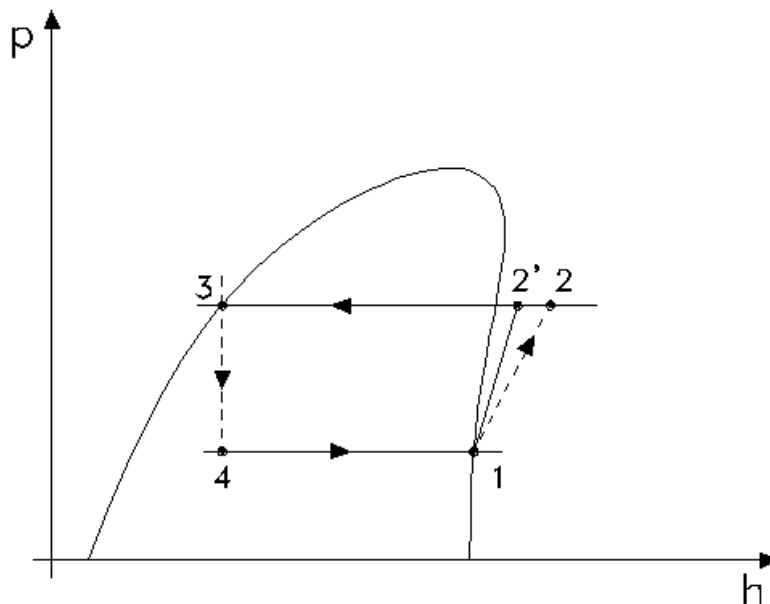


Figura 12. Ciclo ideale della pompa di calore a compressione sul diagramma pressione-entalpia.

Descrizione del diagramma P-h di figura 12:

Punto 3: uscita dal condensatore sottoforma di liquido saturo;

Tratto 3-4: passaggio attraverso l'organo di laminazione con diminuzione di pressione;

Tratto 4-1: passaggio attraverso l'evaporatore con ricezione di calore dall'esterno (aumento di entalpia);

Tratto 1-2: passaggio attraverso il compressore che aumenta la pressione per mezzo della ricezione di lavoro dall'esterno (aumento di entalpia);

Tratto 2-3: passaggio attraverso il condensatore con cessione di calore all'esterno (diminuzione di entalpia).

Supponendo le perdite di calore molto piccole, un bilancio energetico della macchina può essere dato dalla relazione:

$$P_{el} + Q_e = Q_c$$

Dove:

P_{el} : Potenza elettrica usata dalla macchina (kW);

Q_e : Quantità di calore estratta dall'evaporatore (kW);

Q_c : Quantità di calore rilasciata dal condensatore (kW);

Il rendimento di una pompa di calore è espresso dal “Coefficiente di Prestazione” COP, definito come rapporto tra il calore fornito e l'energia elettrica assorbita.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{el}}$$

Questo parametro è influenzato in modo significativo dalle temperature di esercizio o, più precisamente, dalla differenza di temperatura tra la sorgente calda e quella fredda; quando questa differenza è piccola, allora il COP risulta elevato, il che significa minor energia necessaria alla pompa di calore e quindi maggior risparmio.

Si può calcolare con l'aiuto dell'efficienza di Carnot:

$$COP = \eta_{tech} * \frac{T_c}{T_c - T_e}$$

Dove:

T_c e T_e : livelli di temperatura del fluido termovettore rispettivamente del condensatore e dell'evaporatore;

η_{tech} : efficienza tecnica; che tiene conto dei processi irreversibili e delle perdite del ciclo di Carnot. Può essere determinata dal diagramma mostrato in figura 13:

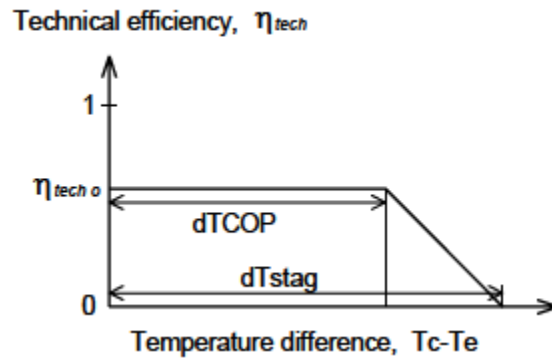


Figura 13. Diagramma dell'efficienza tecnica.

Nell'evaporatore, la temperatura media del fluido termovettore utilizzato per estrarre il calore dalla sorgente fredda (i pali) è superiore alla temperatura del fluido di lavoro. Nel condensatore si verifica invece il contrario e ciò porta ad una perdita di temperatura in entrambi i casi.

Queste perdite di temperatura sono calcolate utilizzando una semplice relazione che modella uno scambio di calore:

$$Q_c = UA_c * (T_c - T_{cf})$$

$$Q_e = UA_e * (T_{ef} - T_e)$$

Dove:

Q_c : tasso di energia termica fornita dal condensatore (kW);

UA_c : coefficiente di scambio termico globale del condensatore (scambiatore di calore) (kW/K);

T_c : livello di temperatura del fluido di lavoro nel condensatore (°C);

T_{cf} : temperatura media del fluido termovettore, determinato come media della temperatura del fluido all'entrata e all'uscita del condensatore (°C);

Q_e : tasso di calore estratto dall'evaporatore (kW);

UA_e : coefficiente di scambio termico globale dell'evaporatore (scambiatore di calore) (kW/K);

T_e : livello di temperatura del fluido di lavoro nell' evaporatore ($^{\circ}\text{C}$);

T_{ef} : temperatura media del fluido termovettore, determinato come media della temperatura del fluido all'entrata e all'uscita dell' evaporatore ($^{\circ}\text{C}$).

Le dimensioni della pompa di calore e della macchina frigorifera sono fissate dalla loro rispettiva potenza elettrica di progettazione. Le condizioni di progetto determinano le loro rispettive potenze di riscaldamento e di raffreddamento, sotto fissati livelli di temperatura del fluido termovettore nel condensatore e nell' evaporatore.

Per comprendere e spiegare le potenzialità e l'elevata compatibilità ambientale che accompagnano un sistema geotermico a pompa di calore, potrebbe essere sufficiente citare quanto affermato dalla *Divisione per l'Energia Elettrica e le Energie Rinnovabili del Canada*:

“Non esiste sistema di riscaldamento e condizionamento in grado di ridurre le emissioni di gas serra ed il conseguente impatto sul riscaldamento globale così efficace come le pompe di calore geotermiche”.

Inoltre, come precedentemente accennato, il consumo di energia elettrica risulta molto basso (addirittura nullo se accoppiato ad un impianto fotovoltaico), i costi di gestione sono bassissimi e gli interventi di manutenzione limitati.

Inoltre nella finanziaria del 2008 sono stati introdotti degli incentivi che fino al 31/12/2010 permettono di ottenere una detrazione fiscale del 55% per la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con pompe di calore ad alta efficienza e con impianti geotermici a bassa entalpia.

Le pompe di calore geotermiche possono essere utilizzate anche per il raffrescamento passivo degli edifici sfruttando il principio del *"Natural Cooling"*. Poiché in estate le temperature all'interno degli ambienti sono superiori rispetto alle temperature del terreno o delle acque di falda, si

utilizzano queste sorgenti per ridurre la temperatura ambiente senza attivare il circuito compressore.

Il “Natural Cooling” si rivela così un metodo per raffreddare gli edifici particolarmente conveniente dal punto di vista energetico ed economico in quanto la poca energia consumata è quella che serve ad una pompa di circolazione per movimentare il fluido nel circuito degli scambiatori. Tale funzione può essere attivata nelle pompe di calore terra/acqua tramite pochi componenti aggiuntivi (scambiatore, valvola a tre vie e pompa di circolazione).

Alcune ditte offrono tutti questi componenti già assemblati in un box dotato di isolamento termico per prevenire la formazione di acqua di condensa, semplificando così le operazioni di montaggio e riducendo i costi di installazione. Il box è fornibile nelle versioni con o senza valvole miscelatrici. Nel caso di miscelatore integrato è garantito un funzionamento continuo senza oltrepassare il punto di rugiada ed evitare in questo modo la formazione di condensa che comprometterebbe l'utilizzo degli impianti radianti a pavimento.

2.2 Geoscambiatori nei pali di fondazione: i pali energetici

I pali di fondazione sono delle strutture in calcestruzzo armato che vengono impiegate quando la soluzione con fondazioni superficiali non è in grado di soddisfare le esigenze del problema geotecnico.

In particolare si ricorre a queste fondazioni profonde per:

- a) trasferire il carico a strati di terreno profondi più resistenti,
- b) trasferire il carico anche attraverso tensioni tangenziali d'attrito o d'aderenza lungo il fusto,
- c) resistere ad azioni di trazione,
- d) resistere ad azioni orizzontali,
- e) resistere in gruppo a carichi inclinati,
- f) assicurare la stabilità anche in caso di scalzamento degli strati superficiali,
- g) trasferire il carico al di sotto di un futuro piano di scavo,
- h) attraversare strati di terreno rigonfiante.

In figura 14 sono raffigurate le funzionalità appena citate di tali fondazioni.

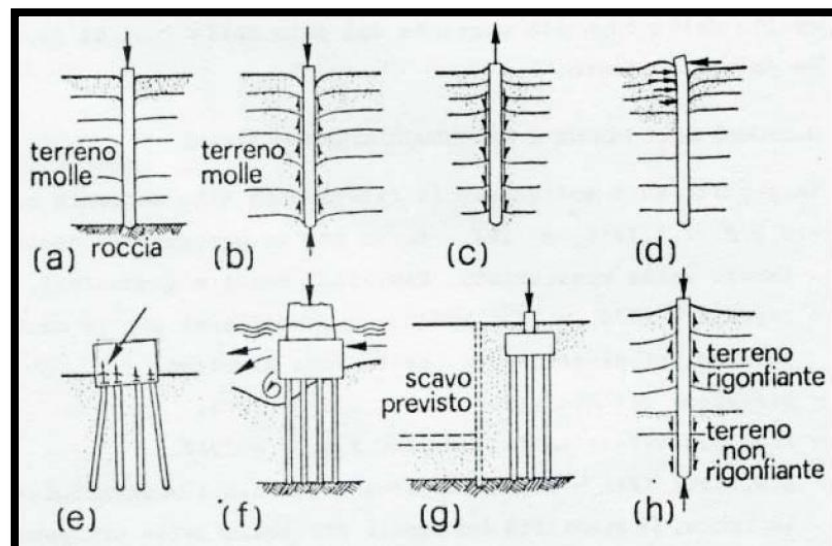


Figura 14. Situazioni in cui è opportuno utilizzare una fondazione su pali

Queste geostrutture dunque, oltre ad avere funzione di fondamento e sostentamento per edifici di tutte le dimensioni (laddove la portanza del

suolo in superficie è debole), possono essere equipaggiate con un sistema di tubi in polietilene nei quali un fluido termovettore può circolare in modo da scambiare calore o freddo con il terreno circostante. Da qui l'espressione "pilastri energetici".

A seconda del fabbisogno termico dell'edificio, tutti i pali necessari alle fondamenta di un edificio, o solamente una parte di essi, possono essere equipaggiati con un sistema energetico.

Il loro funzionamento si svolge secondo un ciclo annuale, con un'estrazione del calore dal terreno durante la stagione di riscaldamento (iniezione di freddo) ed un'estrazione di freddo durante il periodo di climatizzazione (iniezione del calore nel terreno).

I pali energetici in calcestruzzo armato sono abbastanza spessi, con un diametro che va da 0,4 a 1,5 m e una lunghezza che varia a seconda delle condizioni geologiche e può arrivare a circa 30 m; la loro spaziatura invece varia da 3 a 10 m per la maggior parte dei casi e non è necessariamente regolare.



Figura 15. Particolare del posizionamento dei tubi all'interno dell'armatura.

Rappresentano un esempio di integrazione tra edificio e impianto dal momento che i fasci di tubi in polietilene, solitamente U doppi o quadrupli scelti in funzione del diametro del palo, vengono introdotti nelle strutture di fondazione in costruzione. Queste tubazioni vengono normalmente posate a

meandro in senso longitudinale all'interno dell'armatura e serrate su quest'ultima tramite elementi di fissaggio o fascette (vedi figura 15); sono

poi immerse nel calcestruzzo per assicurare un buon contatto termico (la conduttività termica e la capacità di stoccaggio fanno del calcestruzzo un materiale da costruzione ideale per accumulatori di energia termica).

Per tutta la lunghezza del palo, è molto importante che i tubi siano distanziati omogeneamente tra di loro lungo la circonferenza per evitare reciproche interferenze.

Un fluido termovettore, spesso si tratta unicamente di acqua, ma è anche possibile utilizzare una miscela di acqua e glicole, circola in un circuito chiuso tra i pali e la pompa di calore/macchina frigorifera.

Gli elementi che connettono i pali ad un distributore posto in superficie sono dei tubi orizzontali, normalmente posti sotto la base di cemento dello stabile. A volte è possibile che queste connessioni attraversino la base stessa nel punto in cui è posto il distributore e nel caso in cui la platea di fondazione si trovi sotto il livello dell'acqua, è necessario assicurare che questo punto di attraversamento dei tubi risulti ermetico. La figura 16 che segue illustra le connessioni orizzontali tra i pali energetici e la pompa di calore.

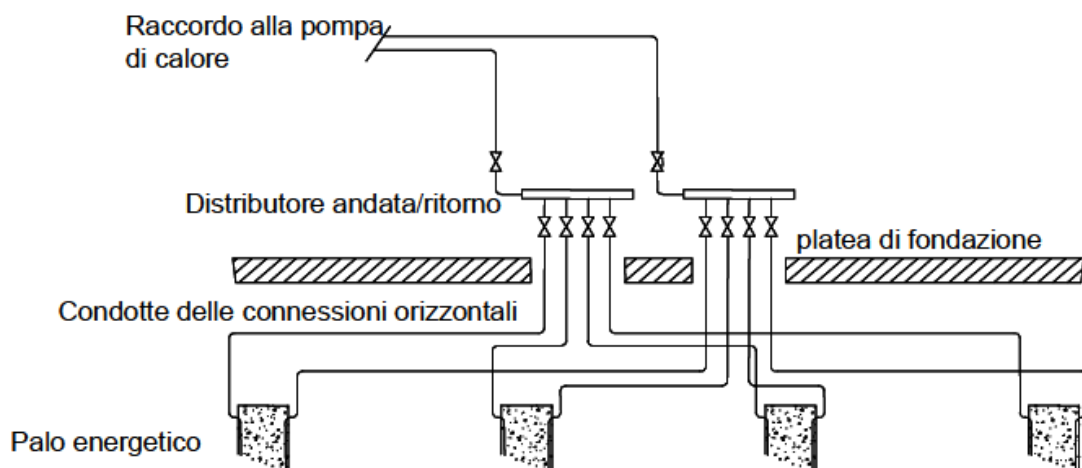


Figura 16. Illustrazioni delle connessioni orizzontali tra i pali energetici e la pompa di calore.

I pali possono anche essere connessi in serie (da 2 fino ad un massimo di 5); la scelta dipende dalla portata totale che li attraversa, la quale è normalmente determinata dalle caratteristiche tecniche della pompa di

calore, dal numero di pali, dal numero di tubi per palo, dalla lunghezza e diametro dei tubi, etc. Se la portata transitante in un palo non è in grado di garantire un sufficiente innalzamento del carico termico del fluido termovettore, allora è ragionevole pensare di adottare in fase di progettazione una configurazione dei pali in serie.

L'energia necessaria a fare circolare il fluido termovettore deve inoltre essere minore possibile, in ogni caso, la potenza elettrica della pompa di circolazione non dovrebbe mai oltrepassare il 10% della potenza nominale della pompa di calore.

Come già precedentemente accennato, i pali energetici sono normalmente accoppiati ad una pompa di calore la quale durante la stagione invernale estrae energia termica dal terreno e fornisce calore all'edificio, coprendo la totalità o parte del fabbisogno di calore; invertendo il ciclo è possibile utilizzarla anche d'estate per la climatizzazione. In questo modo il sistema è definito "bivalente".

Il calore viene estratto con una potenza relativamente bassa, con un conseguente piccolo abbassamento di temperatura ovvero con una piccola differenza di temperatura tra il fluido scambiatore di calore che circola attraverso i pali e il terreno. L'estrazione dell'energia e lo sfruttamento dei pali viene massimizzato grazie al fatto che il sistema di pali funziona per un lungo periodo di tempo, d'altro canto visto che il terreno si raffredda progressivamente, l'effetto a lungo termine può portare ad una situazione inaccettabile. A meno che non esista un flusso costante e sufficiente di acqua sotterranea che scorre attraverso la regione occupata dai pali, occorre necessariamente una ricarica termica del suolo. Questo flusso permette infatti una rigenerazione termica naturale del terreno, con la conseguenza che l'estrazione di calore durante l'inverno (per il riscaldamento) non dipende più dall'iniezione di calore durante l'estate (per il procedimento inverso); il sistema risulta ben adatto ad entrambe le modalità operative.

Tuttavia, dato che questa situazione non è sempre verificata, l'applicazione dei pali energetici è consigliabile per sistemi che combinano riscaldamento e raffreddamento. In tal caso la ricarica termica può essere assicurata dal fabbisogno di raffreddamento, con il volume di terreno occupato dai pali che funge da stoccaggio stagionale di calore.

La modalità operativa del raffrescamento estivo per mezzo di pali energetici può essere realizzato in due modi: per geocooling (freecooling) o con una macchina frigorifera. Per edifici efficacemente coibentati, è possibile attuare la soluzione geocooling, che si realizza connettendo il circuito dei pali all'impianto di distribuzione di freddo attraverso uno scambiatore tradizionale, senza alcun uso di macchina frigorifera. In questo caso l'unico fabbisogno energetico (elettrico) deriva dalle pompe di circolazione; occorre però che il fabbisogno di raffreddamento possa essere soddisfatto con una temperatura "alta", tipicamente 16-20 °C.

Nel caso in cui si debba rimuovere eventuale umidità dell'aria al fine di soddisfare i requisiti per la climatizzazione, bisogna utilizzare una macchina separata per il raffreddamento dal momento che per tale processo è necessaria una temperatura minore. Anche in questo caso un sistema "bivalente" può rappresentare il miglior compromesso. Nelle figure 17 e 18 sono mostrati i due concetti di base per impianti con pali energetici.

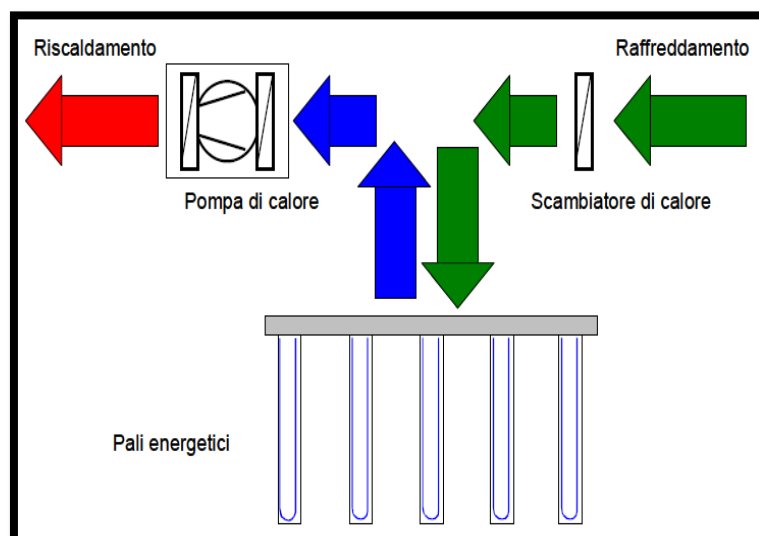


Figura 17. Rappresentazione schematica del concetto d'impianti con pali energetici e geocooling.

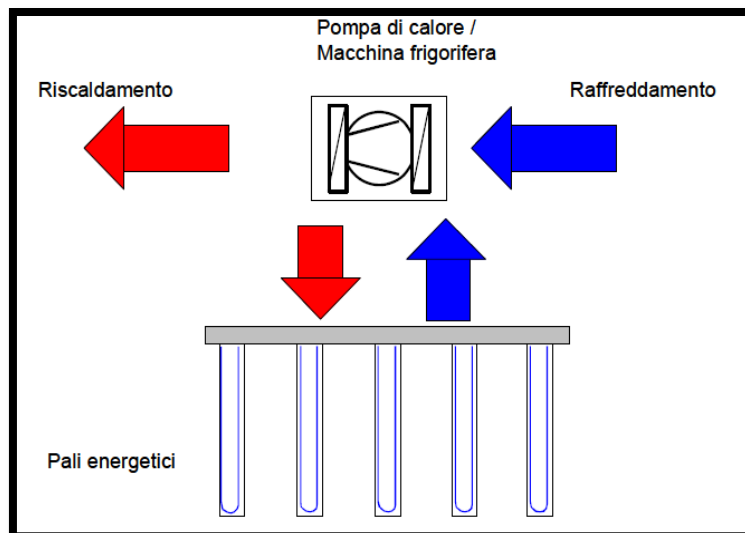


Figura 18. Rappresentazione schematica del concetto d'impianti con pali energetici e raffreddamento attivo.

E' anche possibile combinare i due modi di raffreddamento ed eseguire il geocooling in modo prioritario rispetto al raffreddamento attivo, ma questa soluzione non è raccomandabile dal momento che lo schema di principio e il controllo dell'impianto risultano più complicati, mentre il miglioramento delle prestazioni termiche sono spesso marginali.

Quando una macchina frigorifera si combina ai pali energetici, la temperatura del fluido nei pali cresce fino a raggiungere un livello che non è più compatibile con la modalità di raffreddamento tramite geocooling. Inoltre, se una parte dello scambiatore di calore viene usato per la macchina frigorifera, la perdita di temperatura tra il fluido termovettore e il terreno è troppo grande per una situazione di questo tipo. L'intera lunghezza dei pali deve essere accoppiata sia all'evaporatore della pompa di calore, sia al condensatore della macchina frigorifera oppure allo scambiatore di calore.

2.2.1 Vantaggi della tecnologia

Inserire le sonde geotermiche direttamente nelle fondamenta degli edifici in costruzione, rappresenta una soluzione affascinante che permette di risolvere parecchi problemi rispetto alle configurazioni con sonde verticali e con collettori orizzontali.

In primo luogo, rispetto ad una SGV, si sfrutta l'inevitabile scavo in profondità legato alla posa dei pali di fondazione per applicare anche le sonde e ridurre così i costi realizzativi dell'impianto geotermico, legati principalmente alle attività di trivellazione.

Una stima di massima dei costi (iva esclusa) per queste trivellazioni (sonde incluse, posate e provate in pressione) oscilla tra i 40 Euro al metro per terreni facili (compatti) a 65 Euro al metro o più per terreni difficili. I prezzi sono dell'ordine di grandezza di quelli della perforazione dei pozzi artesiani, con l'aggiunta del costo delle tubazioni.

Inoltre, in fase di progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti, questa soluzione permette di bypassare i regolamenti vigenti in loco circa la perforazione dei pozzi per l'installazione di sonde geotermiche e per l'utilizzo delle acque sotterranee (attualmente non esiste una norma nazionale specifica, ma esistono norme locali, regionali, provinciali ecc..).

Rispetto ai collettori orizzontali invece, non hanno bisogno di una grande superficie esterna dove adagiare le sonde. In un sistema orizzontale queste ultime sono posizionate a 1,5 m di profondità e risentono notevolmente delle variazioni climatiche esterne, sia giornaliere che stagionali; in inverno si corre spesso il rischio che si congelino.

Con i pali energetici, i tubi scambiatori non corrono questo rischio se il sistema è impiegato sia per il riscaldamento che per il raffreddamento (in estate si provvede a ricaricare termicamente il terreno per la successiva stagione invernale) e se la temperatura del fluido termovettore non scende al di sotto di 0°C per un periodo di tempo significativo.

Inoltre, dato che l'impiego del collettore orizzontale provoca inevitabili alterazioni del livello di temperatura all'interno del terreno, necessita di particolare attenzione nella posa dei tubi, che va assolutamente effettuata a debita distanza da alberi, piante sensibili e altre tubazioni. In ogni modo i collettori rappresentano la configurazione meno efficiente sia per potenza termica estraibile dal terreno che per resa di raffreddamento (circa il 20-30% del riscaldamento) ed è per questo motivo che vengono comunemente utilizzate per piccoli sistemi fino a 150 kW con disponibilità di terreno. Nella tabella 3 sottostante si riportano le principali caratteristiche dei vari sistemi esistenti:



	Sonde	Collettore	Sonde Elicoidali	Pali Energetici
Ingombro	Basso	Elevato	Medio	Basso
Posa	Ditta specializzata	Ditta Escavatrice	Ditta Escavatrice	Ditta Specializzata
Posa Posticipata	SI	SI	NO	NO
C.O.P.	4÷4,5	2,5÷3	3,5÷4	3,5÷4
Suolo poco conduttivo ($\lambda < 1,5 \text{ W/mK}$)	25 W/m	10 W/m ²	200-400W/Stk.	25 W/m
Suolo Medio ($\lambda = 1,5-3 \text{ W/mK}$)	50 W/m	20-30 W/m ²	400-600W/Stk.	50 W/m
Suolo molto conduttivo ($\lambda > 3,0 \text{ W/mK}$)	80 W/m	40 W/m ²	600-700W/Stk.	80 W/m
Temp. Fluido	0 fino 6°C	-3 fino 5°C	-3 fino 5°C	4 fino 10°C

Tabella 3. Principali caratteristiche dei vari sistemi, per un funzionamento di 1800 ore/anno secondo la norma VDI 4640 (fonte Rehau).

In generale, i sistemi per lo sfruttamento del calore terrestre appena descritti, garantendo nelle abitazioni delle condizioni ottimali dal punto di

vista del benessere termo igrometrico (temperature uniformi, minimi movimenti di aria e di polveri) e quindi della qualità della vita, rappresentano una soluzione impiantistica che offre una maggiore “efficienza energetica” rispetto agli impianti tradizionali con boiler.

“Maggiore efficienza” significa minor consumo di energia con conseguente minor impatto ambientale e minor spesa di funzionamento. Come già accennato la pompa di calore impiega 1kw di energia elettrica per produrne 4 di energia in forma di calore e questo consente un risparmio fino all'80% sulle spese di riscaldamento, per non parlare dell'ulteriore risparmio che si può ottenere sul condizionamento estivo se il sistema è bivalente.

Inoltre, e di questi tempi è bene sottolinearlo, è energia perfettamente pulita, dato che la pompa di calore non emette fumi e quindi nessun particolato o polvere sottile viene immessa nell'atmosfera.

Si riducono dunque i costi derivanti dallo sfruttamento dei combustibili fossili (fino a circa l'80%) e si producono di conseguenza notevoli vantaggi sul piano ambientale grazie alla riduzione delle emissioni di CO₂ (dal 45 al 100%) e di tutti gli altri inquinanti, frutto della combustione, che hanno un effetto dannoso sulla qualità dell'aria e sul global warming.

Se poi all'impianto geotermico venisse abbinato anche un impianto fotovoltaico con modalità di scambio sul posto (net metering) o meglio ancora in conto energia (che si somma allo scambio sul posto), allora sarebbe possibile coprire totalmente il fabbisogno energetico dell'edificio in maniera autonoma e pulita.

Tra i tanti aspetti positivi possiamo anche citare l'eliminazione dell'impatto architettonico ed acustico degli impianti di condizionamento, dato che le geosonde sono inserite nei pali (nel terreno) quindi “invisibili” e prive di emissioni acustiche, mentre le apparecchiature a pompa di calore, già intrinsecamente silenziose (rumore paragonabile all'udito a quello di un grosso frigorifero), vengono installate in locali tecnici interni all'edificio.

La geotermia può essere senza dubbio considerata la soluzione impiantistica attuale che riserva meno svantaggi rispetto alle altre sul piano della funzionalità, così come sui piani economico e ambientale. Si deve però tener presente che il progettista degli impianti geotermici deve avere una formazione specifica e deve essere supportato da sufficiente esperienza per eseguire un dimensionamento adeguato di tutte le parti che compongono l'impianto, al fine di garantirne il corretto funzionamento e al fine di non vanificare i vantaggi propri di questa tecnologia. Affidandosi, infatti, a progettisti non adeguatamente preparati e/o senza esperienza si corre il rischio di acquistare un impianto con problemi di funzionamento o, come spesso accade, con spese di esercizio elevate a causa di una bassa efficienza. Competenza e professionalità sono dunque alla base per un risultato ottimale

2.2.2 Effetto sulla statica dei pali

Le sollecitazioni termiche subite dai pali non devono in nessun caso condurre ad un deterioramento inaccettabile delle loro proprietà meccaniche. In altri termini, i pali devono conservare la loro capacità di sopportare con continuità il carico dello stabile.

In particolare il gelo dei pali deve essere evitato; per un sistema correttamente dimensionato e controllato, la temperatura del fluido che circola all'interno dei pali non dovrà mai scendere al di sotto di 0°C per un periodo di tempo significativo.

Quando si immettono delle cariche termiche, la temperatura dei pali aumenta, generando così delle deformazioni, che si trasformano in sollecitazioni se il palo non è libero di spostarsi. Uno studio sperimentale di Laloui et al. (1999) ha dimostrato che per un aumento di temperatura del palo di 15 K, la sollecitazione supplementare che si sviluppa non è trascurabile e deve quindi essere presa in considerazione al momento del suo dimensionamento statico.

Comunque, un tale aumento della temperatura del palo implica di poter riscaldare il fluido termovettore che circola nei pali ad una temperatura di 40-50°C, il che rappresenta di per sé una situazione estrema. Se un raffreddamento tramite geocooling è realizzato (temperatura del fluido di 16-20°C), l'effetto è molto più debole. Il fluido che circola nei pali deve così soddisfare dei vincoli di temperatura per non influenzare in maniera inaccettabile le loro proprietà meccaniche. Questi vincoli influenzano la dimensione della pompa di calore/macchina frigorifera e dunque il potenziale di riscaldamento e di raffreddamento offerto dai pali energetici. Se si preferisce la modalità geocooling all'uso di una macchina frigorifera, il potenziale di raffreddamento dipende dal livello massimo di temperatura che soddisfa il fabbisogno di raffreddamento.

3. LA SIMULAZIONE DI UN SISTEMA DI PALI ENERGETICI

3.1 Raccomandazioni per la realizzazione di impianti con pali energetici

Dato il carattere interdisciplinare, il concepimento di un impianto con pali energetici deve avvenire già nelle prime fasi di progettazione.

Un dimensionamento corretto richiede di definire con grande cura il contesto locale geologico, geotecnico e idrogeologico. Inoltre, i fabbisogni energetici, sia per il riscaldamento che per il raffreddamento, devono essere conosciuti in anticipo il più precisamente possibile (idealmente si dovrebbero conoscere le evoluzioni temporali delle potenze richieste e dei livelli di temperatura associati durante tutto l'anno).

A partire da questo punto, diverse varianti di sistemi possono essere valutate, dimensionate e paragonate sulla base del numero di pali di fondazione a disposizione, della loro disposizione e delle loro caratteristiche fisiche e termiche.

Questa procedura può essere effettuata più volte nell'arco del progetto, in funzione delle conoscenze attuali dei dati e della loro evoluzione tra la fase iniziale e la fase finale del progetto, in modo da affinare di volta in volta il concetto e il dimensionamento del sistema. Anche se il concetto finale deve essere stabilito tramite l'aiuto di uno strumento per la simulazione dinamica, questo non è necessariamente il caso per un pre-progetto, dove devono essere effettuate delle scelte tecnologiche.

Allo scopo di potere dimensionare un pre-progetto senza necessariamente ricorrere a degli strumenti di simulazioni dinamiche, una serie di raccomandazioni sono state stabilite sulla base di simulazioni numeriche applicate ad un sistema tipico. Le simulazioni sono state sviluppate e convalidate sulla base delle misure di impianti realizzati in Svizzera

(Fromentin et al., 1997).

Il diagramma riportato di seguito in figura 19 sintetizza i principali risultati numerici relativi ad un pre-dimensionamento di un impianto con pali energetici (le potenze e le energie indicate sono espresse per metro lineare di palo).

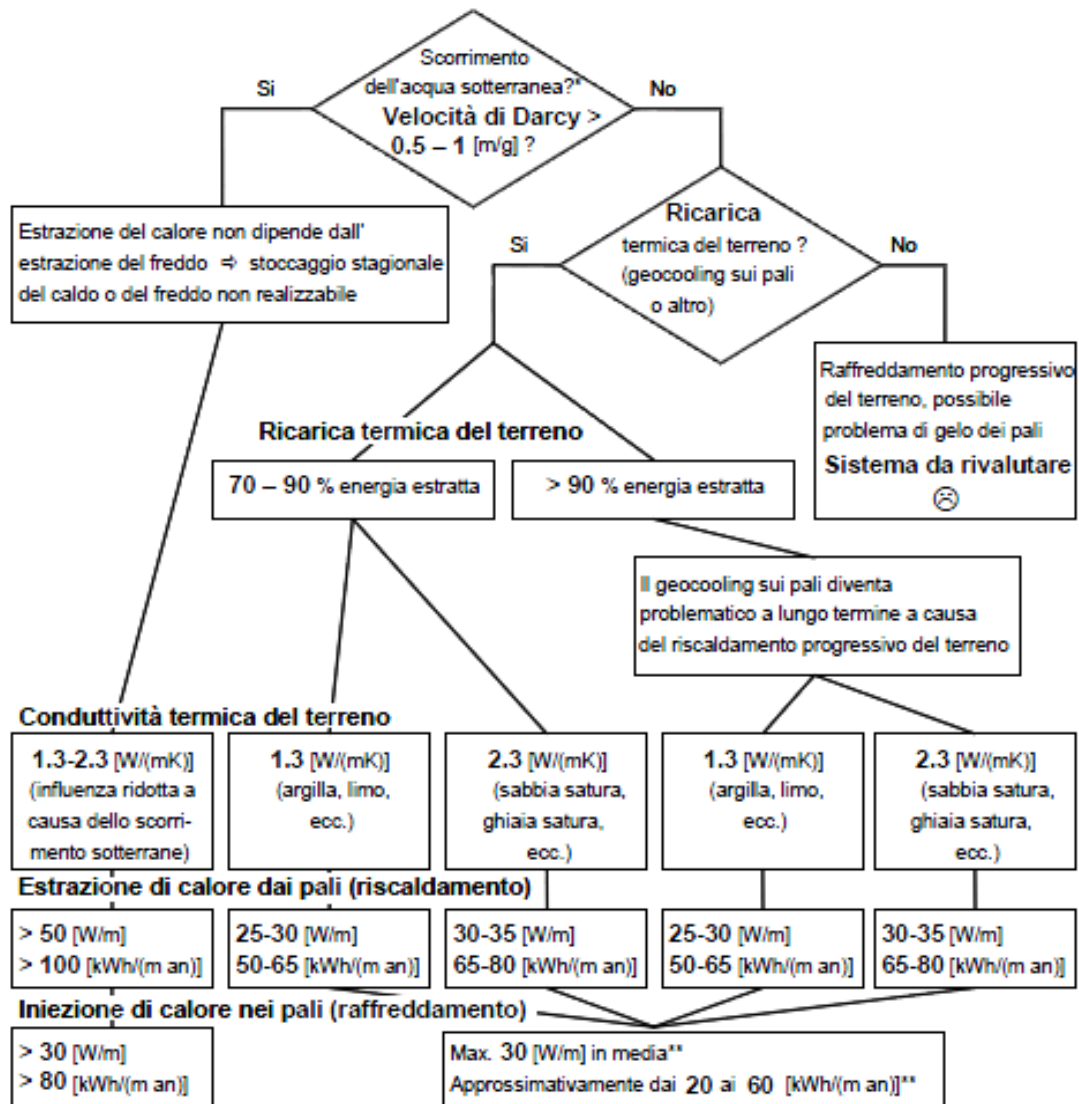


Figura 19. Sintesi dei principali risultati numerici relativi ad un pre-dimensionamento di un progetto in fase iniziale.

** Se la ricarica termica del terreno supera il 90% dell'energia prelevata, la temperature del terreno avrà la tendenza ad aumentare a lungo termine. Questo limiterà la ricarica termica nel caso essa sia ottenuta tramite un raffreddamento diretto sui pali.

Esso è valido per un impianto detto “di referenza”, definito tramite le seguenti caratteristiche principali:

- Sistema monovalente (nessun contributo di energia ausiliaria).
- Nessuna domanda di acqua calda sanitaria da soddisfare.
- Richiesta di energia di riscaldamento pari a 200 MWh/an (clima tipo Zurigo; superficie energetica di referenza di 3600 m², ossia una domanda di energia di riscaldamento di 55 kWh/m² an).
- Tre pompe di calore (PdC) accoppiate ai pali connesse in parallelo (33 kW termico ciascuna alle seguenti condizioni : 5/0°C entrata/uscita dell'evaporatore e 40/50°C entrata/uscita del condensatore; coefficiente di prestazione (COP) del 3,3).
- Temperatura della distribuzione del riscaldamento per una temperatura esterna dell'aria di -10°C : 50°C andata / 40°C ritorno.
- Temperatura minima del fluido termovettore tollerata nel circuito dei pali pari a 0°C.
- Un centinaio di pali di 20 m di lunghezza, di piccolo diametro (35 cm), muniti con un quadruplo U e separati da una distanza di circa 4 metri.
- Zona non riscaldata tra i locali riscaldati e i pali energetici (isolamento della soletta di fondazione dello stabile tramite uno strato isolante di 10 cm di spessore).
- Terreno: conduttività termica pari a 1,8 W/mK; capacità termica volumetrica di 2,4 MJ/m³ K, temperatura iniziale del terreno di 10°C.
- Nessun flusso di acqua sotterranea.

Lo schema di principio dell'impianto di riferimento è mostrato nella figura 20 che segue:

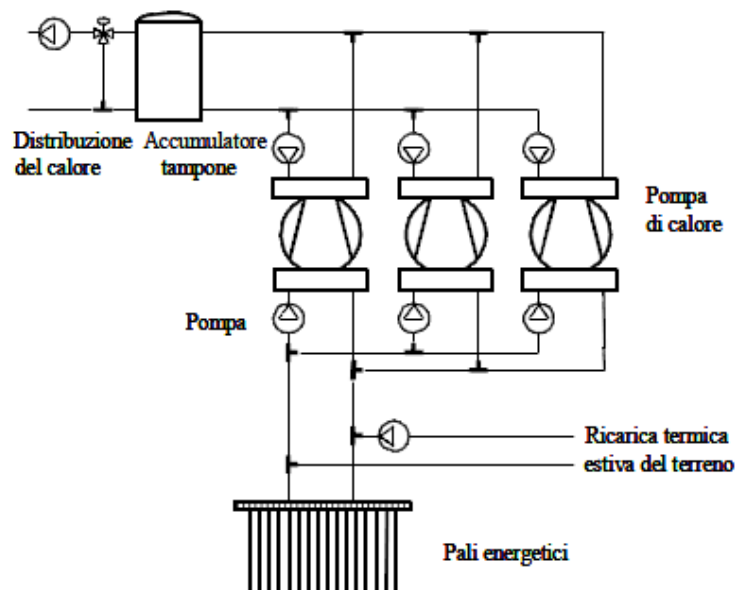


Figura 20. Schema di principio dell'impianto di riferimento utilizzato per stabilire le raccomandazioni.

Usando dei pali con un diametro maggiore (> 40 cm) la distanza tra di essi è anche generalmente più grande e di conseguenza le prestazioni fornite nel diagramma precedente possono essere maggiori (fino a un 50% per dei pali di 1 m di diametro).

I valori presentati corrispondono ad un sistema monovalente. Per un funzionamento di base con un'estrazione costante dai pali, la potenza per metro di palo sarà minore mentre la quantità di energia per metro di palo risulterà maggiore.

Se il flusso di acqua sotterranea è nullo, allora non sarà possibile soddisfare le richieste di temperatura senza dover effettuare una ricarica termica del terreno; essa dovrà essere di almeno 100-125 MWh/an, ossia dal 70 al 85% dell'energia estratta tramite i pali, la cui lunghezza attiva non dovrà essere inferiore ai 20 m.

I tubi di connessione orizzontale fra i pali contribuiscono ugualmente all'estrazione del calore: le simulazioni hanno mostrato che il 20% dell'energia estratta proviene dalle connessioni orizzontali. Questo evidenzia l'importanza di porsi la domanda sulla necessità di isolare o

meno la base dello stabile.

Un sovradimensionamento termico della lunghezza dei pali energetici permette di aumentare la temperatura del fluido termovettore nei pali. Tuttavia, il miglioramento del coefficiente di prestazione annuo della pompa di calore non permette di giustificare l'aumento dell'investimento relativo all'esecuzione dei pali energetici.

Inversamente, un sottodimensionamento termico porta a delle temperature più basse nei pali, situazione che può implicare un pericolo di gelo. Nel diagramma che sintetizza i principali risultati di un pre-dimensionamento dell'impianto, i valori indicati corrispondono a un dimensionamento ottimale, nel senso che la temperatura del fluido nei pali può a volte scendere a 0°C, senza però mai correre il rischio di ghiacciarli.

Questi risultati sono comunque da considerare con prudenza se implementati su altri impianti; in ogni modo permettono di soddisfare le necessità di pre-progettazione nella fase iniziale.

Per concludere, spesso appaiono dei problemi di compatibilità di funzionamento tra le diverse componenti del sistema di riscaldamento o di raffreddamento. Una comprensione del sistema nella sua globalità è necessaria per un'integrazione e una gestione ottimale delle differenti parti implicate e in particolare dei pali energetici nel concetto energetico dello stabile, tenuto conto dei bisogni energetici dell'utilizzatore.

Infine, risulta difficile generalizzare le regole descritte sopra; di conseguenza uno strumento per la simulazione dinamica del sistema con pali energetici risulta molto prezioso per rispondere alle domande che sorgono al momento del concepimento di un tale impianto.

3.2 Lo strumento di simulazione PILESIM2

L'energia termica estratta e iniettata annualmente attraverso i pali determina l'evoluzione della temperatura del terreno anno dopo anno, che a sua volta può influenzare le prestazioni termiche del sistema.

Una valutazione accurata del potenziale di riscaldamento e di raffreddamento offerto da un sistema di pali energetici richiede una simulazione dinamica del sistema, che tiene conto di prestazioni termiche sia a lungo che a breve termine. Richiede inoltre una buona conoscenza delle caratteristiche termiche del sistema, le condizioni locali del terreno e l'uso di un accurato strumento di simulazione.

Nel laboratorio dei sistemi energetici (LASSEN) all'istituto federale di tecnologia della Svizzera a Losanna (EPFL) sono stati sviluppati degli strumenti di simulazione per un sistema di pali energetici; la loro implementazione è stata portata avanti con l'aiuto di misurazioni provenienti dai sistemi esistenti per gli scopi di confronto e di validazione.

Nell'ambito del progetto di ricerca relativo alla simulazione di un sistema di pali energetici all'aeroporto di Zurigo (Pahud et al.), l'esperienza ottenuta nella simulazione di questo sistema fu usata per creare una prima versione di PILESIM, successivamente perfezionata nel 2007. Sebbene si basi su TRNSYS (Klein et al., 1998), programma adattato in seguito al formato TRNSED, PILESIM non ne richiede nessuna conoscenza preliminare.

L'uso di questo software garantisce la possibilità di valutare le performance del sistema termico, il potenziale utilizzo dei pali energetici ed una varietà di progetti e modelli, con facilità e calcoli relativamente veloci. E' inoltre possibile simulare terreni accoppiati a un sistema di pozzi scambiatori di calore.

Nella figura 21 che segue è illustrata una vista schematica di un sistema di pali energetici; la parte del sistema che viene simulata dal programma è quella delimitata dalla linea tratteggiata.

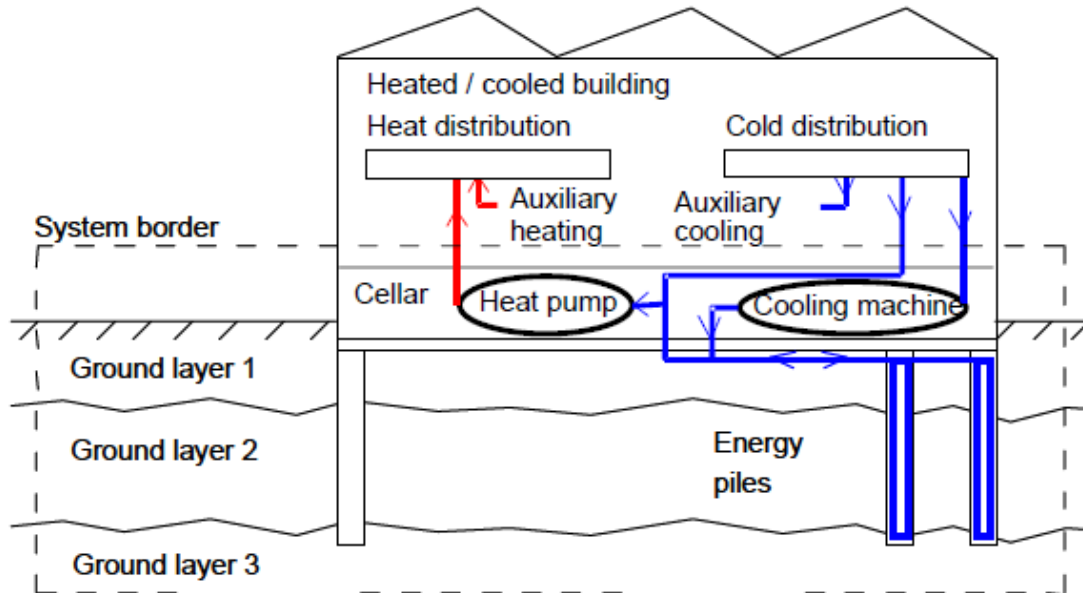


Figura 21. Vista schematica di un sistema di pali energetici; la parte tratteggiata delimita il confine del sistema simulato dal software PILESIM2.

Al PILESIM2 è stata data una grande flessibilità per fornire la simulazione di una larga varietà di schemi, nello specifico si possono simulare quattro differenti tipi di impianti:

1. Solo riscaldamento: una parte o la totalità della domanda di calore è coperta da una pompa di calore accoppiata ai pali, una ricarica termica del terreno può essere realizzata in estate;
2. Riscaldamento e raffreddamento: una parte o la totalità della domanda di calore è coperta da una pompa di calore accoppiata ai pali, l'obbligo di raffreddamento può essere parzialmente o totalmente coperto dal geocooling con i pali. Nessuna macchina frigo connessa ai pali è usata;
3. Riscaldamento e Raffreddamento con geocooling o macchina frigo: una frazione o la totalità della domanda di calore è sempre coperta da pompa di calore accoppiata a pali, l'obbligo di raffreddamento è

soddisfatto in via prioritaria dal geocooling con i pali. Se una maggior parte della richiesta di freddo può essere realizzata con una macchina frigo, allora quest'ultima viene usata e prende il sopravvento sul geocooling; i suoi carichi termici sono iniettati nel terreno attraverso i pali.

4. Riscaldamento e Raffreddamento con macchina frigo: una frazione o la totalità della domanda di calore è coperta da pompa di calore accoppiata a pali, mentre una frazione o la totalità dell'obbligo di raffreddamento è realizzato con una macchina frigo connessa ai pali. Il geocooling non è eseguito.

Un sistema di pali energetici è definito da cinque principali categorie di parametri (per ognuna delle quali il software chiede di specificare diverse informazioni), che sono:

1. **Caratteristiche del terreno**: in cui si definiscono le proprietà termiche degli strati di terreno (fino a 3) ovvero conduttività termica [$\lambda=W/mK$] e capacità termica volumetrica [$C_v=MJ/m^3K$], un possibile flusso regionale di acqua sotterranea in ogni strato e la temperatura iniziale del terreno indisturbato;
2. **I pali energetici**: fino a 6 differenti tipi di pali possono essere definiti, per ognuno dei quali occorre specificare diametro, numero, lunghezza attiva media e resistenze termiche; si richiede inoltre la spaziatura media tra di essi, il numero di pali in serie (se previsti) e alcuni dati sui tubi scambiatori di calore che contengono internamente, tipo la loro configurazione (coassiale o ad U), il numero e il diametro interno.
3. **L'interfaccia terreno-edificio**: questi parametri sono legati alla cantina (ambiente che separa le camere riscaldate dal terreno) e ai collettori di collegamento orizzontale; si richiedono in input la temperatura dell'aria nelle stanze, l'altezza della cantina, lo spessore

di isolante e/o di cemento tra il terreno e la cantina e la lunghezza dei tubi orizzontali che giacciono sotto tale strato.

4. **La pompa di calore e la macchina frigo:** parametri che definiscono le prestazioni termiche delle due macchine; come il COP (che può essere mantenuto costante o con possibilità di variare) e la potenza elettrica di progetto della pompa di calore, la temperatura d'ingresso del fluido nell'evaporatore e quella d'uscita dal condensatore; informazioni simili per la macchina frigo se presente, altrimenti i valori di efficienza e potenza elettrica di progetto vanno settati con il segno negativo (pompa di calore usata in modo reversibile).

5. **Le condizioni di carico per il riscaldamento e il raffreddamento:** Le condizioni di carico sono date in valori orari, i quali vengono letti da un file di testo; esse sono determinate dalle domande di caldo e freddo e dal loro livello di temperatura corrispondente. Un'evoluzione temporale delle condizioni orarie di carico è necessaria per un anno intero.

PILESIM2 può essere utilizzato in modi diversi, a seconda del grado di conoscenza di un progetto. Nella fase iniziale, una pre-simulazione può essere effettuata utilizzando un file predefinito per le condizioni di carico, con un coefficiente di performance per la pompa di calore costante e un rendimento per la macchina di raffreddamento anch'esso costante. Nelle fasi successive del progetto, sarà ovviamente maggiore la conoscenza dell'edificio e quindi anche i parametri del sistema di pali saranno conosciuti in modo più approfondito, dunque sarà possibile effettuare una simulazione più precisa.

Le energie trasferite tra le diverse componenti dei sistemi sono calcolate su base mensile o annua; un equilibrio globale di calore del sistema può essere effettuato di mese in mese o di anno in anno, mentre l'influenza degli

effetti a lungo termine sui risultati possono essere valutati per un massimo di 25 anni.

Una volta che le condizioni di carico sono scelte e tutti i parametri di sistema sono fissati, si può finalmente avviare la simulazione.

La temperatura del terreno indisturbato è scelta per le condizioni iniziali del terreno, la sua simulazione termica viene eseguita con un passo temporale di un'ora; ad ogni passo si determina la modalità operativa del sistema, a seconda del tipo di sistema scelto, della condizione di carico corrente e delle prestazioni termiche dei suoi componenti (pompa di calore, macchina frigorifera, pali energetici, ecc).

Tre modalità operative di base per il sistema di pali sono possibili, come mostrato di seguito in figura 22:

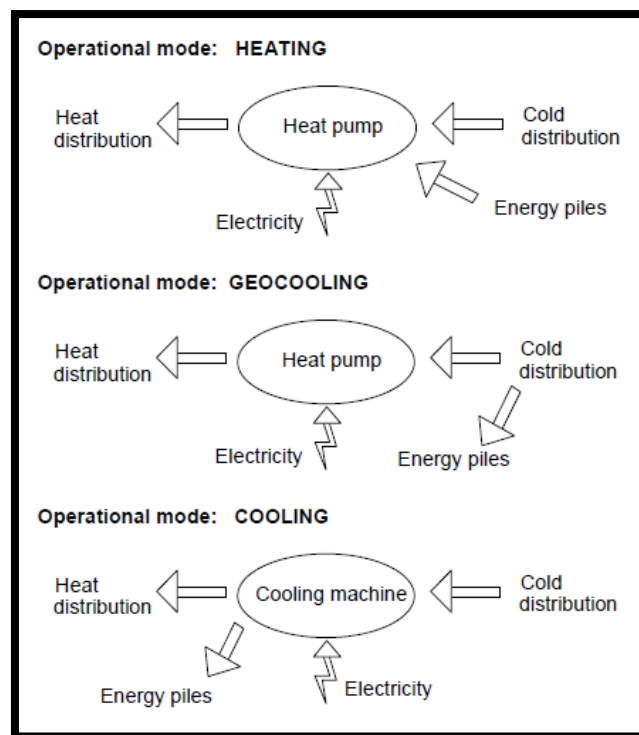


Figura 22. I tre schemi illustrano le tre modalità operative di base del sistema di pali. Le frecce indicano la direzione (positiva) dei flussi di energia.

Riscaldamento e raffreddamento possono essere soddisfatti simultaneamente con ciascuna di queste tre modalità operative di base.

Se non vi è alcun obbligo di raffreddamento, se il riscaldamento è necessario o viceversa, ci si riduce a tre semplici situazioni:

- riscaldamento con la pompa di calore collegata ai pali;
- geocooling con i pali collegati alla distribuzione del freddo;
- raffreddamento con la macchina frigorifera collegati ai pali.

La modalità operativa che soddisfa la maggior parte dei sistemi di riscaldamento e di raffreddamento risulta dunque scelta; la *procedura schematica* per determinarla è visibile nel diagramma di flusso sottostante (figura 23). Si può notare che la “modalità riposo” corrisponde ai periodi in cui il sistema non è utilizzato.

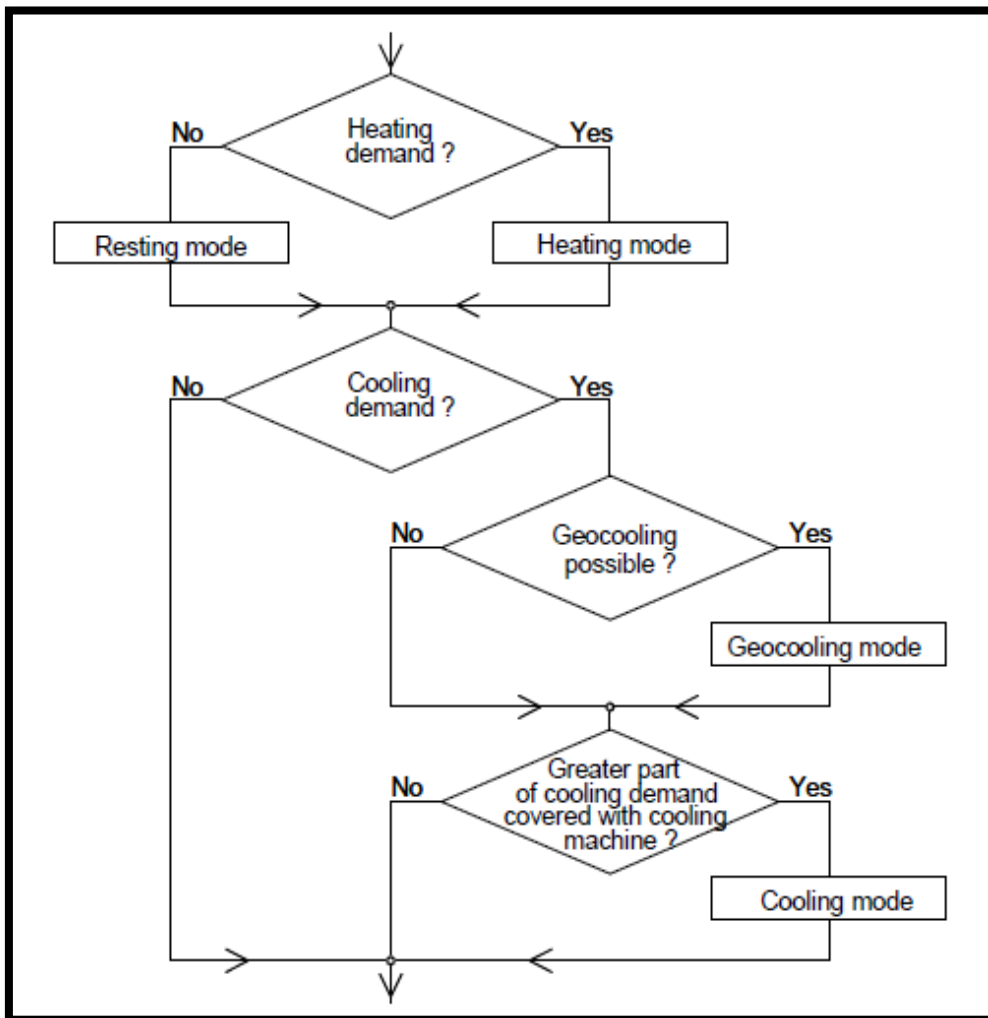


Figura 23. Presentazione schematica della procedura seguita per determinare la modalità operativa.

Il coefficiente di rendimento della pompa di calore e l'efficienza della macchina frigo possono dipendere dal livello di temperatura del fluido

termovettore nel condensatore e nell'evaporatore. Il coefficiente di prestazione determina la potenza di riscaldamento, con l'aiuto della potenza elettrica di progetto della pompa di calore, impostato su un valore costante. Quest'ultimo valore ne determina la dimensione, ed è fissato dall'utente; se il requisito di riscaldamento è più piccolo, la potenza può essere diminuita in modo che corrisponda agli oneri di riscaldamento. Di conseguenza, la potenza elettrica consumata dalla pompa di calore e il tasso di calore estratto presso l'evaporatore sono ricalcolati con l'aiuto del coefficiente di rendimento.

Il potere di riscaldamento della pompa di calore può anche essere ridotto dal vincolo della temperatura associato al fluido termovettore che circola nei pali, questo vincolo richiede che la temperatura del fluido nei pali non scenda mai sotto un determinato valore dato dall'utente, di norma fissato a 0°C. Se non è questo il caso, il tasso di calore estratto dalla pompa di calore viene diminuito fino a quando la temperatura del fluido soddisfa il criterio. Come risultato, la potenza di riscaldamento fornita dalla pompa di calore è ridotta; di conseguenza, una pompa di calore *sovradimensionata* non renderà molta più energia di riscaldamento all'anno rispetto ad una correttamente dimensionata.

Un vincolo di temperatura è anche dato per la temperatura massima consentita al fluido nel circuito di flusso del palo; lo stesso tipo di considerazioni valgono per la macchina di raffreddamento.

PILESIM2 presuppone un sistema di controllo ottimale dal momento che la migliore modalità operativa è selezionata, i poteri di riscaldamento e di raffreddamento sono adeguati alle esigenze termiche del sistema, se necessario, mentre i vincoli della temperatura sul fluido termovettore nei pali sono soddisfatti.

L'influenza dei frequenti avvii e arresti della pompa di calore e della macchina frigo non viene presa in considerazione, anche se un costante

valore di penalizzazione può essere specificato dall'utente sul coefficiente di prestazione ed efficienza.

Altre ipotesi sono legate alla specificità del modello di simulazione utilizzato per i pali energetici, le principali sono:

- Il numero di pali energetici è relativamente grande;
- la disposizione spaziale dei pali energetici è più o meno regolare;
- l'area di terreno occupata dai pali energetici ha una forma che è più o meno la forma di un cerchio o un quadrato;
- i pali energetici hanno circa la stessa lunghezza attiva. (La lunghezza attiva di un palo energetico è la lunghezza lungo la quale un trasferimento di calore avviene radialmente, cioè il calore viene trasferito dal palo al terreno).

Queste ipotesi implicano che la maggior parte dei pali energetici sono circondati da altri pali energetici. In altri termini, PILESIM2 non è adatto alla simulazione di un singolo palo o di più pali energetici disposti in linea. Se la forma della zona di terreno occupato dai pali energetici è ben lontana dall'essere un cerchio o un quadrato, o la disposizione dei pali è molto irregolare, la distanza media tra di essi, che è un parametro di input per PILESIM2, deve essere calibrata con un altro programma (ad esempio TRNSBM).

3.2.1 Parametri in uscita da PILESIM2

I dati in uscita da una simulazione effettuata con PILESIM2 sono riportati in 3 diversi files:

PILESIM.OPA

File che contiene alcuni dei principali parametri che sono calcolati e usati nella simulazione:

Numero di pali [-]; Lunghezza media dei pali [m]; Volume di terreno attribuito ai pali [m³]; Diametro medio dei pali [m]; Diametro effettivo dei pali [m]; Resistenza termica media dei pali [K/(W/m)]; Resistenza termica effettiva dei pali [K/(W/m)]; Tasso di flusso [kg/h]; Conduttività termica effettiva media [W/mK]; Capacità volumetrica media del terreno nella zona dei pali [kJ/m³K].

Di seguito si riporta un esempio del file .OPA ottenuto con i valori di default contenuti nella versione DEMO di PILESIM2:

TIME	PileNumber	AvePLength	GrndVolume	AvePilDiam	EffPilDiam
[h]	[-]	[m]	[m ³]	[m]	[m]
6552	306	26,78	663763	1,36	0,87
AveRbPile	EffRbPile	FlowRate	AveEfGrndL	AveGrndCap	
[K/(W/m)]	[K/(W/m)]	[kg/h]	[W/mK]	[kJ/m ³ K]	
0,060	0,024	102316	1,99	2201	

PILESIM.OUT

File che contiene quantità integrate o medie durante un lungo periodo di tempo (mese o anno), così come i valori minimi e massimi di alcune quantità scelte.

Alcune di queste quantità permettono di stabilire un bilancio complessivo del calore del sistema; come è possibile osservare dal diagramma riportato in figura 24.

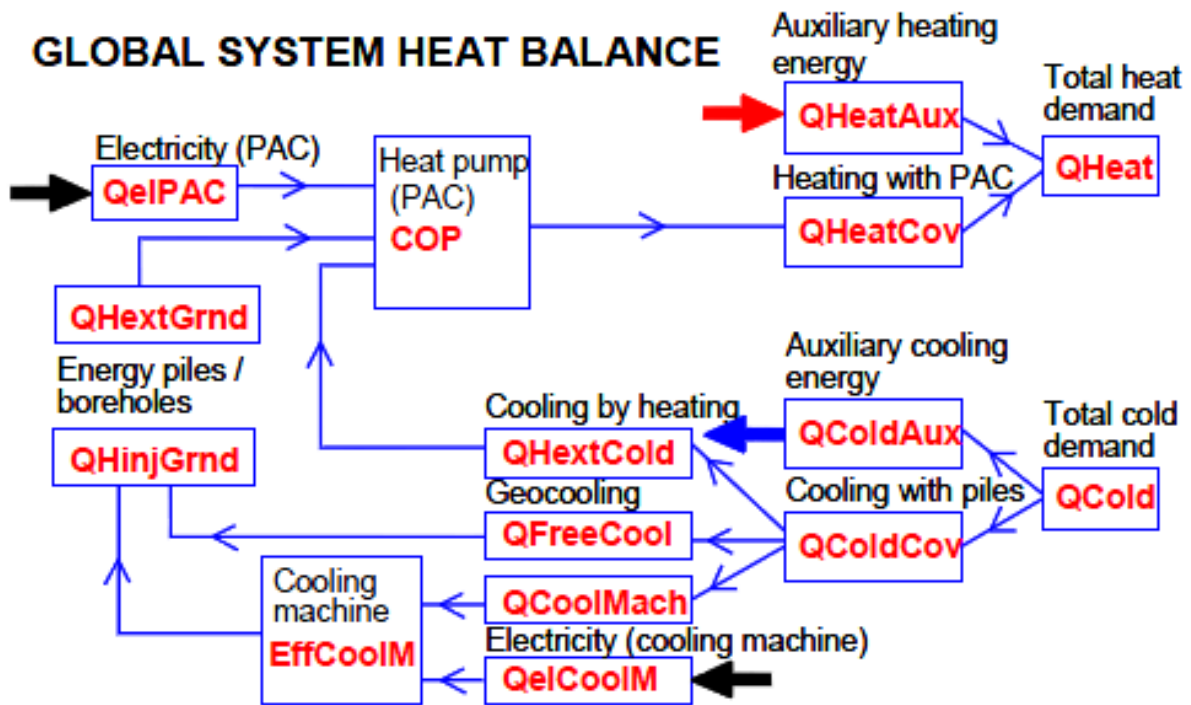


Figura 24. Diagramma dei flussi di energia del sistema.

Le etichette che compaiono nel diagramma sono:

Q_{elPAC} : energia elettrica usata dalla pompa di calore;

$Q_{HextGrnd}$: energia estratta dal terreno;

$Q_{HeatCov}$: energia per il riscaldamento coperta dalla pompa di calore;

COP: coefficiente di prestazione della pompa di calore ($COP = Q_{HeatCov} / Q_{elPAC}$);

Q_{Heat} : domanda totale di calore (di energia per il riscaldamento);

$Q_{HeatAux}$: energia ausiliaria per il riscaldamento ($Q_{HeatAux} = Q_{Heat} - Q_{HeatCov}$);

Q_{Cold} : domanda totale di energia per raffreddare;

$Q_{ColdAux}$: energia ausiliaria per il raffreddamento;

$Q_{ColdCov}$: energia per il raffreddamento coperta da geocooling e macchina frigo;

$Q_{HextCold}$: energia estratta dalla domanda di freddo dalla pompa di calore per scopi di riscaldamento;

QFreeCool: energia di raffreddamento coperta da pompa di calore accoppiata ai pali;

QCoolMach: energia estratta dalla domanda di freddo dalla macchina frigo ($QCoolMach=QColdCov-QFreeCool-QHextCold$);

QelCoolM: energia elettrica usata dalla macchina frigo;

EffCoolM: efficienza media della macchina frigo ($EffCoolM=QCoolMach/QelCoolM$);

QHinjGrnd: energia iniettata nel terreno.

PILESIM.PLT

File che contiene l'evoluzione temporale di alcune temperature e tassi di calore per l'ultimo anno del periodo di simulazione; ovvero:

- Temperatura del fluido in ingresso nel circuito di flusso del palo[°C];
- Temperatura del fluido in uscita dal circuito di flusso del palo[°C];
- Domanda di calore dell'edificio[kWh/h];
- Domanda di calore coperta dalla pompa di calore[kWh/h];
- Domanda di freddo dell'edificio[kWh/h];
- Domanda di freddo coperta dal geocooling/macchina frigo[kWh/h];

I valori orari di queste quantità sono scritti in questo file solo se il parametro in ingresso "Print Hourly Values For The Last Year" è settato su YES; è inoltre possibile graficare i loro andamenti in funzione del tempo dal menù "PLOT". Di seguito vengono riportati alcuni esempi di grafici che si possono ottenere:

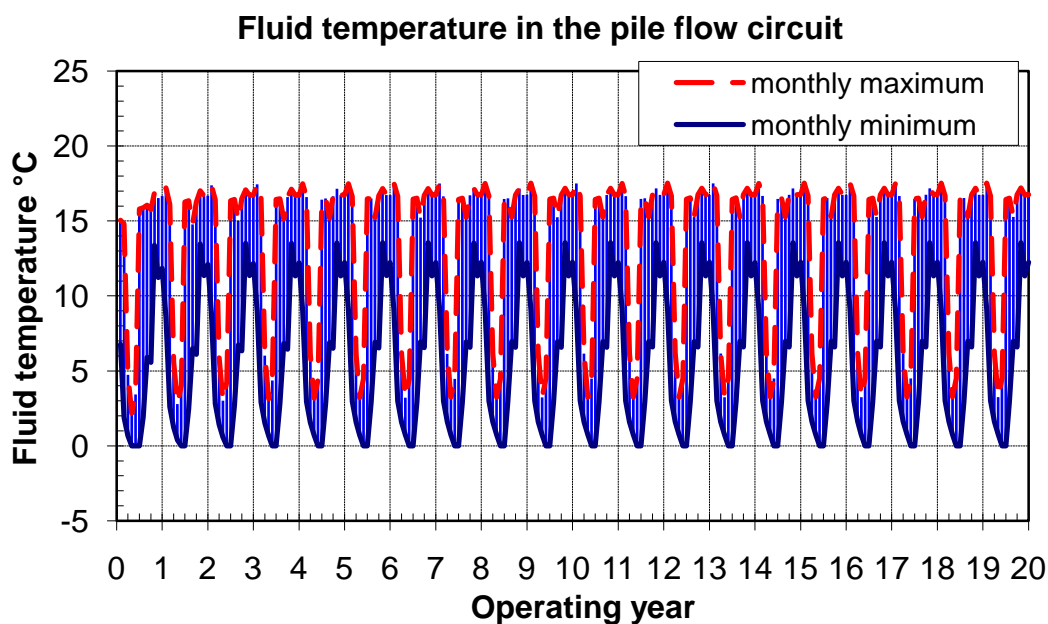


Figura 25. Andamento della temperatura del fluido termovettore nel circuito di flusso del palo durante i 20 anni operativi; si possono osservare i minimi e i massimi valori mensili di temperatura.

Nel grafico di figura 25 è possibile osservare i minimi e i massimi mensili dell'andamento della temperatura del fluido termovettore nel circuito di flusso del palo durante il ventennio operativo.

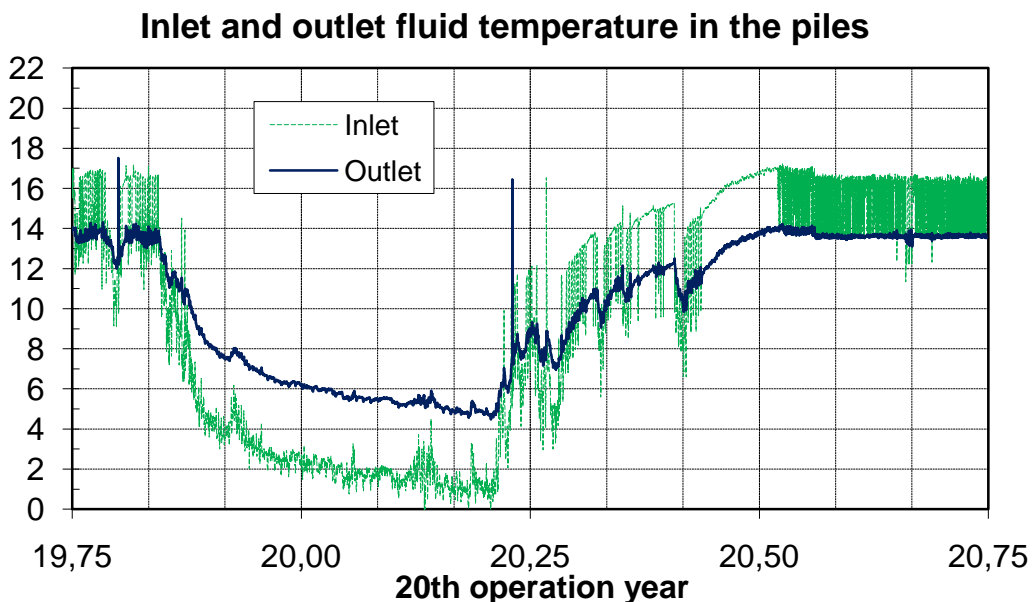


Figura 26. Andamento delle temperature in ingresso e in uscita nel circuito dei pali per i venti anni operativi; la scala temporale parte dal mese in cui inizia la simulazione (in questo caso Ottobre).

Dal grafico è facile notare come nella stagione invernale la temperatura d'uscita dalle sonde sia maggiore di quella che viene inviata dalla pompa di

calore; ciò significa che il fluido termovettore sta prelevando calore dal terreno. Si verifica il contrario nella stagione estiva.

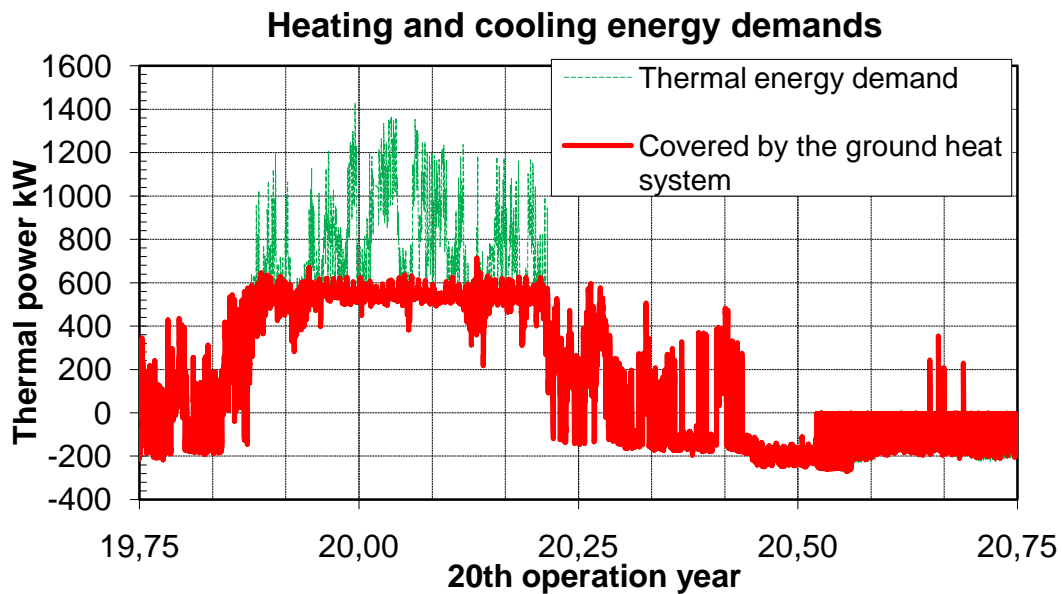


Figura 27. Andamento della domanda di energia termica dell'edificio e visualizzazione della potenza termica garantita dal terreno; la differenza rappresenta la potenza elettrica che dovrà essere fornita dalla pompa di calore.

Nel grafico di figura 27 invece si mostra l'andamento del fabbisogno energetico termico; la parte in rosso rappresenta la potenza termica garantita dal sistema di sonde nel terreno, mentre la porzione in verde indica la quantità che non riesce a soddisfare e che dunque dovrà essere sopperita con un aumento del consumo elettrico della pompa di calore.

Nel grafico di figura 28 si mostrano le quantità di potenza termica estratta ed iniettata nel terreno durante i venti anni di operatività del sistema.

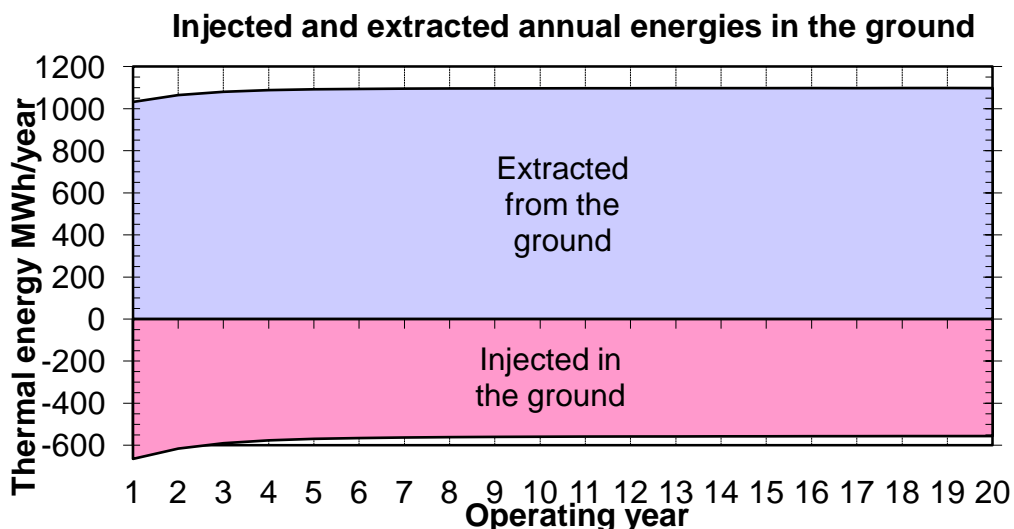


Figura 28. Quantità di potenza termica estratta ed iniettata nel terreno durante i venti anni operativi.

4. CARATTERIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI GEOSCAMBIO MEDIANTE PALI ENERGETICI

4.1 Principali parametri geologici e idrogeologici del terreno

La conoscenza del tipo di sottosuolo, interessato dalla costruzione da climatizzare, gioca un ruolo determinante per il dimensionamento corretto dell'impianto poiché non tutti i tipi di rocce e di terreni hanno la stessa conducibilità termica; per determinare il rendimento termico del terreno a disposizione è quindi necessario svolgere opportune indagini geologiche.

I valori dei parametri che devono essere conosciuti per poter definire al meglio il potenziale di utilizzazione del terreno sono:

- la **capacità termica volumetrica** C_v , in J/m^3K , che corrisponde alla quantità di calore (J) necessaria a far innalzare di 1 K la temperatura di un volume di $1 m^3$ di terreno.
- la **conduttività termica** λ , in W/mK , che corrisponde alla potenza termica trasmessa per conduzione attraverso un corpo (W/m^2) sottoposto ad un gradiente di temperatura di 1 K/m.
- la **permeabilità** k , in m/s, che permette di determinare la velocità di scorrimento dell'acqua sotterranea (velocità di Darcy) in m/s, nota la pendenza i o il gradiente di pressione orizzontale della falda

sotterranea ($v = k \times i$).

Di seguito è riportato nella tabella 4 il campo di variazione dei parametri appena citati, in funzione dei diversi litotipi che si possono incontrare nella posa dei pali di fondazione.

Tipo di suolo	Permeabilità K [m/s]	Conducibilità termica λ [W/m·K]		Capacità termica volumetrica C_v [MJ/m ³ ·K]	
		secco	saturo	secco	saturo
Argilla	$10^{-8} - 10^{-10}$	0.2 - 0.3	1.1 - 1.6	0.3 - 0.6	2.1 - 3.2
Limo	$10^{-5} - 10^{-8}$	0.2 - 0.3	1.2 - 2.5	0.6 - 1.0	2.1 - 2.4
Sabbia	$10^{-3} - 10^{-4}$	0.3 - 0.4	1.7 - 3.2	1.0 - 1.3	2.2 - 2.4
Ghiaia	$10^{-1} - 10^{-3}$	0.3 - 0.4	1.8 - 3.3	1.2 - 1.6	2.2 - 2.4

Tabella 4. Campo di variazione delle principali caratteristiche dei terreni frequentemente incontrati durante la messa in posa dei pali di fondazione

Dalla tabella si evince che i valori delle proprietà termiche λ e C_v risultano nettamente più alti in presenza di acqua nel terreno, in quanto essa migliora lo scambio termico tra sottosuolo e impianto, aumentando di conseguenza il rendimento di quest'ultimo.

La capacità di stoccaggio dell'energia termica a lungo termine (stagionale) di un insieme di pali energetici è anche direttamente dipendente dalla velocità di scorrimento della falda freatica; è infatti sufficiente una velocità di Darcy di $0,5 \div 1,0$ m/giorno in uno strato permeabile attraversato dai pali energetici per disperdere l'energia trasferita da questi ultimi ed impedirne lo stoccaggio stagionale.

Il flusso di calore che interessa un reservoir geotermico superficiale si stima attraverso l'equazione del calore semplificata di Fourier, in cui compaiono *parametri termici* come il tensore della conducibilità termica (λ) e il gradiente di temperatura (∇T) e *parametri geometrici* come la lunghezza (z) e il diametro del palo/pozzo (dS):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \int_s \lambda \nabla T(z) \cdot dS$$

Il significato di tale equazione è che il flusso di calore avviene in virtù di un gradiente di temperature non nullo (se ∇T fosse nullo, lo sarebbe anche l'integrale). Se lo spazio soggetto a tale campo di temperature (il terreno) fosse isotropo, vale a dire omogeneo in ogni direzione, il tensore λ si riduce ad una costante. La mancanza di isotropia comporta la natura tensoriale della conducibilità termica: il flusso di calore non si ha infatti lungo la direzione del gradiente di temperature, bensì lungo una direzione distorta dovuta alle caratteristiche del mezzo; la nuova direzione del flusso termico sarà allora quella del vettore $\lambda \nabla T$.

Dato che per un tale sistema complesso non è possibile ricavare soluzioni analitiche, si ha la necessità di ricorrere all'utilizzo di software per le simulazioni numeriche del flusso (come EED, FEFLOW); i quali la eseguono attraverso i consolidati metodi:

- **Alle differenze finite (FDM):** si definisce una griglia di punti su tutto il dominio (bordi inclusi), all'interno della quale si sostituiscono le derivate con l'approssimazione alle differenze centrali. Mediante le formule alle differenze centrali si ottiene un sistema lineare che può essere risolto con i tradizionali metodi iterativi.
- **Agli elementi finiti (FEM):** si discretizza il dominio continuo di partenza in un dominio discreto (*mesh*) mediante l'uso di primitive (*elementi finiti*) di forma semplice (triangoli e quadrilateri per domini 2D). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, si assume che la soluzione del problema sia espressa dalla combinazione lineare di funzioni di base o di forma (*shape functions*). La soluzione è approssimata: vengono scelti i valori che forniscono il minor errore su tutta la soluzione.

Come già accennato, i fattori che determinano la quantità di scambio di calore sono strettamente legati alle caratteristiche proprie dei vari tipi di sottosuolo, che difficilmente risulta omogeneo. Dunque non è possibile considerare dei valori di conducibilità termica, capacità termica volumetrica e temperatura costanti nello spazio poiché dipendono intrinsecamente dalla natura dei grani, dalla pressione litostatica e dal grado di compattazione, da porosità e permeabilità, e dalla presenza di anomalie geotermiche.

Inoltre le proprietà termiche e petrofisiche del terreno possono cambiare durante la vita del reservoir per ragioni naturali (come le fluttuazioni della falda o le variazioni della permeabilità) o per ragioni collegate allo sfruttamento del serbatoio termico.

Dunque considerare tali parametri costanti nello spazio e nel tempo, durante le simulazioni numeriche del flusso termico del reservoir, può portare a commettere degli errori di approssimazione, che rischiano di compromettere la significatività dei risultati della simulazione stessa e il corretto dimensionamento dell'impianto.

Dunque non sono noti a priori e, anche a posteriori, potranno essere conosciuti solo con un livello di approssimazione.

Grazie al Test di Risposta Termica (TRT), di cui si parlerà a breve, è possibile stimare i valori effettivi dei parametri termici, che sono strettamente collegati al volume di terreno interessato. I risultati che scaturiscono da questo test permettono la calibrazione del modello numerico, anche se andando a cambiare le condizioni al contorno, i valori effettivi dei parametri non sono più rappresentativi della porzione di reservoir attualmente coinvolto dal flusso termico e di conseguenza variano anch'essi (come è possibile notare dalla figura 29 riportata di seguito).

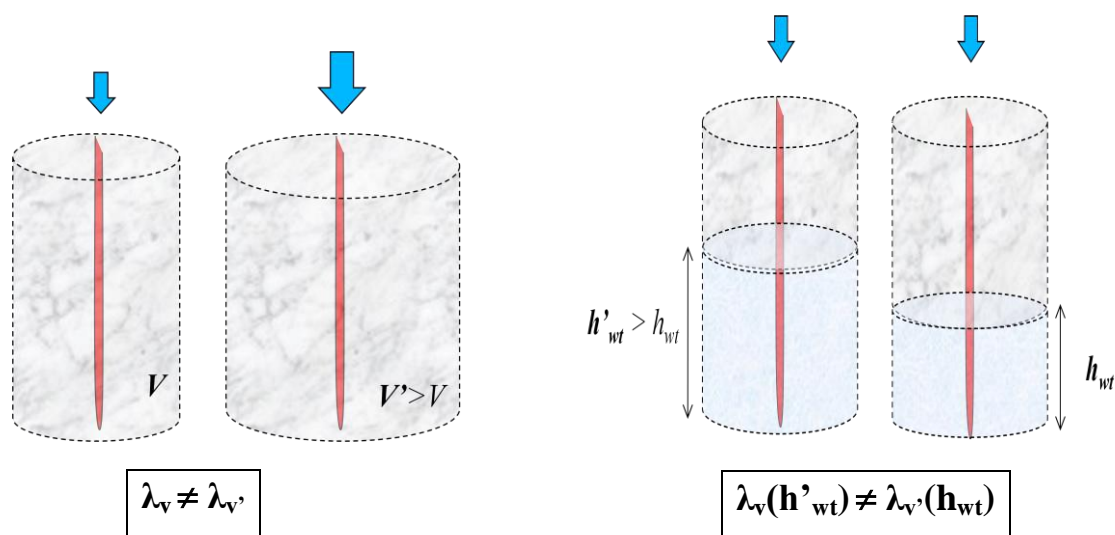


Figure 29. Alterazione della conducibilità termica effettiva al variare del volume di terreno interessato e del livello di falda.

Un tipico modello numerico richiede i valori veri (o effettivi) su una griglia spaziale; dato che questi non possono essere noti in tutto lo spazio circostante, allora si procede ad effettuarne una stima $\lambda^*(x,y,z) = f(\lambda(x_a,y_a,z_a))$.

Questa soluzione però non risulta adeguata in quanto non è in grado di riprodurre la naturale variabilità del parametro e non possiede la stessa autocorrelazione della variabile vera.

I parametri del reservoir geotermico (λ, C_v, \dots) sono variabili regionalizzate $\lambda(x,y,z, \dots), C_v(x,y,z, \dots)$; sono georeferenziati e la loro variabilità può avere un comportamento casuale o spazialmente strutturato.

Sussiste dunque la necessità di un approccio probabilistico (metodo geostatistico) i cui strumenti principali per valutare l'autocorrelazione spaziale di dati osservati in punti georeferenziati sono la *covarianza spaziale* $C(h)$ ed il *semivariogramma* $\gamma(h)$; ogni variabile ha il proprio variogramma.

Sulla base del campionamento e di alcune ipotesi teoriche (stazionarietà spaziale, ergodicità...), la variabilità spaziale può essere caratterizzata ed identificata.

Lo scopo della geostatistica è dunque quello di scoprire un'immagine di valori veri che siano anche compatibili con i risultati ottenuti attraverso il Test di Risposta Termica; questo è possibile grazie ad una procedura in tre passi:

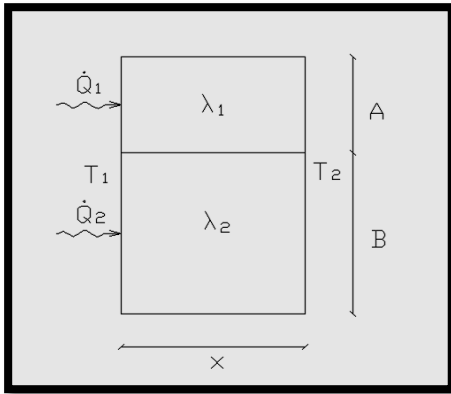
1. si allestiscono modelli numerici dei parametri del reservoir attraverso istogrammi, semivariogrammi e dati reali;
2. si analizzano le diverse simulazioni geostatistiche e si fa girare ogni volta il simulatore di flusso;
3. si scelgono quelle immagini che corrispondono ad una buona sovrapposizione tra i risultati del simulatore di flusso e quelli del TRT.

Tornando alla natura delle variabili regionalizzate che caratterizzano un reservoir termico, occorre menzionare il fatto che mentre la capacità termica C_v è una variabile scalare, dunque può avvalersi della proprietà additiva, la conduttività termica λ è un tensore, una variabile vettoriale che non può essere sommata. Come precedentemente accennato, compare nell'equazione del flusso termico di Fourier: $Q_t = \vec{\lambda}A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$.

Siamo però a conoscenza delle soluzioni per un'altra variabile vettoriale ossia la permeabilità k (dall'equazione di Darcy che modella il flusso d'acqua nel sottosuolo: $Q_w = \frac{-\vec{k}A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x}$); grazie ad una correlazione tra queste due variabili è possibile effettuare l'upscaling anche per la conduttività termica.

Per ottenere il valore dell'effettiva conduttività termica di un volume di terreno, bisogna calcolarla per due strati posti in parallelo e in serie.

Conduttività effettiva per strati in parallelo



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_1 = -\lambda_1 * \frac{(T_1 - T_2)}{x} * A \\ \dot{Q}_2 = -\lambda_2 * \frac{(T_1 - T_2)}{x} * B \\ \dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = -\lambda_{tot} * \frac{(T_1 - T_2)}{x} * (A + B) \end{array} \right.$$

Da cui si ottiene:

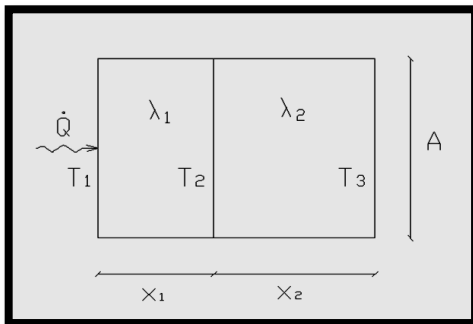
$$\lambda_{tot} = \frac{A * \lambda_1 + B * \lambda_2}{A + B}$$

Figura 30. Rappresentazione schematica degli strati di terreno in parallelo

La conduttività totale coincide con la media aritmetica ponderata.

$$\lambda_{tot} = \bar{\lambda}_a$$

Conduttività effettiva per strati in parallelo



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_1 = -\lambda_1 * \frac{(T_1 - T_2)}{x} * A \rightarrow \dot{q}_1 = -\lambda_1 * \frac{(T_1 - T_2)}{x_1} \\ \dot{Q}_2 = -\lambda_2 * \frac{(T_2 - T_3)}{x} * A \rightarrow \dot{q}_2 = -\lambda_2 * \frac{(T_2 - T_3)}{x_2} \\ \dot{q} = -\lambda_{tot} * \frac{(T_1 - T_2) + (T_2 - T_3)}{x_1 + x_2} \end{array} \right.$$

Figura 31. Rappresentazione schematica degli strati di terreno in serie

Da cui si ottiene:

$$\frac{1}{\lambda_{tot}} = \frac{x_2 * \left(\frac{1}{\lambda_1} * \frac{x_1}{x_2} + \frac{1}{\lambda_2} \right)}{x_1 + x_2} = \frac{x_1 * \frac{1}{\lambda_1} + x_2 * \frac{1}{\lambda_2}}{x_1 + x_2}$$

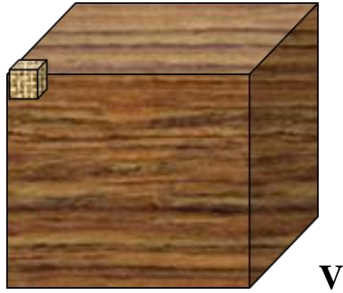
In questo caso la conduttività termica totale risulta uguale alla media armonica ponderata.

$$\lambda_{tot} = \bar{\lambda}_h$$

Si può dunque affermare che l'effettiva conduttività di un volume V

composto da più piccoli volumi elementari con date conducibilità è sempre inclusa tra la sua media aritmetica e la sua media armonica.

$$\bar{\lambda}_a = \lambda_V = \bar{\lambda}_h$$



4.2 Modalità di trasmissione del calore in un sistema di pali energetici.

La trasmissione del calore riguarda tutti quei processi fisici nei quali una certa quantità di energia termica è trasferita da un sistema ad un altro a causa di una differenza di temperatura.

Tali processi avvengono secondo i principi della termodinamica:

- L'energia termica ceduta da un sistema deve essere uguale a quella ricevuta dall'altro;
- Il calore passa dal corpo più caldo a quello più freddo fino a che i due corpi raggiungono la stessa temperatura, quella di equilibrio termico.

In un sistema di pali energetici, opportunamente dimensionati e disposti nel terreno, le modalità di scambio termico possono avvenire per **conduzione**, **convezione** e **advezione**. L'**irraggiamento** non viene considerato in quanto influenza solamente gli strati superficiali di terreno, dunque in questo caso rappresenta un elemento poco rilevante, a parte che per

l'impianto di distribuzione a pannelli radianti di cui si accennerà a breve. Nella figura 33 è riportata una rappresentazione schematica di quanto appena affermato.

Il sottosuolo, a determinate profondità, si trova ad una temperatura pressoché costante; come già abbondantemente menzionato, questo calore può essere captato da un fluido termovettore che viene fatto circolare all'interno dei tubi opportunamente disposti nel palo.

Il fenomeno di scambio di calore in questo caso prende il nome di **convezione forzata**, poiché il fluido è mosso meccanicamente nel circuito grazie ad una pompa di circolazione. Ogni palo energetico possiede un volume di terreno di competenza che ha spesso la forma di un cilindro verticale; al suo interno la propagazione del calore avviene invece per **conduzione**.

Un altro fenomeno trasmissivo che si può verificare nel sottosuolo è l'**advezione**, dovuta allo spostamento di masse d'acqua di falda in direzione prevalentemente orizzontale; questa situazione permette di aumentare sensibilmente lo scambio termico del palo con il terreno, dunque rappresenta un fattore molto positivo.

È molto importante anche la rapidità con cui avviene il processo di scambio termico e quindi la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo ovvero la **potenza termica** \dot{Q} , che si misura in Watt e dipende principalmente dalla natura del terreno interessato. Infatti, se il terreno è meno favorevole ovvero è caratterizzato da una conducibilità termica medio-bassa (come ad esempio i terreni alluvionali), allora occorrerà un numero maggiore di scambiatori di calore.

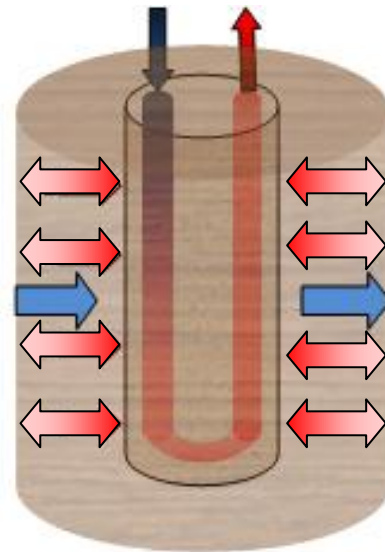


Figura 32. Rappresentazione delle modalità di scambio termico per un palo energetico: convezione forzata nei tubi, conduzione e advezione nel terreno.

La potenza termica ceduta dalla sorgente esterna alla pompa di calore è pari a:

$$P = \dot{Q} = C_p * Q * \Delta T$$

Dove:

C_p : calore specifico del fluido;

Q : portata;

ΔT : differenza tra le temperatura in entrata e uscita dalla pompa di calore.

Appare evidente che la potenza scambiata dipende dunque dalla quantità di fluido circolante, dipendente a sua volta dal numero di geoscambiatori nel palo, e dallo scambio termico che avviene nel terreno.

Tale scambio, per sistemi a circuito chiuso, avviene principalmente per conduzione, per cui lo schema del processo a regime è quello mostrato in figura 33:

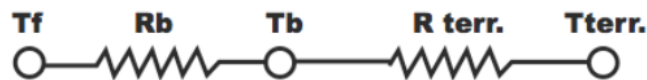


Figura 33. Circuito termico che simula il comportamento del geoscambiatore.

Dunque a carattere generale, la potenza scambiata in un circuito è data da:

$$P = \frac{\Delta T \cdot L}{R}$$

Dove:

ΔT : differenza tra la temperatura del terreno e quella del fluido termovettore (media di in/out);

R : resistenza termica globale, sommatoria della resistenza del materiale antropico (tubi, cementazione, etc..) e del terreno;

L : lunghezza del geoscambiatore nel palo.

Premesso che esistono molte alternative costruttive di geoscambiatori (verticali/orizzontali, a circuito aperto/chiuso, ...), il parametro critico, che ad oggi è stato poco affrontato, o sottovalutato, è l'effettiva efficienza dello scambio energetico per ogni tipologia, in rapporto alle caratteristiche dei diversi terreni, che modifica necessariamente il valore di R .

Come già precedentemente citato, per ottimizzare il dimensionamento dell'impianto e di conseguenza diminuire l'investimento iniziale, la conoscenza delle suddette caratteristiche è di fondamentale importanza.

Impianti a pavimento

Il trasferimento di calore dal massetto riscaldato dal tubo, avviene per effetto combinato di **irraggiamento** e **convezione**. In questo caso però la componente convettiva è trascurabile rispetto a quella di irraggiamento.

Non si creano in questo modo gli effetti di movimentazione del pulviscolo che caratterizzano i più comuni radiatori impiegati nei sistemi di riscaldamento tradizionali, in più si genera una stratificazione del calore fra il pavimento e il soffitto, cioè la temperatura è più alta vicino al pavimento e diminuisce salendo verso il soffitto; questa stratificazione si avvicina alle condizioni ideali di benessere termico. Una rappresentazione di quanto appena detto è osservabile di seguito in figura 34.

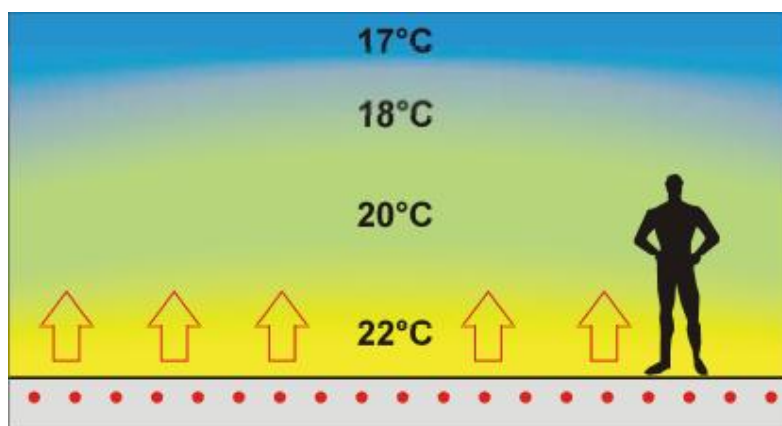


Figura 34. Illustrazione della modalità di scambio termico per un impianto a pannelli radianti.

Modello di simulazione di uno stoccaggio di calore nel terreno usato in PILESIM2

Il **modello TRNVDST** (Hellström et al., 1996) simula uno stoccaggio di calore nel sottosuolo (DST), definito come un sistema in cui il calore o il freddo vengono immagazzinati direttamente nel terreno. Esso assume un numero relativamente elevato di pali energetici posti in modo uniforme nel terreno; c'è trasferimento di calore convettivo nei tubi e conduttivo nel terreno.

Il processo termico nel terreno viene trattato come una *sovrapposizione di due problemi*: uno *globale* che gestisce su larga scala i flussi di calore nello stoccaggio e nel terreno circostante e uno *locale* che prende in considerazione il trasferimento di calore tra il fluido e lo stoccaggio. Il problema locale usa delle soluzioni locali attorno ai pali energetici e una parte di flusso costante, con la quale è possibile ridurre il numero di soluzioni locali (e quindi il tempo di calcolo) senza significative perdite di precisione.

Entrambi i problemi vengono risolti con l'uso del metodo esplicito alle differenze finite (FDM), mentre la parte costante del flusso è data da una soluzione analitica. Ad un certo punto, la temperatura totale è ottenuta da una sovrapposizione di queste tre parti.

Gli effetti a breve termine di iniezione/estrazione attraverso i tubi sono simulati con le soluzioni locali, che dipendono solo da una coordinata radiale e coprono un volume cilindrico esclusivamente associato ad ogni palo. Al confine esterno della palificata è prescritto un flusso di calore pari a zero.

Il trasferimento di calore dal fluido al terreno nelle immediate vicinanze del palo è calcolato con una resistenza termica (R_b), è possibile prendere in considerazione anche il trasferimento di calore interno sfavorevole tra il

flusso dei canali discendenti e ascendenti nel pozzo (R_a).

Il flusso di calore tridimensionale nel terreno è simulato utilizzando una maglia bidimensionale con una coordinata radiale ed una verticale.

Nella versione ultima di TRNVDST, per avere un modello più appropriato di simulazione, è stata introdotta la possibilità di stimare il trasferimento di calore causato da *convezione forzata di un flusso d'acqua sotterraneo* nella regione di stoccaggio. Dal momento che un flusso di acque sotterranee regionali tende a spostare il campo di temperatura in direzione del suo dislocamento, non è conveniente assumere una geometria cilindrica attorno allo stoccaggio.

Per tale motivo, poiché nel TRNVDST la geometria cilindrica è ampiamente utilizzata, sono state introdotte delle approssimazioni. La prima riguarda il *problema globale* o l'influenza a lungo termine di un flusso di acque sotterranee regionali.

Con il metodo utilizzato nel **PILESIM2**, la perdita convettiva (o il guadagno) viene calcolato come differenza di temperatura tra T_{media} dello strato di terreno all'interno della regione di stoccaggio e T_{∞} dell'acqua indisturbata nello strato di terreno.

$$E_{conv} = u * S * C_w * (T_{\infty} - T_{media}) * \Delta t$$

La perdita di calore convettivo nel corso di uno step temporale di simulazione è limitato al valore massimo possibile, definito dalla relazione:

$$E_{conv max} = V * C_{ground} * (T_{\infty} - T_{media})$$

Con:

u: velocità di Darcy nello strato di terreno (m/s);

d: diametro di stoccaggio(di forma cilindrica) (m);

H: estensione verticale dello strato di terreno all'interno del volume di stoccaggio (m);

S: sezione dell'area di stoccaggio interessata dal flusso di Darcy; $S = H * d$ (m^2);

V : volume dello strato di terreno all'interno del volume di stoccaggio; $V = d^2/4 * H$ (m^3);

C_w : capacità volumetrica di calore delle acque sotterranee ($J / m * K$);

C_{ground} : capacità termica volumetrica dello strato di terreno all'interno dello stoccaggio ($J/ m^3 * K$);

T_{∞} : temperatura indisturbata dell'acqua sotterranea nello strato di terreno ($^{\circ} C$);

T_{mean} : temperatura di stoccaggio media nello strato di terreno ($^{\circ} C$);

Δt : step temporale per il calcolo del campo globale della temperatura nel terreno, calcolato per circa un giorno per un caso tipico (s);

E_{conv} : quantità di calore trasferito dalla convezione forzata nello strato di stoccaggio durante lo step temporale (J).

$E_{conv max}$: massima quantità di calore possibile trasferito per convezione forzata nello strato di stoccaggio durante lo step temporale (J).

La quantità di calore trasferito E_{conv} è quindi equamente distribuita come una correzione della temperatura per ogni cella dello strato di terreno all'interno del volume di stoccaggio. Se E_{conv} è superiore a $E_{conv max}$, poi le temperature sono fissate a T_{∞} (la temperatura indisturbata dell'acqua sotterranea).

La seconda approssimazione è relativa al *problema locale* ovvero all'influenza a breve termine di un flusso idrico regionale sotterraneo (influenza sul trasferimento di calore intorno ai pali energetici), che può essere stimata con l'aiuto del numero di Nusselt associato ad un cilindro inserito in un mezzo poroso e sottoposto a un flusso regionale di acque sotterranee.

Tale cilindro, la cui temperatura superficiale è prescritta e costante, è perpendicolare al flusso; quest'ultimo viene considerato uniforme quando si trova abbastanza lontano dal cilindro.

Lo stato costante del tasso di trasferimento del calore tra la superficie del cilindro alla temperatura T_w e il mezzo poroso saturo nel campo lontano alla temperatura T_∞ può essere espresso in termini del numero di Nusselt medio (Nield e Bejan, 1992):

$$\overline{Nu_D} = \frac{\overline{q''}}{T_w - T_\infty} * \frac{D}{\lambda_m}$$

Con:

$\overline{Nu_D}$: valore medio del numero di Nusselt sulla superficie del cilindro, basato sul diametro del cilindro D (-);

$\overline{q''}$: velocità di trasferimento termico medio per unità di area sulla superficie del cilindro (W/m^2);

T_w : temperatura della superficie del cilindro ($^\circ C$);

T_∞ : temperatura del mezzo poroso indisturbato ($^\circ C$),

D : diametro del cilindro (m);

λ_m : conducibilità termica effettiva del mezzo poroso (W/mK);

Quando lo spessore dello strato limite è più piccolo del raggio del cilindro, il valore medio del numero di Nusselt può essere calcolato (Nield e Bejan, 1992) adottando il modello di flusso di Darcy come valido:

$$\overline{Nu_D} = 1,015 Pe_D^{1/2} \quad ; \quad Pe_D = \frac{u * D}{\alpha_m}$$

Con:

Pe_D : il numero Péclet basato sul diametro del cilindro D (-);

α_m : diffusività termica del mezzo poroso (m/s), definito dal rapporto di λ_m/C_w .

L'equazione di $\overline{Nu_D}$ è valida se risulta soddisfatto il seguente requisito:

$$Pe_D^{1/2} \gg 1 \quad \text{o} \quad Nu_D \gg 1$$

Come accennato in precedenza, le soluzioni locali dipendono solo da una coordinata radiale e coprono un volume cilindrico di terreno di raggio r_1 ,

che è esclusivamente attribuito a ciascun palo energetico. Un flusso di calore pari a zero è prescritto al confine esterno a causa di considerazioni geometriche.

Sotto condizioni di flusso costanti e per pura conduzione di calore, *il flusso termico scambiato da un palo energetico* può essere espresso in termini di temperatura del terreno ai confini interni ed esterni (cfr. Hellström, 1991):

$$T_w - T_\infty = \frac{q'_{cond}}{2\pi\lambda_m} * \left\{ \frac{r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) - \frac{1}{2} + \frac{r_0^2}{2r_1^2} \right\}$$

Con

r_0 : raggio del palo energetico, $r_0 = D/2$ (m);

r_1 : raggio esterno del cilindro di terra attribuito al palo energetico (m);

T_w : temperatura del suolo al palo energetico ($r = r_0$) ($^{\circ}$ C);

T_∞ : temperatura del suolo al raggio esterno ($r = r_1$) ($^{\circ}$ C);

λ_m : conducibilità termica effettiva del mezzo poroso (W/m*K);

q'_{cond} : velocità di trasferimento di calore per unità di lunghezza trasferito dai pali energetici (W/m).

Al fine di essere in grado di confrontare i flussi di calore trasferiti per convezione forzata e conduzione pura, la temperatura del suolo al confine esterno (al raggio r_1 da un palo energetico), è assimilata al lontano campo di temperatura T_∞ ; (l'esattezza di questa affermazione è però ancora da controllare).

Con questo presupposto, è ora possibile confrontare i flussi di calore, osservando che: $\bar{q}' = \bar{q}'' * \pi * D$

Combinando le equazioni citate finora, otteniamo:

$$\frac{\bar{q}'_{cond}}{\bar{q}''_{cond}} = \frac{\overline{Nu}_D}{2} \left\{ \frac{r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} * \left[\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) - \frac{1}{2} + \frac{r_0^2}{2r_1^2} \right] \right\}$$

Il rapporto $\frac{\overline{q}'_{cond}}{q_{cond}}$ indica di quanto l'effettivo tasso di trasferimento del calore differisce da quello risultante dalla sola conduzione del calore. Questo rapporto è usato come un fattore di correzione per i calcoli del tasso di trasferimento del calore scambiato dai pali energetici, ma solo se è maggiore di 1. Lo stesso fattore di correzione è assunto per i calcoli dei trasferimenti transitori di calore intorno ai pali energetici.

4.3 La resistenza termica dei pali energetici

Il parametro più importante di un palo energetico è certamente la sua resistenza termica (difficoltà del calore nell'attraversare il mezzo solido), indicata come R_b , che in regime stazionario e per una potenza trasferita conosciuta, permette di quantificare lo scarto di temperatura tra il fluido che circola nei pali e il terreno in contatto con il palo stesso.

In altri termini, l'estrazione di una potenza termica crea una differenza di temperatura tra il fluido e il terreno, indipendentemente dal fatto di avere delle condizioni geologiche e idrogeologiche locali favorevoli o meno.

Questa differenza di temperatura arriva facilmente a parecchi gradi, o addirittura a una decina per un caso sfavorevole. Per esempio, un palo con una resistenza termica di $0,2 \text{ K/(W/m)}$, sotto l'effetto di una potenza di estrazione di 50 W/m , creerà, una volta raggiunto un regime stazionario nel palo, una differenza di temperatura di 10 K tra la temperatura media del fluido e il terreno in contatto con il palo.

$$R_b = \frac{\Delta t}{P} \rightarrow \Delta t = R_b * P = 0,2 \text{ K/(W/m)} * 50 \text{ W/m} = 10 \text{ K}$$

La resistenza termica di un palo energetico dipende dal tipo di palo utilizzato (massiccio o vuoto prefabbricato), dal suo diametro, dal numero e dalla disposizione spaziale dei tubi nel palo, dal regime di scorrimento del fluido nei tubi, dalla conduttività termica dei materiali usati, ecc.

In realtà in Italia non si realizzano pali di tipo vuoto prefabbricato; di conseguenza in questa trattazione descriveremo solamente la resistenza termica del palo massiccio al variare del numero di tubi (fra 4 e 8 ovvero 2, 3 e 4 tubi con forma ad U), della conduttività termica del calcestruzzo λ , del regime di scorrimento del fluido termovettore (laminare o turbolento) e del diametro (34 cm (30 x 30) e 45 cm (40 x 40) i quali sono provvisti di tubi in plastica dal diametro esteriore/interiore di 20/16 mm, fissati

all'interno dell'armatura metallica del palo, a 5 cm dal bordo; 60,100 e 140 cm muniti a loro volta di tubi dal diametro di 32/26 mm e fissati a 10 cm dal bordo).

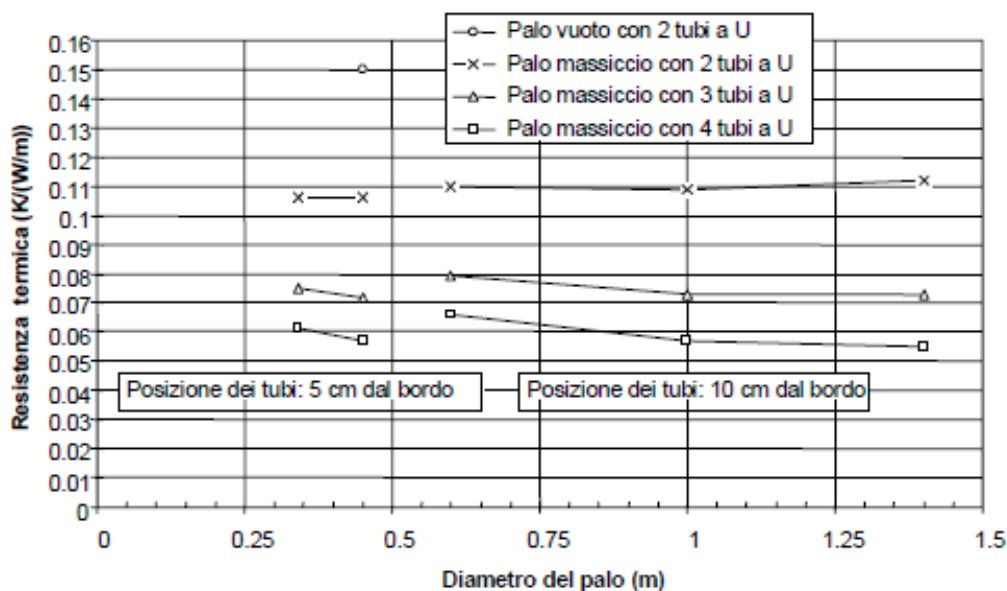


Figura 35. Resistenza dei pali massicci in funzione del diametro; per ciascun palo sono mostrate le varie configurazioni a U.

Nel grafico che segue in figura 35 si possono facilmente ricavare le resistenze termiche dei pali massicci per una conduttività termica del calcestruzzo di 1,8 W/mK e un regime di scorrimento nei tubi laminare. A titolo informativo è stato riportato anche il valore per il palo vuoto prefabbricato di diametro 0,45 m (0,4 x 0,4) con uno spazio vuoto di 0,25 m di diametro al centro riempito con sabbia di quarzo saturata in acqua (1,5 W/mK).

Come si può facilmente notare, la resistenza termica diminuisce ogni volta che un tubo a U viene aggiunto; passando da due U a tre U il guadagno è di circa 0,030 K/(W/m), mentre passando da tre U a quattro U non è che di 0,015 K/(W/m).

Un regime di scorrimento nei tubi non laminare genera una figura simile, con delle resistenze termiche leggermente migliori. Tuttavia, il miglioramento diventa meno marcato per un numero di tubi maggiore; esso è di circa 0,02 K/(W/m) per un doppio U, ma si riduce a 0,01 K/(W/m) con

un quadruplo U.

Una conduttività termica del calcestruzzo più bassa invece (1,3 W/mK al posto di 1,8 W/mK) porta ad una resistenza termica più alta. L'effetto è di circa 0,02 K/(W/m) per un doppio U e diminuisce per un numero di tubi più grande. La resistenza termica del palo, per un numero di tubi dato e posizionati il più vicino possibile al bordo, è all'incirca la stessa indipendentemente dal suo diametro. Tuttavia, essa tende ad aumentare con l'aumento del diametro nel caso di un doppio tubo a U, mentre tende a diminuire nel caso di un quadruplo U; è dunque vantaggioso aumentare il numero di tubi nei pali più grandi, ma l'effetto sulla resistenza termica resta a grandi linee il medesimo per dei pali con un diametro compreso tra i 30 e i 140 cm.

La figura precedente mostra le resistenze termiche dei pali con diametri differenti, ma non permette di paragonarli. Dato che questo parametro può essere definito relativamente al proprio raggio, per poter paragonare più valori tra di essi basta adottare un raggio comune, che per convenzione è scelto come il raggio del palo più grande. In altri termini, alla resistenza termica del palo bisogna aggiungere la resistenza termica dell'anello di terreno compresa tra il bordo del palo e il raggio comune. Per un trasporto di calore nel terreno per pura conduzione, essa è data dalla relazione:

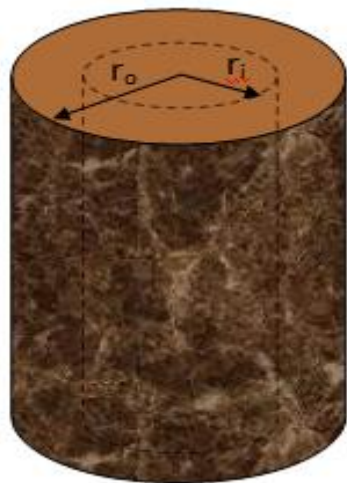


Figura 36. Rappresentazione del raggio del palo e del raggio comune

$$R_{anneau} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

Dove:

R_{anneau} : resistenza termica dell'anello di terreno compreso fra r_i e r_o (K/(W/m));

λ : conduttività termica del terreno (W/mK);

r_o : raggio esterno (raggio comune) (m);

r_i : raggio interno (raggio del palo) (m).

Il grafico successivo mostrato in figura 37 permette il paragone delle resistenze termiche dei pali avendo scelto come raggio di riferimento quello del palo più grande (70 cm); con la conduttività termica del terreno stimata a 1,8 W/mK. Questo paragone è valido solamente se l'effetto del movimento dell'acqua sotterranea è trascurabile. La resistenza termica del palo vuoto è ugualmente indicata.

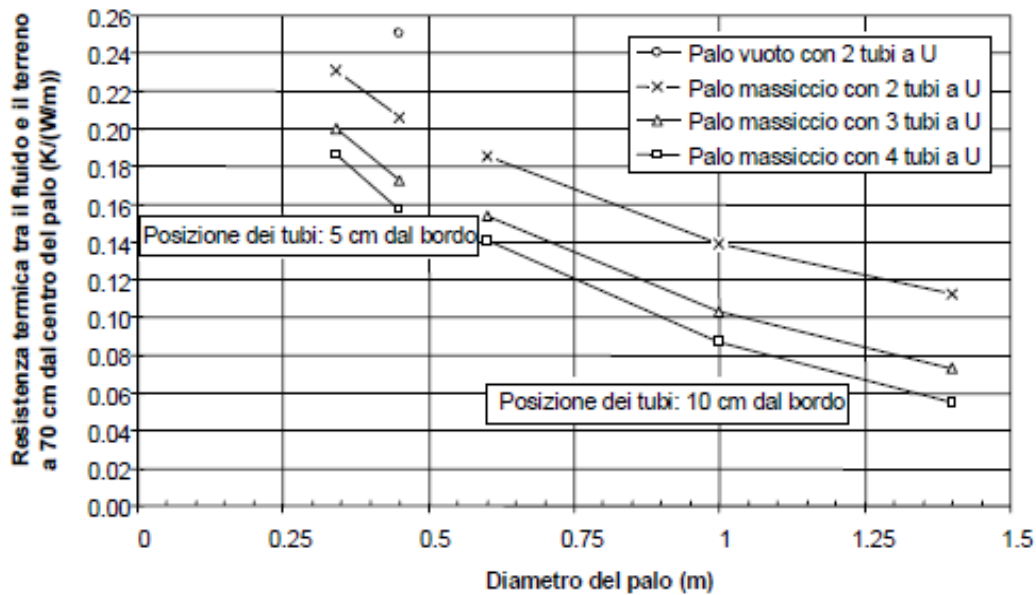


Figura 37. Resistenze termiche dei pali massicci in funzione del diametro, calcolate relativamente a un raggio comune di 70 cm.

Il vantaggio di avere dei pali con un grande diametro è evidente; tuttavia, il posizionamento dei tubi all'interno del palo è un parametro importante, soprattutto se i tubi non sono distanziati omogeneamente gli uni dagli altri e se sono posizionati verso il centro del palo. Nel prossimo grafico (figura 38) si rappresenta la resistenza termica di un palo di 140 cm di diametro, munito di 4 tubi a U, in funzione della posizione dei tubi, misurata come distanza radiale tra il centro del palo e il centro dei tubi (conduttività termica del calcestruzzo: 1,3 W/mK, regime di scorrimento nei tubi non laminare).

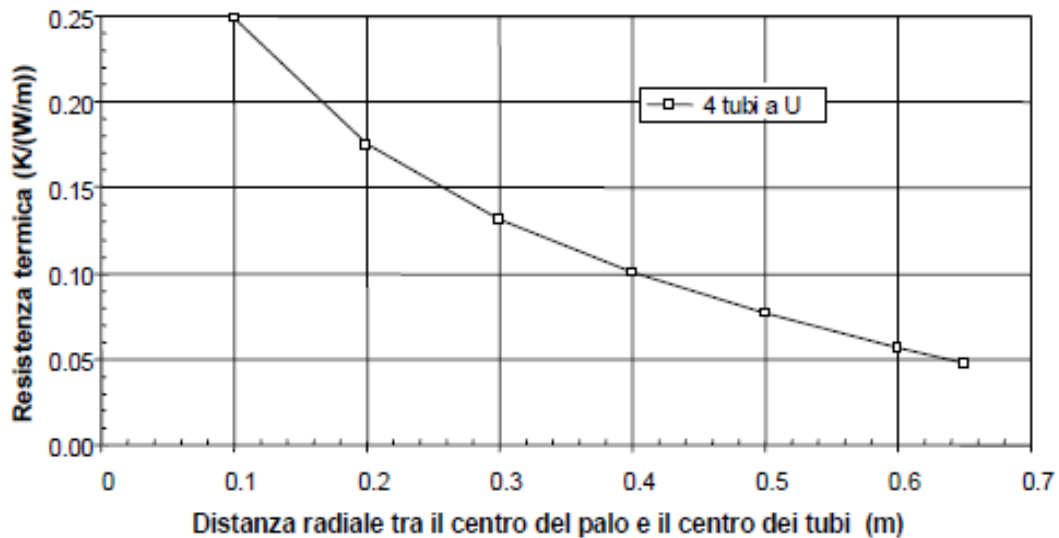


Figura 38. Resistenza termica di un palo massiccio di 140 cm. di diametro in funzione della posizione dei 4 tubi ad U, misurata come distanza radiale tra il centro del palo e il centro dei tubi.

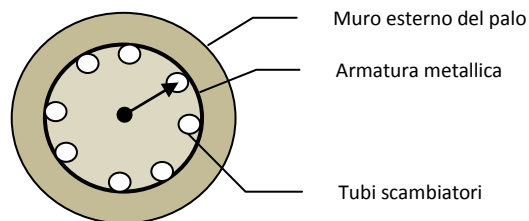


Figura 39. Rappresentazione della distanza radiale tra il centro del palo e il centro del tubo.

Appare chiaro il fatto che più i tubi sono distanziati dal centro del palo, minore è la resistenza termica a cui sono soggetti.

Ricapitolando possiamo riassumere che, per i pali massicci che hanno i tubi fissati sulla faccia interna dell'armatura metallica, il valore della resistenza termica dipende essenzialmente dal numero di tubi a U contenuti. Se i tubi sono distanziati il più possibile gli uni dagli altri e se sono il più distante possibile dall'asse del palo, la variazione del diametro tra 30 e 140 cm. genera un'influenza trascurabile.

In mancanza di calcoli più precisi, i valori delle resistenze termiche riportati di seguito possono essere considerati come tipici ed essere adottati.

Palo massiccio munito di:	R_b (K/(W/m))
Doppio U	0,1÷0,11
Triplo U	0,07÷0,08
Quadruplo U	0,06

Tabella 5. Valori tipici delle resistenze termiche a seconda del numero di tubi ad U.

Aggiungere dei tubi ad U ad un palo già munito di quadruplo U non permette di abbassare sensibilmente la sua resistenza termica.

Esiste anche un altro tipo di resistenza termica; è quella interna R_a , che permette di valutare gli effetti sfavorevoli del trasferimento di calore interno del palo: per un'estrazione di calore data, il fluido termovettore che esce dal palo viene raffreddato dal fluido che ritorna nel palo. Comunque, l'influenza di questo parametro non è così grande come quella di R_b .

4.4 Capacità di scambio termico di un sistema di pali energetici

La capacità di scambio termico è uno dei parametri fondamentali che permettono di caratterizzare un sistema con pali energetici dal punto di vista termico; un altro parametro importante, affrontato successivamente, è la capacità di stoccaggio specifica.

La capacità di scambio termico, indicato come UA (W/m), equivale alla potenza termica che si può scambiare nel terreno una volta raggiunto un regime stazionario, data una differenza di 1 K tra la temperatura media del fluido termovettore e la temperatura media del terreno.

Questo parametro dipende dalla resistenza termica globale tra la

temperatura media del fluido e la temperatura media del terreno (la resistenza termica di un palo è solo una componente della resistenza termica globale).

Una stima del contributo del terreno può essere effettuata nel caso in cui la modalità dominante per il trasferimento di calore è la conduzione. Questa stima è valida dal momento che un regime di flusso stazionario si è stabilito, o in altri termini, quando la differenza tra la temperatura media del fluido e la temperatura media del terreno diventa costante nel tempo, come conseguenza di un'iniezione o di un'estrazione di una potenza termica costante. La durata di questo periodo transitorio è stimata dalla relazione (Hellström, 1991):

$$t_{fs} = 0,065 * \frac{A_p}{a}$$

Dove:

t_{fs} : durata del periodo transitorio (s);

A_p : sezione del volume di terreno associato a un palo (per una disposizione di lato B, $A_p = B \times B$) (m^2);

a : diffusività termica del terreno (m^2/s); a è il quoziente tra la conduttività termica del terreno λ (W/mk) e la sua capacità termica volumetrica C_v (J/m^2K).

Per valori tipici ($a = 0,8 * 10^{-6} m^2/s$ e $B = 4 m.$), il periodo transitorio dura una quindicina di giorni.

Se si calcola la resistenza termica del terreno R_g in flusso stazionario tramite la seguente relazione (Hellström, 1991):

$$R_g = \frac{1}{2\pi\lambda} \left\{ \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right] \ln \left(\frac{r_1}{r_b} \right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{r_1^2 - r_b^2} \right\}$$

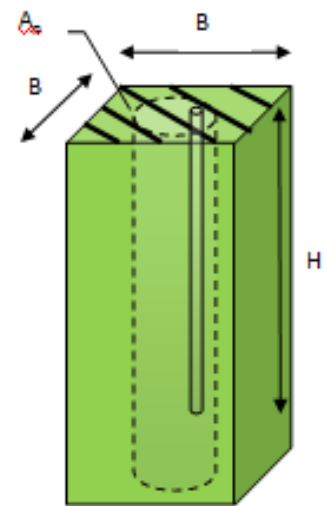


Figura 40. Volume di terreno di lato B e sezione A_p associato ad un palo.

Dove:

r_b : raggio dei pali (m.);

r_1 : raggio del volume di terreno associato ad un palo (m.); $r_1 = \frac{B}{\sqrt{\pi}}$;

Allora la capacità di scambio termico UA risulterà:

$$UA = \frac{n * H}{R_b + R_g}$$

Dove:

n : numero di pali energetici (-);

H : lunghezza attiva di un palo energetico (m);

R_b : resistenza termica dei pali energetici (K/(W/m));

R_g : resistenza termica del terreno in flusso stazionario (K/(W/m)).

La capacità di scambio termico di un sistema di pali è dunque nota se si conosce la resistenza termica dei pali, le loro dimensioni (diametro, lunghezza attiva e numero), la distanza media tra di essi e la conduttività termica media del terreno. Questo parametro è in grado di tradurre una relazione lineare tra la potenza trasferita dai pali e la differenza di temperatura tra il fluido e il terreno in situazione di flusso stazionario:

$$P = UA * (T_f - T_m)$$

Dove:

P : potenza termica iniettata o estratta dai pali energetici (W);

T_f : temperatura media del fluido (°C); $T_f = (T_i + T_0)/2$ con T_i e T_0 :
temperature di entrata e di uscita del fluido nei pali (°C) ;

T_m : temperatura media del terreno nella zona perturbata dai pali energetici (°C).

Di seguito è riportata la figura che permette di ottenere graficamente la resistenza termica del terreno R_g , calcolata per una conduttività termica del terreno λ di 1,8 W/mK, in funzione del diametro del palo e della distanza media tra di essi.

Dato che R_g è inversamente proporzionale a λ , risulta facile correggere i risultati per altri valori della conduttività termica moltiplicandoli per il rapporto $1,8/\lambda$.

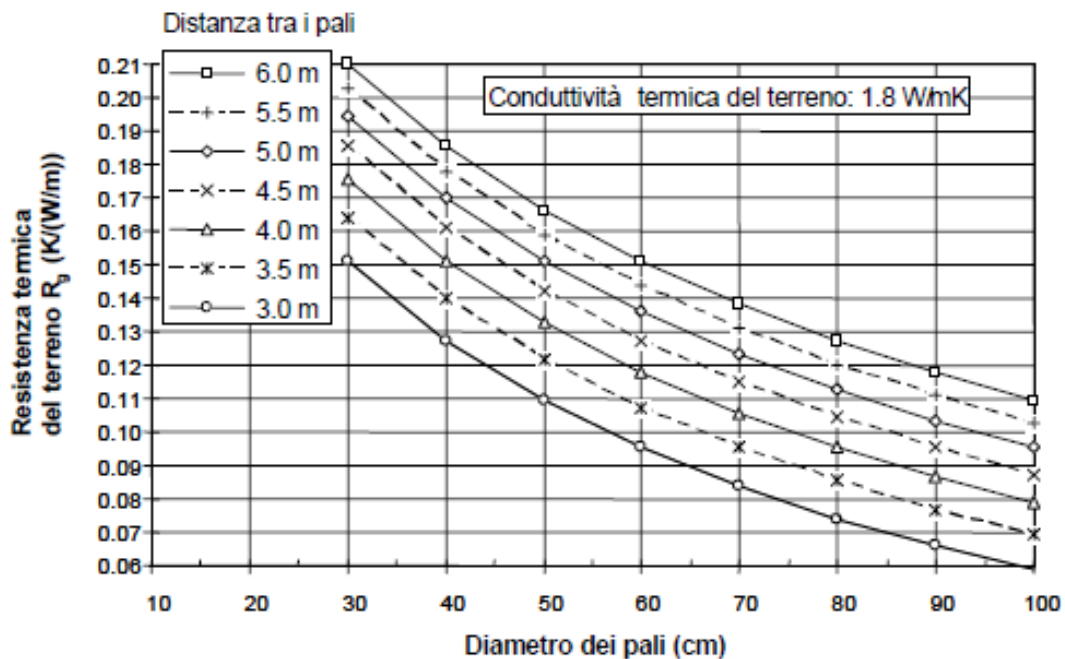


Figura 41. Resistenza termica del terreno R_g di un sistema di pali energetici posti in un terreno con una conduttività di 1,8 W/mK, rappresentata in funzione del diametro e della distanza media dei pali.

Per poter illustrare l'utilizzo della figura 41 appena mostrata, prendiamo in esame il caso in cui sia dato un palo quadrato di lato 40 cm (che equivale a un palo tondo di diametro 45 cm) con spaziatura 4 m e una resistenza termica pari a 0,06 W/mK.

Sul grafico si parte dal diametro 45 cm e si sale fino ad intersecare la curva che appartiene alla distanza di 4 m tra i pali; da questo punto si procede in direzione delle ordinate fino ad intersecarne l'asse a quota 0,14 (valore della resistenza termica del terreno corrispondente).

L'inverso di $(R_b + R_g)$ equivale alla potenza termica che si può scambiare, in situazione stazionaria, per grado di differenza e per metro lineare di palo. Con 5 gradi di differenza, si possono estrarre 25 W per metro di palo.

Se la temperatura media del terreno è di 6 °C, alla fine dell'inverno, l'estrazione di 25 W/m porterà a una temperatura media del fluido nei pali di +1 °C. Ammettendo che la potenza termica sia estratta con uno scarto di temperatura di 4 K tra l'entrata e l'uscita dell'evaporatore della pompa con calore, il fluido termovettore ritornerà nei pali con una temperatura di circa -1 °C.

Un flusso di estrazione relativamente debole (25 W/m) crea in questo caso una differenza di temperatura significativa (5 K); esso è ottenuto dopo circa due settimane durante le quali la differenza di temperatura è mantenuta costante a 5 K (tale è la durata dell'effetto transitorio prima di raggiungere un flusso stazionario nel terreno). Il flusso di estrazione può essere più intenso se viene interrotto da periodi di riposo.

Nel caso estremo, per esempio se un flusso di acqua sotterraneo permette di rigenerare "istantaneamente" l'energia prelevata dal terreno, la resistenza termica di quest'ultimo diventa trascurabile.

Resta comunque quella dei pali (0.06 K/(W/m)), ciò che limita la potenza di estrazione a 80 W/m per uno scarto di temperatura di 5 K come descritto nell'esempio appena citato.

4.5 Capacità di stoccaggio specifica di un sistema di pali energetici

Questo parametro equivale alla quantità di energia necessaria ad innalzare di 1 K la temperatura del volume di terreno influenzato dai pali energetici.

Una piccola distanza tra i pali permette di ottenere una migliore capacità di scambio termico del sistema; in ogni modo, la capacità di stoccaggio della zona dei pali è ridotta se paragonata ad una situazione con una distanza maggiore tra i pali.

Il risultato sarà una variazione più veloce della temperatura media del terreno nel tempo, e dunque un esaurimento più rapido dell'energia termica immagazzinata nella zona dei pali nel periodo di estrazione del calore.

La capacità di stoccaggio specifico C di un sistema di pali energetici, definita come l'energia estraibile per grado di abbassamento della temperatura media del terreno nella zona dei pali, è data dal prodotto della capacità termica volumetrica con il volume di terreno influenzato dai pali energetici:

$$C_{sp} = C_v * (H * S)$$

Dove:

C_{sp} : capacità di stoccaggio specifica (J/K);

C_v : capacità termica volumetrica media del terreno (J/m³K);

H : lunghezza attiva media dei pali energetici (m);

S : superficie orizzontale del terreno influenzato dai pali energetici (m²).

La superficie S è stimata come la superficie delimitata dal perimetro disegnato attorno ai pali, passante a una distanza che corrisponde alla metà della distanza media tra di essi.

Questa superficie, moltiplicata per la lunghezza attiva media dei pali energetici, definisce il volume di terreno influenzato da questi ultimi. Se i pali sono disposti uniformemente, questa stima è soddisfacente.

Bisogna comunque essere prudenti nel caso in cui la distanza tra i pali varia fortemente; in questo caso, la stima del volume di terreno così definito risulterà troppo ottimistica, dato che le distanze più grandi tra i pali lasceranno delle porzioni di volume di terreno più inerti rispetto ad altre.

Senza tenere conto degli apporti o delle perdite di calore nel volume influenzato dai pali energetici, l'energia termica che si vorrebbe estrarre dal terreno crea un abbassamento di temperatura ΔT_m della temperatura media del terreno nella zona dei pali:

$$Q = C_{sp} * \Delta T_m$$

Dove:

Q : energia termica estratta dai pali energetici (J);

C_{sp} : capacità di stoccaggio specifico (J/K);

ΔT_m : abbassamento della temperatura media del terreno nella zona dei pali (K).

4.6 Test di Risposta Termica

Il Test di Risposta Termica (TRT) è un metodo di analisi sul terreno riconosciuto per la determinazione della conducibilità termica effettiva del sottosuolo interessato λ [W/(m*K)], parametro essenziale per il dimensionamento delle sonde geotermiche, dei pali energetici, degli elementi di costruzione in contatto col suolo e degli impianti geotermici “doublet” (costituiti da una coppia di pozzi, di cui uno produttore e l’altro reiniettore).

La misurazione in loco della conduttività termica permette ai progettisti di non applicare dei supplementi di sicurezza per il dimensionamento; in questo modo negli impianti geotermici di media e grande importanza i costi d’investimento possono essere notevolmente ridotti.

In particolare evita al progettista il rischio di sottovalutare la variazione termica sul lungo periodo del terreno interessato dal campo geotermico.

La qualità del “Ground Response Test” supera di gran lunga quella delle misurazioni effettuate in laboratorio, in quanto i parametri litologici e fisico-meccanici del suolo non vengono alterati dalla metodologia.

Per le sonde geotermiche e i pali energetici è inoltre possibile rilevare non solo la conduttività termica λ , ma anche la cosiddetta resistenza termica R_b [K/(W/m)] equivalente del pozzo/palo. Il metodo proposto si applica principalmente a sistemi geotermici verticali (poiché al momento sono le uniche tipologie verticali realizzate in Italia) e consiste nell’iniettare, in una sonda geotermica di prova, una certa quantità di fluido termovettore (generalmente acqua) riscaldato a potenza termica costante e libero di circolare per una certa quantità di tempo.

Attraverso due termometri, posti rispettivamente nelle tubazioni di mandata e di ritorno, si registrano i valori della temperatura del fluido proveniente e diretto alla sonda geotermica grazie ai quali è possibile estrapolare due

grafici. In questo modo, una volta conosciuto l'andamento della temperatura media ed il periodo necessario alla sua stabilizzazione, tramite analisi inverse, è possibile risalire alla conducibilità termica del terreno e alla resistenza termica della sonda.

Se per un tipico SGV queste misurazioni vengono effettuate su un pozzo di prova, per un sistema che sfrutta la tecnologia dei pali energetici, sarebbe ragionevole inserire i tubi scambiatori in un palo di fondazione e procedere al test secondo le stesse modalità operative. L'apparecchiatura utilizzata per la realizzazione del test, mostrata in

figura 42, è composta da una caldaia a condensazione con potenza modulabile, alimentata da bombole di gas metano e collegata alle sonde geotermiche da due raccordi idraulici (uno di mandata e uno di ritorno); tre termometri sul lato sonde di cui due in mandata (uno collegato alla caldaia e uno alla sonda) ed uno in ritorno.

Inoltre sono impiegati un contaltri, un compensatore di portata che permette di modulare la differenza di temperatura del fluido termovettore in entrata/uscita sulla base della presunta ΔT del sistema a regime, lasciando inalterata la potenza termica iniettabile in sonda; un manometro per verificare il corretto funzionamento della caldaia; un datalogger collegato agli strumenti di misura, per la misura in continuo dei valori di temperatura e portata; infine un pc portatile, collegabile al datalogger, per un'analisi in tempo reale dei dati e per lo scarico degli stessi una volta terminato il test.

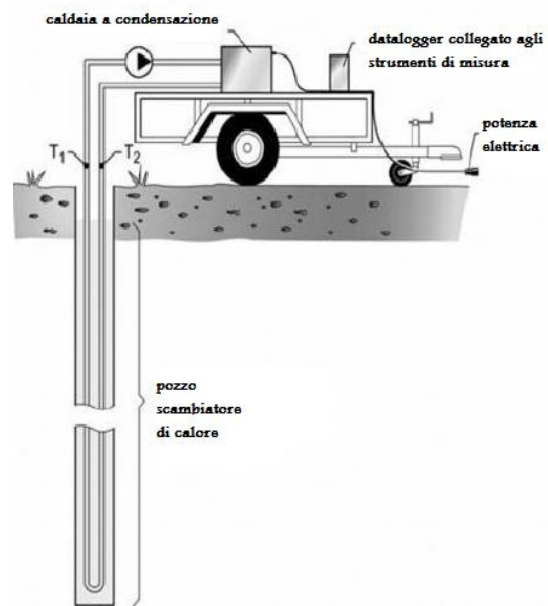


Figura 42. Rappresentazione schematica dell'apparecchiatura utilizzata per realizzare il Test di Risposta Termica.

Oltre a temperatura e portata, sul pc viene visualizzato anche il risultato della potenza termica immessa, che risultata della formula:

$$P = C_p * Q * \Delta T$$

Dove:

P : potenza termica scambiata [Kcal/h]; il valore della potenza termica in kW può essere ottenuto applicando la conversione: 1 kcal/h = 4,187/3600 kW;

C_p : calore specifico [Kcal/(°C*l)], che per l'acqua è circa pari a 1;

Q : portata del fluido termovettore [l/h];

ΔT : differenza tra la temperatura in entrata e la temperatura di ritorno [K].

5. PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI CLIMATIZZAZIONE GEOTERMICO PER UN EDIFICIO UNIFAMILIARE DI NUOVA COSTRUZIONE

5.1 RELAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEL SITO IN ESAME

5.1.1 Premessa

Per valutare la possibilità di realizzare un sistema di climatizzazione con pompa di calore geotermica e pali energetici per un edificio unifamiliare di nuova costruzione, è stato preso in esame un terreno ubicato nel Comune di San Giovanni in Persiceto (BO).

Su tale terreno è stata effettuata da parte della Geo-Net una serie di indagini allo scopo di conoscere e ricostruire i caratteri stratigrafici, litologici, idrogeologici e geomorfologici dell'area. Il modello geologico del sito è stato sviluppato al fine di fornire un elemento di riferimento per la progettazione dei sistemi di fondazione previsti alla base della struttura.

Di seguito si riporta un estratto della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000 (figura 43) e della Carta Geolitologica in scala 1:25000 (figura 44), che indicano la posizione dell'area interessata.



Figura 43. Carta Tecnica Regionale in scala 1:5000.

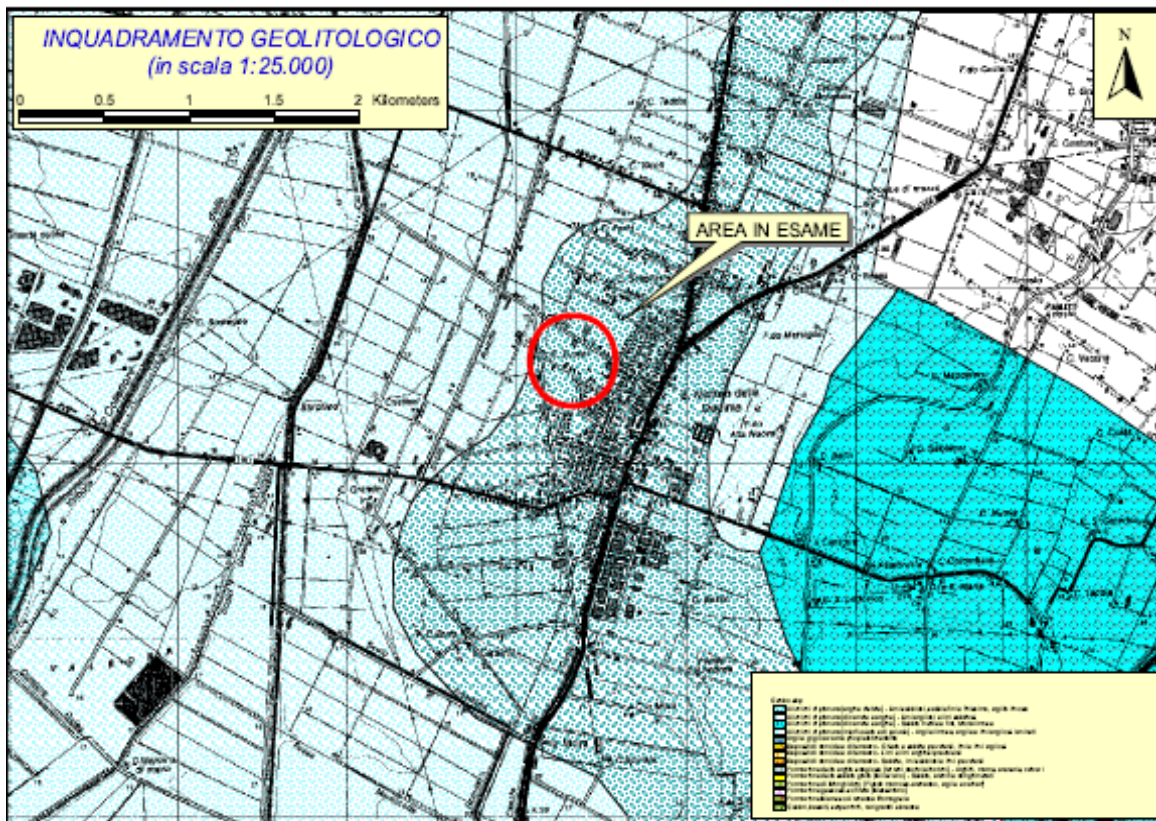


Figura 44. Carta geolitologica in scala 1:25000.

Lo studio è stato svolto mediante la consultazione della cartografia tematica disponibile in letteratura, nonché attraverso un sopralluogo per acquisire direttamente la natura litologica dei terreni, le caratteristiche morfologiche, idrologiche superficiali e sotterranee dell'area; direttamente sul lotto interessato è stata pianificata una serie di indagini geognostiche che ha previsto la realizzazione di due prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT).

Si sono quindi formulate indicazioni in merito agli aspetti geotecnici, in considerazione degli effetti determinati dall'interazione fra la strutture in progetto ed il sottosuolo.

In particolare si riportano i dati ricavati direttamente ed indirettamente sui terreni e le caratteristiche di portanza degli stessi.

5.1.2 Modello geologico del sito:

Caratteri stratigrafici, litologici e morfologici

Il sito in esame si estende ad Ovest dell'abitato di San Matteo della Decima su un'area pianeggiante con debole pendenza verso Nord-Ovest, ad una quota topografica di circa 15 m s.l.m. Come si evince dall'esame dell'estratto della Carta Geologica di Pianura dell'Emilia Romagna in scala 1:25000 mostrata precedentemente, l'area è caratterizzata dalla presenza di terreni sedimentari di origine continentale riferibili a depositi di piana alluvionale ed in particolare di ambiente deposizionale di canale e di argine, nonché di interfluviale e palude.

La litologia della pianura alluvionale è infatti condizionata fortemente dalla disposizione dei principali canali fluviali che, nel periodo precedente agli interventi antropici di regimazione idraulica che hanno portato alla costruzione degli argini artificiali, erano soggetti a frequenti e ripetute tracimazioni delle correnti alluvionali, non essendo in grado di contenere la maggior parte delle piene stagionali.

Le acque fuoriuscite dagli argini inondavano i territori adiacenti e depositavano i materiali in carico con una gradazione dei sedimenti decrescente via via che la capacità di trasporto del flusso diminuiva. In questo modo il fiume costruiva i propri argini naturali all'interno dei quali scorreva pensile sulla piana inondabile; a seguito di eventi eccezionali (deterioramenti climatici) il fiume rompeva gli argini naturali e la corrente alluvionale defluiva verso le aree più depresse dando origine ad una nuova fase di deposizione e a nuovi argini naturali.

Da un punto di vista morfologico i depositi di tali argini naturali costituiscono, pertanto, le aree più elevate della piana alluvionale e

presentano forma allungata secondo l'asse del canale fluviale (con profilo trasversale al canale convesso e pendenza media dell'ordine dello 0,2%).

Da un punto di vista granulometrico i depositi di argine naturale sono caratterizzati, nelle facies più prossimali, da intercalazioni di strati decimetrici di sabbie e sabbie limose con strati limoso-argillosi, mentre le facies distali (come nel caso in questione) sono più frequentemente rappresentate da alternanze di strati limoso-argillosi e argilloso-limosi.

Gli ambienti deposizionali di interfluviale e di palude hanno invece origine nelle parti più depresse della pianura, in aree ubicate a maggiore distanza dai fiumi, nei tratti di alveo o nei meandri abbandonati. I depositi che caratterizzano queste aree, sono perlopiù di natura argillosa e argilloso-limoso. Nella zona indagata non sono presenti fenomeni e caratteri morfologici rilevanti in quanto il sito in oggetto è ubicato in area pianeggiante; non si rilevano particolari forme di erosione, inoltre si esclude la presenza di fenomeni geodinamici a carattere gravitativo.

Idrologia e idrogeologia

L'elemento principale dell'idrologia dell'area indagata è rappresentato dallo scolo Fossetta, che scorre circa 250 m ad Ovest del sito.

La regimazione delle acque superficiali nelle immediate vicinanze dell'area indagata è costituita dalla rete fognaria urbana dell'abitato di San Matteo della Decima e dalla fitta rete di fossi e scoli che costeggiano le strade e le aree interpoderali.

Per quanto concerne il regime idrogeologico del sottosuolo invece, si sottolinea che al termine delle indagini geognostiche effettuate è stata individuata la presenza di una falda idrica sotterranea, soggiacente a profondità comprese tra 0,85 e 1,0 m. dal piano campagna.

Indagini geognostiche

Sull'area è stata pianificata una campagna di indagini geognostiche che ha previsto la realizzazione di due prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT-1 e CPT-2, le quali sono state eseguite ad una quota inferiore pari a 80 e 70 cm. rispetto alla quota 0 di riferimento corrispondente al piano stradale della carreggiata posta a sud del lotto (indicata in rosso nella planimetria dell'edificio in oggetto che viene riportata di seguito in figura 45).

La posizione dei punti in cui sono state eseguite le due prove è ugualmente indicata in rosso.

UBICAZIONE INDAGINI GEOGNOSTICHE - scala 1:200

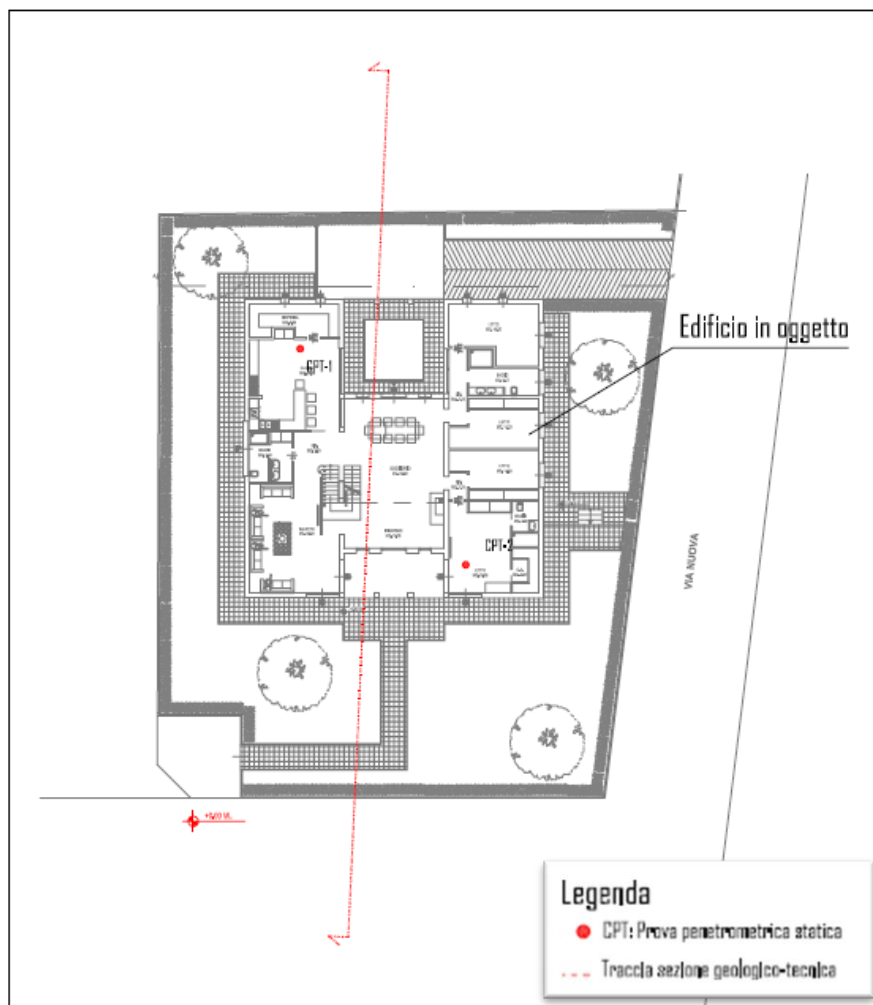


Figura 45. Ubicazione delle indagini geognostiche sulla planimetria dell'edificio in oggetto in scala 1:200.

Per l'esecuzione di tali indagini si è utilizzato un penetrometro semovente Sunda-Pagani da 20 t. con punta meccanica di tipo telescopico con manicotto "punta Begemann" (mostrata in figura 46), dal diametro di base pari a 37,5 mm e angolo di apertura del cono pari a 60°, come da raccomandazioni AGI 1977 e indicazioni internazionali standardizzate. La batteria di aste è composta da una serie di spezzoni di aste cave di lunghezza pari a 1 m e con diametro esterno di 36 mm al cui interno è posta la batteria di astine che permette l'apertura della punta meccanica.

La penetrazione avviene ad una velocità costante pari a 2 cm/sec (con tolleranza $\pm 0,5$ cm/sec), indipendentemente dalla resistenza opposta dal terreno. Il dispositivo di spinta è solidale al terreno mediante un ancoraggio centrale in modo

da non muoversi rispetto al piano di lavoro durante l'immissione. Esso agisce alternativamente sulla batteria di aste interne (consentendo l'avanzamento dapprima della punta e poi del manicotto laterale) e su quella di aste cave esterne (durante tale fase la punta si richiude e torna in posizione iniziale).

Si ottengono in tal modo misure "discontinue", poiché il ciclo di apertura-chiusura avviene ogni 20 cm, che consistono in:

- L_p : spinta necessaria per l'avanzamento della sola punta;
- $L_p + L_l$: spinta per l'avanzamento della punta e del manicotto;

Tramite semplici formule di conversione si ottengono:

- R_p : resistenza alla punta;
- R_l : resistenza per attrito locale sul manicotto;

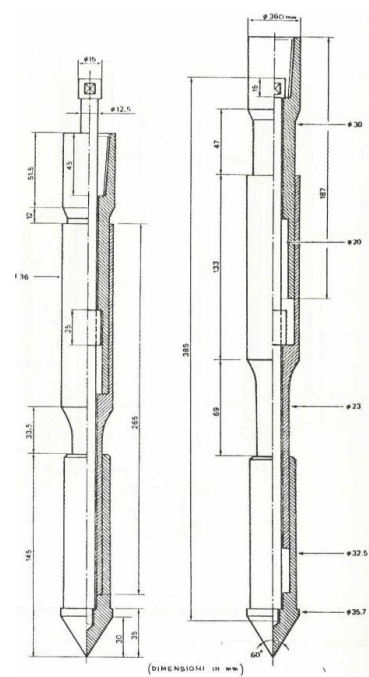


Figura 46. Penetrometro semovente Sunda-Pagani da 20 t. con punta meccanica di tipo telescopico con manicotto "punta Begemann".

Un'indicazione della stratigrafia dei terreni indagati è fornita dal rapporto tra la resistenza all'infissione statica della punta (R_p) e la resistenza per attrito laterale locale (R_l) che il materiale sviluppa sul manicotto della punta meccanica.

Nell'interpretazione quantitativa dei risultati, che consente di determinare le grandezze di alcuni parametri geotecnici dei terreni attraversati mediante formule empiriche, si è tenuto in considerazione che le prove sono assimilabili a prove rapide in condizioni di drenaggio impedito. Pertanto, in terreni coesivi, si ottiene una stima della coesione non drenata C_u . Nei terreni sabbiosi è invece possibile valutare il grado di addensamento e una stima del valore di angolo di attrito.

Le prove CPT si sono spinte fino alla profondità di 10 m. rispetto all'attuale piano campagna, al termine delle quali, nei fori penetrometrici realizzati, è stata misurata, mediante sondino freaticometrico, la soggiacenza della falda idrica sotterranea, risultata pari a 0,85 m rispetto al p.c. in corrispondenza della prova penetrometrica CPT-1 e 1,0 m da p.c. in corrispondenza della prova penetrometrica CPT-2.

Nelle figure 47 e 48 che seguono si mostrano i diagrammi delle resistenze di punta e laterali ottenute attraverso i risultati dalle due prove CPT e l'interpretazione stratigrafica (secondo Schmertmann, 1978) che viene estrapolata da tali risultati.

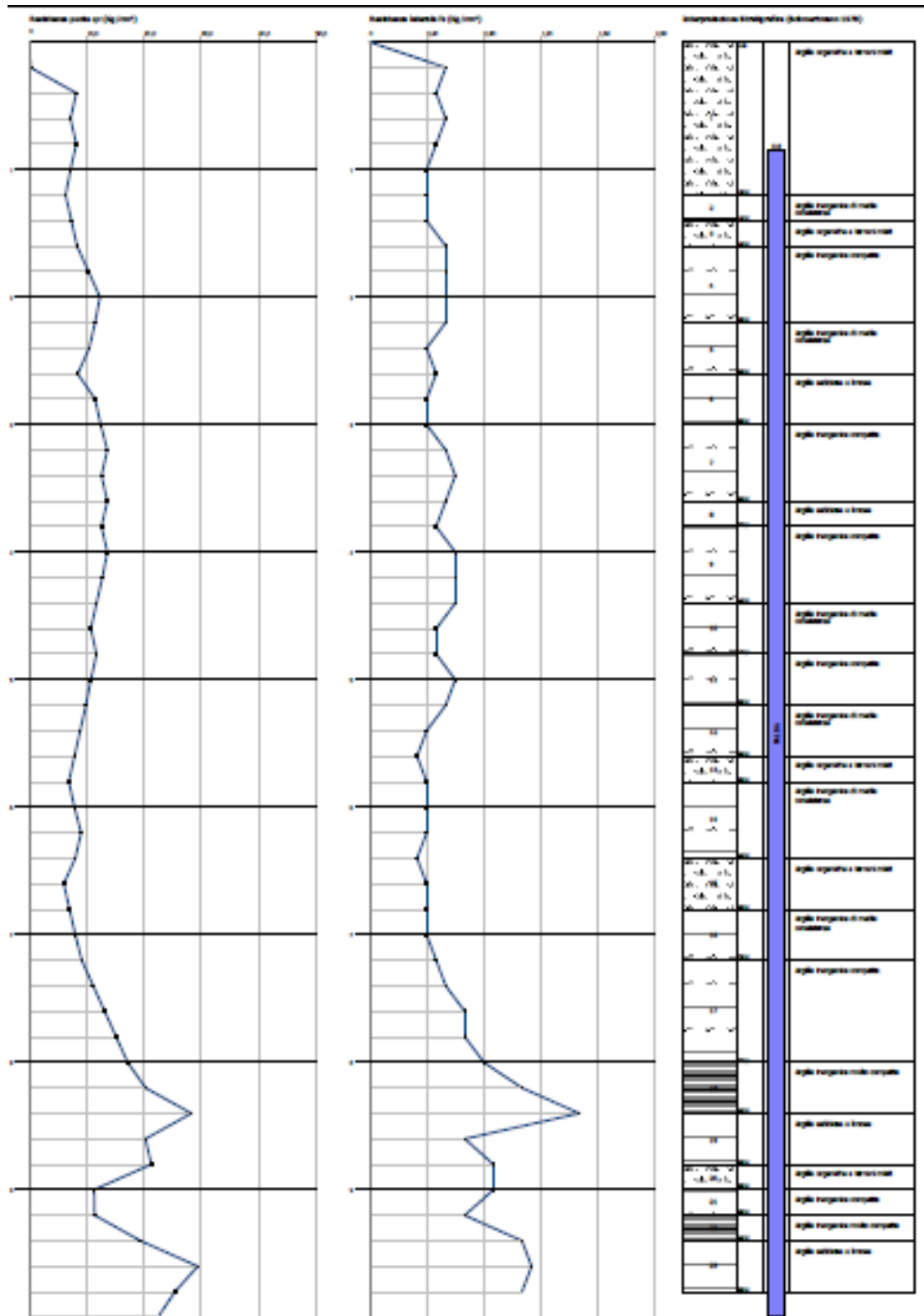


Figura 47. Diagramma delle resistenze di punta e laterali ottenute mediante la prova CPT-1; l'interpretazione stratigrafica che ne deriva è riportata a destra.

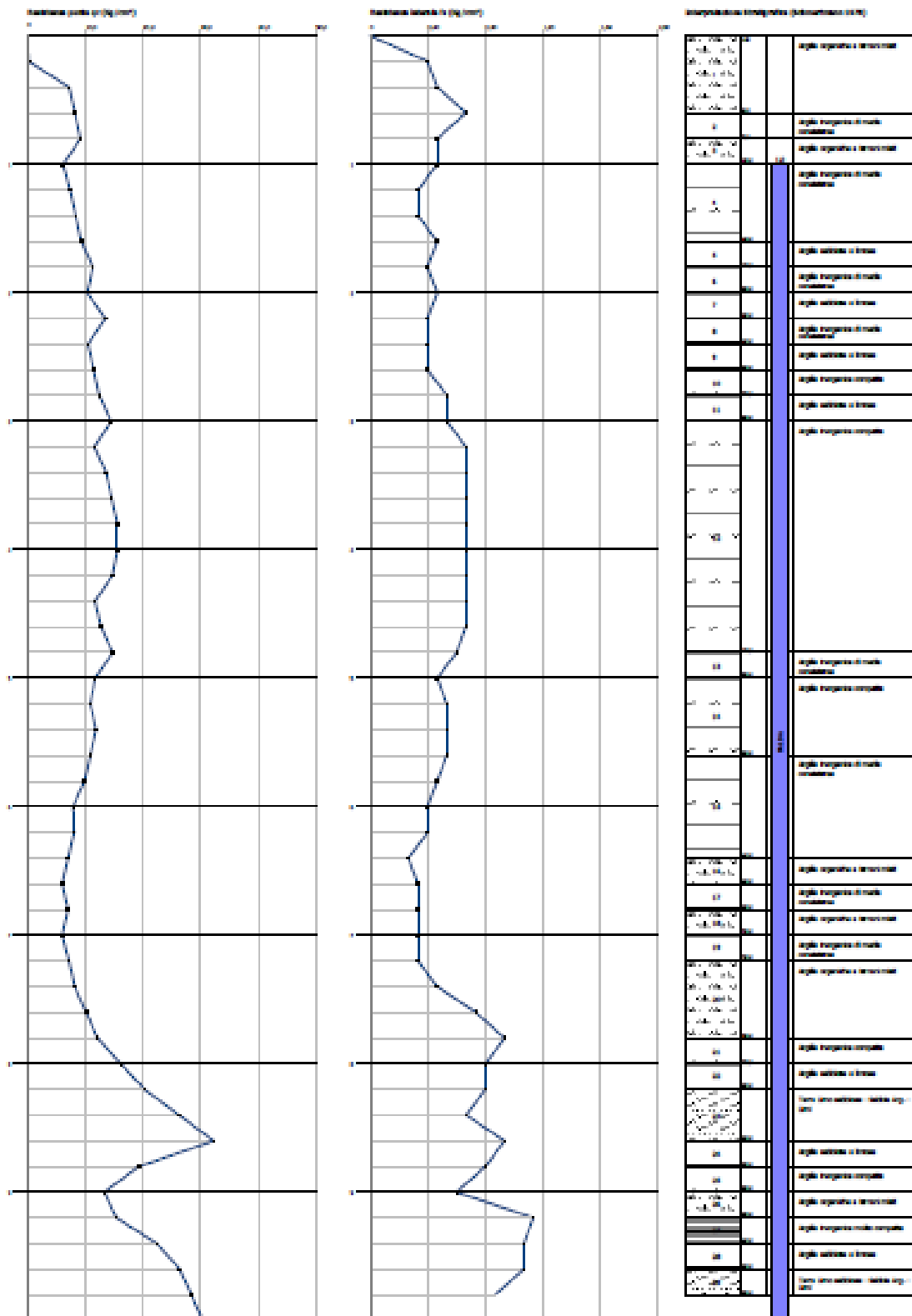


Figura 38. Diagramma delle resistenze di punta e laterali ottenute mediante la prova CPT-2; l'interpretazione stratigrafica che ne deriva è riportata a destra.

5.1.3 Risultati delle indagini e interpretazione litostratigrafia

La successione stratigrafica riconosciuta è costituita da un primo livello di terreno superficiale alterato (**Unità litotecnica A**), che presenta uno spessore compreso tra 0,6 e 0,8 m a cui segue uno spessore di 1,8-2,2 m costituito da argilla limosa con intercalazioni di argilla con sabbia finissima a medio grado di consistenza (**Unità litotecnica B**).

A partire dalla base di questo livello, per spessori compresi tra 3,8 e 5,0 m, la litologia individuata risulta di natura argilloso limosa a grado di consistenza medio (**Unità litotecnica C**). Infine, fino alle massime profondità indagate (10 m da p.c.), è stata riconosciuta un'unità costituita da alternanza di argille limoso-sabbiose a medio/medio-elevato grado di consistenza (**Unità litotecnica D**).

Nel foro penetrometrico realizzato è stata eseguita una misura con sondino freaticometrico, che ha consentito di individuare la presenza di una falda idrica sotterranea soggiacente a profondità comprese tra 0,85 e 1,0 m da p.c. Di seguito si riporta in tabella 6 un riassunto di alcuni parametri geotecnici desunti dalle prove penetrometriche effettuate.

Unità litotecnica	Spessore		Descrizione	Cu (kg/cm ²)	φ' (°)	E _{ed} (kg/cm ²)	γ (t/m ³)
	Min.	Max.					
A	0,6	0,8	Terreno vegetale alterato	-	-	-	1,80-1,85
B	1,8	2,2	Argilla limosa con intercalazioni di argilla con sabbia finissima. Medio grado di consistenza	0,3-0,6	-	35-40	1,80-1,85
C	3,8	5,0	Argilla limosa a medio grado di consistenza	0,4-0,7	-	35-45	1,80-1,85
D	-	-	Alternanza di argille limoso-sabbiose e argille a medio/medio-elevato grado di consistenza	0,5-0,9	-	45-50	1,90-1,95

Tabella 6. Riassunto di alcuni parametri geotecnici desunti dalle prove penetrometriche effettuate, per ogni strato di terreno individuato.

E' possibile riassumere tale successione stratigrafica in una sezione geologico-
 tecnica, che viene mostrata nella figura 49 in scala 1:200.

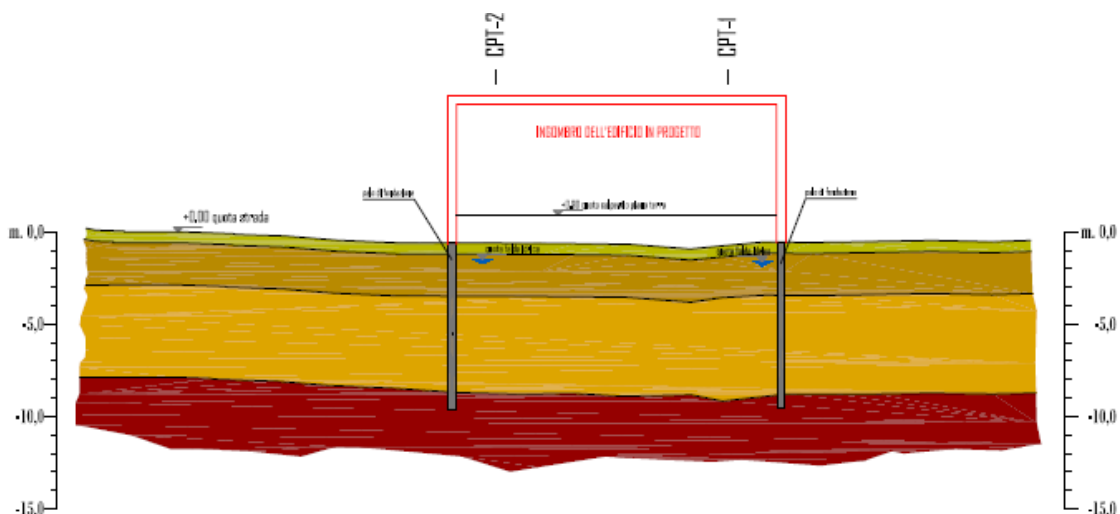
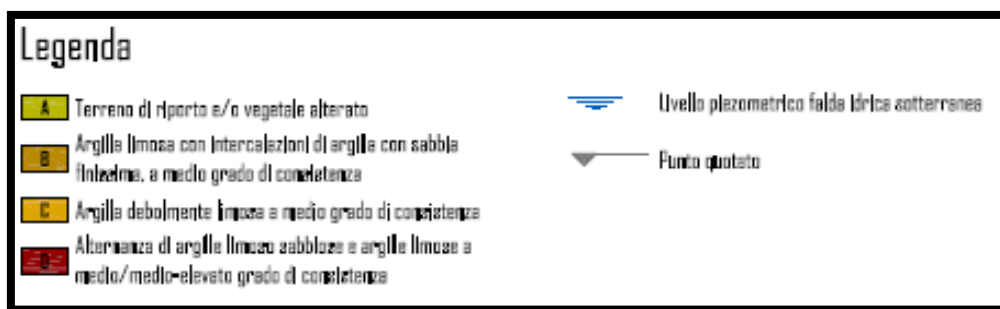


Figura 49. Rappresentazione della successione stratigrafica del terreno in esame.



Il progetto prevede la costruzione di un nuovo edificio residenziale costituito da un piano terra e un primo piano. In virtù del fatto che la quota del piano di calpestio relativo al piano terra è stata fissata a 0,90 m rispetto al riferimento di progetto ed essendo presente, a partire dalla quota del piano di campagna, un primo spessore superficiale costituito da terreno vegetale alterato inadatto dal punto di vista geotecnico per la posa di eventuali fondazioni dirette superficiali, si è ipotizzata la realizzazione di fondazioni profonde su pali trivellati gettati in opera, previa asportazione del terreno.

In sede di realizzazione di tale palificata, data la presenza di una falda idrica sotterranea a una profondità compresa tra 0,85 e 1,0 m e la componente prevalentemente limosa dei litotipi presenti, è consigliabile

prevedere l'utilizzo di rivestimenti per il sostegno delle pareti del foro, onde evitare eventuali franamenti.

5.1.4 Interazione suolo-strutture

Fondazione alla base

La sezione geologico-tecnica che viene riportata in figura 50 rappresenta la fondazione prevista alla base dell'edificio.

SEZIONE GEOLOGICO-TECNICA - scala 1:100

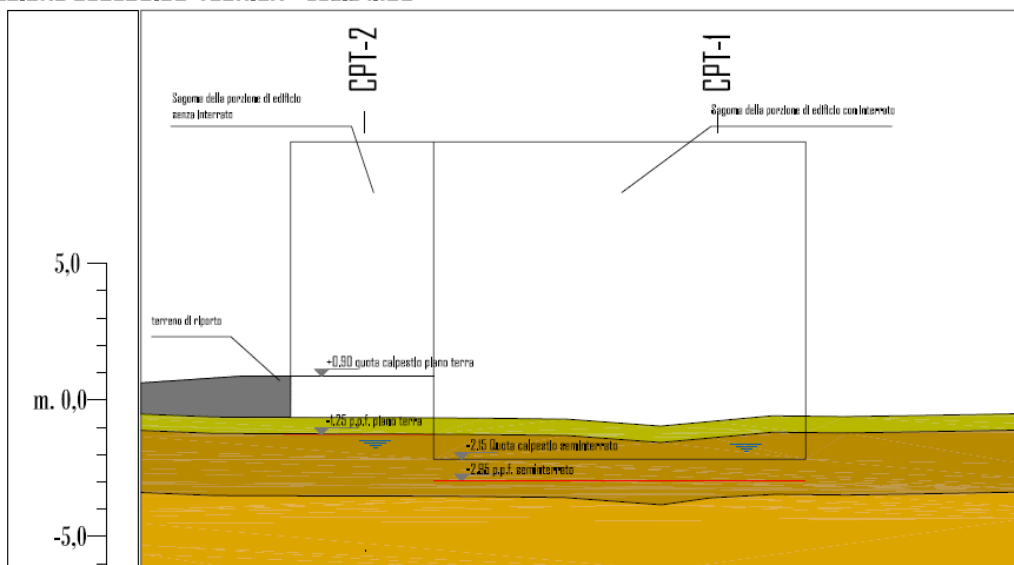
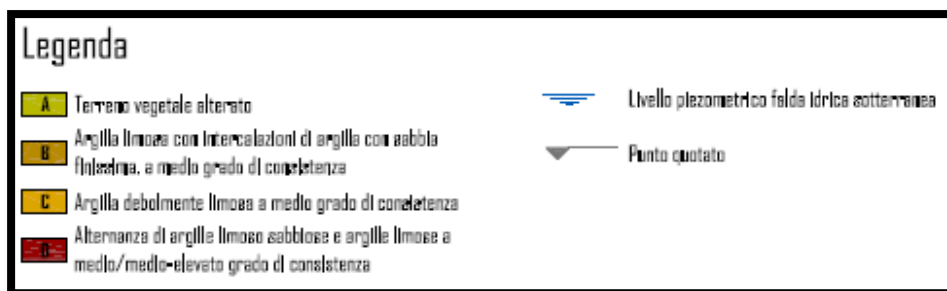


Figura 50. Rappresentazione della fondazione alla base prevista per l'edificio, sulla sezione geologico-tecnica.



Come si può notare, il progetto di tale fondazione prevede una porzione di fabbricato più piccola senza interrato ed una porzione di fabbricato più grande con interrato, nel quale sarà in seguito installata la pompa di calore geotermica in un'apposita stanzetta.

Per quanto riguarda la parte senza interrato, il tipo di fondazione è rappresentato da una platea di dimensioni pari a 5,0x18,0 m e uno spessore di 0,5 m. La profondità del piano di posa è di 0,6 m al di sotto del piano campagna attuale (corrispondente ad una quota pari a circa -1,25 m rispetto alla quota 0,0 della strada). In tal modo i sovraccarichi saranno trasmessi al di sotto dell'unità più superficiale (unità A) costituita da terreno vegetale alterato.

Al termine dello scavo sarà necessario effettuare un sopralluogo da parte dei geologi al fine di verificare l'uniformità delle caratteristiche litologiche e geotecniche dei terreni di fondazione. Qualora fosse necessario, lo scavo dovrà essere approfondito e la quota di imposta originale dovrà essere ripristinata mediante la posa in opera di un adeguato spessore di magrone o di materiale inerte stabilizzato e compattato.

Il carico ammissibile, ottenuto ipotizzando una condizione non drenata in ragione della natura coesiva dei terreni, è stato opportunamente ridotto al fine di contenere i cedimenti attesi entro valori compatibili con il tipo di fondazione ipotizzata (5-6 cm). Dovrà essere considerato un carico uniformemente distribuito sulla platea di fondazione pari a 0,45 Kg/cm²; applicando tale carico è stato stimato indicativamente un valore di cedimento atteso a centro platea pari a 4,92 cm.

Vista la presenza di un battente idrico sotterraneo ubicato alla profondità di 1,0 m rispetto alla quota di realizzazione della prova penetrometrica CPT-2 (pari a circa -0,49 m rispetto alla quota 0,0 della strada), sarà quindi necessario dotare le strutture di fondazione di adeguati sistemi di impermeabilizzazione e di abbattimento del livello piezometrico della falda.

Per la porzione di fabbricato dotata di interrato invece, il tipo di fondazione alla base è rappresentata da una platea di dimensioni pari a 13,5x13,5 m e spessore di 0,5 m.

Considerando che il piano di calpestio del piano interrato sarà posizionato ad una quota di m -2,15 (come da progetto) e che il pacchetto delle fondazioni sarà caratterizzato da uno spessore pari a m 0,8 (su indicazione del progettista), i carichi saranno dunque trasmessi ad una quota pari a -2,95 m rispetto allo 0,0 (quota strada).

In questo caso si considera un carico uniformemente distribuito sulla platea di fondazione pari a $0,5 \text{ Kg/cm}^2$; la cui applicazione comporta un valore indicativo di cedimento a centro platea di 5,28 cm.

La presenza di un battente idrico sotterraneo ubicato ad una profondità pari a 0,85 m rispetto alla quota di realizzazione della prova penetrometrica CPT-1 (pari a circa -0,76 rispetto allo 0,0 della quota strada), implicherà la necessità di dotare le strutture di fondazione di adeguati sistemi di impermeabilizzazione e di abbattimento del livello piezometrico della falda anche in questa circostanza.

Pali di fondazione

Per le fasi di calcolo viene fatto riferimento alla seguente normativa:

- **Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 20/3/2003** : primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- **Norme tecniche per le costruzioni** : documento con gli allegati relativi alla Pericolosità sismica trasmesso per la discussione in sede di Conferenza Unificata del 20 dicembre 2007 - versione del 18/12/2007 (versione aggiornata rispetto a quella approvata dal Cons. Sup.LL.PP. con Voto n°74 del 27.07.2007)

- **Eurocodice 7:** Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- **Eurocodice 8:** Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

La realizzazione di un palo, sia esso infisso o trivellato, comporta sempre un disturbo nel terreno circostante, con conseguente alterazione dello stato tensionale; per questo motivo si propone di assumere un angolo di resistenza al taglio pari a:

$\phi' = 3\phi + 10$ nei pali infissi e $\phi' = \phi - 3^\circ$ nei pali trivellati; dove ϕ è l'angolo di resistenza al taglio prima dell'esecuzione del palo.

Per stimare la capacità portante per carico verticale di un palo di fondazione si fa riferimento allo schema mostrato in figura 51.

Il palo è un corpo cilindrico che oppone resistenza alla penetrazione nel terreno mediante tensioni tangenziali di attrito e/o di aderenza sulla superficie laterale (Q_s) e tensioni di compressione alla base (Q_p). Le tensioni tangenziali si sviluppano per uno scorrimento relativo tra la superficie laterale del palo e il terreno circostante, in parte dovuto alla traslazione rigida e in parte alla compressione assiale del palo. Le tensioni di compressione alla base invece si sviluppano per un cedimento della base. Se viene applicato un carico verticale progressivamente crescente alla sommità del palo, inizialmente (ovvero se il carico è piccolo), l'equilibrio è garantito solo da tensioni tangenziali nella parte superiore del palo; in seguito, al crescere dell'intensità della forza, la deformazione del palo si propaga verso il basso

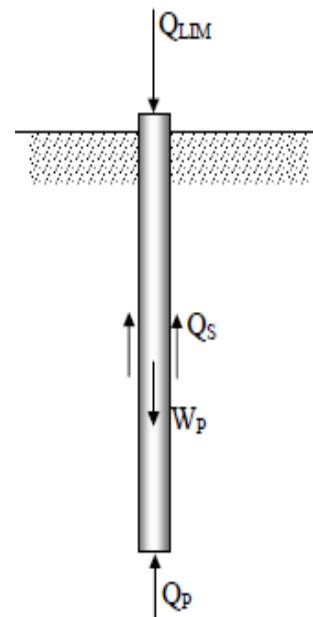


Figura 51. Schema per il calcolo della capacità portante di un palo isolato.

e iniziano i cedimenti in prossimità della sua base. Oltre un certo valore del carico gli scorrimenti relativi tra la superficie laterale del palo e il terreno circostante sono tali da avere prodotto la completa mobilitazione delle tensioni tangenziali d'interfaccia, mentre vi è ancora un margine di crescita delle tensioni di compressione alla base, fino alle condizioni di equilibrio limite.

La forza Q_S è la risultante delle tensioni di attrito e/o di aderenza, le quali dipendono dall'interazione tra la superficie laterale del palo e un determinato spessore di terreno deformato. La forza Q_P invece è la risultante delle tensioni di compressione alla base del palo, le quali dipendono da un volume di terreno deformato, che si estende al di sopra e al di sotto della base del palo e le cui dimensioni sono funzione del diametro del palo. In pratica la completa mobilitazione della resistenza laterale (Q_S) si ha per spostamenti del palo di 6-10 mm indipendentemente dal diametro, mentre la completa mobilitazione della resistenza di punta (Q_P) si ha per spostamenti pari a circa l'8% del diametro per pali infissi e pari a circa il 25% del diametro per pali trivellati.

La capacità portante per carico verticale di un palo può essere valutata:

- con formule statiche,
- con formule dinamiche,
- dai risultati di prove penetrometriche statiche e dinamiche,
- dai risultati di prove di carico.

Stima della capacità portante per carico verticale di un palo mediante formule statiche

La stima della capacità portante per carico verticale di un palo Q_{LIM} mediante formule statiche è ottenuta valutando i valori massimi

mobilizzabili della resistenza laterale Q_S e di quella di punta Q_P , in condizioni di equilibrio limite:

$$Q_{LIM} + W_P = Q_S + Q_P$$

essendo W_P il peso proprio del palo ($V_{palo} * \gamma_{cemento} = (H_{palo} * L_{tot}) * \gamma_{cemento}$).

Si fanno le seguenti ipotesi:

- il carico limite del sistema palo-terreno è condizionato dalla resistenza del terreno e non da quella del palo;
- il palo è un corpo cilindrico rigido;
- i termini di capacità portante per attrito e/o aderenza laterale Q_S e di capacità portante di punta Q_P non si influenzano reciprocamente e possono essere determinati separatamente.

Per semplicità di esposizione si farà riferimento ad un terreno coesivo di fondazione omogeneo; in realtà un palo di fondazione attraversa spesso strati di diversa natura o comunque con proprietà geotecniche variabili con la profondità, per cui la capacità portante dovrà essere valutata per sommatoria dei contributi dei differenti strati.

Stima della resistenza di punta Q_P

In genere il termine di capacità portante di punta Q_P di pali in un terreno coesivo contribuisce in maniera modesta (10% - 20%) alla capacità portante totale. Per la stima di Q_P si esegue un'analisi in condizioni non drenate, in termini di tensioni totali. L'equazione di riferimento (Formula di Terzaghi) è formalmente identica a quella della capacità portante di fondazioni superficiali su terreno coesivo in condizioni non drenate:

$$Q_P = A_P * q_P = A_P * (c_u * N_c + \sigma_{v0,P})$$

In cui A_P è l'area di base del palo $\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)$, q_P è la capacità portante unitaria, c_u è la resistenza al taglio in condizioni non drenate del terreno alla profondità della base del palo, $\sigma_{v0,P}$ ($\sigma' + u$) è la tensione verticale totale alla punta, e N_c è un fattore di capacità portante, il cui valore è assunto pari a 9 (proposto da Skempton).

Molto spesso il peso del palo W_P e il termine $A_P * \sigma_{v0,P}$ sono trascurati, poiché quasi si compensano, e si pone:

$$Q_{LIM} = Q_S + Q_P$$

$$Q_P = 9 c_u * A_P$$

In terreni coesivi sovraconsolidati, e quindi spesso fessurati, è opportuno introdurre un fattore di riduzione R_C che, secondo Meyerhof, per pali trivellati può essere calcolato nel modo seguente, in funzione del diametro D del palo (in metri):

$$R_C = \frac{D+1}{2D+1} \leq 1$$

Stima della resistenza per attrito Q_S

La capacità portante per aderenza e/o per attrito laterale per un palo di diametro D e lunghezza L è per definizione:

$$Q_S = \pi D \int_0^L \tau_S dz$$

Le tensioni tangenziali limite di attrito e/o di aderenza laterale all'interfaccia tra la superficie del palo e il terreno coesivo saturo circostante, τ_S , sono molto difficili da valutare analiticamente, poiché dipendono dal grado di disturbo e dall'alterazione delle pressioni efficaci e interstiziali che le modalità di costruzione del palo producono nel terreno. Sul piano qualitativo il fenomeno è abbastanza chiaro, ma per una valutazione quantitativa è necessario ricorrere a semplificazioni drastiche e

ad una buona dose di empirismo. I metodi attualmente più utilizzati sono due, il *metodo* α e il *metodo* β . È buona norma assumere come capacità portante per attrito e/o aderenza laterale di progetto il minore dei due valori stimati.

Metodo α

Si assume che le tensioni tangenziali limite siano una quota parte della resistenza al taglio non drenata originaria del terreno indisturbato:

$$\tau_s = \alpha * c_u$$

in cui α è un coefficiente empirico di aderenza che dipende dal tipo di terreno, dalla resistenza al taglio non drenata del terreno indisturbato, dal metodo di costruzione del palo, dal tempo, dalla profondità e dal cedimento del palo. L'Associazione Geotecnica Italiana suggerisce di assumere per i pali trivellati in terreni coesivi saturi, i valori del coefficiente α riportati in tabella 7:

c_u (kPa)	α
≤ 25	0,90
25 – 50	0,80
50 – 75	0,60
> 75	0,40

Tabella 7. Valori indicativi del coefficiente di aderenza α per pali trivellati in terreni coesivi saturi.

Metodo β

Si assume che le sovrappressioni interstiziali che si generano durante la messa in opera del palo si siano dissipate al momento di applicazione del carico e che pertanto la tensione tangenziale limite possa essere valutata, con riferimento alle tensioni efficaci, nel modo seguente:

$$\tau_s = \sigma'_h * \tan \delta = K * \sigma'_{v0} * \tan \delta = \beta * \sigma'_{v0}$$

In cui:

σ'_h : tensione efficace orizzontale nel terreno a contatto con il palo;

σ'_{v0} : tensione efficace verticale iniziale, prima della messa in opera del palo;

K : coefficiente di spinta, rapporto fra σ'_h e σ'_{v0} ;

$\tan \delta$: coefficiente d'attrito palo-terreno, che dipende dalla rugosità del palo;

β : coefficiente, pari al prodotto $K * \tan \delta$.

Se l'angolo di attrito palo-terreno δ , fosse eguale all'angolo di resistenza al taglio del terreno ϕ' , e se l'installazione del palo non producesse alterazioni nello stato tensionale del terreno, si avrebbe:

$$K = K_0 \approx (1 - \sin \phi') * OCR^{0.5}$$

$$\tan \delta = \tan \phi$$

Per terreni coesivi l'angolo di resistenza al taglio ϕ' è generalmente compreso tra 20° e 30° ; per cui, per un terreno NC (normal consolidato), si otterrebbero valori di β compresi tra 0,24 e 0,29.

Per pali trivellati in terreni coesivi normalmente consolidati si può fare riferimento, come valore di progetto, a $\beta = 0,25$; mentre in terreni coesivi OC (sovra consolidati) si può fare riferimento a $\beta = 0,8$.

Tornando al caso in esame, ai fini dei calcoli della portata unitaria di ogni palo, si sono considerate diverse condizioni, ipotizzando un palo di lunghezza pari a 7,0 m (in alternativa 8,0 e 9,0 m) e diametro di 0,40 m (in alternativa 0,50 e 0,60 m).

Non è stato considerato il contributo alla resistenza dei terreni riconducibili all'Unità litotecnica A.

Ai valori di carico limite di punta e di carico limite laterale, ottenuti da Geo-Net mediante il Software Geostru MP 2009, ipotizzando una condizione non drenata in virtù della natura prevalentemente coesiva dei terreni indagati, è stato applicato un coefficiente di sicurezza pari a 2,5.

Nella tabella 8 sono riportati i valori dei carichi limite ottenuti nelle condizioni sopra descritte:

Diametro (m)	Lunghezza (m)	Nq	Nc	Carico limite punta (kg)	Carico limite laterale (kg)	Carico limite (kg)	Carico ammissibile punta (kg)	Carico ammissibile laterale (kg)	Carico ammissibile (kg)
0,40	7,00	1,00	9,00	7248,32	25355,80	30405,01	2899,33	10142,32	10842,53
0,40	8,00	1,00	9,00	6425,92	31622,21	35534,86	2570,37	12648,88	12705,98
0,40	9,00	2,61	4,65	11186,32	39192,05	47550,94	4474,53	15676,82	17323,91
0,50	7,00	1,00	9,00	11325,50	31694,76	39584,13	4530,20	12677,90	13771,98
0,50	8,00	1,00	9,00	10040,51	39527,76	45641,28	4016,20	15811,10	15900,32
0,50	9,00	2,75	5,06	18727,89	48990,05	63300,08	7491,16	19596,02	22669,31
0,60	7,00	1,00	9,00	16308,71	38033,71	49394,41	6523,49	15213,48	16788,96
0,60	8,00	1,00	9,00	14458,33	47433,32	56236,78	5783,33	18973,33	19101,79
0,60	9,00	2,88	5,42	28517,06	58788,07	80943,41	11406,83	23515,23	28560,33

Tabella 8. Valori dei carichi limite ottenuti nelle condizioni sopra descritte.

6. ANALISI TECNICO-ECONOMICO FINANZIARIA

6.1 Dimensionamento statico dei pali

I carichi dell'edificio, secondo una stima di massima, si aggirano intorno ai 3000 kg/m^2 , considerando 300 kg/m^2 per il tetto, 1000 kg/m^2 per il primo piano e il piano terra e 700 kg/m^2 per il seminterrato.

La base dell'edificio è di $18 \times 18 \text{ m}$; è ragionevole pensare di suddividere tale superficie in maglie da $6 \times 6 \text{ m}$, con una soletta spessa 35 cm ($30+5 \text{ cm}$), ottenendo così 16 pali (uno per ogni angolo della maglia) e considerare un diametro di $0,6 \text{ m}$.

Il carico su ogni maglia risulterà:

$$3000 \text{ kg/m}^2 * 36 \text{ m}^2 = 108000 \text{ kg.}$$

Di norma i pali centrali si faranno carico di tutto il peso gravante sulla maglia (108000 kg), quelli posti negli angoli ne prenderanno un quarto (27000 kg), mentre quelli esterni la metà (54000 kg). Per avere un'idea di quanto appena detto si rimanda alla rappresentazione grafica della base dell'edificio di figura 52.

Facendo un'interpolazione dei dati delle varie lunghezze dei pali ($7,8$ e 9 m) e dei relativi carichi ammissibili, che sono riportati in tabella 8, trovo il valore del carico ammissibile per una lunghezza del palo di 12 m . Questo valore trovato ($47700,8 \text{ kg}$) però risulta inferiore al valore del carico che effettivamente si verifica sul palo centrale.

Di conseguenza si potrebbe pensare di rendere più fitta la palificata diminuendo la spaziatura tra i pali. Prendiamo dunque una distanza media

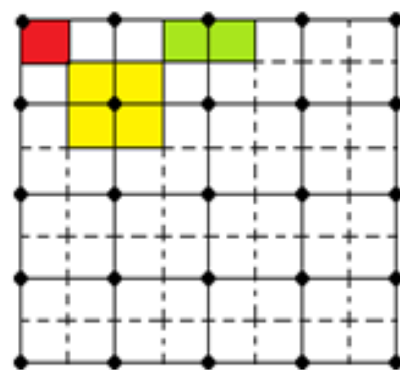


Figura 42. Rappresentazione schematica della planimetria dell'edificio suddivisa in maglie di $4,5 \text{ m}$.

di 4,5 m; in questo modo otterremo delle maglie di 20,25 m² per un numero complessivo di pali pari a 25. La soletta potrà così essere considerata dello spessore di 30 cm (25+5cm).

In questo caso avremo un carico su tale maglia pari a:

$$3000 \text{ kg/m}^2 * 20,25 \text{ m}^2 = 60750 \text{ kg.}$$

Vale lo stesso ragionamento di prima:

- i pali centrali prendono tutto il carico (60750 kg);
- i pali agli angoli ne prendono un quarto (15187,5 kg);
- i pali laterali la metà (30375 kg).

Faccio ancora un'interpolazione dei dati delle varie lunghezze dei pali e dei relativi carichi ammissibili e trovo il valore per una lunghezza del palo di 12 m; che risulta di 99816,6 kg. In questo modo il dimensionamento statico risulterebbe ampiamente soddisfatto. C'è da considerare però il fatto che un interasse di 4,5 m può causare un effetto negativo in termini di interferenza tra pali troppo vicini tra di loro. Spesso infatti conviene fare delle valutazioni differenti come ipotizzare di eseguire pali più profondi invece che aumentarne il numero, cosa che comporta un beneficio in quanto permette di aumentare il contributo della portanza laterale del palo.

Dunque ipotizzando di mantenere i 16 pali, proviamo a vedere se aumentandone la lunghezza il carico totale ammissibile risulta soddisfatto.

Il carico su ogni maglia è sempre di 108000 kg (maglia 6x6m); per una lunghezza di 14 m, il carico ammissibile risulta di 183029,9 kg, dunque per le fondamenta di tale villetta unifamiliare si può affermare che realizzando 16 pali da 14 m di lunghezza equamente distanziati tra loro di 6 m, il dimensionamento statico risulta garantito.

Adesso occorre passare al dimensionamento energetico dei pali, ovvero si procede nel verificare se, equipaggiando questi pali con tubi scambiatori di calore, il fabbisogno energetico annuo dell'edificio (15,75 MWh per il riscaldamento e 11,4 MWh per il raffreddamento) risulta soddisfatto,

altrimenti sarà necessario ricorrere ad una soluzione alternativa dell'impianto geotermico.

6.2 Dimensionamento energetico dei pali

Nel dettaglio, le caratteristiche principali dell'edificio ai fini dello studio sono:

- superfici da climatizzare: 285 m²;
- classe energetica edificio: B (fabbisogno energetico unitario annuo \leq 50 kWh/m²);
- potenza termica di picco per riscaldamento: 12 kW;
- ore annue di utilizzo in riscaldamento (stima): 2160 h (per la zona climatica E, le ore giornaliere in cui è consentita l'accensione degli impianti di riscaldamento è pari a 14 (D.L. 26/08/93 n°412); che diminuiscono per un edificio di classe B);
- COP della pompa di calore in riscaldamento: 4,5;
- Produzione acqua calda sanitaria con pompa di calore prevista;
- Tipologia impianto interno di riscaldamento/raffrescamento: pannelli radianti;
- Tipologia impianto geotermico di raffrescamento: active cooling;
- Potenza frigorifera di picco raffrescamento: 10 kW;
- EER della pompa di calore in raffrescamento: 5;
- Ore annue di utilizzo in raffrescamento (stima): 1080 h.

Stima dei fabbisogni annui (caldo/freddo):

Fabbisogno totale annuo di riscaldamento = $285 \text{ m}^2 * 50 \text{ kWh/m}^2 = 14250 \text{ kWh}$;

Fabbisogno totale annuo di acqua calda sanitaria = 1500 kWh;

Fabbisogno totale annuo di raffrescamento (solitamente 15-20% in meno del fabbisogno di riscaldamento) = $14250 \text{ kWh} - 2850 \text{ kWh} = 11400 \text{ kWh}$.

L'edificio unifamiliare in oggetto è disposto su due livelli e prevede una porzione di interrato, per una superficie totale da riscaldare di 285 m^2 ; anche il fabbisogno di acqua calda sanitaria è preso in considerazione. Attraverso la realizzazione di opportune coibentazioni, la casa risulterà classificata in classe B (ai sensi del decreto attuativo sulla certificazione energetica degli edifici in vigore dai primi di Luglio del 2009).

Il terreno sul quale poggia è di origine alluvionale, dunque di natura prevalentemente argillosa-limosa (con una conducibilità termica media di circa $2 \text{ W/m}^*\text{K}$) come riscontrato dalle prove penetrometriche effettuate fino alla profondità di 10 m circa; inoltre è stata verificata la presenza di un livello di falda superficiale a circa un metro dal piano campagna, dunque il terreno di edificazione risulta umido.

Di conseguenza come potenza di estrazione si considera un valore pari a 30 W/m , puramente indicativo in quanto nei primi metri di palo, la temperatura del terreno non è molto alta e risente delle fluttuazioni termiche climatiche; quindi in quei metri la potenza estraibile sarà inevitabilmente minore. Come potenza di iniezione si prende invece un valore pari a 40 W/m (la capacità di stoccaggio di calore di un terreno è su valori dell'ordine del 30-40% in più rispetto alla sua capacità di cedere calore). Questi valori sono stati estrapolati dalla tabella (9) della linea guida tedesca VDI 4640 riportata di seguito.

Sottosuolo	Potenza estraibile specifica (W/m di sonda)	
	per 1800 h/anno	per 2400 h/anno
Valori indicativi generali:		
Fondo cattivo con sedimenti secchi ($\lambda < 1,5$ W/m/K)	25	20
Fondo normale con roccia solida e sedimenti saturi d'acqua ($\lambda = 1,5-3,0$ W/m/K)	60	50
Roccia solida ad alta conduttività termica ($\lambda < 3,0$ W/m/K)	84	70
Terreni omogenei:		
Ghiaia, sabbia (secchi)	<25	<20
Ghiaia, sabbia (acquiferi)	65-80	55-85
Forte acqua di falda in ghiaia e sabbia (impianti singoli)	80-100	80-100
Argilla, creta, limo (umidi)	35-50	30-40
Pietra calcarea massiccia	55-70	45-60
Pietra arenaria	65-80	55-65
Magmatite acida (granito)	65-85	55-70
Magmatite basica (basalto)	40-65	35-55
Gneis	70-85	60-70
I valori possono subire variazioni anche consistenti per effetto della tipologia della formazione rocciosa come fessurazione, scistosità, erosione.		

Tabella 9. Potenze termiche estraibili a seconda del tipo di terreno e delle ore di utilizzo dell'impianto (fonte VDI 4640).

La pompa di calore scelta è di taglia media e fornisce 12 kW di potenza termica di picco e 10 kW di potenza frigorifera di picco. La potenza termica da prelevare dal terreno in riscaldamento sarà dunque:

$$12 \text{ kW} - (12/4,5) \text{ kW} = 9,34 \text{ kW (ovvero } P_{\text{terreno}} = P_{\text{utenze}} - P_{\text{elettrica}}),$$

mentre quella da iniettare nel terreno in raffreddamento sarà pari a:

$$10 \text{ kW} + (10/5) \text{ kW} = 12 \text{ kW (ovvero } P_{\text{terreno}} = P_{\text{utenze}} + P_{\text{elettrica}}).$$

In linea teorica il palo scambia una potenza termica massima di $30 \text{ W/m} * 14 \text{ m} = 420 \text{ W}$; che moltiplicata per il numero dei pali dà un valore totale di $6720 \text{ W} = 6,72 \text{ kW}$ (in riscaldamento). In modalità raffreddamento invece riesce a scambiare una potenza pari a $40 \text{ W/m} * 14 \text{ m} = 560 \text{ W}$; per un totale di $8960 \text{ W} = 8,96 \text{ kW}$.

Confrontando i risultati si può affermare che con una tale configurazione dei pali le richieste energetiche della pompa di calore e di conseguenza dell'edificio non risultano soddisfatte. Infatti, equipaggiando i 16 pali di fondazione di 14 m di lunghezza con le sonde geotermiche, avremo un deficit energetico di 2,62 kW in riscaldamento e 3,04 kW in raffreddamento.

Dunque a questo punto le opzioni progettuali praticabili per sopperire al deficit energetico sono due:

1. Aumentare la lunghezza dei pali;
2. Integrare il sistema di pali energetici con una soluzione SGV.

In entrambi i casi dovremo rivalutare i costi iniziali dell'impianto geotermico.

IPOTESI 1

Manteniamo il numero di pali pari a 16, che risultano compatibili con il dimensionamento statico dell'edificio, e ne portiamo la lunghezza da 14 a 20 m. In questo modo otterremo una potenza termica massima di 9,6 kW in riscaldamento e 12,8 kW in raffreddamento; dei valori soddisfacenti per coprire il fabbisogno energetico.

IPOTESI 2

Il numero di pali è mantenuto costante e la lunghezza considerata di 14 m; in questo modo, come abbiamo potuto notare, si verifica un deficit energetico di 2,62 kW in riscaldamento e 3,04 kW in raffreddamento. Dividendo questi due valori per le potenze termiche di estrazione/iniezione del pozzo, che risultano più elevate rispetto a quelle dei pali in quanto si raggiungono profondità maggiori, si ottiene una lunghezza utile delle sonde rispettivamente di 58,3 m (2620 W/45 W/m) e di 52 m (3040 W/58,5 W/m). Si potrebbe dunque sopperire al deficit realizzando un pozzo di 80 m nel giardino di competenza.

IPOTESI SGV

Se invece dei pali energetici avessimo voluto utilizzare delle **sonde geotermiche verticali**, che hanno una resa termica maggiore ovvero di 45 W/m in riscaldamento e di 58,5 W/m in raffreddamento (sempre il 30% in più), avremmo dovuto calcolare la lunghezza delle sonde necessaria per entrambe le modalità di climatizzazione e in base al più grande valore trovato, stimare il numero di pozzi da realizzare.

La lunghezza delle sonde utile per il riscaldamento si ricava dividendo la potenza termica massima di estrazione dal terreno (9,34 kW = 9340 W) per la resa termica del terreno (45 W/m); in questo caso si otterrà un valore di 207,41 m, mentre per quanto riguarda la stima della lunghezza delle sonde per il raffreddamento risulterà un valore pari a 205,13 m.

In base a questi risultati è plausibile ipotizzare la realizzazione di tre SGV, ciascuna da 90 m di profondità, per un totale di 270 m di perforazione; due pozzi scambiatori non garantirebbero il soddisfacimento del fabbisogno termico.

Si riportano di seguito i costi d'installazione iniziali e i costi d'esercizio di tre possibili soluzioni impiantistiche:

1. pompa di calore geotermica accoppiata a pali energetici;
2. pompa di calore geotermica accoppiata ad SGV;
3. caldaia a gas del tipo a condensazione, unita a refrigeratori condensati ad aria.

L'analisi di questi costi ci servirà come strumento per vedere in quanto tempo l'impianto si ripaga. Per l'ipotesi 1, dato che da sola non riesce a soddisfare il fabbisogno energetico, si considererà quella meno dispendiosa tra le due soluzioni modificate che abbiamo appena citato.

6.3 Analisi costi-benefici

Al fine di quantificare i costi complessivi di un impianto geotermico che usufruisce della tecnologia dei pali energetici, occorre definire i costi di installazione e di esercizio e considerare anche gli sgravi fiscali previsti dalla finanziaria per questo tipo di interventi ad alto risparmio energetico.

Per quanto riguarda i costi di installazione, non dovendosi sostenere gli oneri non indifferenti di perforazione dei pozzi per l'installazione delle sonde geotermiche verticali (tipicamente di 100 m), che variano dai 50 ai 65 €/m a seconda della difficoltà del terreno da perforare, essi risultano nulli o comunque irrisori dato che sono limitati al costo della macchina e delle apparecchiature ausiliarie.

Le sonde sono realizzate in PE ed hanno costi variabili a seconda dell'efficienza di scambio termico, della resistenza e del diametro; all'aumentare della lunghezza, il prezzo al metro ovviamente diminuisce (si stima intorno a 0,5 €/m). Il piede di sonda con il raccordo a U, solitamente incrementa il prezzo delle sonde, ma i pali energetici non ne risultano muniti dal momento che i tubi sono ancorati internamente alle armature del palo. A tale valore, va aggiunto il costo della manodopera per l'inserimento della sonda solidale all'armatura, nel foro del palo di fondazione, che si aggira intorno ai 150 €/pezzo.

Per quanto riguarda l'impiantistica, il prezzo della pompa di calore non si discosta molto dal prezzo di una caldaia a condensazione; inoltre utilizzando un sistema di erogazione a pannelli radianti per entrambi (45-55 €/m²), i costi sono comparabili. Per entrambe le macchine, i prezzi variano a seconda della potenza richiesta. La scelta di un sistema di erogazione del calore a pannelli radianti è quasi obbligata per un impianto geotermico in quanto le temperature di mandata del fluido dalla pompa di calore sono troppo basse per il sistema a radiatori, che necessita di temperature sugli

80°C. Grazie a questi pannelli, ed essendo permessa l'inversione del ciclo nella pompa di calore, il sistema garantisce sia il riscaldamento invernale che il raffrescamento estivo. Solitamente un sistema di distribuzione del calore predisposto nel massetto della pavimentazione necessita di un deumidificatore, per evitare che si formi condensa nei tubi. In questa analisi il costo del deumidificatore sarà considerato unitamente a quello dei pannelli radianti; in ogni modo influenza poco il calcolo, essendo presente in entrambe le configurazioni impiantistiche.

Di seguito si analizzano i costi d'installazione e gestione delle tre tipologie d'impianto citate alla fine del paragrafo precedente ovvero:

1. pompa di calore geotermica accoppiata a pali energetici;
2. pompa di calore geotermica accoppiata ad SGV;
3. caldaia a gas del tipo a condensazione, unita a refrigeratori condensati ad aria.

Sarà sviluppata un'analisi costi-benefici della soluzione con pali energetici più vantaggiosa tra le due ipotesi modificate, nei confronti di quella tradizionale con caldaia; verranno mostrati inoltre, su un orizzonte di vent'anni, i più comuni indici economici che evidenziano la convenienza o meno dell'investimento iniziale.

Poiché i costi dell'energia elettrica, del gas e degli impianti sono soggetti alle fluttuazioni del mercato, i valori riportati sono da considerarsi puramente indicativi (iva inclusa) e sarebbero da contestualizzarsi nell'arco di tempo di valutazione; i prezzi al 2009 sono i seguenti:

- costo energia elettrica: 0,2 €/kWh;
- costo gas metano: 0,80 €/m³.

I costi iniziali d'installazione

IPOTESI 1A) pompa di calore geotermica accoppiata a 16 pali energetici di 20 m:

- 1 pompa di calore geotermica: 4500 €;
- Costo collettori: $(0,5 \text{ €/m} * 20 \text{ m} * 16 * 8 \text{ (4 doppi U)}) = 1280 \text{ €} +$
manodopera: $(150 \text{ €} * 16) = 2400$; tot = 3680 €;
- Costo aggiuntivo per la realizzazione dei pali (0,6 m di diametro) comprensivo di ferri (FeB44K) e malta cementizia: $85 \text{ €/m} * 6 \text{ m} * 16 = 8160 \text{ €}$;
- Pannelli radianti: $45 \text{ €/m}^2 * 285 \text{ m}^2 = 12825 \text{ €}$;
- TOTALE: 29165 €.

IPOTESI 1B) pompa di calore geotermica accoppiata a 16 pali energetici di 14 m + 1 SGV:

- 1 pompa di calore geotermica: 4500 €;
- Costo collettori: $(0,5 \text{ €/m} * 14 \text{ m} * 16 * 8 \text{ (4 doppi U)}) = 896 \text{ €} +$
manodopera: $(150 \text{ €} * 16) = 2400$; tot = 3296 €;
- 1 sonda da 80 m: $65 \text{ €/m} * 80 \text{ m} = 5200 \text{ €}$;
- Pannelli radianti: $45 \text{ €/m}^2 * 285 \text{ m}^2 = 12825 \text{ €}$;
- TOTALE: 25821 €.

IPOTESI 2) pompa di calore geotermica accoppiata ad SGV:

- 1 pompa di calore geotermica: 4500 €;
- 3 sonde da 90 m: $65 \text{ €/m} * 90 \text{ m} * 3 = 17550 \text{ €}$;
- Pannelli radianti: $45 \text{ €/m}^2 * 285 \text{ m}^2 = 12825 \text{ €}$;
- TOTALE: 34875 €.

IPOTESI 3) caldaia a gas del tipo a condensazione, unita a refrigeratori condensati ad aria:

- 1 caldaia a condensazione + allacciamenti alla rete del gas: 4000 €;
- 1 refrigeratore aria-acqua: 3500 €;
- Pannelli radianti: $45 \text{ €/m}^2 * 285 \text{ m}^2 = 12825 \text{ €}$;
- TOTALE: 20325 €.

I costi di esercizio

Per quanto riguarda i costi di esercizio di un *impianto geotermico*, ci si riferisce ai costi dell'energia elettrica consumata, a cui si possono aggiungere i costi di manutenzione.

Considerando i fabbisogni energetici di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, un COP medio nel corso dell'anno pari a 4,5 e pari a 3 per l'acqua calda sanitaria in quanto necessita di temperature superiori (55°C), ed un EER media pari a 5, l'energia elettrica necessaria sarà pari a:

$(14250 \text{ kWh} / 4,5) + (1500 \text{ kWh} / 3) + (11400 \text{ kWh} / 5) = 5780 \text{ kWh}$ elettrici.

Che moltiplicata per il costo dell'elettricità (pari a 0,2 €/kWh) fornirà il costo annuo per la climatizzazione dell'abitazione ovvero 1189,33 € (di cui 633,33 € per il riscaldamento, 100 € per l'acqua calda sanitaria e 456 € per il raffreddamento).

I costi di manutenzione annua sono bassi e si aggirano intorno ai 60 €; per cui il costo di gestione totale di un impianto geotermico risulta di 1249,33 €/anno.

Inoltre bisogna rammentare che un impianto di questo tipo gode dei seguenti sgravi fiscali:

- 55% su 3 anni per l'impianto geotermico, previsto dalla Finanziaria 2008, come intervento di risparmio energetico (nel caso dei pali energetici la detrazione annua sarebbe pari a: $(7500 \text{ €} * 55/100)/3 = 1375 \text{ €}$);
- 36% su 10 anni per le ristrutturazioni (vale anche per un impianto con caldaia): rientra tra queste l'installazione dei pannelli radianti (la detrazione annua sarebbe pari a: $(12825 \text{ €} * 36/100)/10 = 423,23 \text{ €}$).
In questa analisi, dato che l'impianto a pannelli radianti è ipotizzato per entrambi gli impianti, non verrà considerata tale detrazione.

La stima dei costi di esercizio per un *impianto tradizionale* viene invece identificata con i costi per l'approvvigionamento dei combustibili e dell'energia elettrica consumati mediamente in un anno. I fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, riportati all'inizio della valutazione, vengono soddisfatti attingendo a energie primarie diverse (energia elettrica, metano) e con rendimenti differenti.

Si riportano di seguito i dati utilizzati per il calcolo dei consumi energetici:

- Potere calorifico gas metano: $8359 \text{ kcal/m}^3 = 9,6 \text{ kWh/m}^3$
- η : rendimento medio stagionale delle caldaie = 91%
- EER: indice che determina l'efficienza di un refrigeratore aria-acqua = 2,5

I costi annui di gestione risultano di 1442,31 € per il riscaldamento dell'abitazione e dell'acqua sanitaria, ovvero:

$(15750 \text{ kWh} * 0,8 \text{ €/m}^3)/(9,6 \text{ kWh/m}^3 * 91\%)$ e di 912 € per il raffrescamento, ovvero:

$(11400 \text{ kWh} * 0,20 \text{ €/kWh})/2,5$; per un totale di 2574,31 €, compresi i 220 € di manutenzione.

Occorre precisare che il calcolo effettuato considera un costo dell'energia costante nel tempo, ipotesi non ragionevole nel medio periodo dato il

sistematico incremento registrato nel passato, ma comunque accettabile per un confronto di massima tra i diversi impianti.

Per individuare l'investimento più conveniente, si calcola innanzitutto il *costo totale attualizzato dell'investimento*, cioè la spesa totale su 20 anni, definito come:

$$CTa = C_0 + \sum_j^n \frac{C_j}{(1+i)^j}$$

Dove:

- C_0 : costo di investimento sostenuto alla data di attivazione dell'impianto;
- C_j : spese di esercizio annuali;
- i : tasso di interesse al quale viene effettuata l'operazione; poiché il mercato dell'energia è soggetto ad un rischio limitato, lo si suppone sempre intorno al 2%;
- n : numero di anni del periodo di riferimento per la valutazione.

Nel caso analizzato, il costo totale attualizzato risulta avere i seguenti valori:

- **IPOTESI 1A)** geotermico con pali energetici lunghi 20 m:
 $CTa = - 45628 \text{ €}$;
- **IPOTESI 1B)** geotermico con pali energetici di 14 m + 1 SGV:
 $CTa = - 42284 \text{ €}$
- **IPOTESI 2)** geotermico con 3 SGV:
 $CTa = -51338 \text{ €}$
- **IPOTESI 3)** impianto tradizionale:
 $CTa = -62419 \text{ €}$

In seguito, si confrontano le ipotesi tramite il *valore attuale netto*, associato alla differenza tra i costi di investimento e quelli di gestione delle soluzioni impiantistiche a confronto.

$$VAN = \sum_j^n \frac{\Delta C_j}{(1+i)^j} - \Delta C_0$$

Dove:

- ΔC_0 : differenza tra i costi di investimento delle due soluzioni a confronto;
- ΔC_j : differenza tra i costi di gestione delle due soluzioni a confronto;
- i : tasso di interesse al quale viene effettuata l'operazione;
- j : anno;
- n : numero di anni del periodo di riferimento per la valutazione.

Il criterio del VAN si basa sul principio secondo il quale un'iniziativa merita di essere presa in considerazione solo se i benefici che ne possono derivare sono superiori alle risorse utilizzate.

Confrontando le ipotesi 1A e 3, il VAN risulta essere positivo e pari a 16791 € e il TIR (Tasso di Redditività Interna), cioè il tasso di interesse che azzerava la redditività, del 21,6%; mentre confrontando le ipotesi 1B e 3 il VAN risulta sempre positivo e pari a 20135 € e il TIR del 40%.

Solitamente il progetto d'investimento che presenta il VAN maggiore è quello da preferire.

La soluzione di realizzare un pozzo scambiatore supplementare risulta dunque più favorevole rispetto a quella di aumentare la lunghezza dei pali; infatti su quest'ultima ipotesi grava molto l'incremento dei costi di investimento dovuti all'ulteriore trivellazione dei pali. In figura 53 si mostra il grafico dei flussi di cassa tra l'impianto con pompa di calore

collegata al sistema di 16 pali energetici lunghi 14 m accoppiati ad un pozzo con SGV e quello tradizionale con caldaia e refrigeratore.

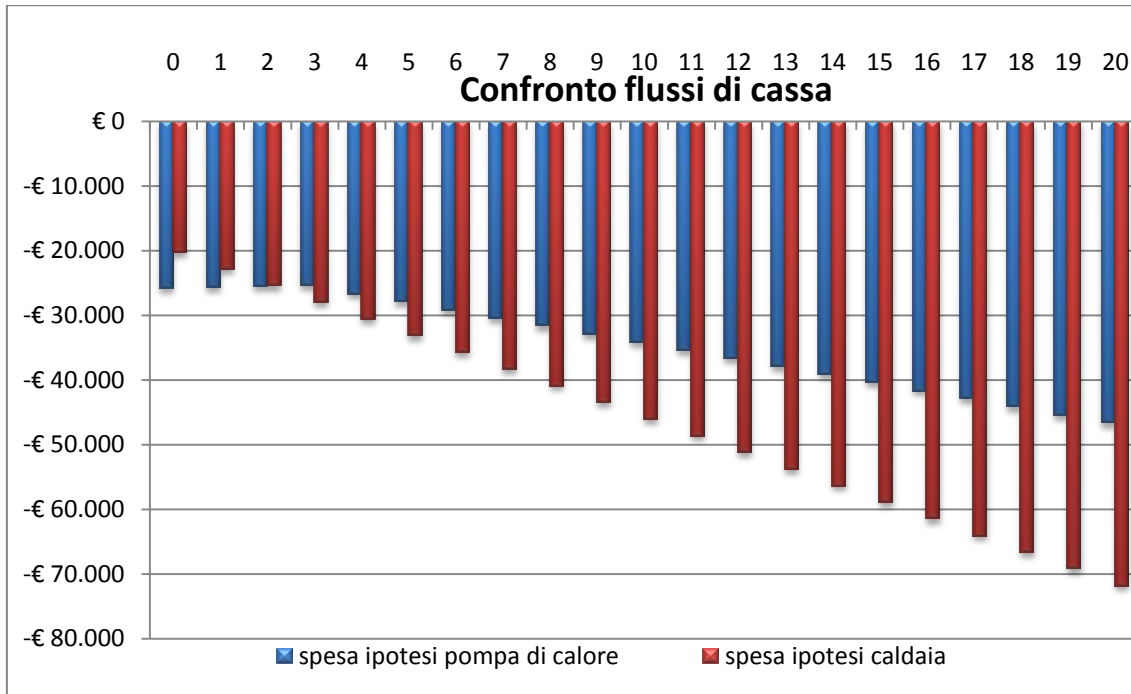


Figura 53. Confronto dei flussi di cassa tra le ipotesi 1B e 3.

Da come stimato in precedenza, il costo iniziale di un impianto geotermico così configurato differisce di circa 5500 € rispetto ad un impianto tradizionale, all'incirca il prezzo relativo alla realizzazione del pozzo geoscambiatore.

Se andiamo a considerare i costi di gestione annuale invece, questi risultano molto inferiori rispetto ad un impianto con caldaia e refrigeratore, poco meno della metà (1249 € contro i 2574,31 €), e per i primi tre anni addirittura in positivo grazie alla detrazione fiscale del 55% (-1249,33 € + 1375 € ≈ +126 €).

Di seguito, nella figura 54 si riporta il grafico con il confronto dei flussi di cassa differenziali tra l'ipotesi 1B e l'ipotesi 3. Si riesce così ad estrapolare il tempo di ritorno dell'investimento iniziale dell'impianto geotermico

(ovvero il tempo per cui la maggiore spesa iniziale dell'impianto rispetto alla soluzione tradizionale è completamente ripagata).

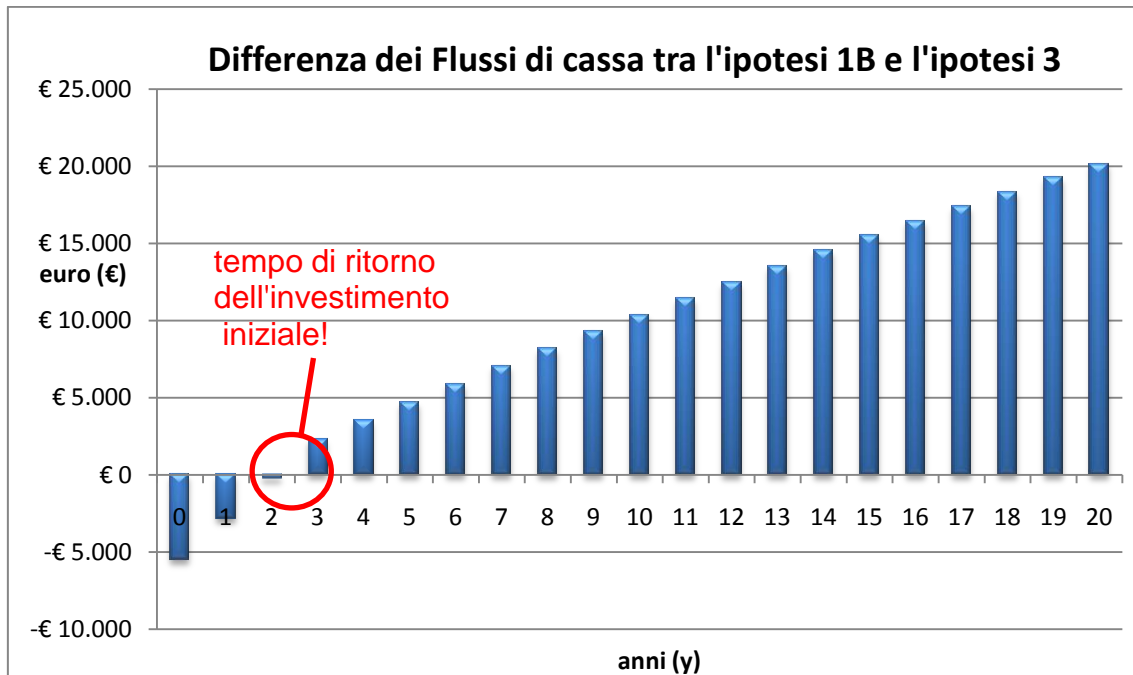


Figura 54. Differenza dei Flussi di cassa tra l'impianto con Pompa di Calore accoppiata al sistema di pali energetici lunghi 14 m. più SGV e l'impianto tradizionale.

Come è facile intuire dal grafico appena mostrato, la realizzazione di un impianto che corrisponde all'ipotesi 1B (16 pali da 14 m di lunghezza più SGV) nonostante l'investimento iniziale più alto, si ripaga con un tempo di ritorno che cade tra il secondo e il terzo anno di gestione. Oltre tale anno, dato che per la soluzione geotermica i costi gestionali sono più bassi del 50% rispetto all'ipotesi tradizionale, si verifica un andamento linearmente crescente degli utili, che al termine del ventesimo anno di valutazione arriva a toccare la soglia dei 20000 €. In questo caso si considera guadagno la mancata spesa dovuta al gas ed all'elettricità (il vantaggio economico rispetto ai costi di gestione di un sistema tradizionale).

Di conseguenza risulta palese la convenienza, per non parlare del beneficio ambientale che ne deriva, in quanto l'impiego della pompa di calore geotermica, non bruciando combustibili fossili come la caldaia, evita di introdurre in atmosfera ingenti quantità di CO₂ e polveri inquinanti.

E' inoltre opportuno segnalare altri aspetti significativi dell'opzione geotermica, legati alla possibilità, in qualunque momento, di alimentare l'impianto con pannelli solari fotovoltaici, assumendo così la totale autosufficienza energetica, importante dal punto di vista economico, ambientale e strategico.

Se avessimo invece deciso di realizzare l'ipotesi 1A, il diagramma differenziale dei flussi di cassa sarebbe risultato il seguente:

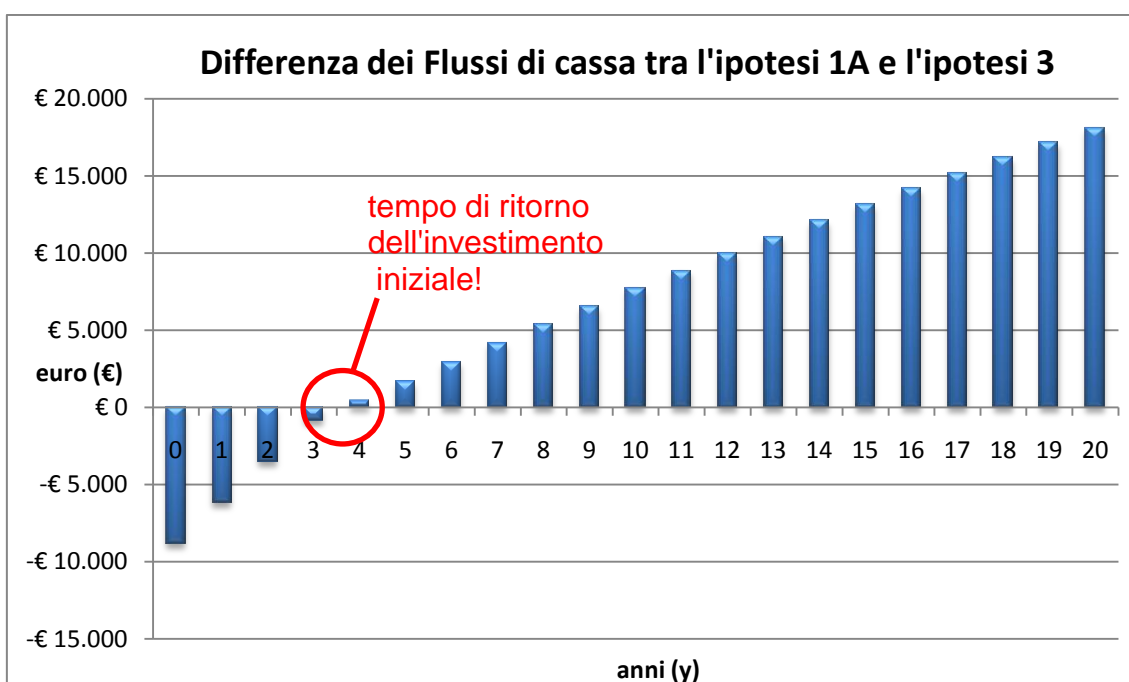


Figura 55. Differenza dei Flussi di cassa tra l'impianto con Pompa di Calore accoppiata al sistema di pali energetici lunghi 20 m. e l'impianto tradizionale.

In questo caso, il costo iniziale maggiore di tale impianto comporta uno shift temporale del "Pay Back" che si verifica tra il terzo e il quarto anno, una risultato comunque soddisfacente se consideriamo il notevole investimento; infatti da questo punto in poi il trend ha un interessante andamento crescente a favore della geotermia.

Per completezza si mostra anche il grafico del tempo di ritorno dell'investimento per l'ipotesi 2 (figura 56), ovvero per un impianto con pompa di calore accoppiata a tre pozzi muniti di SGV rispetto a quella tradizionale. In questo caso il tempo per cui la maggiore spesa iniziale che

si affronta (34875€) è completamente ripagata, si verifica a cavallo tra il sesto e il settimo anno.

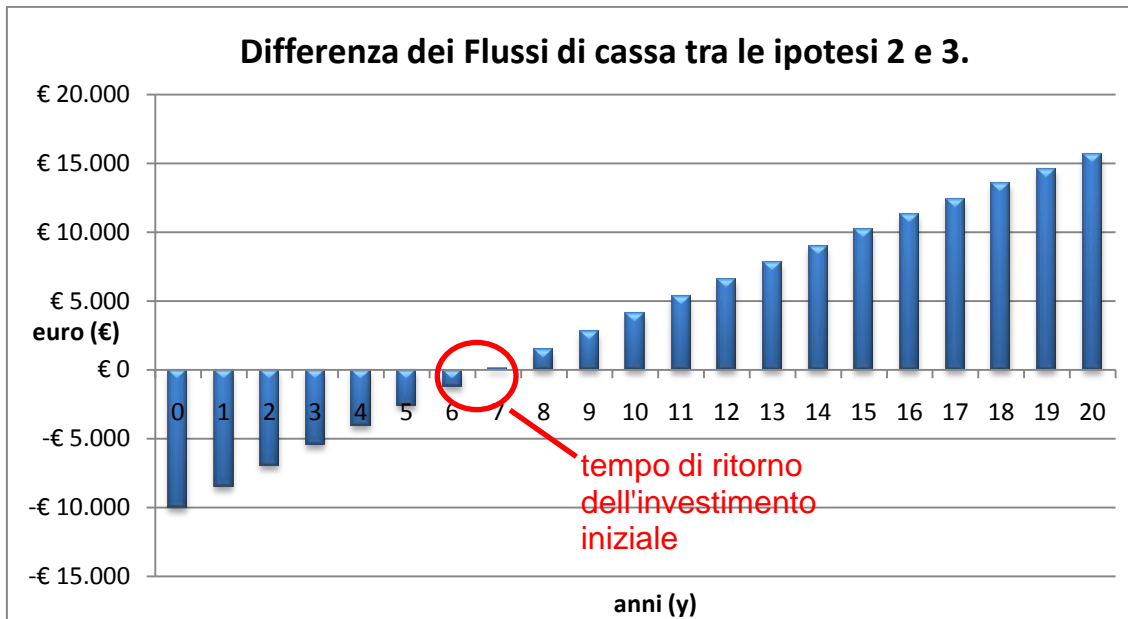


Figura 56. Differenza dei Flussi di cassa tra l'impianto con Pompa di Calore ed SGV e l'impianto tradizionale.

Importanti considerazioni

Nel dimensionamento energetico dei pali di fondazione sono stati presi in considerazione i valori delle potenze termiche d'estrazione/iniezione per un terreno argilloso umido tabellati nella linea guida tedesca VDI 4640, rispettivamente di 30 e 40 W/m.

In realtà, una volta inseriti i valori di INPUT del caso in esame nel PILESIM2 ed eseguita una simulazione, ci si è resi conto che l'effettiva resa termica del terreno è risultata inferiore al valore precedentemente stimato, ovvero il software rilascia in OUTPUT i valori di 22 W/m in estrazione e 28 W/m in iniezione. Questo valore era da aspettarselo vista la natura limo-argillosa del terreno. Di conseguenza, questi nuovi valori più

precisi mi hanno portato a riconsiderare il sistema nel suo complesso, a partire dal dimensionamento energetico dell'edificio.

Dunque con una potenza di estrazione di 22 W/m avremo che:

$22 \text{ W/m} * 14\text{m} * 16 = 4,93 \text{ kW}$, che in confronto alla potenza termica necessaria alla pompa di calore, risulta inferiore di 4,41 kW.

Facendo vari tentativi ci accorgiamo che per soddisfare tale potenza termica avremmo bisogno di realizzare dei pali lunghi 27m, un valore estremamente eccessivo sia per la statica dell'edificio che per i costi che ne deriverebbero in fase di realizzazione.

Un giusto compromesso sarebbe quello di considerare l'ipotesi di realizzare i pali da 16 m, lunghezza staticamente ineccepibile che implicherebbe un deficit energetico di 3,66 kW; con un valore simile la sonda supplementare da realizzare dovrà essere lunga almeno $(3660 \text{ W}/40 \text{ (W/m)}) = 91,5 \text{ m}$.

In raffreddamento invece avremo un deficit di 4,83 kW per cui la lunghezza stimata per la sonda sarà $(4830 \text{ W}/52,5 \text{ (W/m)}) = 92 \text{ m}$.

Di conseguenza sarà necessario realizzare una SGV da 100 m. Ovviamente sono stati considerati dei valori di potenza di iniezione/estrazione ridotti anche per il geoscambiatore verticale supplementare.

Costi iniziali

Nuova Ipotesi: pompa di calore geotermica accoppiata a 16 pali energetici lunghi 16 m + 1 SGV da 100 m:

- 1 pompa di calore geotermica: 4500 €;
- Costo collettori: $(0,5 \text{ €/m} * 16 \text{ m.} * 16 * 8 \text{ (4 doppi U)}) = 1024 \text{ €} +$
manodopera: $(150 \text{ €} * 16) = 2400$; tot = 3424 €;
- 1 SGV da 100 m: $65 \text{ €/m} * 100 \text{ m} = 6500 \text{ €}$;

- Costo aggiuntivo per la realizzazione dei pali (0,6 m di diametro) comprensivo di ferri (FeB44K) e malta cementizia: $85 \text{ €/m} * 2 \text{ m} * 16 = 2720 \text{ €}$;
- Pannelli radianti: $45 \text{ €/m}^2 * 285 \text{ m}^2 = 12825 \text{ €}$;
- TOTALE: 29969 €.

Costi di gestione

Risultano i medesimi; cambieranno una volta effettuata l'analisi di sensitività sui nuovi valori delle potenze termiche considerate, di iniezione ed estrazione nel terreno.

Aggiorno dunque i flussi di cassa cumulati di un impianto così concepito e li mostro insieme a quelli fissi dell'impianto tradizionale (figura 57). In seguito rivaluterò il VAN e di conseguenza la redditività.

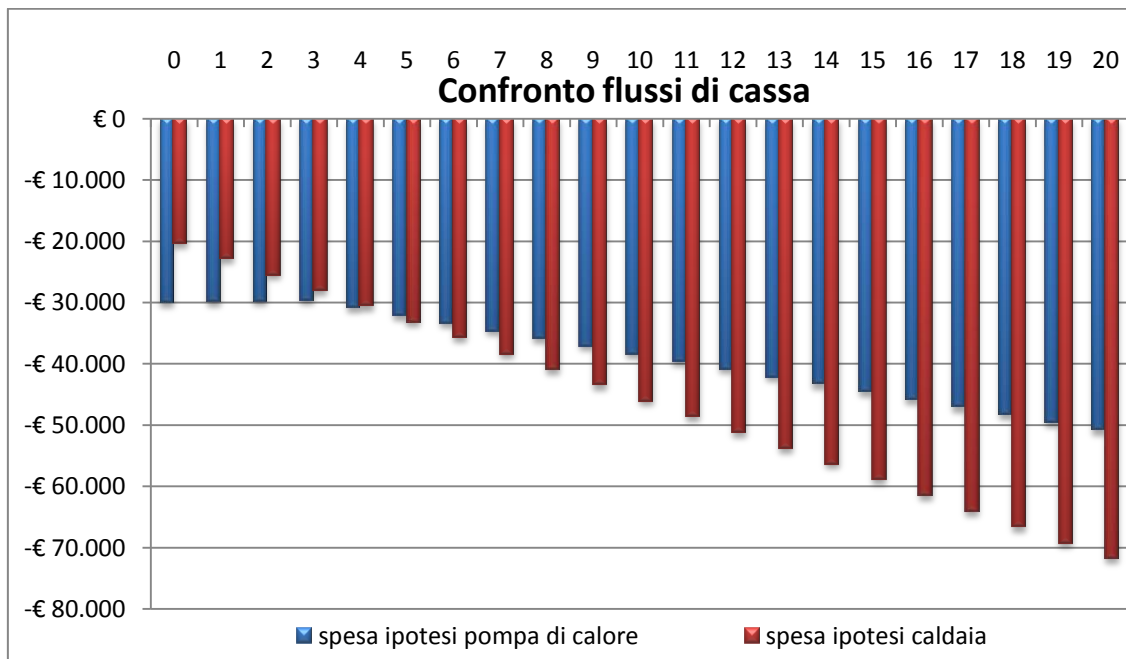


Figura 57. Confronto dei flussi di cassa tra l'ipotesi geotermica riconsiderata e l'ipotesi 3.

Il VAN risulta di 15987 €; il TIR invece sarà del 19,15%. In questo caso l'aumento dei costi iniziali dell'impianto ha portato ad una diminuzione del tasso interno di redditività. Vediamo ora in figura 58 cosa succede andando a graficare i flussi di cassa differenziali.

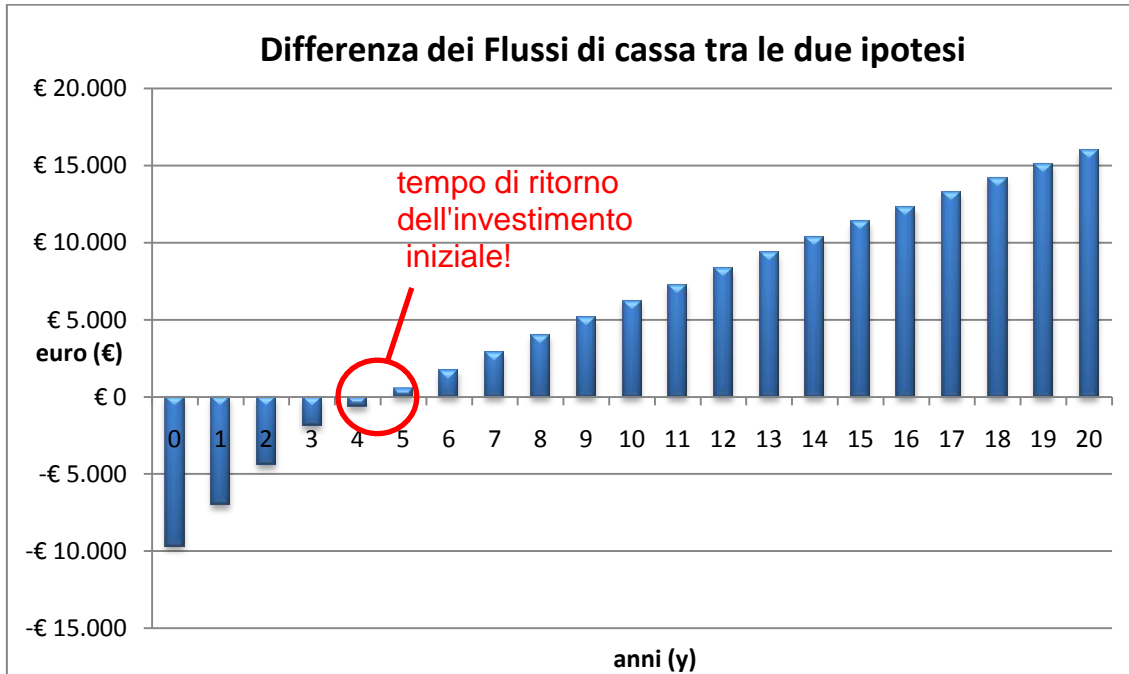


Figura 58. Differenza dei Flussi di cassa tra l'impianto con Pompa di Calore accoppiata al sistema integrato di pali energetici lunghi 16 m. ed SGV da 100m. e l'impianto tradizionale.

Come si può notare dal grafico, riconsiderare i costi iniziali dell'impianto in funzione dell'effettiva resa termica del terreno ha portato a dilatare di un anno il tempo di ritorno dell'impianto geotermico e a diminuire di conseguenza la redditività. Ciò nonostante sul ventennio di valutazione il vantaggio economico che deriva da tale impianto "rinnovabile" non è messo in discussione, come del resto abbiamo potuto notare per tutte le varie configurazioni geotermiche che abbiamo stimato.

6.4 Analisi di sensitività

Questa analisi consiste nel valutare gli effetti sui risultati forniti da un modello (ossia dalla funzione che lo descrive analiticamente) indotti da modifiche nei valori delle variabili di ingresso. Si parla in genere di analisi *what if*, in quanto si va a valutare *cosa* cambia *se* cambiano i valori assunti dai parametri decisionali.

Solitamente il processo di codificazione di un modello è carico di incertezze di diverso tipo, nell'inclusione/esclusione di caratteristiche, nei meccanismi ipotizzati, nei valori dei parametri di sistema e nelle osservazioni. In virtù di quanto appena affermato, il modello dovrebbe tenere conto di tutte le suddette incertezze/supposizioni nella produzione dei risultati in output.

Poiché nessun modello, per quanto accurato possa essere, approssima fedelmente la realtà, si rende necessaria una sua revisione a posteriori, o una raccolta ulteriore di osservazioni. Questa valutazione, conosciuta come analisi di sensitività, permette ad esempio di determinare quale aspetto del sistema richiede una migliore caratterizzazione per fare in modo che il risultato ottenuto sia il più verosimile possibile.

Tale analisi va giustappunto applicata al valore della *conducibilità termica del terreno*, parametro che gioca un ruolo fondamentale in un sistema di geoscambio in quanto influenza la quantità di calore estraibile/iniettabile in un terreno, che a sua volta si ripercuote sulle decisioni progettuali e quindi sui costi iniziali, ma soprattutto gestionali dell'impianto.

Come precedentemente menzionato nel capitolo 4, la conoscenza del valore esatto di tale parametro non è noto a priori essendo il terreno un mezzo eterogeneo ed anisotropo ed essendo il flusso di calore variabile nel tempo. Dunque considerare un valore di λ costante per ogni strato di terreno interessato dal geoscambiatore (nel nostro caso un palo energetico), come

accade nel software PILESIM2, comporta la commissione di errori di valutazione che si possono ripercuotere sul dimensionamento energetico dell'impianto.

Un valore maggiore rispetto a quello effettivo potrebbe di fatti implicare un sottodimensionamento dell'impianto in quanto le potenze di estrazione e/o immissione risulteranno maggiori. Di conseguenza in fase di progettazione si potrebbe decidere di installare nei pali un numero di sonde minori oppure optare per una riduzione della lunghezza attiva, ritrovandosi poi ad affrontare il problema del mancato soddisfacimento dei fabbisogni energetici per la climatizzazione dell'edificio.

In fase di gestione invece, l'aver sovrastimato questo parametro comporta uno sforzo maggiore della pompa di calore che deve lavorare di più per sopperire alla deficienza della potenza estraibile; questo finché non arriva al suo valore massimo di potenza oltre il quale il sistema inevitabilmente collassa ovvero non riesce più a garantire la climatizzazione dell'edificio.

Stesso ragionamento va fatto se si ipotizza un valore di λ inferiore che a sua volta implicherà un sovradimensionamento dell'impianto ed un conseguente aumento dei costi d'installazione (sonde, lunghezza del palo) e di gestione (aumento della potenza necessaria alla pompa di calore e quindi dell'elettricità consumata).

Il minore/maggiore costo sostenuto in fase iniziale non influenza suddetta analisi di sensitività in quanto si considera già realizzato; dunque non modificabile. Ciò che si valuta dunque, è come una sovrastima/sottostima di λ si ripercuote sui costi di esercizio dell'impianto.

Il punto di partenza di tale analisi è quello di considerare i range di conduttività e della stratigrafia del terreno in esame, che sono riportati in tabella 10.

Unità litotecnica	Spessore		Descrizione	λ (W/mK)		
	Min.	Max.		Min.	Med.	Max.
A	0,6	0,8	Terreno vegetale alterato	-	-	-
B	1,8	2,2	Argilla limosa con intercalazioni di argilla con sabbia finissima. Medio grado di consistenza	0,9	1,7	2,3
C	3,8	5,0	Argilla limosa a medio grado di consistenza	0,9	1,7	2,3
D	-	-	Alternanza di argille limoso-sabbiose e argille a medio/medio-elevato grado di consistenza	1,1	2	2,7

Tabella 10. Riassunto della consistenza degli spessori degli strati di terreno interessati e relativi range di conduttività termiche.

I valori di conducibilità più plausibili in conformità con la natura degli strati interessati sono:

- Unità litotecnica B: 2 m; λ_1 : 2,3 W/mK;
- Unità litotecnica C: 4,5 m; λ_2 : 1,7 W/mK;
- Unità litotecnica D: 9,5 m; λ_3 : 2,5 W/mK.

Una variazione percentuale di conducibilità termica nei tre strati considerati va ad aumentare/diminuire la potenza di estrazione da parte delle sonde presenti nei pali di fondazione. Ragioneremo dunque in termini di variazione della potenza fornita dal terreno, che a sua volta si ripercuoterà sui consumi di energia elettrica della pompa di calore (sui costi di gestione dell'impianto). Come già ampiamente detto, una λ maggiore vuol dire una minore resistività del terreno che risulta più facilmente attraversabile dal flusso termico. In questo caso la potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore sarà minore (da $P_{\text{elettrica}} = P_{\text{utenze}} - P_{\text{terreno}}$) dato che la potenza termica fornita dal terreno aumenta.

Le potenze termiche estratte e iniettate nel terreno in esame sono quelle riscontrate nei valori di OUTPUT dal software PILESIM2, ovvero rispettivamente 22 e 28 W/m. Dato che stiamo considerando il caso in cui si è scelto di realizzare 16 pali di fondazione da 16 m equipaggiati a scambiatori di calore insieme ad una sonda verticale in pozzo, nel calcolare le potenze elettriche totali dovremo considerare anche il contributo dell'SGV. Di conseguenza in fase di estrazione calcoleremo:

$$P_{\text{elettrica,tot}} = P_{\text{utenze}} - (P_{\text{terreno,pali}} + P_{\text{terreno,SGV}}).$$

Nella tabella 11 che segue si riportano le variazioni percentuali di questi valori (W/m), le corrispettive potenze elettriche che ne derivano (kW) e il costo gestionale annuo che si ricava moltiplicando la potenza elettrica per le ore di funzionamento annue dell'impianto e per il costo dell'energia elettrica (kW*h)*(€/kWh) = (€).

In modalità riscaldamento avremo:

Variatz %	Pterreno PALI (W/m)	Pterreno SGV (W/m)	Pelettr (kW)	Costo energia €
-10%	20	36	3,28	1016,144
-5%	21	38	2,824	874,8752
0	22	40	2,368	733,6064
+5%	23	42	1,912	592,3376
+10%	24	44	1,456	451,0688

Tabella 11. Variazione delle potenze termiche di estrazione e rispettivi costi gestionali.

In modalità raffrescamento invece avremo:

Variatz %	Pterreno PALI (W/m)	Pterreno SGV (W/m)	Pelettr (kW)	Costo energia €
-10%	24	47,25	3,967	748,1762
-5%	26	49,875	3,1925	602,1055
0	28	52,5	2,418	456,0348
+5%	30	55,125	1,6435	309,9641
+10%	32	57,75	0,869	163,8934

Tabella 12. Variazione delle potenze termiche di iniezione e rispettivi costi gestionali.

Per un totale dei costi gestionali di:

Variazione %	TOT €
-10%	1764,32
-5%	1476,981
0	1189,64
+5%	902,3017
+10%	614,9622

Tabella 13. Costi gestionali totali

Da quanto detto in precedenza, si nota che ad un incremento percentuale del parametro analizzato si ottiene una diminuzione dei costi di esercizio.

Di seguito si riportano gli andamenti delle potenze elettriche richieste dalla pompa di calore in funzione della variazione percentuale della potenza termica estratta in riscaldamento ed iniettata in raffreddamento (figure 59 e 60).

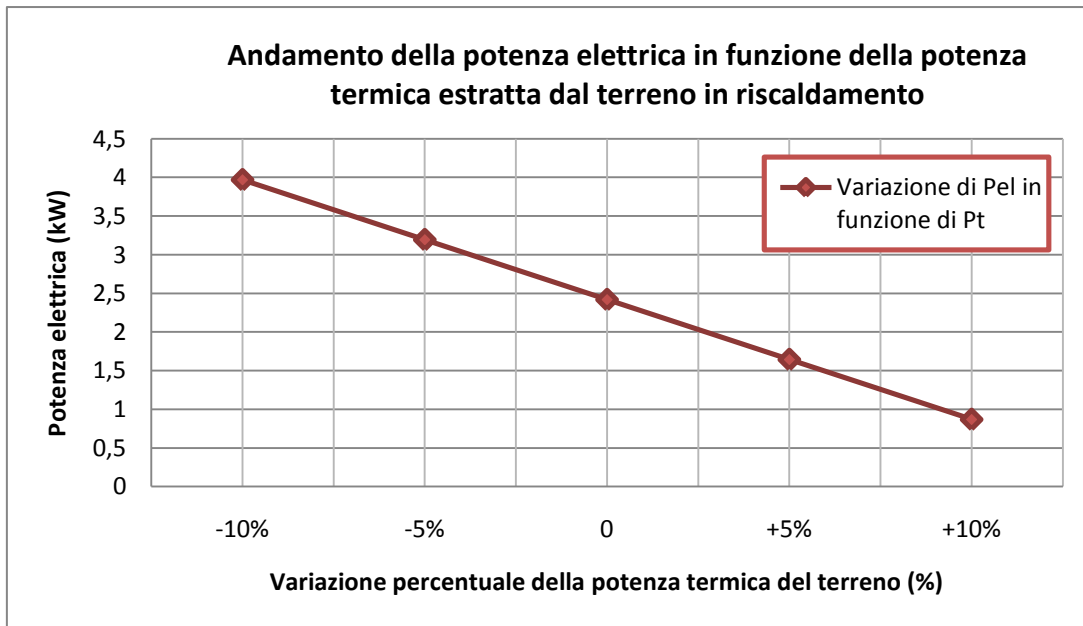


Figura 59. Andamento della potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore in funzione della potenza termica estratta dal terreno in riscaldamento.

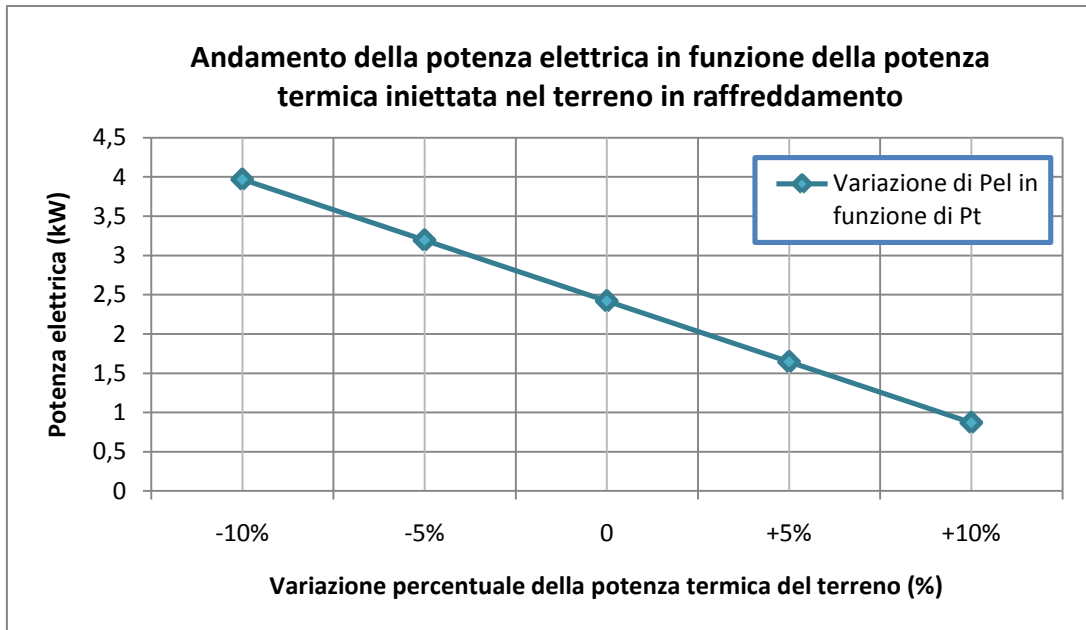


Figura 60. Andamento della potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore in funzione della potenza termica iniettata nel terreno in raffreddamento

Nel grafico in figura 61 si riporta l'evoluzione del costo d'esercizio dell'impianto al variare della potenza termica estratta/iniettata nel terreno; si distinguono quelli inerenti al riscaldamento e quelli al raffreddamento, inoltre si mostra l'andamento della loro somma.

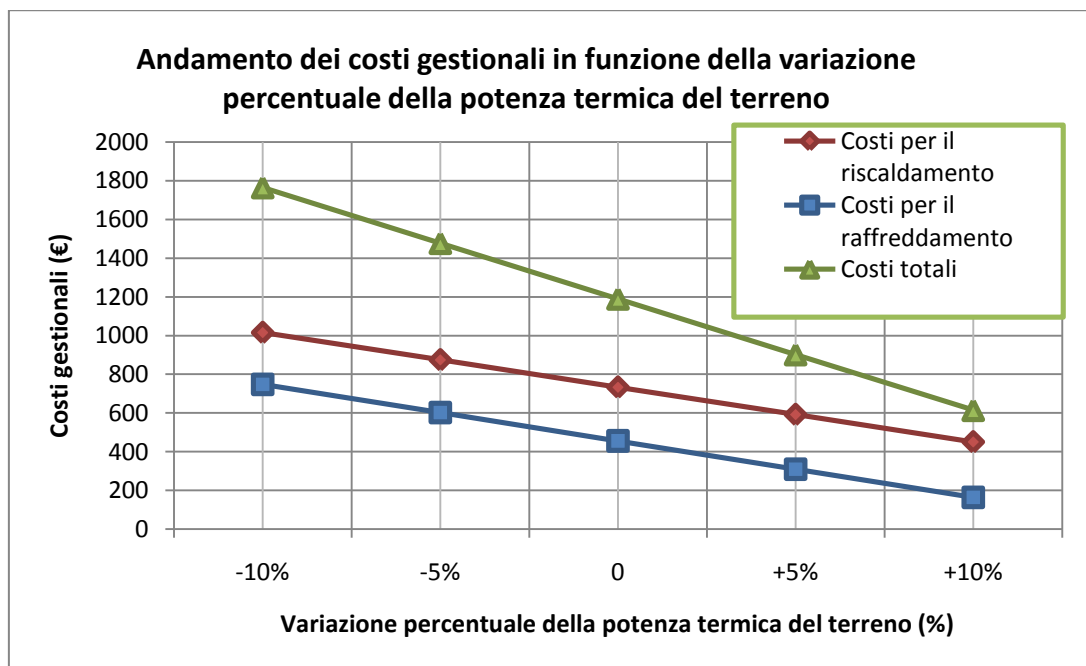


Figura 61. Andamento dei costi gestionali dell'impianto geotermico modificato in funzione della variazione percentuale di potenza termica del terreno.

I valori riportati non tengono in considerazione il costo annuale della manutenzione (60€), che comunque influenza relativamente poco tale analisi in quanto molto esiguo.

Adesso andiamo a verificare che peso acquista tale variazione dei costi gestionali nei confronti della redditività dell'impianto. Riporto in breve i costi variati in funzione delle diverse percentuali considerate (tabella 14):

Variazione (%)	Costi gestionali (€)
-10%	1764,32
-5%	1476,981
0	1189,64
+5%	902,3017
+10%	614,9622

Tabella 14. Costi di esercizio in funzione delle variazioni percentuali.

Ad ogni incremento/decremento della variabile indipendente considerata corrisponde una variazione del VAN ed un conseguente nuovo tasso interno di rendimento; i valori ottenuti vengono riportati in tabella 15.

Variazione (%)	VAN (€)	TIR (%)
-10%	6585	10,33
-5%	11283	14,97
0	15982	19,15
+5%	20680	23,05
+10%	25378	26,78

Tabella 15. Valore del VAN e del TIR ottenuti modificando la potenza termica del terreno.

Dai risultati ottenuti è facile intuire che un aumento percentuale in positivo della potenza di estrazione/iniezione nel terreno corrisponde ad un aumento del valore attuale netto dell'impianto, ovvero ad un margine di guadagno maggiore tra le soluzioni a confronto. In riferimento al VAN, può essere vista la variazione in percentuale del TIR tra le due soluzioni studiate (tabella 16).

TIR (%)	ΔTIR (%)
10,33	-46,05
14,97	-21,82
19,15	0
23,05	20,36
26,78	39,84

Tabella 16. Valori del TIR e della corrispondente variazione percentuale.

Nel grafico successivo di figura 62 si mostra l'andamento della variazione percentuale del tasso di redditività interno in funzione del parametro indipendente considerato.

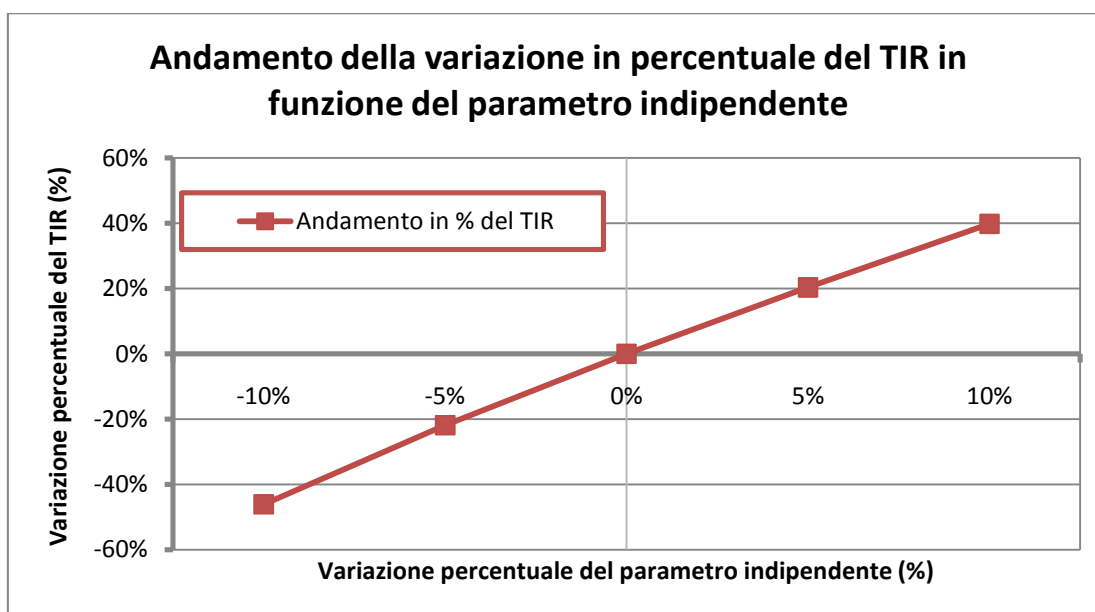


Figura 62. Andamento della variazione in percentuale del TIR in funzione del parametro indipendente.

Possiamo notare che ad una variazione positiva del 5% della potenza di estrazione/iniezione nel terreno corrisponde un aumento del TIR pari al 20%; viceversa ad un decremento del 5% corrisponde un decremento del TIR del 20%.

Dunque al termine di queste analisi e considerazioni possiamo affermare l'importanza della stima quanto più verosimile possibile dei parametri che influenzano il corretto funzionamento del sistema, per evitare che una scelta di valutazione errata in fase progettuale ci porti ad avere in seguito dei costi gestionali eccessivi e quanto meno inutili. I costi di investimento iniziali, come precedentemente accennato, sono stati considerati fissi e si è provveduto a valutare la redditività dell'impianto solamente in funzione della variazione dei costi gestionali. Vediamo ora cosa succede in seguito ad una decisione errata sui costi di investimento iniziali, ovvero cosa succede se un'interpretazione approssimata dei parametri fondamentali del sistema ci porta a sovrastimare o sottostimare il dimensionamento

dell'impianto. Ad una decurtazione percentuale in negativo del parametro indipendente corrisponderà un investimento maggiore in seguito al sovradimensionamento dell'impianto e viceversa.

Si ricalcolano i costi in funzione di queste variazioni e successivamente il VAN e il corrispettivo TIR. I risultati sono visibili nella tabella 17 che segue:

Costo Investim. (€)	Variazione (%)	VAN (€)	TIR (%)
32965,9	-10%	12990	12,86
31467,45	-5%	14488	15,58
29969	0	15982	19,15
28470,55	5%	17485	24,1
26972,1	10%	18983	31,42

Tabella 17. Costi d'investimento modificati in funzione della variazione della variabile indipendente e relativi VAN e TIR.

Anche in questo caso possiamo notare che un aumento percentuale in positivo della potenza di estrazione/iniezione nel terreno corrisponde ad un aumento del valore attuale netto dell'impianto (costi iniziali più bassi).

In riferimento al VAN, calcoliamo la variazione in percentuale del TIR tra le due soluzioni studiate (tabella 18).

TIR (%)	ΔTIR (%)
12,86	-0,3284595
15,58	-0,186423
19,15	0
24,1	0,25848564
31,42	0,64073107

Tabella 18. Valori del TIR e della corrispondente variazione percentuale.

Successivamente graficheremo l'andamento della variazione percentuale del tasso di redditività ottenuto modificando i costi dell'investimento iniziale e lo sovrapporremo a quello precedentemente realizzato per i costi gestionali per verificare se i trends sono simili. Tale risultato è visibile nel grafico riportato in figura 63.

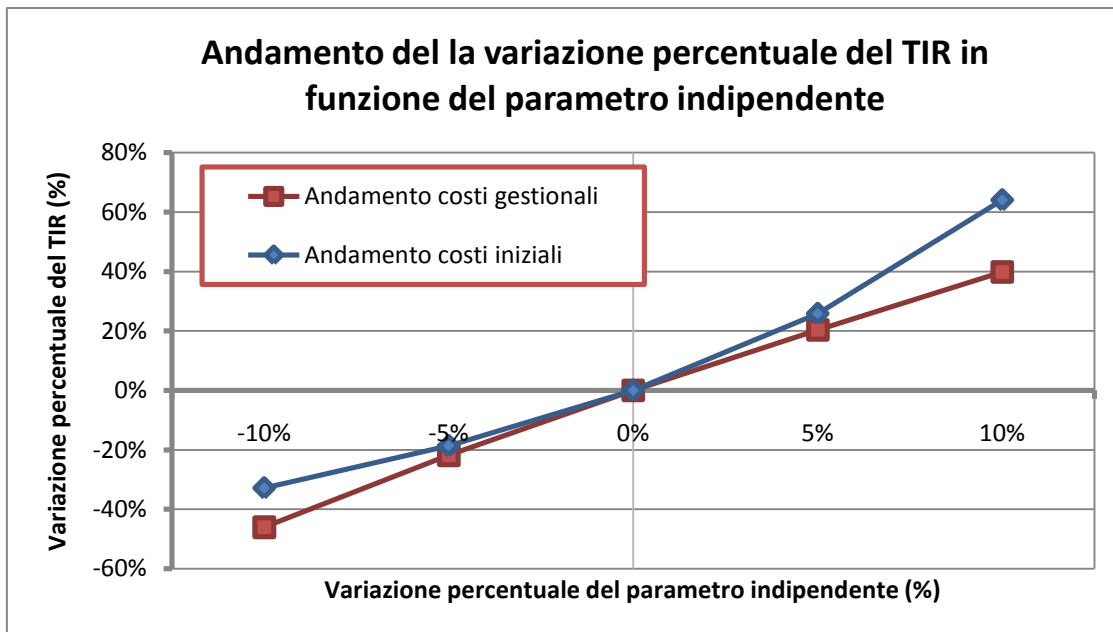


Figura 63. Andamento della variazione in percentuale del TIR in funzione del parametro indipendente per i casi modificati dei costi gestionali e iniziali.

Dal grafico è possibile notare che anche in questo caso l'andamento è lineare; leggermente diverso dal caso precedente. Infatti ad un aumento percentuale in positivo del parametro indipendente si ottiene una variazione percentuale del TIR maggiore mentre ad un decremento percentuale corrisponde una variazione del TIR inferiore. Questo si verifica in virtù del fatto che la redditività dell'impianto risulta superiore.

6.5 Aspetti ambientali

La peculiarità di un sistema di climatizzazione che utilizza la tecnologia ormai consolidata a livello europeo della pompa di calore geotermica, è quello della minore produzione di CO₂ nei confronti di un impianto tradizionale. Come già ampiamente dibattuto, l'unico consumo energetico di questa macchina è l'elettricità fornita al compressore, dunque nella conta delle emissioni occorre tener conto dell'intero processo di produzione dell'energia. L'impianto considerato nel caso di studio permette di generare 15750 kWh termici annui in riscaldamento e 11400 kWh in raffreddamento, utilizzando un totale di 5946,66 kWh elettrici.

Considerando un valore medio per il parco elettrico di produzione italiano di 550 gCO₂/anno (fonte ENEA 2006) si ottiene una produzione di circa 3270,66 kgCO₂/anno, rispetto ai 7466,25 kgCO₂/anno di un sistema tradizionale (4331,25 kgCO₂/anno di una caldaia a metano e 3135 kgCO₂/anno di uno split a parete). L'abbattimento complessivo delle emissioni si aggira dunque intorno al 56%.

La circolare M.I.C.A. n°219 del 2 marzo 1995 indica l'equivalente energetico dei principali prodotti combustibili, indicando le modalità di conversione delle varie grandezze in TEP (tonnellate di petrolio equivalente).

Prodotto	Equivalenza in TEP
Combustibili Liquidi	
Gasolio	1 t = 1,08 TEP
Olio combustibile	1 t = 0,98 TEP
GPL	1 t = 1,1 TEP
Benzine	1 t = 1,2 TEP
Combustibili Solidi	
Carbon fossile	1 t = 0,74 TEP
Carbone di legname	1 t = 0,75 TEP
Antracite	1 t = 0,7 TEP
Legna da ardere	1 t = 0,45 TEP
Lignite	1 t = 0,25 TEP

Combustibili gassosi	
Gas naturale	1000 Nm ³ = 0,82
Elettricità in alta tensione	1 MWh = 0,23 TEP
Elettricità in bassa tensione	1 MWh = 0,25 TEP

Tabella 17. Equivalente energetico in TEP dei principali prodotti combustibili secondo la circolare M.I.C.A. n°219 03/95.

La climatizzazione con pompa di calore consuma dunque 1,35 TEP/anno, mentre quella di tipo tradizionale ne consuma 1,3 in riscaldamento e 1,5 in raffrescamento per un totale di 2,8 TEP/anno; il risparmio in termini di TEP è dunque di 1,45. Un altro fattore ambientale da tenere in considerazione è la mancata emissione di fumi e polveri sottili come ad esempio il *CO*, l'*NOx* ed in particolare le *PM10*, visto che all'interno di una pompa di calore non è prevista alcuna combustione. Solo per quanto riguarda il riscaldamento invernale, una stima generale degli impianti a pompa di calore geotermica mostra che tale sistema risparmia un 30-45% di energia rispetto a una caldaia ad olio, ed un 35% rispetto ad una caldaia a gas, con una riduzione di 45-55% di emissioni di *CO₂* per la caldaia ad olio e di 15-30% per quella a gas. Tali percentuali inoltre, in seguito alla tendenza attuale verso l'efficienza energetica nella produzione di elettricità, sono decisamente destinate ad aumentare. In aggiunta, l'integrazione di questi sistemi con le attuali tecnologie di produzione locale di elettricità può ridurre la dipendenza dalle importazioni estere di energia primaria.



L'impatto ambientale più significativo che una pompa di calore geotermica può causare, riguarda la variazione termica del sottosuolo, a seguito del funzionamento della macchina in continuo che può portare all'esaurimento del reservoir termico. Di conseguenza, oltre alla potenza di estrazione del palo energetico (in W/m), deve essere monitorata anche la quota di estrazione annuale (in kWh/(m*anno)). All'inizio la rigenerazione delle

temperature nel sottosuolo avviene molto velocemente; in seguito, la temperatura tende a tornare asintoticamente al valore iniziale. In questa fase, il processo rallenta, e l'impreciso dimensionamento della sonda potrebbe provocare un ulteriore rallentamento.

Considerazioni Finali

Da quanto emerso in questa mia trattazione, l'utilizzo di una pompa di calore reversibile accoppiata ad un sistema di geoscambio per la climatizzazione degli edifici risulta estremamente vantaggiosa in termini di efficienza energetica, economica, ma soprattutto ambientale rispetto ad un impianto tradizionale con caldaia e split. Infatti tale tecnologia, ampiamente diffusa nei paesi europei, permette di eliminare i costi derivanti dallo sfruttamento di combustibili fossili e di ridurre così drasticamente le emissioni di CO₂ e di tutti gli altri inquinanti generati durante la fase di combustione, che hanno un effetto dannoso sulla qualità dell'aria e sul global warming. Quella piccola quota parte di emissioni che si produce è limitata al solo consumo di energia elettrica della macchina, che risulta estremamente basso e può essere addirittura azzerato se accoppiata ad un impianto fotovoltaico, i cui costi sono destinati a diminuire sensibilmente nei prossimi anni in seguito al forte sviluppo della tecnologia. In questo modo si riuscirebbe a coprire l'intero fabbisogno energetico dell'edificio in maniera autonoma e pulita, svincolandosi dalla dipendenza del petrolio e non essendo più soggetti alle oscillazioni del suo prezzo sul mercato.

Entrando nel merito della tipologia del geoscambiatore da me approfondito, occorre menzionare il fatto che inserire i collettori nelle fondazioni degli edifici permette di abbattere l'elevato costo iniziale del più noto impianto geotermico a sonde verticali, dato che consente di risparmiare sui costi di perforazione dei pozzi, bypassando il complesso iter burocratico per ottenere i permessi per le trivellazioni. Se al minor costo iniziale si aggiungono poi i minori costi di esercizio (50% in meno rispetto ad un sistema tradizionale a metano) il tempo di ritorno stimato è dell'ordine di un paio di anni, dunque estremamente basso e redditizio.

Al fine di ottenere un corretto dimensionamento energetico dell'impianto risulta essenziale un'approfondita conoscenza preliminare del sottosuolo interessato. Occorre dunque conoscere nel modo più dettagliato possibile i valori di quei parametri estremamente variabili nello spazio e nel tempo (come ad esempio la conducibilità termica) che influenzano in maniera significativa il potenziale di utilizzazione del terreno, per non doversi ritrovare in seguito ad affrontare eccessivi e quanto meno inutili costi di gestione; per non parlare dei costi d'investimento.

Nella progettazione dell'impianto geotermico in esame, è emersa dunque l'importanza di effettuare un'analisi di sensitività a posteriori delle caratteristiche incerte del sottosuolo e di utilizzare un software per la simulazione del sistema di pali energetici, il PILESIM2, sebbene quest'ultimo non consideri la variabilità spaziale di parametri fondamentali come la conducibilità termica, la capacità termica volumetrica e gli spessori degli strati. Inoltre si è constatata la necessità di integrare tale sistema con una SGV, dal momento che le potenze termiche estratte ed iniettate nel terreno dai pali sono risultate insufficienti per il soddisfacimento del fabbisogno energetico dell'edificio. Aumentare la loro lunghezza oltre il valore indicato dal dimensionamento statico, avrebbe implicato dei costi iniziali aggiuntivi non indifferenti. Dunque risulta più logico pensare di adottare questa tipologia d'impianto geotermico ad edifici più grandi (come ad esempio condomini), che comunque presentano una planimetria più estesa in grado di ospitare un numero maggiore di pali di fondazione.

L'impiego dei pali energetici rappresenta una pratica impiantistica quasi sconosciuta in Italia, nonostante sia abbondantemente affermata a livello europeo, soprattutto nelle vicine Svizzera, Austria e Germania. Qualcosa si sta muovendo, seppur lentamente; si auspica che in un futuro prossimo non troppo lontano l'impiego di questa tecnica peculiare della geotermia a bassa entalpia e delle risorse rinnovabili in generale per la climatizzazione

degli edifici, riesca a trovare terreno fertile in questo Paese ancora troppo radicato al consumo di fonti fossili. L'uso combinato di energie rinnovabili garantisce un costante comfort domestico sia nella stagione invernale che in quella estiva, nel pieno rispetto dell'ambiente...le conoscenze ci sono, basterebbe potenziare i mezzi di diffusione; possiamo ancora invertire questa rotta negativa prima che sia troppo tardi, ma c'è bisogno di una sensibilità maggiore che purtroppo il sistema economico e chi lo muove non riesce ancora a contemplare e puntualmente ignora.

BIBLIOGRAFIA

- ❖ La casa intelligente. Risparmio, tecnologia e comfort – R. Rizzo, Franco Muzzio Editore;
- ❖ Consumo interno lordo di energia (fonti: Relazione generale sulla situazione economica del Paese - Ministero dello Sviluppo Economico, "Bilancio energetico nazionale");
- ❖ Relazione geologico-tecnica del sito di San Giovanni in Persiceto (BO) fornita da GEONET;
- ❖ Servizio di accesso diretto 'Dexter' ai dati di temperatura e radiazione solare del comune di Bologna - ARPA-SIM (Servizio IdroMeteorologico) Emilia-Romagna;
- ❖ Sistemi con pali energetici – Supsi;
- ❖ User Manual del software PILESIM2 “Simulation tool for heating/cooling systems with energy piles or multiple borehole heat exchangers” – Dr. Pahud, Supsi;
- ❖ Sistema Rauego per lo sfruttamento del calore terrestre (informazione tecnica 827600) – Rehau;
- ❖ Tipologia e capacità portante di pali di fondazione - Dipartimento di Ingegneria Civile – Sezione Geotecnica, Università degli Studi di Firenze;
- ❖ Sviluppi nelle pompe di calore: il terreno come sorgente termica - Dipartimento di Fisica Tecnica della Facoltà di ingegneria di Padova;
- ❖ Articolo “Ground Source Heat Pump – il terreno come sorgente fredda” di G. Dall’O’;
- ❖ Modelli di scambio termico in pozzo sulla base della caratterizzazione geotermica di un reservoir a bassa entalpia: studio di sensitività sulla efficienza dei sistemi di condizionamento con pompa di calore – Tinti Francesco;

- ❖ TRT & Geostatistical modelling of a shallow geothermal reservoir –
R. Bruno, F. Tinti DICMA, Università degli studi di Bologna;
- ❖ Il Manifesto della geotermia – U.G.I.;

WEBBOGRAFIA

- ❖ www.geothermie.ch
- ❖ www.supsi.ch
- ❖ www.gitalia.eu/
- ❖ www.infobuildenergia.it/
- ❖ prana.climaveneta.it
- ❖ www.minergie.ch
- ❖ www.energyresources.it
- ❖ www.rehau.it/
- ❖ www.energeticambiente.it/geotermico/

Un Ringraziamento va...

A Giuseppina, che in questi giorni compirà 80 anni, tanti auguri nonna, questa tesi è il mio regalo di compleanno per te!

A Franco e Laura, saldi pali di fondazione “energetici” su cui sta edificando la mia coscienza ecosostenibile.

A Marina, la stella che mi indica la direzione quando smarrisco la bussola e senza la quale mi sentirei perso.

Al Prof. Bruno per la sua infinita disponibilità e il suo impegno nelle energie rinnovabili, grazie al quale ho avuto modo di approfondire questa tematica “ambientale” a me tanto a cuore.

A Francesco, che mi ha guidato in questi mesi nel mondo della geotermia; per il suo sostegno e le conoscenze che mi ha trasmesso.

A Pasquale ed Emanuele eterni compagni di viaggio in questa esperienza universitaria.

Ad Antonio, amico leale e collega ambientale.

A Baraldi, Guflone, Cavallo, Kimbo, Pinocchio e Zapp per quante ne abbiamo combinate insieme in questi anni a Bologna.

A mia sorella, alla colonia di Atriani e agli amici tutti.