

**ALMAMATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in INGEGNERIA EDILE

**STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN IMPIANTO DI RISCALDAMENTO
GEOTERMICO PER UN EDIFICIO PUBBLICO E CONSIDERAZIONI
ECONOMICHE**

Tesi di Laurea in: GEOLOGIA APPLICATA T

Relatore:

PROF. GIANLUCA MARCATO

Presentata da:

FILIPPO BATTISTINI

(II sessione)

Anno accademico: 2010/2011

INDICE

INTRODUZIONE	pag.4
CAPITOLO 1	
ENERGIA GEOTERMICA	pag.6
1.1 CALORE DELLA TERRA	pag.6
CAPITOLO 2	
SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE GEOTERMICHE	pag.10
2.1 SISTEMI CLOSED-LOOP	pag.12
2.2 SISTEMI OPEN-LOOP	pag.14
2.3 SISTEMI A COLLETTORI ORIZZONTALI	pag.16
CAPITOLO 3	
CENNI DI NORMATIVA	pag.20
3.1 RIFERIMENTI NORMATIVI IN EUROPA	pag.29
3.2 RIFERIMENTI NORMATIVA IN ITALIA	pag.21
CAPITOLO 4	
IL POTENZIALE GEOTERMICO	pag.28
4.1 POTENZIALE GEOTERMICO IN ITALIA	pag.28
4.2 POTENZIALE GEOTERMICO IN EMILIA-ROMAGNA	pag.29
CAPITOLO 5	
STUDIO DI IMPIANTO GEOTERMICO PER EDIFICIO PUBBLICO	pag.36
5.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO OGGETTO DI STUDIO	pag.36
5.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO	pag.39
5.3 ANALISI STRATIGRAFICHE DELL'AREA DI STUDIO	pag.43
5.4 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE	pag.49
5.5 IDROCHIMICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE	pag.56
5.6 CARATTERIZZAZIONE IDROCHIMICA	pag.57
5.7 FATTIBILITA' ED INDICAZIONI SULLA TIPOLOGIA DI GEOSCAMBIO OTTIMALE	pag.58

5.8 CALCOLO DEL FABBISOGNO TERMICO	pag.59
5.9 DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO A PDC	pag.60
5.9.1 DEFINIZIONE DELLA POTENZA DELLA PDC	pag.61
5.9.2 IMPIANTO DI DISTRIBUZIONE	pag.62
5.9.3 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLE SONDE GEOTERMICHE	pag.63
5.9.3.1 APPROSSIMATO (TABELLARE)	pag.63
5.9.3.2 ESAUSTIVO (ASHRAE)	pag.67
5.10 ESEMPIO DI INSTALLAZIONE	pag.78
CAPITOLO 6	
ASPETTI ECONOMICI DELL'INTERVENTO	pag.84
6.1 COSTO ECONOMICO DELL'IMPIANTO	pag.84
6.2 COSTI DI ESERCIZIO	pag.85
6.3 COSTO DI MANUTENZIONE	pag.86
6.4 CONSIDERAZIONI FINALI CASO STUDIO	pag.86
CAPITOLO 7	
CONFRONTO TRA RISCALDAMENTO TRADIZIONALE E IMPIANTO GEOTERMICO PER GLI EDIFICI SCOLASTICI DEL COMUNE DI CESENA	pag.88
7.1 IMPIANTI TRADIZIONALI, COSTI E CONSUMI	pag.88
7.2 IMPIANTI GEOTERMICI, COSTI DI INSTALLAZIONE E CONSUMI	pag.90
7.3 BILANCIO ECONOMICO DELL'INTERVENTO	pag.92
CAPITOLO 9	
CONCLUSIONI	pag.94
BIBLIOGRAFIA	pag.96
RINGRAZIAMENTI	pag.98

INTROUZIONE

Con il termine Energie Rinnovabili s'intendono quelle forme di energia generate da fonti che per loro caratteristica intrinseca si rigenerano o non sono esauribili nella scala di tempo umana, e il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per le generazioni avvenire. Sono forme di energia alternativa alle tradizionali fonti fossili e molte hanno la caratteristica di essere pulite.

Tra i combustibili fossili, per il riscaldamento vediamo che il più comune è il Gas metano, esso ha tempi di formazione molto lunghi e quindi è considerato una fonte di energia non rinnovabile.

L'uso più comune del gas naturale è quello residenziale e le previsioni future indicano un incremento del 30% nel consumo residenziale entro il 2020.

Secondo i dati ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) nel 2004 sono stati consumati, nel mondo, 2760 miliardi di m³ di gas naturale. Alla fine dello stesso anno le riserve ammontavano a 177572 miliardi di m³; assumendo costanti i consumi (trascurando un incremento di circa il 2,7% annuo), le riserve note si estinguerebbero prima di 60 anni. Oltre all'esauribilità della fonte bisogna considerare l'impatto ambientale della sua combustione, infatti, si generano gas serra che contribuiscono al surriscaldamento del pianeta. L'estrazione del gas, inoltre, porta ad una diminuzione della pressione nella riserva sotterranea e ciò può portare ad un lento e progressivo abbassamento del terreno (subsidenza).

L'utilizzo di gas metano per il riscaldamento degli edifici rappresenta un'importante spesa economica, perciò l'utilizzo di fonti rinnovabili oltre a garantirci una salubrità dell'aria migliore riducendo l'inquinamento, ci permette soprattutto di risparmiare nel tempo.

In questa tesi sarà descritta, studiata e proposta come energia rinnovabile l'Energia Geotermica, effettuando anche considerazioni economiche preliminari per l'utilizzo di essa per il riscaldamento degli edifici scolastici a carico del Comune di Cesena, eseguendo un dimensionamento dell'impianto per un edificio-tipo.

CAPITOLO 1

ENERGIA GEOTERMICA

L'energia geotermica è l'energia che si trova nel sottosuolo sotto forma di calore. All'interno della terra sono immagazzinate enormi quantità di calore, che derivano in maggior parte dal decadimento delle sostanze radioattive contenute nel sottosuolo. Secondo le conoscenze attuali, le temperature nel nucleo della terra si situano intorno a 6000 °C e nel mantello superiore sono intorno a 1200 °C. Il flusso geotermico totale attraverso la superficie terrestre è di una quantità enorme, pari a 40 miliardi kW, di cui, attraverso varie tecnologie per lo sfruttamento dell'energia geotermica, è tecnicamente possibile usare solo una piccola frazione.

Vicino alla superficie terrestre la temperatura è una combinazione della radiazione solare e del flusso geotermico. In confronto alla radiazione solare che ha un valore di circa 200 W/m², il flusso geotermico è molto piccolo con valori intorno a 50 a 100 mW/m². Il sistema geotermico può essere paragonato a una batteria che viene caricata con una corrente molto bassa. L'estrazione dell'energia geotermica di conseguenza deve essere fatta con una certa cautela, evitando l'estrazione di quantità troppo elevate in poco tempo.

[Geotermica link:<http://lezionitecnologia.jimdo.com/energia/energia-da-fonti-rinnovabili/geotermica/>]

1.1 CALORE DELLA TERRA

E' stato stimato chi il calore della terra, assumendo una temperatura superficiale media di 15°C, sia dell'ordine di 12,6 x 10²⁴ MJ e che quello contenuto nella sola crosta sia dell'ordine di 5,4 x 10²¹ MJ. L'energia termica della Terra è quindi enorme, ma soltanto parte di essa può essere sfruttata. Sino a oggi, l'utilizzazione di questa energia è stata limitata a quelle aree nelle quali le condizioni geologiche permettono a un vettore (acqua in fase liquida o vapore) di "trasportare" il calore dalle formazioni calde profonde alla superficie o vicino a essa, formando quelle che chiamiamo risorse

geotermiche. Il calore interno si manifesta in superficie in siti limitati, come vulcani, geysir, fumarole e sorgenti calde.

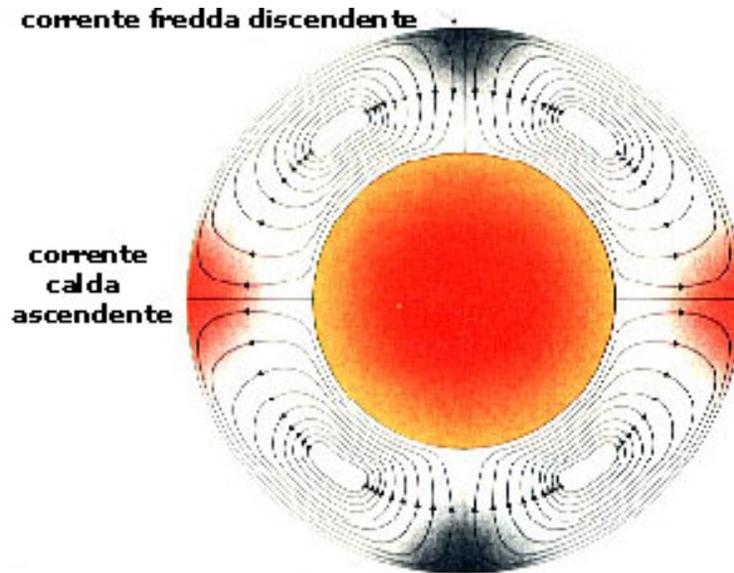


Figura 1: moti convettivi

Esso, tuttavia, ha dimensioni tali da essere la causa di fenomeni di scala planetaria, quali il movimento delle placche crostali. E', infatti, il calore interno della terra che provoca nell'astenosfera i moti dei materiali fusi o semifusi che "trascinano" le placche litosferiche (Fig.1); queste placche si spostano in continuazione e reciprocamente, collidono, si formano e sono "digerite". Ai margini delle placche si formano anche vulcani e aree a gradiente geotermico molto elevato. Il gradiente geotermico, che dà la misura dell'aumento della temperatura con la profondità, ha un valore medio di 2,5-3°C/100 m, ma, nelle aree "geotermiche" esso può essere anche dieci volte superiore alla norma.

L'energia geotermica è generalmente definita rinnovabile e sostenibile. Il termine rinnovabile si riferisce a una proprietà della sorgente di energia, mentre il termine sostenibile descrive come la risorsa è utilizzata. La ricarica di energia è il fattore critico della rinnovabilità di una risorsa geotermica. Quando si sfrutta un sistema geotermico naturale, la ricarica energetica avviene attraverso l'apporto al sistema di

fluidi caldi contemporaneamente (o in tempi comparabili) allo sfruttamento. Questo permette di classificare l'energia geotermica come risorsa energetica rinnovabile. La sostenibilità dell'utilizzazione di una risorsa dipende dalla sua quantità iniziale, dalla velocità con cui si rigenera e dalla velocità con cui si consuma. Ovviamente, l'utilizzazione può essere sostenuta per tutto il tempo che si vuole, purché la risorsa si rigeneri a una velocità maggiore di quanto non sia sfruttata. Il termine "sviluppo sostenibile" è usato dalla Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo per descrivere lo sviluppo che "soddisfa le necessità della presente generazione senza compromettere le necessità delle generazioni future". In questo quadro, lo sviluppo sostenibile non richiede che tutte le risorse energetiche debbano essere usate in modo completamente sostenibile, ma, più semplicemente, che a una data risorsa, che si esaurisce, se ne possa sostituire un'altra in grado di far fronte alle necessità delle generazioni future. Ne segue che un particolare campo geotermico non deve necessariamente essere sfruttato in modo sostenibile. I programmi per realizzare la sostenibilità dell'energia geotermica dovrebbero tendere a raggiungere, e poi sostenere, un certo regime di produzione, a livello nazionale o regionale, sia nel settore elettrico sia in quello dell'uso diretto del calore, per un dato periodo, ad esempio 300 anni, mettendo in produzione nuovi sistemi geotermici, man mano che altri si esauriscono.

[Linee e Zone Geotermiche link: <http://eilantha.splinder.com/post/9463712/linee-e-zone-geotermiche>]

CAPITOLO 2

SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE GEOTERMICHE

L'energia geotermica, tra le energie rinnovabili, è certamente quella più versatile. La produzione di elettricità è la forma di utilizzazione principale e più importante delle risorse geotermiche ad alta temperatura ($>150^{\circ}\text{C}$). Le risorse a temperatura medio-bassa ($<150^{\circ}\text{C}$) sono adatte, oltre che alla generazione di elettricità con impianti a ciclo binario, a una molteplicità di usi diretti del calore, che vanno dal riscaldamento di ambienti (Fig. 2), alla refrigerazione, agli usi agricoli, all'acquacoltura, all'impiego nei processi industriali a caldo.

Le pompe di calore sono la forma di uso diretto del calore geotermico con la

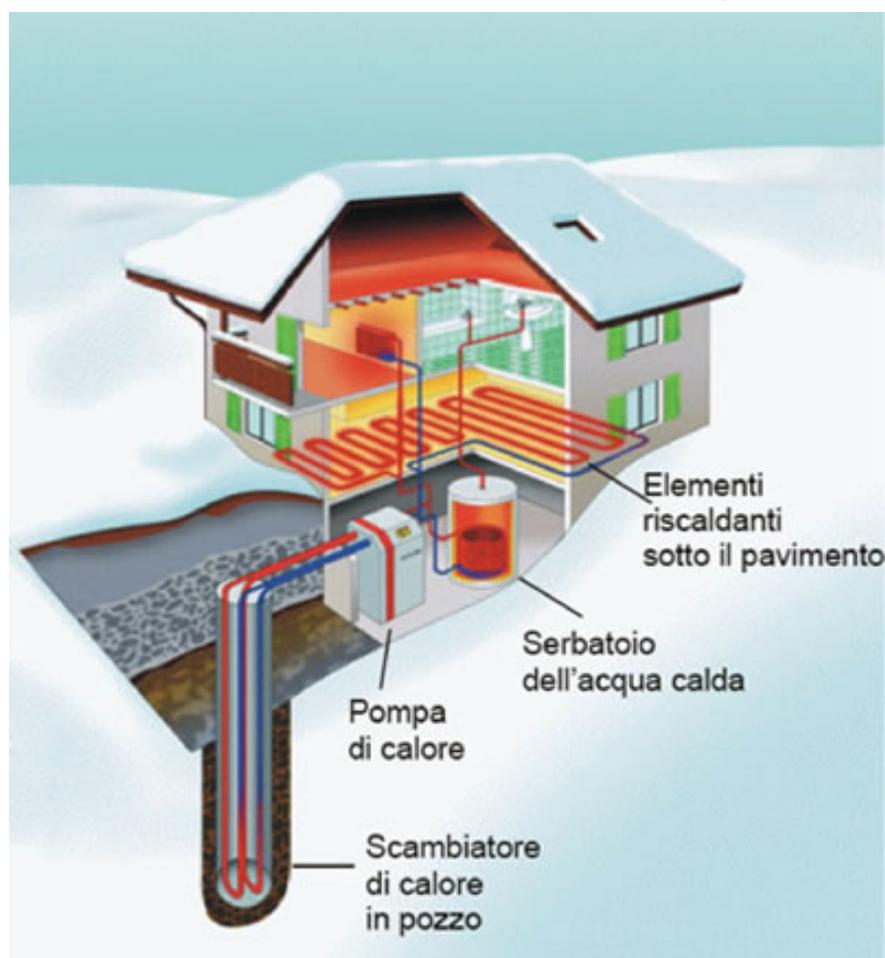


Figura 2 , Impianto Geotermico ad uso domestico

maggior utilizzazione di energia e la maggior potenza installata. I diversi sistemi di pompe di calore disponibili permettono di estrarre e utilizzare economicamente il calore contenuto in corpi a bassa temperatura, come terreno, acquiferi poco profondi, masse d'acqua superficiali, ecc. Le pompe di calore sono macchine che spostano il calore da uno spazio o corpo più freddo verso uno più caldo, cioè, in direzione opposta a quella in cui tenderebbe a dirigersi naturalmente. Un comune condizionatore è, in realtà, una pompa di calore. Tutti gli apparecchi refrigeranti (condizionatori d'aria, frigoriferi, freezer, ecc.) estraggono calore da uno spazio (per mantenerlo freddo) e lo scaricano in un altro spazio più caldo. L'unica differenza tra una pompa di calore geotermica e un'unità refrigerante sta nell'effetto desiderato, il raffreddamento per l'unità refrigerante, e il riscaldamento per la pompa di calore. Molte pompe di calore sono, peraltro, reversibili e il loro funzionamento può essere invertito, potendo operare alternativamente come unità riscaldanti o raffreddanti. Le pompe di calore richiedono energia elettrica per funzionare, ma, in condizioni climatiche adatte e con un buon progetto, il bilancio energetico è positivo. In Italia, le pompe di calore hanno ancora un'applicazione piuttosto limitata, ma il loro uso si sta espandendo. Le risorse geotermiche sono sfruttate per il riscaldamento di ambienti in 33 paesi. Islanda, Turchia, Cina e Francia sono i paesi con le maggiori installazioni, soprattutto nel settore del riscaldamento di quartieri urbani, mentre il riscaldamento di abitazioni singole è più diffuso in Australia, Russia, Giappone e Stati Uniti. I sistemi di riscaldamento sono quelli convenzionali (radiatori, pannelli radianti, ecc.). I fluidi caldi geotermici sono usati direttamente, se non contengono sostanze corrosive o incrostanti, oppure riscaldano un fluido secondario attraverso scambiatori di calore. Il riscaldamento geotermico di quartieri residenziali richiede un investimento di capitali ingente. I costi maggiori sono quelli iniziali dei pozzi di produzione e di reiniezione, i costi degli impianti ausiliari, della rete di distribuzione e degli impianti integrativi per i periodi di maggior freddo. In confronto ai sistemi convenzionali, che bruciano combustibili, i costi operativi sono, al contrario, considerevolmente più bassi. I sistemi di riscaldamento alimentati dall'energia geotermica hanno emissioni di biossido di carbonio in pratica nulle. In Italia, il sistema di riscaldamento urbano di

Ferrara, alimentato da un acquifero a 100°C tra 1100 e 2000 m di profondità, fornisce calore a un volume di 2,5 milioni di m³ in edifici privati e pubblici. Altri sistemi di riscaldamento si trovano nell'area geotermica toscana (Castelnuovo V.C., Larderello, Monterotondo Marittimo, Pomarance) e a Bagno di Romagna. Il riscaldamento di singoli edifici, soprattutto alberghi, è diffuso nell'area dei Colli Euganei (Abano Terme, Battaglia Terme, Galzignano, Montegrotto) e nell'Isola d'Ischia.

[Le risorse geotermiche link: http://tecnnet.ptenel.it/depositi/tecnnet/articolisegnalati/1429/36601-Risorse_geotermiche.pdf]

2.1 SISTEMI CLOSED-LOOP

Le sonde geotermiche verticali consistono in un sistema chiuso, di uno o più tubi raccordati a U sul fondo del pozzo, generalmente sui 100 - 150 m di profondità, al cui interno scorre il fluido termovettore proveniente dalla pompa di calore (Fig. 3). Nel sottosuolo avvengono, infatti, i processi di scambio termico, in parte amplificati dalle proprietà termiche dei suoli e dalla temperatura del terreno indisturbato, che permettono la estrazione/dissipazione nel sottosuolo della potenza termica/frigorifera generata dalla pompa di calore.



Figura 3 , sistema Closed-Loop

Geothermal System Types :<http://www.mcquay.com/McQuay/DesignSolutions/GeothermalPage2>

Tale soluzione è applicabile ovunque, perché non si hanno particolari problemi ambientali dovuti all'utilizzo diretto di acqua di falda e lo scambio termico nel sottosuolo in profondità fornisce in sostanza sempre dei risultati accettabili in termini di resa. Le migliori condizioni si hanno in presenza di formazioni rocciose fratturate, con notevole flusso di acqua di falda. Infatti, da una parte i calcari e le rocce in genere hanno buone proprietà conduttive, e dall'altra la permeabilità secondaria favorisce la componente convettiva, dovuta al moto dell'acqua di falda. Per contro, terreni sciolti secchi forniscono le rese peggiori, a causa non solo della mancanza di acqua, ma anche e soprattutto alla presenza di aria tra i granuli, molto isolante.

Le sonde geotermiche verticali sono la soluzione a minor impatto ambientale tra tutte quelle possibili. Gli impatti ambientali di un impianto geotermico a sonde verticali sono modesti e limitati quasi esclusivamente alla fase di perforazione. Per quanto riguarda la situazione a regime, trattandosi di un circuito chiuso, immerso in una miscela bentonitica, non si hanno prelievi e re immissioni di acqua di falda. Per questo, non sussiste nessun problema legato alla subsidenza, allo sversamento d'inquinanti e all'interazione tra falde sovrapposte in acquiferi multistrato.

Il prelievo/immissione di calore ha caratteristiche puntuali: per tale motivo, è molto improbabile la modifica della temperatura del sottosuolo per opera di sonde geotermiche verticali. Il problema si può verificare solo in caso di notevoli sottodimensionamenti del campo sonda, per cui, in condizioni geologiche particolari, si può avere il congelamento dell'acqua di falda contenuta nel terreno immediatamente a ridosso della sonda; il fenomeno, denominato "ice lensing", può portare, a causa dell'aumento della pressione, a rotture meccaniche della sonda. Di norma, è piuttosto facile accorgersi di questo pericolo perché si verifica quando il fluido termovettore circolante nelle sonde si assesta al di sotto degli 0°C per lunghi periodi di tempo. Un evento di questo tipo avviene solo in condizioni particolari. Molto più probabile, e pericoloso, è invece il verificarsi del congelamento del fluido circolante all'interno delle sonde, dovuto a notevoli sottodimensionamenti del geoscambiatore. L'abbassamento della temperatura al di sotto del limite di congelamento imposto dal fluido antigelo miscelato all'acqua nelle sonde, anche per periodi limitati

di tempo, comporta il congelamento del fluido termovettore, con danni evidenti alle tubazioni e soprattutto alla pompa di calore, fino alla completa rottura dell'impianto geotermico. Lo sversamento del fluido che ne deriva, dà luogo in ogni caso ad un impatto ambientale molto basso, in quanto il materiale di cementazione, presente per tutta la lunghezza utile della sonda verticale, impedisce alla miscela di spargersi nel suolo. Diverso è il discorso per i collegamenti orizzontali, dalla sonda geotermica alla pompa di calore, il cui intorno non è cementato. La perdita di fluido conseguente ad una lesione nei collegamenti orizzontali causerebbe un'alterazione delle caratteristiche chimiche della falda freatica superficiale, se presente.

Per quanto riguarda invece le fasi di perforazione, i principali impatti possono essere sversamenti di inquinanti nelle falde (a seguito di non corretto controllo del foro), interconnessione di falde sovrapposte, (a seguito di un non corretto rivestimento del foro) e lieve intorbidimento localizzato dell'acqua di falda.

2.2 SISTEMI OPEN-LOOP

I pozzi geotermici di prelievo di acqua di falda forniscono generalmente dei risultati di resa migliori rispetto alle sonde geotermiche verticali. Infatti, con portate sufficienti (per la portata minima si parla di 0,25 m³/h per ogni kW di potenza da generare) si ottiene la potenza termica totale necessaria con un numero molto inferiore di perforazioni rispetto alla soluzione a circuito chiuso vista prima nel sistema Closed-Loop. Un pozzo geotermico di estrazione va in genere ad intercettare una falda artesianica; viene quindi predisposta una pompa a fondo pozzo al fine di emungere l'acqua con portate sufficienti.

A ogni pozzo di estrazione, occorre aggiungere pozzi di reiniezione per lo scarico nel medesimo acquifero dell'acqua in uscita dalla pompa di calore (Fig.4). L'acqua di falda non può però essere utilizzata direttamente, a causa delle particelle fini in essa disciolte e del suo contenuto di sali e metalli. In particolare, occorre analizzare il contenuto di ferro e manganese, elementi le cui quantità elevate possono portare a rilevanti incrostazioni delle tubazioni di raccolta. Prima dell'ingresso nella pompa di

calore, occorre inoltre inserire nel circuito un filtro per trattenere le particelle più fini, che potrebbero danneggiare l'evaporatore della macchina. Anche per quanto riguarda la reiniezione, si riscontrano diversi problemi tecnici, poiché può verificarsi, con maggiore frequenza rispetto al pozzo di estrazione, l'intasamento dei filtri posti a fondo pozzo. Non essendoci, al contrario dei pozzi di estrazione, flusso d'acqua elevato, aumenta la probabilità di intasamento delle superfici filtranti, a causa dei sali disciolti nell'acqua e delle particelle finissime non intercettate da precedenti filtri. A tale problema si può in parte ovviare con l'inserimento di una pompa idraulica anche nel circuito di re immissione; tale scelta pregiudicherebbe però sensibilmente sull'efficienza generale, in termini di consumi elettrici, del sistema, già limitata dalle pompe idrauliche di sollevamento dei pozzi di estrazione.

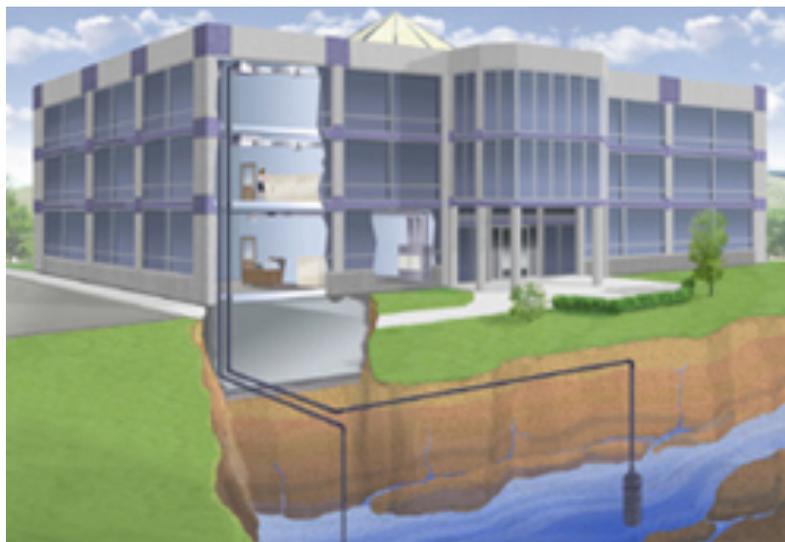


Figura 4 , sistema Open-Loop

Geothermal System Types :<http://www.mcquay.com/McQuay/DesignSolutions/GeothermalPage2>

I pozzi geotermici con prelievo di acqua di falda, per quanto riguarda la perforazione riscontrano gli stessi problemi e pericoli ambientali esistenti per i sistemi Closed-Loop. Per quanto riguarda la fase di esercizio, invece, il problema è completamente diverso. Infatti, non sussiste o è molto limitata, la possibile modifica termica del

sottosuolo. Ciò è dovuto fondamentalmente al fatto che l'estrazione e l'immissione sono situati in punti diversi, anche se interessano il medesimo acquifero, quindi la variabilità termica è limitata. Inoltre, questo sistema viene progettato in modo che il pozzo di estrazione sia a monte e l'immissione sia a valle, nella direzione del flusso della falda; in tal modo, non si crea un corto circuito termico che potrebbe compromettere l'efficienza del sistema. Trattandosi di un circuito aperto, e usufruendo sempre di quantità di acqua differenti, il congelamento del fluido è un pericolo remoto, e potrebbe accadere solo nel circuito di re immissione. Per ovviarvi, occorre tenere sempre sotto monitoraggio le temperature di entrata (in questo caso il ΔT tra ingresso e uscita è intorno ai 13-14°C) e le ΔT generate dalla pompa di calore. Il principale impatto in fase di esercizio di un sistema aperto consiste nel pericolo della subsidenza. Infatti, sebbene l'estrazione venga perfettamente compensata in termini di portata dalla reiniezione, il carattere puntuale di queste operazioni potrebbe generare squilibri nella quota della falda. Tali squilibri ovviamente sarebbero accentuati se una parte dell'acqua in uscita dalla pompa di calore fosse utilizzata per altri scopi, e poi re iniettata. In questo caso, si sommerebbe anche il rischio di sversamento di inquinanti in falda.

In caso che le perforazioni intercettino falde sovrapposte, occorre sempre predisporre il pozzo affinché prelevi acqua da un solo acquifero, quello a conducibilità idraulica maggiore. Il prelievo (e la re immissione) da più acquiferi sovrapposti genererebbe infatti un'interconnessione tra le falde e aumenterebbe il rischio di squilibri e subsidenza, nonché il rischio di sversamento di inquinanti dall'acquifero posto a quota superiore a quello posto a quota inferiore.

2.3 SISTEMI A COLLETTORI ORIZZONTALI

La soluzione a collettori geotermici orizzontali consiste nel disporre, in varie possibili soluzioni, a serpentina, a chiocciola, etc., i tubi di polietilene distesi su un'ampia superficie di terreno, a 2-3 metri di profondità (Fig.5). Infatti, già i primi 2 metri

servono a schermare in parte i tubi dalla radiazione solare, per cui si riscontra una non eccessiva variabilità della temperatura a detta profondità. Il valore di resa termica che si considera in genere per questa soluzione è di 20 - 25 W/m² di terreno adibito allo scopo. Per tale motivo, il primo limite che presenta l'impianto è quello che occorre una grande estensione per soddisfare potenze anche relativamente modeste.



Figura 5 , sistema a collettori orizzontali

Geothermal System Types :<http://www.mcquay.com/McQuay/DesignSolutions/GeothermalPage2>

Un altro limite all'utilizzo di questo sistema è che il terreno deve presentare un'elevata permeabilità, infatti, la posa dei collettori in terreni secchi, dà solitamente luogo a risultati mediocri, che, con il funzionamento nel tempo della pompa di calore, possono anche portare a un completo inaridimento del terreno e a fenomeni di sovraconsolidazione delle argille, con il risultato del peggioramento progressivo dell'efficienza del sistema. I collettori orizzontali, essendo una soluzione diffusa e non concentrata, sono la soluzione con il maggior rischio di modifica termica del

terreno, con conseguente inaridimento dello stesso. Per tale motivo, onde garantire un apporto termico costante al terreno, è opportuno che i collettori orizzontali vengano posizionati in terreni ad elevato fattore di permeabilità. L'essiccamento del terreno può portare ad alterazioni stagionali nel normale sviluppo della componente arborea superficiale e a fenomeni di sovra consolidazione nel caso siano presenti terreni coesivi (argilloso - limosi), con rischi per i fabbricati eventualmente vicini.

E' noto che tali fenomeni possono determinare un generale ritiro volumetrico e crepe nei terreni di fondazione degli edifici con conseguenti ripercussioni negative sulle strutture in elevazione.

CAPITOLO 3

CENNI DI NORMATIVA

Il tema del risparmio energetico e della riduzione delle emissioni di CO₂ è di grande attualità negli ultimi anni. Il protocollo di Kyoto prevede una riduzione delle emissioni del 6,5% rispetto al 1990 entro il 2020 e il mancato rispetto del protocollo di Kyoto comporterà per l'Italia penali di 9,3 miliardi di €. La comunità scientifica internazionale è concorde sugli effetti negativi derivanti dall'emissione di gas serra e polveri sottili derivanti dalla combustione di combustibili. L'unione europea promuove la diffusione di tecnologie che non prevedano l'utilizzo di fonti di energia fossile. Fuori dai confini europei, gli USA, pur non essendo tra i firmatari del protocollo di Kyoto, sono la nazione che fa il più largo uso di impianti di climatizzazione geotermica (i primi furono installati nei primi anni '40). L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning System) costituisce uno dei riferimenti mondiali per il settore della climatizzazione ad uso civile. Negli USA si contano oltre 500'000 installazioni per un totale di 7'000 MWatt ed è ipotizzabile un fortissimo incremento nei prossimi anni.

In Svizzera l'energia geotermica è stata classificata come rinnovabile pertanto beneficia del programma nazionale per l'energia "Energie 2000" e del successivo "Energie Suisse". La Svezia ha abbattuto il 50% dei consumi di combustibili fossili per il riscaldamento degli edifici negli ultimi 15 anni, ed ora il 95% delle nuove abitazioni singole è climatizzata con metodi geotermici

[Normativa sulla geotermia link: <http://www.slideshare.net/Calbeira/normativa-sulla-geotermia>]

3.1 RIFERIMENTI NORMATIVI IN EUROPA

Tra i principali riferimenti normativi o di indirizzo dell'UE vanno evidenziate la direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico dell'edilizia e il documento strategico del 10 gennaio 2007 "Una politica energetica per l'Europa" che propone infatti

obbiettivi specifici di aumento dell'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e la crescita dell'efficienza energetica stessa. Esso rileva la necessità di un nuovo quadro normativo per la promozione delle energie rinnovabili. In Europa solamente alcuni stati sono dotati di una specifica normativa relativa agli impianti geotermici a bassa entalpia e sono la Svezia, che ha definito a scala di programmazione territoriale gli areali dei quali è possibile realizzare impianti geotermici con le relative limitazioni o vincoli, e la Germania che con le norme tedesche VDI 4640 costituiscono di fatto uno dei riferimenti standard europei per la progettazione degli impianti

[Normativa sulla geotermia link: <http://www.slideshare.net/Calbeira/normativa-sulla-geotermia>]

3.2 RIFERIMENTI NORMATIVI IN ITALIA

Nel 2005 è stata recepita la direttiva 2002/91/CE redatta dall'Unione Europea, ed è stato emanato il D.Lgs 19 agosto 2005, n.192 corretto e integrato dal successivo D.Lgs. 29 dicembre 2006, n. 311 il quale codifica per la quantità energetica degli edifici mediante il parametro kWh/m²*anno, e imponendo dal 1 Luglio 2007 l'obbligo del Certificato Energetico per tutti gli edifici di nuova costruzione superiori a 1000 m² successivamente esteso nel 2008 a tutti i casi di compravendita, e dal 1 luglio 2009 esteso a tutti i casi.

Interessanti a riguardo dell'argomento della geotermia sono le seguenti:

- Il R.D. 27 luglio 1927 n. 1443 - Art. 1: La ricerca e la coltivazione di sostanze minerali e delle energie del sottosuolo, industrialmente utilizzabili, sotto qualsiasi forma fisica, sono regolate dalla presente legge.
- Il R.D. 11 dicembre 1933 n. 1775 - Art. 95: salva la facoltà attribuita al proprietario nell'art. 93, chi, nei comprensori soggetti a tutela, voglia provvedere a ricerche di acque sotterranee o a scavo di pozzi nei fondi propri o altrui, deve chiederne l'autorizzazione all'ufficio del Genio civile, corredando la domanda del piano di massima dell'estrazione e dell'utilizzazione che si propone di eseguire.
[...]
- Legge 4 Agosto 1984 n. 464 - Art. 1: Chiunque intenda eseguire nel territorio

della Repubblica studi ed indagini, a mezzo di scavi, pozzi, perforazioni ed indagini , a mezzo di scavi, pozzi, perforazioni e rilievi geofisici, per ricerche idriche o per opere di ingegneria civile , al disotto di trenta metri dal piano di campagna ovvero a mezzo di gallerie suborizzontali o inclinate di lunghezza superiore ai duecento metri, deve darne comunicazione al Servizio geologico della Direzione generale delle miniere del Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato entro trenta giorni dall'inizio degli studi e delle indagini, indicando su apposite mappe la localizzazione degli studi e delle indagini programmati e deve fare pervenire al Servizio geologico, entro trenta giorni dall'ultimazione degli studi e delle indagini, una dettagliata relazione, corredata dalla relativa documentazione, sui risultati geologici e geofisici acquisiti.

- Legge 4 Agosto 1984 n. 464

Per perforazioni di profondità superiore a 30 m occorre dunque comunicare all'ISPRA (ex APAT) - Dipartimento Difesa del Suolo Servizio Geologico, Scienze della Terra e Carte Tematiche Settore Idrogeologia e Geologia Applicata - Via Vitaliano Brancati, n° 48 - 00144 Roma:

denuncia di inizio indagine (Mod. 1). Al modulo deve essere allegato uno stralcio di cartografia (base I.G.M. scala 1:25.000) con indicata l'area d'intervento;

denuncia dell'eventuale sospensione (Mod. 2) e successiva eventuale ripresa (Mod. 3);

denuncia di fine indagine con dati tecnici (Mod. 4). A tale modulo deve essere allegata l'ubicazione della perforazione su carta di dettaglio e la descrizione lito-stratigrafica del sottosuolo utilizzando, se necessario, lo schema tipo (Mod. 4 bis).

Art. 840: Sottosuolo e spazio sovrastante al suolo . La proprietà del suolo si estende al sottosuolo, con tutto ciò che vi si contiene, e il proprietario può fare qualsiasi escavazione od opera che non rechi danno al vicino . Questa disposizione non si applica a quanto forma oggetto delle leggi sulle miniere, cave e torbiere. Sono del pari salve le limitazioni derivanti dalle leggi sulle antichità e belle arti, sulle acque, sulle opere idrauliche e da altre leggi speciali. Il proprietario del suolo non può opporsi ad attività di terzi che si svolgano a tale

profondità nel sottosuolo o a tale altezza nello spazio sovrastante, che egli non abbia interesse ad escluderle.

Art. 889: Distanze per pozzi, cisterne, fosse e tubi . Chi vuole aprire pozzi, cisterne, fosse di latrina o di concime presso il confine, anche se su questo si trova un muro divisorio, deve osservare la distanza di almeno due metri tra il confine e il punto più vicino del perimetro interno delle opere predette. Per i tubi d'acqua pura o lurida, per quelli di gas e simili e loro diramazioni deve osservarsi la distanza di almeno un metro dal confine . Sono salve in ogni caso le disposizioni dei regolamenti locali.

- La legge 23 luglio 2009 n. 99, Art. 27 comma 28 ha previsto l'emanazione di un regolamento finalizzato al riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche.

Art. 27 comma 28: Il Governo e' delegato ad adottare, entro centottanta giorni dalla data di entrata in vigore della presente legge, [...], u no o piu' decreti legislativi al fine di determinare un nuovo assetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche che garantisca, in un contesto di sviluppo sostenibile del settore e assicurando la protezione ambientale, un regime concorrenziale per l'utilizzo delle risorse geotermiche ad alta temperatura e che semplifichi i procedimenti amministrativi per l'utilizzo delle risorse geotermiche a bassa e media temperatura . [...]

- La legge 23 luglio 2009 n. 99, Art. 27 comma 28 ha previsto l'emanazione di un regolamento finalizzato al riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche.

Art. 27 comma 39: Entro sei mesi dalla data di entrata in vigore della presente legge, il Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e con il Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, di intesa con la Conferenza unificata di cui all'articolo 8 del decreto legislativo 28 agosto 1997, n. 281, emana un decreto volto a definire le prescrizioni relative alla posa in opera degli impianti di produzione di calore da risorsa geotermica, ovvero sonde geotermiche, destinati al

riscaldamento e alla climatizzazione di edifici, per cui e' necessaria la sola dichiarazione di inizio attivita'.

- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 costituisce tale regolamento ed il riferimento normativo nazionale di riferimento per lo sfruttamento geotermico del sottosuolo. E' abrogata la precedente normativa costituita dalla legge 9 dicembre 1986, n. 896
- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 1: La ricerca e la coltivazione a scopi energetici delle risorse geotermiche effettuate nel territorio dello Stato, nel mare territoriale e nella piattaforma continentale italiana, quale definita dalla legge 21 luglio 1967, n. 613, sono considerate di pubblico interesse e di pubblica utilità e sottoposte a regimi abilitativi ai sensi del presente decreto. Ai sensi e per gli effetti del presente decreto legislativo, valgono le seguenti definizioni: sono risorse geotermiche ad alta entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito superiore a 150 °C; sono risorse geotermiche a media entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito compresa tra 90 °C e 150 °C; sono risorse geotermiche a bassa entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito inferiore a 90 °C.
- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 1: Sono d'interesse nazionale le risorse geotermiche ad alta entalpia , o quelle economicamente utilizzabili per la realizzazione di un progetto geotermico, riferito all'insieme degli impianti nell'ambito del titolo di legittimazione, tale da assicurare una potenza erogabile complessiva di almeno 20 MW termici , alla temperatura convenzionale dei reflui di 15 gradi centigradi; sono inoltre di interesse nazionale le risorse geotermiche economicamente utilizzabili rinvenute in aree marine. Fatto salvo quanto disposto ai commi 3 e 5 sono di interesse locale le risorse geotermiche a media e bassa entalpia. Fatto salvo quanto disposto ai commi 3 e 5 sono di interesse locale le risorse geotermiche a media e bassa entalpia , o quelle economicamente utilizzabili per la realizzazione di un progetto geotermico, riferito all'insieme degli impianti nell'ambito del titolo di legittimazione, di potenza inferiore a 20 MW termici ottenibili dal solo fluido geotermico alla temperatura convenzionale dei reflui di

15 gradi centigradi.

- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 1: Sono piccole utilizzazioni locali le risorse geotermiche come definite e disciplinate dall'articolo 10 . Le stesse non sono soggette alla disciplina mineraria di cui al regio decreto 29 luglio 1927, n. 1443, e all'articolo 826 del codice civile. Le risorse geotermiche ai sensi e per gli effetti di quanto previsto e disciplinato dal regio decreto 29 luglio 1927 n. 1443, e dall'articolo 826 del codice civile sono risorse minerarie, dove le risorse geotermiche di interesse nazionale sono patrimonio indisponibile dello Stato mentre quelle di interesse locale sono patrimonio indisponibile regionale . Le autorità competenti per le funzioni amministrative, ai fini del rilascio del permesso di ricerca e delle concessioni di coltivazione, comprese le funzioni di vigilanza sull'applicazione delle norme di polizia mineraria, riguardanti le risorse geotermiche d'interesse nazionale e locale sono le Regioni o enti da esse delegati , nel cui territorio sono rinvenute [...]
- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 1: [...] L'iniezione di acque e la reiniezione di fluidi geotermici nelle stesse formazioni di provenienza, o comunque al di sotto di falde utilizzabili a scopo civile o industriale, anche in area marina, sono autorizzate dall'autorità competente.
- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 10: Piccole utilizzazioni locali Sono piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle per le quali sono soddisfatte congiuntamente le seguenti condizioni: consentono la realizzazione di impianti di potenza inferiore a 2 MW termici , ottenibili dal fluido geotermico alla temperatura convenzionale dei reflui di 15 gradi centigradi; ottenute mediante l'esecuzione di pozzi di profondità fino a 400 metri per ricerca, estrazione e utilizzazione di fluidi geotermici o acque calde, comprese quelle sgorganti da sorgenti per potenza termica complessiva non superiore a 2.000 kW termici, anche per eventuale produzione di energia elettrica con impianti a ciclo binario ad emissione nulla. Sono altresì piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle effettuate tramite l'installazione di sonde geotermiche che scambiano calore con il sottosuolo senza effettuare il prelievo e la reimmissione nel

sottosuolo di acque calde o fluidi geotermici.

- D.Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 Art. 10: Piccole utilizzazioni locali Le autorità competenti per le funzioni amministrative, comprese le funzioni di vigilanza, riguardanti le piccole utilizzazioni locali di calore geotermico sono le Regioni o enti da esse delegate. Le piccole utilizzazioni locali di cui al comma 1, sono concesse dalla Regione territorialmente competente con le modalità previste dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici, di cui al regio decreto 11 dicembre 1933, n. 1775 .Le piccole utilizzazioni locali di cui al comma 2 sono sottoposte al rispetto della specifica disciplina emanata dalla regione competente, con previsione di adozione di procedure semplificate.Le operazioni per lo sfruttamento delle piccole utilizzazioni locali possono essere vietate o limitate, dall'autorità competente, su aree già oggetto di concessioni di coltivazione di risorse geotermiche di interesse nazionale o locale, previa valutazione delle possibili interferenze.

[Normativa sulla geotermia link: <http://www.slideshare.net/Calbeira/normativa-sulla-geotermia>]

CAPITOLO 4

IL POTENZIALE GEOTERMICO

4.1 IL POTENZIALE GEOTERMICO IN ITALIA

La geotermia in Italia è sfruttata in Toscana, una sorta di 'Texas' italiano, dove al posto dei pozzi di petrolio ci sono giacimenti geotermici che valgono oltre 300 miliardi di euro. Con il vapore estratto dal suolo si potrebbero produrre oltre 5 mila miliardi di kilowattora, una quantità sufficiente per soddisfare circa 70 anni di consumi elettrici nazionali. Infatti lo sfruttamento del vapore dei giacimenti geotermici di Larderello, di Travale e dell'Amiata potrebbe equivalere a 428 anni di fatturato di Enel e a 10 volte il valore di borsa del gruppo, concessionario dei serbatoi geotermici in Toscana. Anche a livello mondiale la geotermia può dare un contributo importante alla produzione di energia. Le riserve note, sono stimate in 50 mila miliardi di kilowattora, ovvero 12 miliardi di tonnellate equivalenti petrolio, un decimo delle riserve mondiali, tanto che società come Shell, Bp, Unocal guardano con molto interesse alla geotermia. Molti serbatoi (o acquiferi) si trovano in Paesi in via di sviluppo e, in tal caso, la risorsa geotermica può essere considerata anche un'eccellente opportunità di crescita economica sostenibile, e deve accrescere il benessere delle popolazioni indigene e non le solite note compagnie. Nel medio e lungo termine si prevede uno sviluppo della tecnica basata sull'utilizzo di rocce calde secche (HDR e DHP) situate in profondità. Gli esperti di molti Paesi, tra cui Usa, Giappone, Inghilterra, Francia, Germania, Belgio e Svizzera, stanno studiando la possibilità di perforare pozzi in zone dove non ci sono serbatoi e di iniettarvi acqua per farla scaldare in profondità dal calore della Terra, farla risalire da altri pozzi e infine utilizzarla come fluido energetico per centrali termoelettriche. Tale tecnologia, se sviluppata, darebbe origine a un potenziale tale da soddisfare da solo il fabbisogno di energia elettrica e termica. Oltre alla produzione di energia elettrica con i vapori delle acque prelevate ad oltre 100 gradi centigradi, esiste un vastissimo territorio ove

è possibile il prelievo di acque calde sotto i 100 gradi centigradi, reperibili alle profondità già raggiunte dai tanti pozzi scavati nella ricerca del petrolio che potrebbero far fronte al riscaldamento domestico di interi quartieri e cittadine. Tutta la zona dalla Toscana al Napoletano (Campi Flegrei) è ricchissima di vapori e acque calde, con utilizzi (tutti da progettare e realizzare) di energia ad alta e bassa entalpia, cioè superiori e inferiori a 100 gradi centigradi. Inoltre, secondo una testimonianza non sospetta, quella del nuclearista Felice Ippolito, il potenziale geotermico della fascia dalla Toscana alla Campania sarebbe di 500.000 GWh all'anno, corrispondenti a 50 centrali elettriche da 1000 MW ciascuna, corrispondente alla potenza attualmente impiegata in Italia per la produzione di energia elettrica. Inoltre, con le sonde geotermiche si può climatizzare un ambiente sia d'estate che d'inverno, la potenzialità di questo sistema è superiore al 50% delle necessità energetiche per la climatizzazione invernale ed estiva e quindi è un'enorme potenziale ad un costo molto conveniente.

[Potenziale, link: <http://www.energoclub.it/doceboCms/page/72/Potenziale.html>]

4.2 IL POTENZIALE GEOTERMICO IN EMILIA ROMAGNA

L'approvvigionamento energetico è da sempre un aspetto fondamentale per lo sviluppo economico. Negli ultimi anni, sono diventati prioritari anche la sicurezza degli approvvigionamenti e la riduzione dell'inquinamento. Perciò la ricerca di fonti energetiche rinnovabili ed eco-compatibili ha assunto sempre maggiore interesse. La geotermia, cioè il calore della Terra, è una fonte di energia primaria, disponibile anche in Italia, la quale, se opportunamente sfruttata, è rinnovabile ed eco-compatibile. In Emilia-Romagna non sono presenti fonti geotermiche ad alta entalpia, cioè con temperature maggiori di 150°C; tuttavia, nell'Appennino emiliano-romagnolo e nella pianura sono presenti sorgenti termali e pozzi con anomalie termiche positive, indicativi di sistemi a bassa e media entalpia che possono essere sfruttati per usi diretti del calore (Fig.6):

Name and location	Reservoir	Depth of exploitation (m b.g.l.)	Water temperature (°C)	Water salinity (g/l)	Discharge rate (m ³ /h)	Drawdown (m)	Remarks
Rodigo (MN)	Lower Jurassic limestone	4000	60	1	>100	<100	
Casaglia (FE)	Jurassic limestone and dolomite	1100-1900	95	60	>250	<100	
Metanopoli (MI)	upper Miocene Colombacci fm	2000	62	70	50	300	Methane: 40 m ³ /h
Foce tagliamento and Grado (UD)	Pleistocene Asti sand Fm	100-420	35-48	0.3	5-50	Free flowing	
Euganei (PD)	Cretaceous and Jurassic limestone	<500	65-87	1-5	10-150	1-15	Area of thermal springs
Vicenza (VI)	Triassic-cretaceous limestone and dolomite	1500-2000	68	1	120	<100	

Figura 6 ; Esempio di riserve geotermiche a bassa entalpia in Italia settentrionale

link: http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/geotermia/analisi_2010/01_premessa.htm

Ad esempio, a Ferrara e a Bagno di Romagna, lo sfruttamento di questi serbatoi geotermici a bassa entalpia ha permesso l'uso diretto del calore per il teleriscaldamento e la balneologia. Altre applicazioni sono possibili in campo industriale e in agricoltura. I recenti progressi tecnologici, la continua variazione del prezzo del petrolio e la necessità di ridurre l'uso dei combustibili fossili per diminuire l'inquinamento e la dipendenza di approvvigionamento da paesi esteri hanno reso l'uso della geotermia conveniente anche a bassi valori di temperatura. La Regione Emilia-Romagna ha promosso uno studio geologico sul potenziale geotermico del territorio regionale già all'inizio degli anni '80 (RER & CNR, 1982). Una delle principali conclusioni di questo studio è che, data l'assenza di intrusioni magmatiche (plutoni) nel sottosuolo dell'Emilia-Romagna, le cause delle anomalie termiche positive (sorgenti termali in Appennino e anomalie termiche positive misurate in pozzi profondi della Pianura Padana) sono da ricercare nella struttura tettonica di questo settore di catena. Non dimentichiamo, infatti, che l'Appennino è una catena ancora in formazione e che il vero fronte non coincide con il limite morfologico collina - pianura ma è localizzato in corrispondenza del Po, sepolto sotto i depositi quaternari padano-adriatici. Le sorgenti termali appenniniche, secondo questo studio, possono essere spiegate con la circolazione in profondità, grazie alla presenza di faglie che ne favoriscono l'infiltrazione e la risalita delle acque meteoriche. Le anomalie termiche positive in pianura, tutte rilevate in pozzi localizzati al di sopra delle dorsali sepolte note come Pieghe Ferraresi e Pieghe

Emiliane, possono essere spiegate con una risalita, localmente anche fino a poche centinaia di metri dalla superficie, grazie all'attività di strutture tettoniche di sollevamento, di orizzonti acquiferi in origine profondi. Tali orizzonti, prima del sollevamento, si sono trovati, per tempi sufficientemente lunghi, a profondità di alcune migliaia di metri, con conseguente aumento della loro temperatura. Le recenti fasi tettoniche hanno poi rapidamente traslato questi orizzonti verso l'alto. Ciò spiega perché, a parità di quota, negli alti strutturali si misurano temperature maggiori rispetto alle sinclinali e perché i gradienti geotermici siano maggiori al top delle antiformali. Attualmente, l'energia geotermica è in corso di sfruttamento nella zona di Ferrara e a Bagno di Romagna (FC). Poiché le condizioni geologiche che caratterizzano il sottosuolo di queste zone esistono anche in altre aree della regione, la prospettive di trovare altri campi geotermici sono reali. I successivi studi geologici, realizzati soprattutto nell'ambito del progetto regionale Carta Geologica dell'Appennino emiliano-romagnolo 1:10.000 e del progetto CARG 1:50.000 e per la ricerca di risorse idriche e di idrocarburi, hanno reso disponibile una notevole mole di nuove informazioni sul sottosuolo di tutto il territorio regionale. Uno degli studi a scala regionale più recenti, mettono in relazione la presenza di sorgenti termali con strutture tettoniche recentemente attive. Prendendo spunto dalle conclusioni di RER & CNR (1982), sono stati riletti i dati geologici disponibili sull'assetto tettonico dell'Appennino, della Pianura Padana e della costa adriatica ed è stata così realizzata una carta di sintesi (fig. 5) che mette a confronto i principali elementi tettonici della regione, sia unità che strutture, e la localizzazione di acque calde. In questa mappa sono rappresentati i grandi insiemi di unità strutturali e le principali strutture tettoniche; tra queste sono state distinte quelle con evidenze di attività recente (< 450.000 anni, Pleistocene medio - Olocene). L'assetto strutturale della pianura e della costa è stato rappresentato grazie alla distribuzione delle isobate della base del Pliocene tratte dal Modello Strutturale d'Italia (CNR, 1992). Sono state quindi ubicate le sorgenti calde dell'Appennino ed evidenziate le zone di pianura in cui sono presenti pozzi profondi con anomalie termiche positive. Sono state indicate anche le località il cui nome potrebbe essere indicativo della presenza di

flussi di calore o di acque calde. E' interessante notare che le sorgenti termali sono soprattutto localizzate nelle "finestre tettoniche", aree in cui affiorano gli orizzonti geologici generalmente più profondi, spesso in corrispondenza di faglie importanti, o in prossimità di zone di faglia di interesse regionale (Porretta Terme, Bagno di Romagna, Lesignano Bagni, Castrocaro Terme, Castel S. Pietro Terme, Riolo Terme, Monticelli Terme). Molte di queste strutture mostrano attività recente. Inoltre, tutte le principali sorgenti termali (Bobbio, Quara, Porretta Terme, Bagno di Romagna) e anomalie termiche del settore appenninico sono ubicate a monte del fronte che provoca il raddoppio del basamento cristallino e quindi la risalita delle unità più profonde (successione carbonatica mesozoica, successioni oligo-mioceniche toscoromagnole) a discapito della copertura alloctona "Liguride" che risulta fortemente ridotta e, nelle finestre tettoniche, addirittura assente (fig. 6).

Le zone di pianura con acque profonde più calde sono soprattutto localizzate al di sopra dell'intero arco della dorsale ferrarese, tra Reggio Emilia e Ravenna, lungo la costa tra Cervia (RA) e Rimini, cioè al di sopra dell'estremità settentrionale delle Pieghe Adriatiche, e tra Reggio Emilia e Fiorenzuola d'Arda (PC), al di sopra della parte sud-orientale delle Pieghe Emiliane. Anche queste strutture sepolte, in particolare nei tratti indicati, mostrano evidenze di attività recente.

I dati sopra descritti indicano inequivocabilmente che le aree d'interesse sono localizzate soprattutto in corrispondenza di "alti strutturali". Le zone di alto strutturale relativo possono essere riconosciute anche analizzando la distribuzione delle anomalie gravimetriche positive.

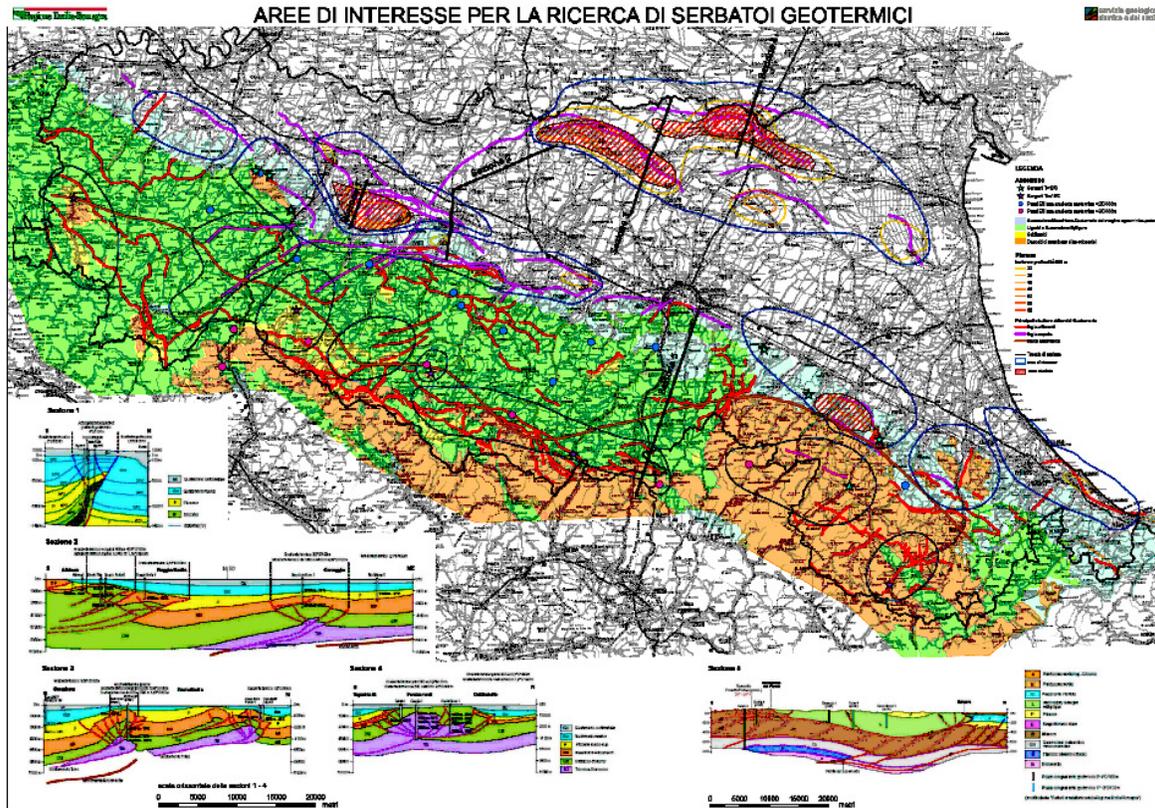


Figura 7, Aree di interesse per la ricerca di serbatoi geotermici

link: http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/geotermia/analisi_2010/01_premessa.htm

In sintesi, le zone di maggiore interesse, in cui concentrare ulteriori approfondimenti, per la ricerca di serbatoi geotermici, dall'analisi preliminare sopra esposta (Fig.7), sono le zone di alto strutturale che hanno permesso la risalita del basamento, delle successioni carbonatiche e di quelle oligo-mioceniche e del Pliocene inferiore. In particolare sono aree di particolare interesse (Fig. 7):

- la finestra tettonica di Bobbio e della val d'Aveto,
- la finestra tettonica di Salsomaggiore e la zona del PTF fino al Panaro,
- la finestra tettonica e l'alta Val Parma (Miano e zona sud-ovest),
- la finestra tettonica dell'alta Val Secchia,

- la finestra tettonica di Gova e la zona dell'alta Val Dolo,
- il crinale emiliano tra il M. Cusna e Porretta Terme (finestra tettonica di Pievepelago e la zona del fronte del "Cervarola"),
- il medio e alto Appennino romagnolo, in particolare l'alto strutturale tra le valli del Montone e del Tramazzo,
- l'alta valle del Savio (zona di faglia),
- l'alto delle colline di Cesena, tra le valli del Bidente e del Rubicone,
- il margine appenninico-padano tra Castel S. Pietro Terme e Castrocaro Terme,
- l'alto delle Pieghe Adriatiche tra Cattolica e Cervia,
- l'arco delle Pieghe Ferraresi da Novi (MO) alle valli di Comacchio,
- l'alto delle Pieghe Emiliane tra Reggio Emilia e Fontanellato (PR),
- il margine appenninico-padano tra la Val Trebbia e la Val d'Arda,
- la Val Taro.

Studi pilota di maggiore dettaglio effettuati in alcune di queste aree (zona Bondeno-Ferrara, zona nord della Provincia di Modena, zona Collecchio-Montecchio Emilia) hanno confermato la presenza di acquiferi d'interesse geotermico a profondità economicamente interessanti.

CAPITOLO 5

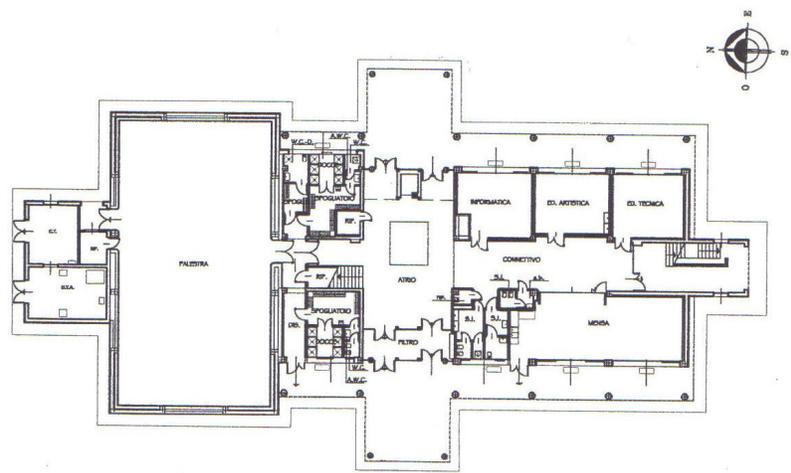
STUDIO DI IMPIANTO GEOTERMICO PER EDIFICIO PUBBLICO

La realizzazione di un impianto di riscaldamento geotermico prevede un susseguirsi di fasi di ricerca e di progettazione. E' molto importante questa fase, perché l'equilibrio di tutto il progetto è molto sensibile ad ogni fattore. E' necessario esaminare ogni aspetto al fine di eseguire una corretta progettazione ed ottenere il miglior funzionamento possibile del prodotto finito. Per prima cosa si dovranno individuare le caratteristiche intrinseche ed estrinseche del fabbricato e l'ubicazione, si dovrà eseguire un inquadramento geo-morfologico dell'area sulla quale si interviene, si dovranno predisporre analisi stratigrafiche, a si individueranno le caratteristiche idrogeologiche ed idrochimiche dell'area. Fatto ciò sarà possibile individuare il tipo di geoscambio ottimale e il relativo dimensionamento preliminare.

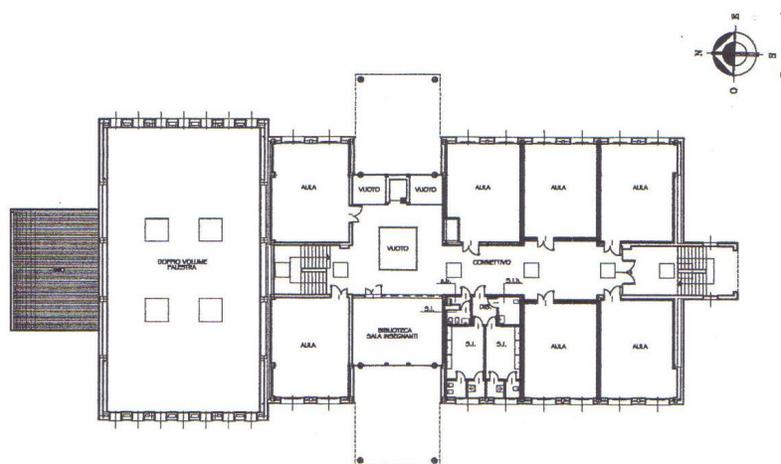
5.1 DESCRIZIONE DELL' EDIFICIO OGGETTO DI STUDIO

L'edificio pubblico oggetto di studio che è stato scelto è la Scuola Primaria "Dismano Pievesestina" esso consiste in un edificio adibito ad attività scolastiche e palestra, ubicato in via Dismano n°4758 a Pievesestina di Cesena, classe di appartenenza E7, in zona climatica E. E' stata inaugurata nel settembre 2001. L'edificio si eleva su due piani fuori terra. Al piano terra trovano spazio, oltre al porticato, l'ingresso principale con ampio atrio, il laboratorio d'informatica, due aule (progettate inizialmente come laboratori), la sala mensa e i servizi igienici. Sempre al piano terra collegata direttamente all'edificio (ma dotata pure di un ingresso indipendente) sorge la palestra avente una superficie di circa 300mq, completa di spogliatoi. Al primo piano trovano sistemazione 7 aule + 1 aula (progettata come biblioteca), i servizi igienici, la scala di sicurezza. L'edificio è dotato di ascensore. E' un edificio circondato da un ampio spazio verde adibito a spazio gioco, ed è presente una serra per orto didattico. Essendo un edificio di recente costruzione gode di ottimi servizi come ampio parcheggio sia sull'ingresso principale che quello secondario, è presente sulla

strada una fermata autobus che garantisce un comodo raggiungimento di essa senza automobile. La condizione in cui si trova l'immobile è in buono stato, la manutenzione ordinaria è stata sempre rispettata, e non sono stati necessari interventi straordinari. Il medio livello di rifinitura e di soluzioni tecniche per l'isolamento termico e acustico la rendono ideale per essere utilizzata come caso studio. Recuperata la planimetria (Fig.8) ed effettuato il rilievo fotografico (Fig. 9;10;11;12) abbiamo ottenuto tutti i dati e quindi caratteristiche intrinseche ed estrinseche del nostro fabbricato necessarie per il nostro studio.



PIANTA PIANO TERRA



PIANTA PIANO PRIMO

Figura 8; Planimetria

Link: <http://www.delfo.forli-cesena.it/dd7cesena/7circolovigne/pievesestina/index.htm>



Figura 9 , rilievo aereo

Link: www.bing.com



Figura 10 rilievo aereo

Link: www.bing.com



Figura 11 rilievo aereo

Link: www.bing.com



Figura 12 rilievo aereo

Link: www.bing.com

5.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO

La Provincia di Forlì-Cesena comprende l'estremo settore sudorientale della pianura padano-veneto-romagnola, e un tratto del versante adriatico dell'Appennino Tosco-Emiliano. La **pianura** occupa il 32,8% del territorio, la **fascia collinare** il 44,6% e le **aree montane** il 22,6%. La fascia montana che culmina in corrispondenza dello spartiacque appenninico si mantiene costantemente sopra i mille metri di quota, e arriva a raggiungere i 1407 m del Monte Fumaiolo, i 1658 m di Monte Falco e i 1520 m di Poggio Scali. Il complesso montagnoso degrada verso il lato nord-est, trasformandosi dapprima in sistemi collinari ed infine in pianura, che si estende fino al mare Adriatico. Da questo settore dell'Appennino scendono, con un corso trasversale all'orientamento di questa parte della catena, alcuni corsi d'acqua, tutti sfocianti in Adriatico: il Tramazzo, il Montone, il Rabbi, il Bidente-Ronco, il Savio e l'Uso. Il Bevano, il Pisciatello e il Rubicone nascono invece dai rilievi collinari.

Dal punto di vista geomorfologico il territorio provinciale deve l'attuale assetto all'azione dei processi morfogenetici, espressione dell'interazione fra la natura delle rocce affioranti (litologia), agenti endogeni (tettonica e struttura) ed agenti esogeni (clima, vegetazione, attività antropiche). Il fattore che più ha influenzato l'aspetto morfologico del territorio è quello erosivo, in quanto, sia per la natura stessa delle rocce sulle quali ha esercitato la sua azione, sia per la modalità di scorrimento delle acque sotterranee fra gli strati rocciosi, ha modellato, modificato e trasformato continuamente il paesaggio. In tale contesto è possibile individuare a grande scala alcune aree relativamente omogenee per forme e processi. Tale suddivisione risulta evidente già dalla visione d'insieme di una qualunque carta del dissesto del nostro territorio.

Settore dell'Alto Savio

Si tratta di una fascia allungata dal Monte Fumaiolo verso S.Sofia dove è presente un modesto affioramento di rocce alloctone, appartenenti al Complesso della Valle del

Savio (propaggine occidentale della Coltre della Val Marecchia). Il nucleo più antico di queste rocce risale al Cretaceo-Eocene ed è costituito da argille ed argille marnose grigie e varicolorate ("argille scagliose"), con struttura caotica, inglobanti inclusi litologicamente eterogenei (calcari, calcari marnosi, siltiti, diaspri, marne ed arenarie) ed eterometrici. Le forme del paesaggio sono fortemente influenzate dalle scadenti proprietà fisico – meccaniche delle argille scagliose, a cui si contrappongono rilievi accentuati con caratteristiche fisico-meccaniche ben più elevate rappresentati dagli inclusi ivi inglobati.

In questo contesto si ha una morfologia irregolarmente ondulata, con frequenti forme calanchive, ad instabilità accentuata, a cui si alternano speroni competenti dalle forme abrupte. I dissesti dipendono dal tipo litologico interessato: colate di fango, frane rotazionali e/o complesse nelle argille scagliose; i litotipi più competenti presentano invece crolli e rotolamenti.

Settore della Formazione Marnoso-arenacea e delle Arenarie di Monte Falterona

La successione autoctona più antica affiorante nel territorio provinciale è rappresentata da terreni appartenenti alla porzione superiore della Successione Toscana affiorante nell'Alto Casentino fino al crinale tosco-romagnolo, nell'ambito della quale predominano le Arenarie di Monte Falterona, deposito torbido prevalentemente arenaceo nella parte inferiore passante a pelitico verso l'alto.

Gran parte della montagna e dell'alta collina del territorio della Provincia di Forlì-Cesena è comunque contraddistinta dalla presenza di litotipi appartenenti alla *Successione Romagnola*, con netta predominanza della Formazione marnoso-arenacea del Miocene inferiore e medio. Questa formazione, avente uno spessore di oltre 3.000 metri, è costituita da una ritmica alternanza di arenarie quarzoso-feldspatiche-micacee, marne, siltiti e argilliti in massima parte risedimentate. Tali formazioni presentano una spiccata omogeneità geologica e strutturale e comportamento geomeccanico simile, pertanto vengono trattate insieme, anche se le forme del rilievo sono comunque influenzate anche dalle caratteristiche climatiche e

dai processi morfogenetici tipici delle varie fasce altimetriche (zona di crinale, alta montagna, montagna e collina), che conferiscono maggiore o minore energia al rilievo. La dinamica geomorfologia è in genere strettamente collegata all'azione erosiva di fiumi e torrenti che scavano valli strette e profonde con pareti rocciose dove affiora la stratificazione. In questo contesto sono abbastanza frequenti scivolamenti, planari e non, per lo più controllati da faglie e fratture. In genere i movimenti franosi si collocano al tetto della faglia principale, sui versanti con strati a franappoggio inclinati circa come il pendio ed interessano gli orizzonti pelitici o con arenarie poco cementate. In prossimità delle faglie trasversali i movimenti franosi si sviluppano anche in versanti con giacitura diversa dal franappoggio. In corrispondenza delle scarpate più ripide sono possibili crolli e ribaltamenti per scalzamento al piede. Dall'analisi della distribuzione dei movimenti franosi emerge come ad una diminuzione del rapporto arenaria/pelite, corrisponda un aumento della franosità. In questo contesto si rinviene una situazione geomorfologica piuttosto variegata, dovuta all'affioramento di litotipi non omogenei con caratteristiche geomeccaniche molto differenziate. In particolare nelle aree collinari a Nord-Est dell'allineamento Dovadola-Cusercoli- Mercato Saraceno, affiorano terreni, risalenti al Messiniano, di ambiente sovrassalato, in cui tuttavia non mancano episodi salmastri. Procedendo dai sedimenti più antichi ai più recenti vi si possono osservare: la Formazione Gessoso- solfifera con gesso, marne, calcare e mineralizzazioni di zolfo, avente alla base marne tripolacee e tripoli; la Formazione di tetto, estesa tra il Rabbi e il Borello, e la Formazione a colombacci, costituita da marne argillose e siltose con alcune sottili intercalazioni di calcare evaporitico (colombacci). Nella Formazione a colombacci si intercalano livelli grossolani ben evidenti nella zona di Predappio Alta, Cusercoli e Voltre.

Nella bassa collina dominano invece le argille azzurre plio-pleistoceniche, caratterizzate da una buona omogeneità litologica e da una tettonizzazione molto limitata. In questo contesto si distingue il calcare organogeno o arenaceo del Pliocene inferiore e medio, noto localmente col nome di "spungone", che affiora tra le valli del Marzeno e del Savio, formando le alture di Castrocaro, Rocca delle Caminate, M.

Pallareto, M. Casale e M. Maggio. La sua costituzione è caratterizzata da un grossolano impasto di gusci di conchiglie marine, tenute insieme da cemento calcareo. In alcuni punti le pareti si presentano friabili, in altre durissime, con evidenti variazioni di compattezza anche nella stessa località. La sua formazione deriva da depositi di sedimenti marini affiorati nel pliocene medio formando un golfo, sul quale prese corpo una scogliera abitata principalmente da Molluschi dotati di conchiglia o guscio. Con il successivo ritiro del mare grandi quantità di frammenti subirono il processo di compattazione che ha dato origine a questa roccia. Frequenti sono anche le facies torbiditiche: arenarie di Borello, arenarie di Lardiano. Nell'area pedecollinare, la presenza delle "sabbie gialle" di ambiente litoraneo deltizio, testimonia il definitivo ritiro del mare dal territorio in esame. In generale si rinviene una bassa energia del rilievo ed un pattern del reticolo idrografico passante da dendritico nelle aree calanchive, a parallelo nelle aree prospicienti la pianura, a centripeto nei litotipi gessosi. Il paesaggio del calanco è caratterizzato da processi idrici molto intensi; l'origine e la dinamica del calanco sono strettamente legate all'assetto strutturale ed all'elevata erodibilità delle argille; infatti in genere si sviluppano in corrispondenza di formazioni argillose con giacitura degli strati da suborizzontale a reggipoggio. Dove la giacitura degli strati è a franappoggio l'evoluzione è più lenta e si sviluppano versanti aventi pendenza molto simile a quella degli strati. Il paesaggio è facilmente riconoscibile per le numerose vallecole relativamente ripide e profonde e per la mancanza quasi totale di vegetazione. Le condizioni ambientali estremamente severe, la continua evoluzione del substrato, imputabile all'intensa erosione e ai movimenti franosi e la presenza di suoli sottoposti a forte esposizione solare e quindi ad elevata siccità, rendono possibile la sopravvivenza di una flora molto specializzata. Al contrario i margini delle erosioni, contraddistinti da un forte dinamismo, presentano una vegetazione estremamente varia: si passa dal prato all'arbustato, fino al bosco, con presenze di diverse specie rare (es. orchidee del genere *ophrys*). In sostanza gli ambienti calanchivi seppur apparentemente inospitali, offrono riparo a una fauna ricca e diversificata: diverse specie di rapaci (come poiana e gheppio) trovano rifugio sulle pendici, mentre i

ristagni creatisi negli avvallamenti generati dalle frane sono ottimi ambienti per diverse specie di anfibi. L'affioramento delle formazioni arenacee e conglomeratiche dà luogo a contrafforti, ben rilevati rispetto alle argille circostanti, e caratterizzati da maggior stabilità. Nell'area pedecollinare le forme del paesaggio sono per lo più a geometria piana o debolmente inclinata, assumendo l'aspetto di altopiani più o meno estesi che si immergono dolcemente verso la pianura.

Settore della pianura

Nella pianura, infine, potenti coltri di alluvioni pleistoceniche coprono i depositi più antichi. Si tratta di sedimenti erosi dalle aree collinari e montane e trasportati dai fiumi nelle parti depresse del territorio. I sedimenti alluvionali sono costituiti da cicli sedimentari grossolani alla base (ghiaie e sabbie) e fini al tetto (peliti). Si articola in deboli crinali ed ampie depressioni in corrispondenza delle quali il reticolo idrografico superficiale è condizionato dall'attività antropica piuttosto che da elementi di tipo morfologico.

[Comune di Cesena, Piano di riqualificazione urbana, quartiere econovello – Cesena]

5.3 ANALISI STRATIGRAFICHE ESISTENTI DELL'AREA DI STUDIO

Per studiare la stratigrafia del sottosuolo cesenate, non potendo eseguirne di propri ci si è appoggiati al database online rappresentato dalla cartografia geologica online nel sito della regione (ERGO), la quale contiene carotaggi, prove dinamiche e prove statiche. Ricordando che l'impianto geotermico richiede il raggiungimento di importanti profondità la quantità di dati disponibile si è ridotta ai soli risultati di carotaggio per la realizzazione di pozzi per estrazione di acqua. I pozzi campione sono stati scelti principalmente per la profondità raggiunta, e ove necessario seppur poco profondi sono stati scelti perché rappresentanti di un'area specifica del territorio cesenate. Degno di nota è che la quantità di pozzi risulta molto superiore nella parte Nord e Nord-Ovest del territorio comunale, mentre a sud la presenza delle prime colline vede una scarsa presenza di pozzi di estrazione di acqua.

Successivamente sono stati raggruppati in sottoinsiemi con continuità laterale

sufficiente, cercando di individuare aree omogenee anche se risulta comunque complicato ricostruire completamente un profilo stratigrafico completo del territorio comunale. Di seguito (Fig.11) possiamo vedere i pozzi oggetto di interesse:

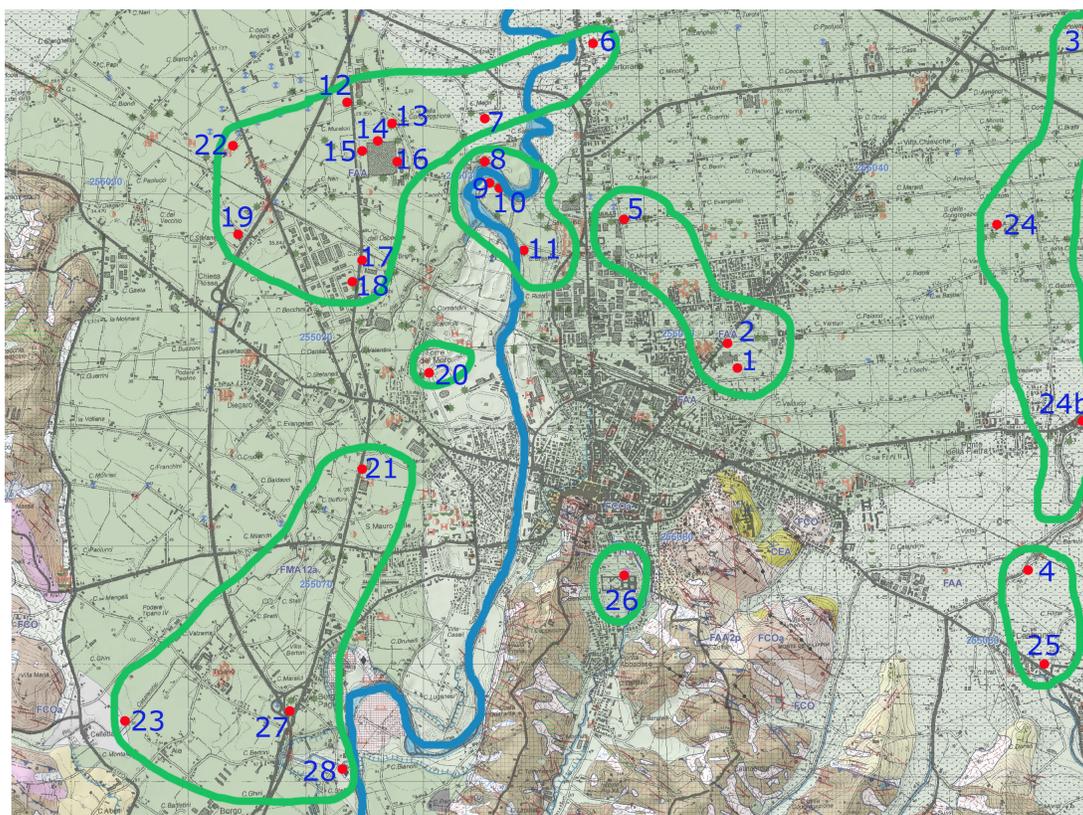


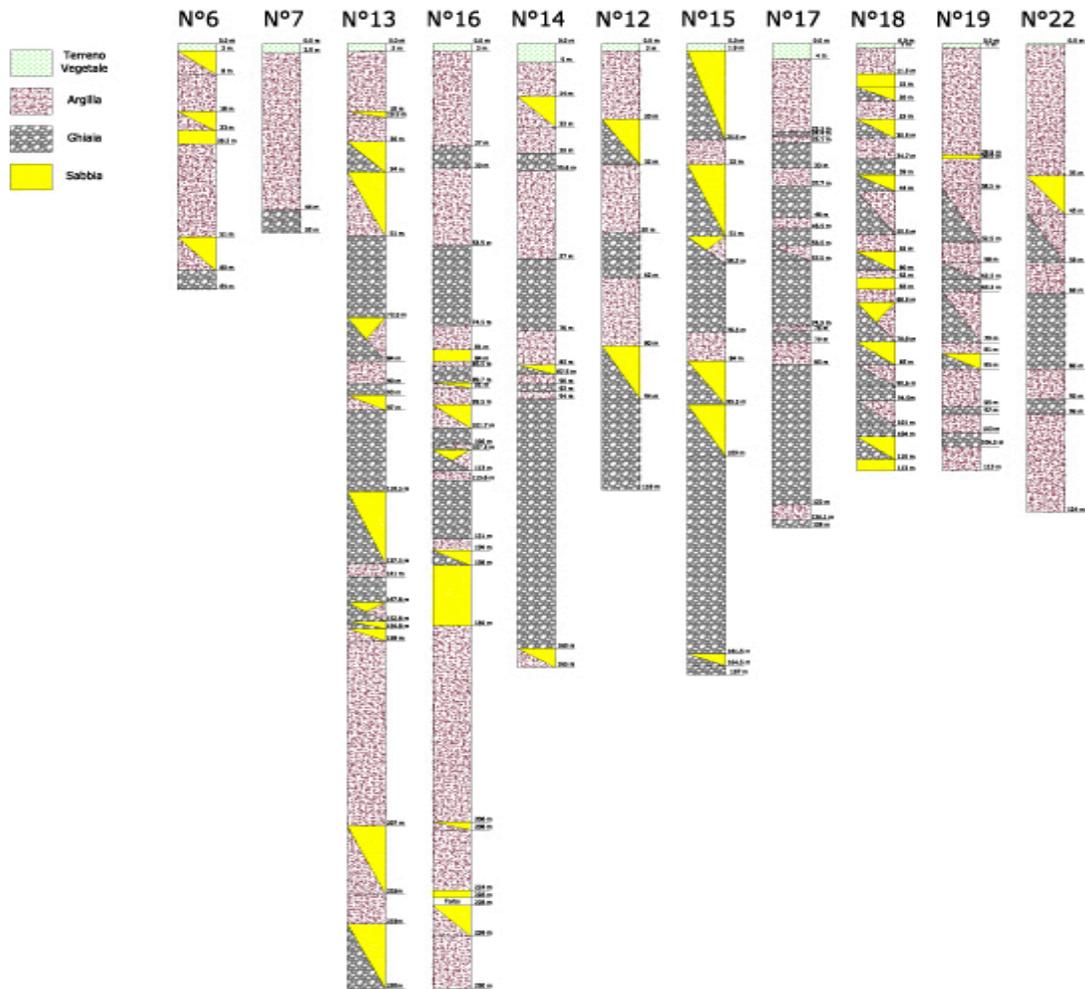
Figura 11

Estratto di mappa Cartografia Geologica Interattiva, Regione Emilia-Romagna

L'esame delle stratigrafie dei 28 pozzi, ubicati come da figura , compresi in un intorno di circa 5,5 km dal centro storico, e di seguito vengono indicati per gruppi omogenei di continuità laterale i risultati.

Ora esaminando area per area cercheremo di individuare le caratteristiche stratigrafiche generali del comune di Cesena.

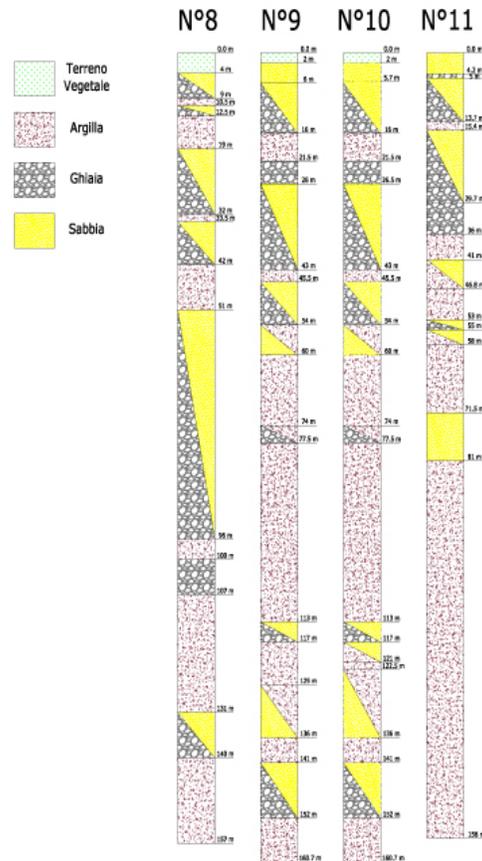
Area A:



In generale appare evidente un comune spessore, all'incirca di 45-50 m dal piano campagna, composto in prevalenza da argille, a luoghi più o meno sabbiose, con alcuni casi di presenza di ghiaia in esse. Più in profondità nella fascia tra i 50 e 150 m troviamo prevalenza di ghiaie, con la presenza di uno strato di argilla (a volte mista a sabbia) a circa 70-80 m di profondità spesso mediamente una decina di metri. Oltre i 150 m i pochi sondaggi denunciano la presenza di argilla.

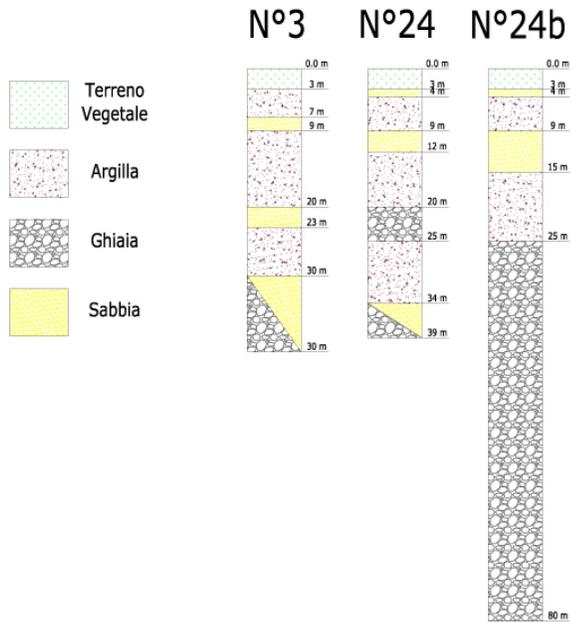
Area B:

In generale appare evidente un comune spessore, all'incirca di 40 m dal piano campagna, composto in prevalenza da ghiaia mista a sabbia, con la presenza di un breve spessore di argilla a circa 20 m di profondità. Oltre i 40 m troviamo prevalentemente argille a piccoli tratti sabbiose.



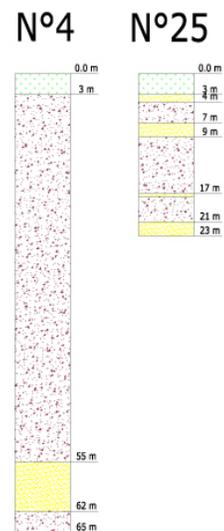
Area D:

Si nota un primo spessore, all'incirca di 20-25 m dal piano campagna, composto in prevalenza da argilla, si nota la presenza di un breve spessore di sabbia a circa 10 m di profondità. Oltre i 25 m troviamo prevalentemente ghiaie a piccoli tratti miste a sabbia.



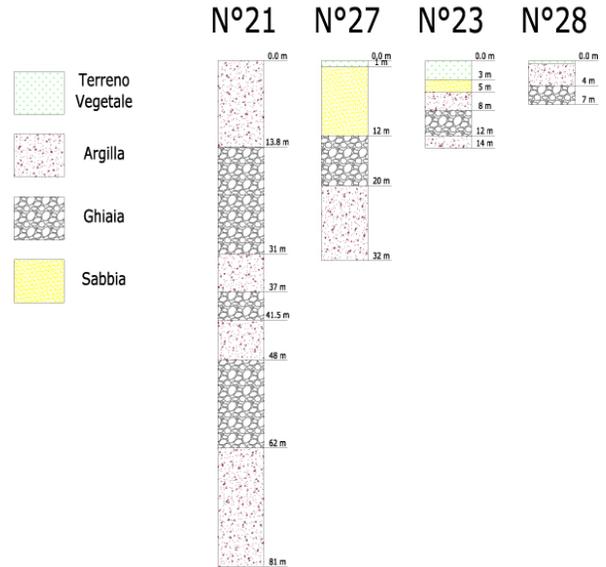
Area E:

La stratigrafia dell'area di interesse è difficilmente individuabile in quanto si è ottenuto i dati di soli 2 pozzi, uno dei quali di scarsa profondità. Si ipotizza comunque per i 65 m del carotaggio un terreno prevalentemente argilloso, con a tratti la presenza di sabbia.



Area F:

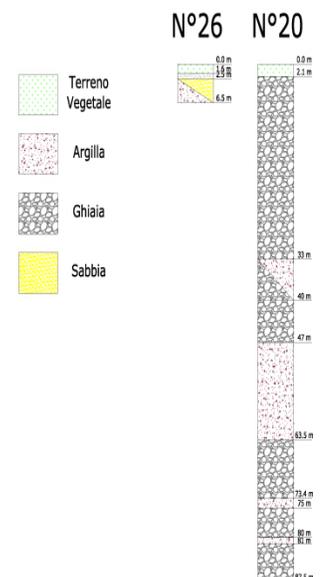
Quest'area ripercorre verso monte il fianco ovest del fiume savio. Le ghiaie infatti non si trovano ad una profondità costante dal piano di campagna ma sono sempre meno profonde e meno spesse, man mano che si va a monte. Un primo strato di argilla mista a sabbia antecede la ghiaia, che varia da una profondità di 4 m a 13 m dal piano di campagna. In profondità solo un pozzo ci può dare informazione e vediamo alternarsi strati di ghiaia e argilla, con uno strato sottile di 4 m a 37 m di profondità, e uno strato di 14 m a 48 m dal piano di campagna.



Pozzi singoli:

Questi pozzi sono stati scelti per due ragioni differenti. Il pozzo n° 26 è stato scelto perché rappresentativo dell'area sud del comune di Cesena, area dove c'è assenza di dati di perforazioni profonde. E da esso possiamo estrapolare poche informazioni, se non che sapere che per i primi 6 m abbiamo argille miste a sabbia.

Il pozzo n° 20 invece è caratterizzato dalla presenza di ghiaia pressoché affiorante, spessore esteso fino a 47 m di profondità, di seguito troviamo uno stato di 16 m di argilla per poi ritrovare ghiaia sino alla profondità massima raggiunta. Quest'area nel recente passato è stata sfruttata come cava per l'estrazione di ghiaia.



5.4 CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

Le caratteristiche degli acquiferi del territorio in esame vanno inquadrare nel modello evolutivo tridimensionale, sia idrogeologico che stratigrafico, dell'intera Pianura Padana emiliano-romagnola. Secondo i più recenti studi si distinguono, sia in superficie che nel sottosuolo 3 Unità Idro-stratigrafiche di rango superiore, denominate Gruppi Acquiferi (Fig.12). Esse affiorano sul margine meridionale del Bacino Idrogeologico della Pianura per poi immergersi verso nord al di sotto dei sedimenti depositati dai corsi d'acqua principali negli ultimi 20.000 anni, contenenti acquiferi di scarsa estensione e potenzialità (Acquifero Superficiale). Ciascun Gruppo Acquifero risulta idraulicamente separato, almeno per gran parte della sua estensione, da quelli sovrastanti e sottostanti, grazie a livelli argillosi di spessore plurimetrico sviluppati a scala regionale.

Per quanto riguarda l'area di studio, tutti i depositi quaternari marini affioranti sono allocati nel "Supersistema del Quaternario marino" mentre tutti i depositi continentali affioranti vengono inseriti nel "Supersistema emiliano-romagnolo"; quest'ultimo è suddiviso nel "Sistema emiliano-romagnolo inferiore" e nel "Sistema emiliano-romagnolo superiore". Sul margine appenninico le unità geologiche sopra menzionate sono separate tra loro da superfici di discontinuità stratigrafica corrispondenti a discordanze angolari osservabili sia in affioramento che in sismica; i limiti tra le unità sono quindi interpretati come il prodotto di fasi d'attivazione tettonica. A queste unità stratigrafiche corrispondono altrettante unità idrostratigrafiche denominate "gruppi acquiferi", che vengono utilizzate per lo studio del sottosuolo; lo schema di Figura mostra le corrispondenze tra le unità geologiche di superficie e di sottosuolo:

- il "Supersistema del Quaternario marino" corrisponde al "Gruppo acquifero C";
- il "Sistema emiliano-romagnolo inferiore" corrisponde al "Gruppo acquifero B";
- il "Sistema emiliano-romagnolo superiore" corrisponde al "Gruppo acquifero A".

I limiti basali dei tre gruppi acquiferi sono la prosecuzione nel sottosuolo delle discontinuità che separano in affioramento i super sintemi ed i sintemi; questi limiti corrispondono a discordanze stratigrafiche sui principali alti strutturali interni al bacino ed alle superfici di continuità ad esse correlate nelle zone meno deformate. Sia i gruppi acquiferi che i sintemi corrispondono pertanto a sequenze deposizionali. Sia i gruppi acquiferi che i sintemi corrispondono pertanto a sequenze deposizionali.

PRINCIPALI UNITA' STRATIGRAFICHE				ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE								
AFFIORANTI		SEPOLTE				GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO							
QUATERNARIO CONTINENTALE	TERRE ROSSE, DILUVIUM, ALLUVIUM, TERRAZZI E ALLUVIONI	DILUVIUM P.P.	FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE	UNITA' DI VILLA DEL BOSCO	UNITA' DI CA. DI SOLA	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	UNITA' DI BORGIO PANIGALE	CRIZZANTE E FOROSOLLO	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE	0.125	A	A1
										A2				
	A3													
	A4													
QUATERNARIO MARINO	MILAZZANO SABBIE di CASTELVETRO P.P.	MILAZZANO o CALABRIANO P.P. SABBIE di CASTELVETRO P.P. SABBIE GALLE di IMOLA P.P.	CALABRIANO P.P. SABBIE di MONTERRICCO FORMAZIONE di TERRA del SOLE P.P.	CALABRIANO P.P. FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO P.P.	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE	ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI	~0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1	
	B2													
	B3													
	B4													
P2	FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO P.P.	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	SUPERINTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	~0.65	0.89	C	C1	
										~0.8	PLEISTOCENE INFERIORE	C2		
										~1.0	1.72	C3		
										~2.2	PLEIOGENE MEDIO - SUPERIORE	C4		
										~3.3-3.6	3.55	PLEIOGENE INFERIORE	C5	
										~3.9	ACQUITARDO BASALE			

Figura 12, sistema acquiferi

[Comune di Cesena, Piano di riqualificazione urbana, quartiere econovello - Cesena]

Grazie all'analisi dei dati della sismica industriale di ENI -AGIP, tarati con le stratigrafie dei pozzi per idrocarburi e dei pozzi per acqua più profondi tra quelli disponibili nella banca dati geognostici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, in RIS è stato possibile cartografare in scala 1:250.000 in tutta la pianura emiliano-romagnola la profondità del limite basale dei tre gruppi acquiferi. Le analisi svolte in RIS mostrano come gli andamenti dei limiti inferiori delle tre unità siano chiaramente influenzati dalla presenza dei

principali fronti di accavallamento della catena sepolta e come, conseguentemente, lo spessore delle unità sia maggiore nelle sinclinali e minore sulle anticlinali. Lo spessore di ciascuno dei gruppi acquiferi è generalmente dell'ordine del centinaio di metri. In RIS viene anche illustrata attraverso alcune sezioni geologiche l'architettura interna dei tre gruppi acquiferi. Ognuno di essi è articolato secondo un'organizzazione ciclica dei depositi molto marcata; sulla base di questa ciclicità è stato possibile suddividere ciascuno dei gruppi acquiferi in complessi acquiferi. I complessi acquiferi sono delle unità idrostratigrafiche di rango gerarchico inferiore rispetto ai gruppi acquiferi; essi corrispondono a sequenze deposizionali generate da eventi climatici che hanno causato l'alternarsi di attivazioni e disattivazioni dei sistemi fluviali e deltizi. Sono stati distinti 5 complessi acquiferi nel gruppo acquifero A, 4 nel B, e 5 nel gruppo acquifero C; lo spessore dei singoli complessi acquiferi è dell'ordine delle decine di metri. I complessi acquiferi vengono denominati con un numero progressivo dall'alto stratigrafico verso il basso, posto dopo il nome del gruppo acquifero (ovvero A0, A1, A2, A3, ...). I gruppi acquiferi ed i complessi acquiferi corrispondono ad unità geologiche delimitate da superfici tempo; all'interno di ciascuno di essi pertanto sono presenti depositi di diverso tipo, che appartengono a sistemi deposizionali distinti, quali:

- conoide alluvionale appenninica;
- pianura alluvionale appenninica;
- pianura alluvionale padana;
- delta padano;
- pianura costiera;
- delta appenninico;
- delta conoide e spiagge appenniniche;
- piattaforma;
- scarpata sottomarina;
- piana bacinale.

All'interno dei gruppi acquiferi e dei complessi acquiferi questi sistemi deposizionali si trovano affiancati tra loro: ad esempio, nel gruppo acquifero A, partendo da monte

verso valle, sono presenti: le conoidi alluvionali, la pianura alluvionale appenninica, la pianura alluvionale padana, il delta padano, la pianura costiera ed infine i depositi di piattaforma. Le tipologie di depositi presenti nel gruppo acquifero B sono analoghe a quelle del gruppo acquifero A, salvo il fatto che nelle porzioni più distali sono presenti anche sedimenti marini più profondi. I sistemi deposizionali del gruppo acquifero C sono invece quasi esclusivamente appartenenti all'ambiente marino.

Questi sistemi deposizionali possono essere saturati in acque dolci oppure salate. I sistemi deposizionali saturati in acque dolci costituiscono i depositi in cui si concentra il prelievo idrico nella pianura emiliano-romagnola; con riferimento al gruppo acquifero A, si tratta dei sistemi deposizionali delle conoidi alluvionali appenniniche, della pianura alluvionale appenninica, della pianura alluvionale padana e della pianura costiera. La distribuzione di questi sistemi deposizionali ha contribuito alla perimetrazione dei corpi idrici e più in generale dei complessi idrogeologici. I complessi idrogeologici, in cui si concentrano i prelievi idrici nella pianura emiliano romagnola, sono compresi

nel gruppo acquifero A, e sono:

- Conoidi alluvionali appenniniche
- Pianura alluvionale appenninica
- Pianura alluvionale e deltizia padana

Un complesso idrogeologico ulteriore, caratterizzato da volumi ed utilizzi della risorsa più modesti dei precedenti è costituito dai depositi sabbiosi di delta conoide e spiaggia appenninica presenti lungo il margine pedemontano e nel sottosuolo della pianura più prossimale alla catena, riferiti al gruppo acquifero C e B.

Va sottolineato, inoltre, che in alcuni casi le conoidi alluvionali costituiscono un complesso idrogeologico importante, per volume ed utilizzo della risorsa contenuta, anche all'interno del gruppo acquifero B. La conoide alluvionale è la zona dove i depositi grossolani di canale fluviale sono amalgamati tra loro a formare dei corpi tabulari coalescenti. Alla luce delle conoscenze geologiche la zona di distribuzione delle conoidi viene fatta coincidere con le delimitazioni dei principali corpi ghiaiosi individuati nella cartografia geologica del sottosuolo.

Le conoidi alluvionali appenniniche sono presenti nei gruppi acquiferi A e B, dove caratterizzano le zone più prossime al margine appenninico; le caratteristiche di seguito illustrate derivano da osservazioni relative prevalentemente al gruppo acquifero A. Le conoidi si possono differenziare sulla base del volume dei depositi grossolani in esse presenti, che dipende dalle dimensioni e dalle tipologie dei terreni affioranti nei bacini imbriferi dei corsi d'acqua associati alle conoidi stesse. E' pertanto possibile distinguere: conoidi maggiori, conoidi intermedie, e conoidi minori.

La conoide alluvionale definita dal Fiume Savio corrisponde, secondo ai caratteri descritti al punto precedente, ad una conoide di tipo intermedio. Dal punto di vista geologico la conoide del Savio è costituita da alternanze di depositi grossolani e fini di spessore pluridecametrico, ripetute più volte sulla verticale. Ognuna delle alternanze corrisponde ad uno dei complessi acquiferi precedentemente definiti e, dal punto di vista deposizionale, è organizzata al suo interno nel modo seguente:

- la porzione basale è costituita da alcuni metri di limi più o meno argillosi ricchi in sostanza organica di piana alluvionale e palude a cui sono associati depositi lagunari e costieri. I depositi fini basali sono caratterizzati da una grande continuità laterale. Per le loro caratteristiche granulometriche e la loro grande estensione laterale, questi intervalli fini costituiscono gli acquitardi più importanti presenti nella conoide alluvionale;
- la porzione intermedia è composta da depositi fini di tracimazione fluviale dominati da limi alternati a sabbie e/o argille e comprendenti ghiaie di canale fluviale presenti prevalentemente sotto forma di corpi isolati. Tale porzione è spessa varie decine di metri;
- la porzione superiore di ogni alternanza è costituita da sedimenti ghiaiosi di canale fluviale, amalgamati tra loro sia orizzontalmente che verticalmente, ed organizzati in corpi tabulari costituenti i lobi di conoide alluvionale in senso stretto. Lo spessore e la continuità laterale dei corpi grossolani decresce in modo abbastanza evidente a favore di un analogo aumento dei corpi fini. Nella porzione prossimale della conoide, ovvero nella zona che si sviluppa poco a valle della cerniera strutturale che separa

l'Appennino dalla pianura, l'articolazione geometrica sopra descritta si modifica in modo sostanziale. Qui infatti la deposizione delle ghiaie da parte del fiume è estremamente abbondante: i depositi grossolani sono spesso direttamente affioranti, e, a causa del limitato tasso di subsidenza naturale che favorisce i fenomeni di erosione, tutto lo spessore dei depositi fini viene eroso e sostituito da ghiaie. Si formano pertanto corpi di ghiaie amalgamati tra loro senza soluzione di continuità, che a partire dal piano campagna possono essere spessi anche molte decine di metri. Questi corpi di ghiaie amalgamati ed i lobi di conoide descritti in precedenza, sono sede dell'acquifero principale. A monte delle zone di amalgamazione cala bruscamente il volume delle ghiaie; all'interno della valle le sole ghiaie presenti hanno spessori di pochi metri e costituiscono i depositi di terrazzo alluvionale. Le geometrie con cui avviene il passaggio dalla zona di conoide alluvionale alla zona intravalliva è comandata dalla struttura tettonica locale. Nella zona apicale della conoide, a partire dal piano campagna per decine di metri, sono presenti corpi ghiaiosi amalgamati; questo settore costituisce un acquifero monostrato in condizione di falda libera con frequenti ed elevati scambi idrici falda – fiume, caratterizzati dal fiume che alimenta la falda. La circolazione idrica è mediamente elevata, come testimoniato dall'età delle acque che si deduce dalle analisi isotopiche. In questo settore avviene la ricarica diretta della falda dalle infiltrazioni efficaci, per dispersione dall'alveo e dai flussi laterali provenienti dai settori delle conoidi minori. Procedendo verso valle i sedimenti fini iniziano a preservarsi, essi seppelliscono le ghiaie più superficiali, e nel sottosuolo, si interpongono e separano tra loro i corpi ghiaiosi di conoide. Si costituisce pertanto un sistema acquifero multifalda, progressivamente compartimentato, caratterizzato dalla presenza di falda confinata tranne locali condizioni di falda libera che possono caratterizzare la porzione più superficiale. Lo scambio falda fiume è limitato alle porzioni più superficiali, con alimentazione dal fiume alle falde. Nelle zone più esterne la porzione più superficiale può contenere un acquifero libero non connesso con gli acquiferi sottostanti, costituito prevalentemente da depositi sabbiosi. Il suo spessore è una decina di metri circa, e dal punto di vista

stratigrafico esso si sviluppa nei depositi del complesso acquifero A0.

La circolazione idrica rimane complessivamente molto elevata sviluppandosi all'interno dei corpi grossolani di conoide descritti al punto precedente, isolati tra loro dai principali acquitardi che costituiscono buone barriere di permeabilità. I livelli piezometrici tra i diversi lobi di conoide possono essere diversi tra loro anche di diversi metri ed i fenomeni di drenanza possono avvenire tra diverse parti dell'acquifero, in particolare in presenza di forti prelievi e in relazione a differenza di piezometria tra le diverse falde. I movimenti verticali tra falde si sviluppano in particolare nei settori caratterizzati da litologie limoso sabbiose o nelle porzioni più prossimali, dove gli acquitardi hanno una minore continuità laterale. Va sottolineato che la naturale continuità laterale degli acquitardi principali può essere interrotta in modo artificiale a causa dalla grande densità di pozzi presenti nella zona di conoide. I pozzi infatti possono indurre un flusso idrico attraverso gli acquitardi, che si sviluppa lungo l'intercapedine tra il pozzo ed il terreno. Sono stati rilevati gradienti idraulici delle falde pari al 7-12 per mille, per le parti apicali e intermedie della conoide del Savio, mentre valori pari a 2-3 per mille si rilevano per le porzioni intermedie – distali. In alcuni casi la presenza di prelievi di vasta entità può causare modifiche anche evidenti rispetto a questo andamento generale, con richiamo verso i pozzi di masse idriche, con piezometria concentrica dal raggio di diversi chilometri.

[Comune di Cesena, Piano di riqualificazione urbana, quartiere econovello – Cesena]

5.5 IDORCHIMICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Grazie al portale online con la cartografia interattiva delle “Piezometrie e qualità delle acque sotterranee nella pianura emiliano-romagnola” (Fig.13), è stato possibile raccogliere informazioni sulle caratteristiche chimiche delle acque di falda.



Figura 13, punti di monitoraggio

Cartografia Interattiva acque sotterranee. Regione Emilia-Romagna

Sono stati scelti 6 pozzi di monitoraggio del comune di Cesena e sono stati tabellati i risultati ottenuti:

PARAMETRI		STAZIONI					
		1	2	3	4	5	6
Boro	ug/l	196	260	103	132	511	110
Cloruri	mg/l	52	70	73	42	48	132
Conducibilità	uS/cm	949	1494	1223	975	968	1066
Durezza	°F	468	920	660	580	424	348
Escherichia coli	U.F.C.	0	0	11	0	0	0
Ferro	ug/l	3784	41	< 20	1026	3514	24
Manganese	ug/l	128	< 5	< 5	107	60	78
Nitrati	mg/l	< 1	37	77.1	< 1	< 1	3.5
Potassio	mg/l	3.8	4.1	3.1	1.5	1.4	2.7
Sodio	mg/l	46	57	64	38	78	51
Solfati	mg/l	49	272	106	88	12	41
Temperatura	°C	14.7	15	14	14.4	14.8	15.5

5.6 CARATTERIZZAZIONE IDORCHIMICA

Vengono di seguito riportati i valori dei principali parametri idrochimici degli acquiferi analizzati da ARPA per l'area Cesenate. Per ogni parametro, verrà evidenziato il proprio valore in prossimità dell'area di studio.

Per quanto riguarda la **temperatura**, è stata rilevata una contenuta escursione termica, indice di un buon equilibrio dinamico degli acquiferi profondi. La variazione termica rilevata nel 2006 oscilla da un minimo di 13°C ad un massimo di 19°C, coerentemente con quanto rilevato negli anni passati. Nell'area d'indagine, tale temperatura risulta compresa tra **14°C e 15,5°C**.

Conducibilità elettrica specifica. Indice del contenuto salino delle acque, risulta variabile da 949 a 1494 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Durezza. Si attesta mediamente su valori molto elevati (350-900°F).

Solfati e cloruri. Per il territorio cesenate, i solfati variano da circa **12 mg/l** a circa **272 mg/l**, mentre i cloruri variano da circa **42 mg/l** a circa **132 mg/l**.

Sodio e potassio. Per l'area in esame i valori di sodio sono prossimi ai **55 mg/l**, mentre i valori di potassio sono prossimi ai **2,7 mg/l**.

Ferro e manganese. La presenza di entrambi gli elementi è correlata alle condizioni di basso potenziale redox e quindi acquiferi a bassa permeabilità. Conseguentemente si riscontrano livelli significativi nella media e bassa pianura. Il ferro viene solubilizzato per alterazione dei minerali ferro-magnesiaci e ferriferi ad opera di organismi riducenti sul terreno agrario. E' la sua forma ridotta (Fe^{++}) ad essere solubile, mentre allo stato ossidato (Fe^{+++}) precipita conferendo alle acque la caratteristica colorazione giallo-rossastra. La valutazione congiunta della distribuzione spaziale dei due parametri indica una loro non correlazione, sebbene entrambi si mobilizzino in ambienti riducenti (il manganese sembra più caratteristico delle acque di recente infiltrazione che non di quelle più antiche). Nell'area d'indagine, il ferro si attesta su valori molto variabili, da **>20 $\mu\text{g}/\text{l}$** a **1000 $\mu\text{g}/\text{l}$** ; il manganese a **200 $\mu\text{g}/\text{l}$** .

Boro. Sulla base di quanto si può dedurre dalla distribuzione areale di questo

elemento, la presenza è correlabile alla matrice argilloso-limosa del serbatoio acquifero. Nell'area d'indagine i valori sono prossimi a **200 µg/l**.

5.7 FATTIBILITA' ED INDICAZIONI SULLA TIPOLOGIA DI GEOSCAMBIO OTTIMALE

Onde scegliere la soluzione di geo-scambio ottimale, occorre considerare le proprietà del terreno, i possibili impatti sull'ambiente e i limiti fisici e geometrici di realizzazione del cantiere. Per quanto riguarda la soluzione con scambio di acqua di falda, il sottosuolo di Cesena è caratterizzato da strati di terreno quasi sempre argillosi, salvo alcune aree dove localmente sarebbe possibile utilizzare i sistemi open-loop grazie alla presenza di ghiaia in falda, infatti questi sistemi se applicati ove il sottosuolo non è ghiaioso provocano lo “scioglimento” delle sabbie con pericolosi effetti di subsidenza. Oltre alla natura abbiamo anche la presenza di acqua di falda chimicamente aggressiva che potrebbe danneggiare i circuiti delle pompe di calore, le quali renderebbero necessario l'utilizzo di scambiatori, con relativo aumento del consumo di elettricità. Per ultimo e non per importanza risulta inoltre l'ottenere le autorizzazioni necessarie ad eseguire questo tipo di geoscambio, in quanto pur in linea di massima non inquinare a livello chimico la falda, ma bensì inquinare a livello termico. Le conoscenze geologico-stratigrafiche hanno rilevato la presenza di argille impermeabili nei primi metri di profondità; si sconsiglia dunque anche la soluzione a collettori orizzontali. Tale soluzione risulta poco realizzabile anche in termini pratici, in quanto le potenze termiche in gioco richiederebbero un'area eccessiva da dedicare ai collettori. Non si riscontrano infine particolari situazioni per cui si debba precludere la soluzione a sonde geotermiche verticali, purché la perforazione e l'installazione delle sonde vengano eseguite a regola d'arte, e cioè in maniera tale da non produrre impatti negativi sulle componenti ambientali. Detto questo, ciò che seguirà sarà un dimensionamento preliminare a sonde geotermiche verticale di tipo Closed-Loop, per un edificio scolastico-tipo situato nel comune di Cesena.

5.8 CALCOLO DEL FABBISOGNO TERMICO

Questa è una fase molto critica, perché l'impianto geotermico è dimensionato sulla base del fabbisogno termico dell'edificio. Per fabbisogno termico si intende la potenza in Watt che un impianto deve sviluppare sotto forma di calore per poter mantenere ad una data temperatura (20°) un ambiente. Il calcolo è molto complesso perché fortemente influenzato da innumerevoli fattori quali: isolamento termico, numero di pareti, superfici vetrate, numero di piani, numero di ricambi d'aria giornalieri, esposizione, ubicazione e altro. E' stato possibile ottenere questo dato grazie alla relazione tecnica obbligatoria prevista dalla Legge 9 gennaio 1991 n°10 per la verifica delle norme per il contenimento del consumo energetico degli edifici. Da essa rileviamo un fabbisogno termico pari a 138 KW.

Il nostro edificio avrà anche un carico termico estivo di raffrescamento, esso però non è presente nella Legge 10 perciò sarà stimato a seguito di alcune considerazioni. Solitamente il carico estivo è più alto di quello invernale, ma ciò se a parità di volume riscaldato, nel nostro caso trattandosi di un edificio scolastico non è così, in quanto in inverno si deve riscaldare l'intero edificio, mentre in estate lo si sfrutta per il raffrescamento, quindi a regime ridotto, dei soli uffici del personale aperti anche nei mesi estivi.

A seguito di tali ipotesi e considerazioni, sulla base del carico invernale e del rapporto della volumetria totale e quella degli uffici, in via semplificata si stima un Carico Termico Estivo pari a 25 KW.

E' molto utile ed economicamente conveniente considerare la curva di carico di un edificio (Fig.12), si tratta di una curva che indica la distribuzione della potenza richiesta nell'anno solare.

Essa è interessante per capire che il picco di potenza termica richiesta lo si ha per poche ore e in pochi giorni dell'anno, pertanto dimensionando l'impianto geotermico in base alla potenza termica massima implicherebbe che per la maggior parte del periodo di esercizio esso lavori a regime ridotto. Ciò rende molto più alto il costo di installazione e i tempi di ritorno dell'investimento. Una soluzione a ciò è l'utilizzo di

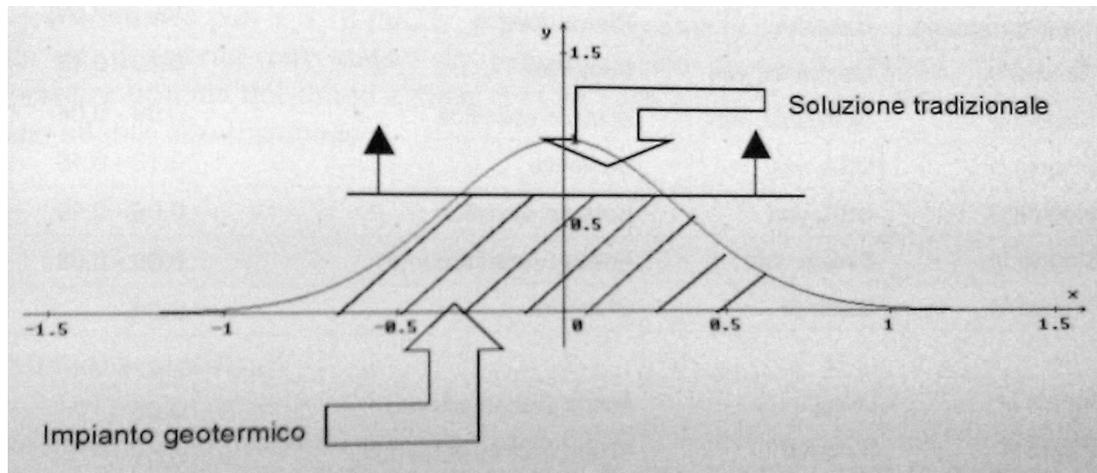


Figura 14 , Curva carico termico

S.Basta F.Minchio, Geotermia e pompe di calore

impianti ibridi, quindi coadiuvati da impianti tradizionali, i quali colmerebbero il gap di potenza nei soli giorni particolarmente freddi. Studiando la curva di carico si può notare che se si dimensiona l'impianto al 70%, si riesce a coprire il 90% del fabbisogno energetico annuo. Perciò abbiamo deciso di utilizzare questo sistema di dimensionamento per rendere l'intervento più economico ed efficiente. Perciò la potenza di 138 KW sarà ridotta del 30% ottenendo 97 KW.

5.9 DIMENSIONAMENTO DELL'IMPIANTO A POMPA DI CALORE

Il corretto dimensionamento e l'adeguata configurazione di un impianto geotermico sono essenziali per il suo funzionamento efficiente, duraturo, continuo ed economico. Ciò vale sia per la scelta della pompa di calore, ma vale soprattutto per il

dimensionamento del geoscambiatore, che rappresenta una consistente parte dell'investimento. Una pompa di calore sovradimensionata può avere un funzionamento intermittente, provocando molte accensioni e spegnimenti andando così ad accorciare la durata nel tempo del compressore. Un impianto sottodimensionato, non produce la potenza necessaria e può portare a consumi superiori alla norma. Inoltre, è fondamentale evitare che il geoscambiatore sia sovradimensionato (con conseguente notevole aumento dei costi) o sottodimensionato (con scarsa efficienza e limitata durata nel tempo). Per evitare questi rischi è importante configurare correttamente il sistema. Per impianti con potenza installata superiore a 30 KW il geoscambiatore deve essere dimensionato, a seguito del GRT, mediante l'utilizzo di metodi estesi di calcolo (es. modello ASHRAE)

5.9.1 DEFINIZIONE DELLA POTENZA DELLA POMPA DI CALORE

La potenza termica/frigorifera che deve erogare la pompa di calore è definita in funzione del fabbisogno energetico dell'edificio in precedenza calcolato.

Per quanto riguarda la potenza elettrica, si è considerato un COP (Coefficient Of Performance) medio della pompa di calore pari a 3,8 fornita dal progettista (esso tiene conto del fatto che una pompa di calore che comunque nasce per riscaldare aria, ha una resa minore se adibita al riscaldamento di un fluido).

L'equazione che lega la potenza termica ed elettrica al COP è:

$$COP = \frac{P_t}{P_e}$$

Dove:

- P_t : potenza termica sul lato utenze;
- P_e : potenza elettrica assorbita dal compressore della pompa di calore.

La potenza termica estratta dal lato sonde è pari a: $P = P_t - P_e$

Per tale motivo, i 97 KW termici generati sul lato utenze necessitano almeno di 71

KW estratti sul lato sonde.

Ora calcolato la potenza termica necessaria, è possibile proseguire con il dimensionamento dell'impianto.

5.9.2 IMPIANTO DI DISTRIBUZIONE

Il funzionamento delle pompe di calore geotermiche è ottimizzato se le stesse sono accoppiate a sistemi di distribuzione a bassa temperatura. In tal senso i sistemi radianti a pavimento, parete o soffitto, rappresentano la soluzione ottimale da abbinare alle pompe di calore geotermiche. E' molto importante che i sistemi radianti vengano dimensionati per lavorare con temperature di alimentazione del fluido termovettore contenute. Generalmente, l'ottimizzazione del sistema si ha quando la temperatura dell'acqua in ingresso al circuito radiante non supera i 35°C.

Nel nostro caso trattandosi d'interventi sul costruito, risulta impossibile installare pannelli radianti a pavimento, ma un'ottima soluzione è quella di sostituire i radiatori con ventilconvettori, essi sono in grado di funzionare con la rete di distribuzione esistente, e oltre ad avere un'ottima resa con temperature del fluido basse, sono in grado di funzionare sia per riscaldare che per raffreddare l'ambiente. In commercio si trovano ventilconvettori di varie potenze, con capacità di condizionamento in m² troviamo modelli da 10 m² sino a modelli più potenti in grado di condizionare un'ambiente di 85 m² ricordandosi che per soddisfare il benessere termico non è opportuno installare fonti di calore e raffrescamento troppo "puntuali" ma è meglio distribuire all'interno di un'ambiente la potenza in più unità. Pertanto vista la dimensione delle aule, corridoi, mense e bagni, è opportuno prevedere di massima ventilconvettori con capacità pari a 25 m², stimando la superficie utile da condizionare del nostro edificio otteniamo un valore di 720 m², condizionabile con l'adozione di circa 29 ventilconvettori.

5.9.3 DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DELLE SONDE GEOTERMICHE

5.9.3.1 APPROSSIMATO (TABELLARE)

Come qualsiasi corpo caldo, il terreno scambia calore per conduzione con i corpi freddi, ivi immersi, che subiscono un aumento di temperatura fino alla stabilizzazione con gli strati del sottosuolo interessati, che, molto limitatamente, si raffreddano.

La presenza di un fluido freddo all'interno delle tubazioni accentua tale processo: il fluido si riscalda tornando in superficie, per poi raffreddarsi nuovamente a temperatura ambiente e ripetere così il ciclo. In questo caso, al fenomeno della conduzione, si unisce quello della convezione tra fluido termovettore e il tubo in cui esso scorre. La variazione di temperatura ΔT generata è molto ridotta e dipende in parte dalle condizioni atmosferiche, ma soprattutto dal flusso di calore geotermico presente nel terreno. La conduzione in una sonda geotermica avviene generalmente in tre materiali diversi: attraverso le pareti del collettore, attraverso la malta della cementazione e nel terreno. Il fenomeno della convezione regola invece lo scambio termico tra fluido freddo e tubo caldo, dove però avvengono anche fenomeni di dispersione termica; è per tale motivo che i tubi delle sonde hanno diametri limitati grosso modo compresi tra 20 e 40 mm. Nel caso di trasporto di calore in un mezzo poroso saturo, tipico nei terreni della pianura padana, dove è frequente la presenza di falde freatiche e artesiane in profondità, il flusso di energia è la somma dei flussi di calore attraverso la fase fluida e solida; la conducibilità termica è in funzione della porosità e della conduttività termica del fluido e della matrice solida. Si può pensare di utilizzare l'energia termica ricavata dalla ΔT generata dal terreno, per alimentare una pompa di calore, cioè una particolare macchina per la climatizzazione. Essa, prelevando energia dal fluido, restituisce un valore di temperatura inferiore a quanto accadrebbe normalmente con uno scambio nell'atmosfera e ciò aumenta notevolmente l'efficienza del processo. Il sistema geotermico consiste nel raffreddamento degli strati superficiali del sottosuolo, che cedono calore a un livello termico sufficiente per l'evaporatore della pompa di calore ai fini del riscaldamento. Mediante la realizzazione di pozzi geotermici si ottiene questo scambio termico; si

eseguono varie perforazioni verticali, il cui numero è in funzione della necessità di potenza termica o frigorifera richiesta, e si inserisce in ognuna un sistema chiuso composto da tubi di mandata e ritorno al cui interno si fa scorrere successivamente un fluido composto da acqua e antigelo atossico. La terra per conduzione cede calore alla sonda, di conseguenza al fluido che torna in superficie riscaldato, che a sua volta lo trasmette alla pompa di calore, tornando così nel pozzo a una temperatura inferiore a quella del terreno. In genere per le normali profondità dei pozzi geotermici, comprese tra i 100-150 m a secondo del terreno presente, la temperatura del sottosuolo non è influenzata dalle variazioni climatiche esterne e si mantiene grosso modo costante durante tutto l'arco dell'anno, intorno ai 14°-15°. Effettuando lo scambio termico con il fluido esterno, il terreno va raffreddandosi, questo processo può essere invertito durante l'estate facendo circolare nei tubi acqua più calda derivante dai processi di raffrescamento. Il terreno può essere utilizzato come un serbatoio di stoccaggio di energia termica durante i mesi più caldi e questa energia sarà poi rilasciata nei mesi più freddi. Per aumentare la potenza disponibile occorre aumentare il flusso di calore oppure ottenere una differenza di temperatura più elevata; in genere non è conveniente procedere con perforazioni molto profonde, in quanto le dispersioni termiche durante il percorso di risalita annullerebbero in parte il vantaggio. Inoltre se si vogliono utilizzare i medesimi collettori anche per lo stoccaggio del calore nel sottosuolo, e quindi per esigenze di raffrescamento, non è ottimale per il bilancio termico annuale raggiungere temperature troppo elevate, che inficerebbero l'efficienza del sistema durante il funzionamento estivo. Il metodo più idoneo e quello più adottato, anche per un bilancio dei costi, consiste nel posare i tubi all'interno di una serie di pozzi, con una profondità sufficiente a creare una modesta ΔT . La conducibilità dipende dai terreni presenti ed in particolare dalla densità, che definisce il materiale, dalla umidità, che definisce la presenza di acqua, e dalla stratificazione del suolo, che permette di rilevare le discontinuità. Esistono varie correlazioni che stimano la conducibilità termica dei vari tipi di terreno, definendone in termini di energia, la resa termica. In generale suoli molto compatti e rigidi (rocciosi) hanno una conducibilità migliore e quindi una maggiore resa termica. Un

altro fattore determinante è la presenza di acqua nel sottosuolo, che determina ed influenza gli scambi convettivi di calore all'interno del terreno, andando a modificare in maniera notevole la conducibilità termica dei vari strati. La resa termica del terreno viene stimata sulla base della stratigrafia desunta da indagini geologiche di superficie e dalla modellazione geologica profonda. Il parametro termico che influisce sulla resa è la diffusività termica, espressa in $[m^2/s]$, data dal rapporto tra la conducibilità termica e la capacità termica volumetrica, due parametri intrinseci di ogni materiale e ricavabili in laboratorio. La resa complessiva del terreno, espressa in $[W/m]$, tiene conto dello spessore dei diversi strati e della presenza della componente convettiva (moto di acqua di falda). Dalle informazioni relative all'assetto idrogeologico, emerge una presenza di falde acquifere rilevanti, in corrispondenza di due distinti livelli di ghiaie sature, nelle fasce tra 25 - 30 m ; 50 - 75 m e 95 - 130 m circa; ad intervallare questi due livelli sono presenti degli strati di argilla a tratti sabbiosa.

Le informazioni puntuali, ricavabili dal sondaggio N°14, in prossimità dell'area fittizia d'intervento, arrivano fino a 165 m di profondità. Osservando le stratigrafie ottenute dal sondaggio, si nota il primo strato di ghiaia dai 29 ai 33 m, il secondo da 57 - 76 e tra 94 e 160 m di profondità. Tutti intervallati da strati di argilla a piccoli tratti sabbiosa. Per calcolare la resa termica abbiamo la possibilità di seguire due strade, una più semplificata tabellare (che però è corretta solo per impianti inferiori ai 30 KW) e una più articolata (necessaria per potenze superiori ai 30 KW). Nel nostro caso abbiamo una potenza superiore ai 30 KW perciò dovremo utilizzare il metodo più laborioso. Nulla ci vieta, anzi ci sarà molto utile, per dimensionare sommariamente e quindi capire in linea di massima la dimensione dell'impianto, l'utilizzo del metodo semplificato. Esso consiste nell'utilizzo di una tabella frutto dell'esperienza tedesca e scandinava, e riportata di seguito:

Roccia	Conducibilità termica media λ [W/Km]	Resa [W/m]
Linee guida generali		
Sottosuoli sterili, sedimenti secchi ($\lambda < 1,5 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		20
Normali sottosuoli rocciosi ($\lambda = 1,5 \div 3,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		50
Rocce consolidate altamente conduttive ($\lambda > 3,0 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$)		70
Rocce eruttive		
Graniti	3,5	80 – 90
Granodioriti	2,5	60 – 70
Gabbri	1,8	40 – 50
Basalti	1,7	40 – 50
Porfidi	1,9	40 – 50
Ossidiane	1,3	30 – 40
Pomici	0,4	20 – 30
Rocce sedimentarie		
Calcari	2,8	60 – 70
Arenarie	2,2	50 – 60
Travertini	2,4	50 – 60
Gesso	2,5	50 – 60
Ghiaia asciutta	0,4	20 – 40
Ghiaia bagnata	1,6 ⁽¹⁾	40 – 50
Sabbia asciutta	0,5	30 – 50
Sabbia bagnata	2,3	50 – 60
Limi e argille asciutti	0,6	30 – 50
Limi e argille bagnate	1,8	40 – 50
Rocce metamorfiche		
Gneiss	2,9	60 – 70
Marmo	2,2	50 – 60
Ardesia	2,4	50 – 60
Altri materiali		
Bentonite	0,7	
Cemento	1,6	
Aria secca	0,026	
Polistirolo espanso	0,03	
Quarzo	8	
Ferro	60	
Rame	400	
Diamante	2.500	

Questa tabella per poter ricavare la resa termica necessita della conoscenza della conducibilità termica, questo dato può essere calcolato con metodi analitici, oppure mediante una prova fisica chiamata GRT (Ground Response Test) in sito, tale test lo si è riuscito ad ottenere da una ditta locale e di seguito se ne riportano le conclusioni: “Il coefficiente di conducibilità termica equivalente desunto dal test GRT (Trattasi di una simulazione, che avviene, immettendo nella sonda acqua calda o fredda a potenza

costante, e valutando nell'arco di circa 3-4 giorni, come il terreno assorbe/disperde la temperatura con cui viene a contatto), si è rivelato comparabile con i valori ipotizzati tramite i dati bibliografici geologici e idrogeologici ed è pari a: **2.05 W/mK**. Il valore mediamente piuttosto elevato della conducibilità termica della sonda geotermica sembra essere favorevolmente condizionato dalla presenza, nella sequenza geologica interessata, materiali ad elevata conducibilità idraulica (ghiaie prevalenti).

Utilizzando questo dato notiamo nella tabella che sono chiamati Normali sottosuoli rocciosi ($\lambda=1,5 - 3$) e pertanto la Resa Termica viene stimata in **50 W/m**.

Tale valore è abbastanza tipico del sottosuolo della Pianura Padana.

Sulla base del quadro geologico-stratigrafico ed idrogeologico, una volta scelta l'alternativa migliore di geo-scambio, si è potuto stimare il quantitativo di sonde geotermiche da installare nel terreno. In riferimento pertanto al modello geologico sopra descritto, considerati i 97 kW di potenza termica da estrarre dal terreno nel periodo invernale, effettuando il calcolo con la resa trovata, si ritengono necessari al minimo 1940 m di perforazione; per coprire tale lunghezza, si ritiene idonea la seguente soluzione di 15 sonde da 130 m, per un totale di 1950 m. Lo stesso calcolo applicato al caso estivo rivela la necessità di 4 sonde profonde 130 metri per il raffrescamento estivo. Sulla base di questo risultato ci possiamo fare l'idea dell'estensione del nostro impianto.

[S. BASTA – F. MINCHIO, geotermia e Pompe di Calore]

5.9.3.2 ESAUSTIVO (ASHRAE)

Questo metodo tiene conto di diversi fattori, tra i quali: potenza della macchina, modalità di esercizio (riscaldamento o raffrescamento), ore di funzionamento, temperature di esercizio e interferenze tra le sonde. Questo metodo fu implementato e proposto da Kavanaugh e Rafferty (1997). Le equazioni di riferimento sono basate sul modello a sorgente cilindrica e adeguate all'impiego di sonde geotermiche tramite l'introduzione di una serie di parametri aggiuntivi che tengono conto della geometria,

della disposizione e dei parametri costruttivi degli scambiatori. Secondo tale metodo, la lunghezza complessiva delle sonde riferita rispettivamente al periodo estivo e al periodo invernale, è definita dalle seguenti relazioni:

Condizione invernale

$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lh} - \bar{W}_c) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - (t_{wi} + t_{wo})_c / 2 - t_p}$$

Condizione estiva

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lc} - \bar{W}_c) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - (t_{wi} + t_{wo})_c / 2 - t_p}$$

Dove:

- c, h : pedici che indicano rispettivamente, la condizione di raffreddamento (cooling) e quella di riscaldamento (heating);
- L_c, L_h : lunghezze totali di perforazione necessarie per raffreddare e riscaldare l'edificio [m]
- q_a : flusso termico netto scambiato mediamente con il sottosuolo durante l'intero anno [W]
- q_{lc}, q_{lh} : carichi di progetto (di picco) necessari per raffreddare e riscaldare l'edificio [W]
- W_c, W_h : potenze elettriche assorbite dalla pompa di calore in corrispondenza del carico di progetto [W]
- PLF_m : fattore di carico/parzializzazione mensile
- F_{sc} : fattore di perdita legato al cortocircuito termico in sonda tra tubo di mandata e di ritorno
- t_g : temperatura del sottosuolo non influenzato dalla presenza della sonda [°C]
- t_p : temperatura di penalizzazione che indica la reciproca influenza termica tra le sonde attraverso il terreno [°C]

- T_{wi} , T_{wo} : temperatura del fluido in ingresso e in uscita della pompa di calore [°C]
- R_b : resistenza equivalente tra fluido e bordo sonda per unità di lunghezza della sonda stessa [mK/W]
- R_{ga} : resistenza termica efficace del terreno per unità di lunghezza di sonda riferita all'impulso annuale [mK/W]
- R_{gm} : resistenza termica efficace del terreno per unità di lunghezza di sonda riferita all'impulso mensile [mK/W]
- R_{gd} : resistenza termica efficace del terreno per unità di lunghezza di sonda riferita all'impulso mensile [mK/W]

La lunghezza totale di sonda richiesta è il valore maggiore tra L_c e L_h . Qualora la scelta ricada su L_c la pompa di calore lavorerà con un campo sonde sovradimensionato e quindi l'efficienza del sistema aumenterà nel funzionamento in riscaldamento. Solitamente quando le due lunghezze sono molto diverse tra loro, il progetto prevedrà un campo sonde con la lunghezza minore. Per garantire la copertura totale il sistema sarà integrato con una pompa di calore aria-acqua. In tali circostanze l'impianto verrà definito ibrido. R_b , può essere considerata costante rispetto alla resistenza termica del terreno, poiché il fluido termovettore, il tubo e la malta cementizia hanno un'inerzia termica trascurabile rispetto al terreno circostante.

Di seguito si riporta una tabella con indicazione dei valori di R_b :

DN/s	Diametro perforazione 100mm			Diametro perforazione 150mm		
	λ malta [W/mK]					
	0,86	1,73	2,60	0,86	1,73	2,60
20/2,4	0,33	0,16	0,19	0,40	0,19	0,14
25/3	0,29	0,14	0,10	0,35	0,17	0,12
32/3,5	0,26	0,14	0,08	0,31	0,16	0,10

Si osservi che i suddetti valori si riferiscono al moto turbolento ($Re > 10.000$).

Per $Re = 4000$ aggiungere 0,014 mK/W

Per $Re = 1500$ aggiungere $0,040 \text{ mK/W}$

R_{ga} , R_{gm} , R_{gd} , si riferiscono al terreno circostante il foro e corrispondono alla resistenza assunta dal terreno dopo un certo periodo di funzionamento del sistema geotermico.

La loro definizione è la seguente:

$$R_{ga} = G_f - G_1/\lambda_g$$

$$R_{gm} = G_1 - G_2/\lambda_g$$

$$R_{gd} = G_2/\lambda_g$$

G_1, G_2 e G_f sono detti G-factor e vengono calcolati nel seguente modo:

$$G_f = 0,0758 \cdot \ln(Fo_f) + 0,1009$$

$$G_1 = 0,0758 \cdot \ln(Fo_1) + 0,1009$$

$$G_2 = 0,0758 \cdot \ln(Fo_2) + 0,1009$$

Dove Fo è il numero di Fourier espresso come:

$$Fo_f = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot \tau_f}{d_b^2}$$

$$Fo_1 = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_1)}{d_b^2}$$

$$Fo_2 = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_2)}{d_b^2}$$

con:

$$\tau_1(10 \text{ anni}) = 3650 \cdot 86400$$

$$\tau_2(10 \text{ anni} + 1 \text{ mese}) = (3650 + 30) \cdot 86400$$

$$\tau_f(10 \text{ anni} + 1 \text{ mese} + 1 \text{ gg}) = (3650 + 30 + 0,25) \cdot 86400$$

F_{sc} tiene conto del degrado dello scambio termico tra sonda e terreno dovuto al trasporto di calore nel tubo discendente e in quello ascendente.

Nella tabella di seguito si riportano i valori tipici di questo parametro:

Sonde per circuito	Fattore di corto circuito termico F_{sc}	
	$0,036(L/s)/kW-\Delta T=6.6$ [°C]	$0,054(L/s)/kW-\Delta T=4.4$ [°C]
1	1,06	1,04
2	1,03	1,02
3	1,02	1,01

Nel caso di geoscambiatore costituito da più sonde è necessario tener conto della penalizzazione dello scambio termico dovuto all'interferenza tra le sonde. Il parametro che consente ciò è t_p .

Nella tabella di seguito si riportano i valori tipici di questo parametro:

Ore equivalenti di funzionamento a pieno carico [h/anno]		Passo tra le sonde	t_p [K]	Lunghezza specifica sonda [m/kW]
Freddo	Caldo			
1000	500	4,6	Trascurabile	16,6
1000	1000	4,6	2,6	19,5
		6,1	1,3	17,8
500	1000	4,6	4,2	22,5
		6,1	2,2	19,7
500	1500	4,6	7,1	29,9
		6,1	3,7	22,0
		7,6	1,9	19,4
0	2000	4,6	Sconsigliato	
		6,1	5,8	27,4
		7,6	3,1	21,8
FATTORE CORRETTIVO PER ALTRE DISPOSIZIONI A GRIGLIA (moltiplicatore di t_p)				
Griglia 1x10 Cf = 0,36	Griglia 2x10 Cf = 0,45	Griglia 5x5 Cf = 0,75	Griglia 20x20 Cf = 1,14	

T_{wi} e T_{wo} rappresentano, rispettivamente, la temperatura in ingresso e in uscita della pompa di calore lato geoscambiatore. La scelta di T_{wi} , è un punto critico della progettazione, in quanto la scelta di un valore molto prossimo a quello della temperatura del terreno indisturbato rappresenta sicuramente la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista dell'efficienza energetica, ma comporta un incremento delle dimensioni del campo sonde e quindi dell'investimento. Ovviamente vale il discorso diametralmente opposto, se si scegliesse un valore molto lontano dalla temperatura indisturbata del terreno. Una buona norma suggerisce di fissare il valore di T_{wi} da 10 a 16°C superiore alla T_g nel raffreddamento e da 6 a 11°C inferiore, nel caso di riscaldamento.

Infine, si definiscono i termini di potenza scambiati con il terreno nel modo seguente:
(metodo esteso)

$$(q_{lc} - \bar{W}_c) = q_{lc} \cdot (COP_c + 1) / COP_c$$

$$(q_{lh} - \bar{W}_h) = q_{lh} \cdot (COP_h + 1) / COP_h$$

(metodo semplificato)

$$(q_{lc} - \bar{W}_c) = q_{lc} \cdot C_{fc}$$

$$(q_{lh} - \bar{W}_c) = q_{lc} \cdot C_{fh}$$

con:

EER (raffreddamento)	C_{fc}	EER (riscaldamento)	C_{fh}
11	1,31	3,0	16,6
13	1,26	3,5	19,5
15	1,23	4,0	17,8
17	1,20	4,5	22,5

Alla luce di questo, ora è possibile procedere con il dimensionamento dell'impianto con il metodo ASHRAE.

[Miniguide AICARR, ed 2009]

Ricordiamo che il nostro sistema deve essere in grado di produrre acqua calda in inverno e fredda in estate, per il condizionamento del fabbricato. La distribuzione interna avverrà per entrambi i casi mediante ventilconvettori (fancoil).

Inoltre:

- $q_{lh} = 97 \text{ KW}$ (Potenza Max Invernale)
- $q_{lc} = 25 \text{ KW}$ (Potenza Max Estiva)
- $\tau_h = 1170 \text{ h}$ (ore di funzionamento annue di riscaldamento)
- $\tau_c = 768 \text{ h}$ (ore di funzionamento annue di raffrescamento)
- $h_{eq,h} = 192 \text{ h}$ (ore di riferimento mensili a pieno carico di riscaldamento)
- $h_{eq,c} = 144 \text{ h}$ (ore di riferimento mensili a pieno carico di raffrescamento)

In riferimento alla pompa di calore:

- $T_{wi} = 6^\circ\text{C}$ con $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ (inverno)
- $T_{wi} = 27^\circ\text{C}$ con $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ (estate)
- $\text{COP}_h = 4,7$ (rendimenti stagionali)
- $\text{COP}_c = 4,05$ (rendimenti stagionali)
- $\text{COP}_h = 3,8$ (rendimenti a picco)
- $\text{COP}_c = 3,3$ (rendimenti a picco)

In riferimento al terreno:

- $\lambda_g = 2,05 \text{ W/mK}$ (conducibilità termica media da GRT)
- $\alpha_g = 9,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (diffusività termica media)
- $t_g = 15^\circ\text{C}$ (temperatura indisturbata)

In riferimento alla sonda:

- PE100HD PN16 SDR11 (materiale)
- DN 32 ; s = 3mm (dimensioni)
- $\phi = 150\text{mm}$ (diametro perforazione)
- $\lambda_{\text{malta}} = 2,60 \text{ W/mK}$

➤ Calcoliamo i fattori di parzializzazione nei mesi di progetto:

$$(PLF_m)_h = h_{eq,h}/31 \cdot 24 = 0,258$$

$$(PLF_m)_c = h_{eq,c}/31 \cdot 24 = 0,194$$

➤ Calcoliamo il flusso medio netto annuale scambiato con il terreno:

$$q_a = \frac{q_h \cdot \left(\frac{COP_h^{-1}}{COP_h}\right) \tau_h + q_c \cdot \left(\frac{COP_c^{-1}}{COP_c}\right)}{365 \text{gg} \cdot 24 \text{h}} = \frac{(97000 \cdot 0,787 \cdot 1170) - (25000 \cdot 1,247 \cdot 768)}{8760} = 7462,81 \text{ [W]}$$

➤ Dalle tabella già vista con il diametro di perforazione di 150mm e la sonda tipo DN32 ricaviamo $R_b = 0,10 \text{ mK/W}$

DN/s	Diametro perforazione 100mm			Diametro perforazione 150mm		
	$\lambda_{\text{malta}} \text{ [W/mK]}$					
	0,86	1,73	2,60	0,86	1,73	2,60
20/2,4	0,33	0,16	0,19	0,40	0,19	0,14
25/3	0,29	0,14	0,10	0,35	0,17	0,12
32/3,5	0,26	0,14	0,08	0,31	0,16	0,10

- Da questa tabella ricavo $t_p = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ che rappresenta la temperatura di penalizzazione (>0 in inverno e <0 in estate) che indica la reciproca influenza termica tra le sonde attraverso il terreno.

Ore equivalenti di funzionamento a pieno carico [h/anno]		Passo tra le sonde	t_p [K]	Lunghezza specifica sonda [m/kW]
Freddo	Caldo			
1000	500	4,6	Trascurabile	16,6
1000	1000	4,6	2,6	19,5
		6,1	1,3	17,8
500	1000	4,6	4,2	22,5
		6,1	2,2	19,7
500	1500	4,6	7,1	29,9
		6,1	3,7	22,0
		7,6	1,9	19,4
0	2000	4,6	Sconsigliato	
		6,1	5,8	27,4
		7,6	3,1	21,8
FATTORE CORRETTIVO PER ALTRE DISPOSIZIONI A GRIGLIA (moltiplicatore di t_p)				
Griglia 1x10 Cf = 0,36	Griglia 2x10 Cf = 0,45	Griglia 5x5 Cf = 0,75	Griglia 20x20 Cf = 1,14	

- Da questa invece troviamo il fattore $F_{sc} = 1,05$ che rappresenta la perdita legata al cortocircuito termico in sonda tra tubo di mandata e di ritorno.

Sonde per circuito	Fattore di corto circuito termico F_{sc}	
	$0,036(\text{L/s})/\text{kW}-\Delta T=6.6$ [°C]	$0,054(\text{L/s})/\text{kW}-\Delta T=4.4$ [°C]
1	1,06	1,04
2	1,03	1,02
3	1,02	1,01

- Utilizzando le seguenti formule approssimate è possibile calcolare i G-factor:

$$Fo_f = 4 \cdot \alpha_g \cdot \tau_f / d_b^2$$

$$Fo_f = 4 \cdot 9,38 \cdot 10^{-7} \cdot 317973600 / 0,15^2 = 53023,86$$

$$G_f = 0,0758 \cdot \ln(Fo_f) + 0,1009 = 0,9255$$

$$Fo_1 = 4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_1) / d_b^2$$

$$Fo_1 = 4 \cdot 9,38 \cdot 10^{-7} \cdot 2613600 / 0,15^2 = 435,832$$

$$G_1 = 0,0758 \cdot \ln(Fo_1) + 0,1009 = 0,5616$$

$$Fo_2 = 4 \cdot \alpha_g \cdot (\tau_f - \tau_2) / d_b^2$$

$$Fo_2 = 4 \cdot 9,30 \cdot 10^{-7} \cdot 21600 / 0,15^2 = 3,602$$

$$G_2 = 0,0758 \cdot \ln(Fo_2) + 0,1009 = 0,1980$$

➤ Quindi è possibile calcolare i valori di resistenza termica:

$$R_{ga} = G_f - G_1 / \lambda_g = 0,1775$$

$$R_{gm} = G_1 - G_2 / \lambda_g = 0,1774$$

$$R_{gd} = G_2 / \lambda_g = 0,0966$$

➤ Ora si definiscono i termini di potenza scambiati con il terreno:

$$(q_{lc} - \bar{W}_c) = q_{lc} \cdot (COP_c + 1) / COP_c = 32575,75$$

$$(q_{lh} - \bar{W}_h) = q_{lh} \cdot (COP_h + 1) / COP_h = 102105,26$$

➤ Si hanno ora tutti i dati per poter calcolare la lunghezza complessiva del campo sonde per il raffreddamento:

$$L_c = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lc} - \bar{W}_c) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - (t_{wi} + t_{wo})_c / 2 - t_p}$$

$$L_c = \frac{7462,8 \cdot 0,1775 + 32575 \cdot (0,1 + 0,194 \cdot 0,1774 + 0,096 \cdot 1,05)}{15 - (27 + 32) / 2 - 0,5} = 599m$$

idem per il riscaldamento:

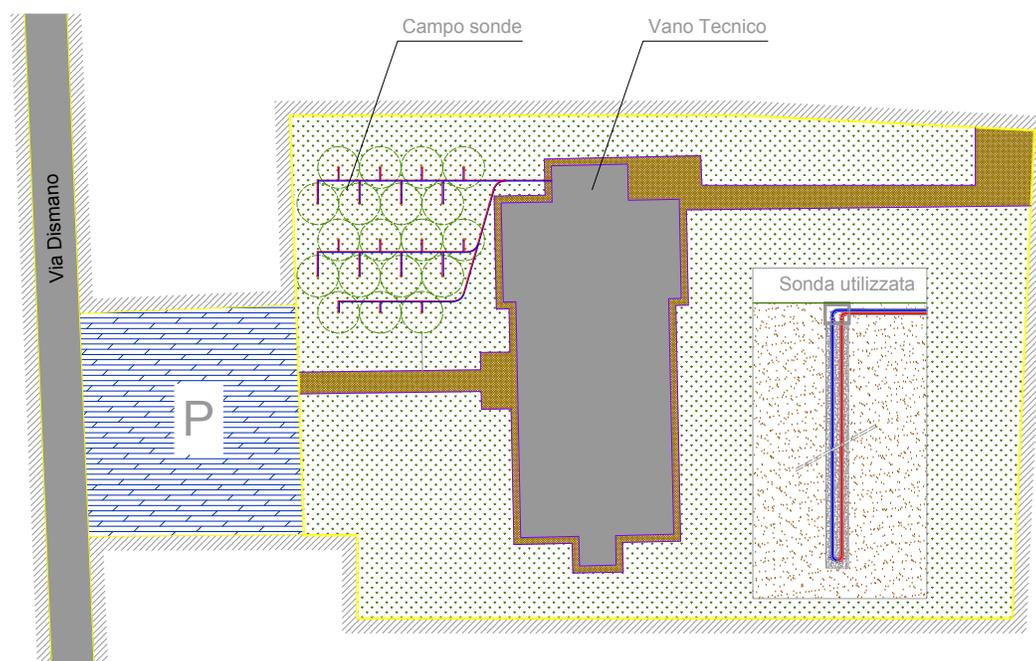
$$L_h = \frac{q_a \cdot R_{ga} + (q_{lh} - \bar{W}_h) \cdot (R_b + PLF_m \cdot R_{gm} + R_{gd} \cdot F_{sc})}{T_g - (t_{wi} + t_{wo})_h / 2 - t_p}$$

$$L_h = \frac{7462,8 \cdot 0,1775 + 102105 \cdot (0,10 + 0,194 \cdot 0,1774 + 0,096 \cdot 1,05)}{15 - (6 + 2) / 2 - 0,5} = 2411m$$

Il campo sonde avrà quindi una lunghezza complessiva di 2470 m e sarà realizzato con 19 sonde profonde 130 m.

Dallo sviluppo di questi calcoli, notiamo che con il modello di calcolo ASHRAE si è dimensionato un impianto con 4 sonde in più rispetto al metodo semplificato, questa differenza giustifica il fatto che il metodo tabellare può essere utilizzato solo per piccoli impianti, e fa notare come lo squilibrio tra carico termico estivo ed invernale influisca negativamente sull'efficienza. Fisicamente questa perdita di efficienza è spiegabile in quanto il terreno viene utilizzato come serbatoio per lo stoccaggio del calore, perché d'estate si immette calore nel sottosuolo sottraendolo all'edificio, mentre d'inverno lo si preleva dal sottosuolo per riscaldare l'edificio stesso. Se questi due cicli fossero ben bilanciati, si ridurrebbe anche l'inquinamento termico del terreno.

E' interessante ipotizzare una soluzione di layout da applicare al nostro caso, il campo sonde è stato disposto con interasse tra esse di 6 m (consigliato dall'esperienza tedesca) e disposto a nido d'ape in quanto la soluzione con minor ingombro . I collegamenti orizzontali verranno realizzati completamente interrati, e verrà predisposto un pozzetto di ispezione in corrispondenza della testa di ogni sonda



Layout campo sonde e sonda tipo

5.10 ESEMPIO DI INSTALLAZIONE

Giunti al dimensionamento di massima dell'impianto, è utile individuare le 5 macrofasi operative dell'installazione. L'installazione si suddivide in : Trivellazione, Installazione, Cementazione, Collegamenti orizzontali, Installazione vano tecnico.

Nella fattispecie:

➤ TRIVELLAZIONE

Con l'utilizzo di trivelle, personale altamente specializzato, procede con la perforazione dei pozzi, questa fase rappresenta economicamente 1/3 del costo totale dell'impianto, poiché molto impegnativa date le profondità da raggiungere. La fase di perforazione deve essere svolta a regola d'arte ai fini dell'efficienza dell'impianto. Di seguito possiamo vedere in foto la fase di trivellazione con terreno "secco" (Fig.15a, 15b)



Figura 9 a , perforazione



Figura 15b , perforazione

➤ **INSTALLAZIONE DELLE SONDE**

A pozzo ultimato saranno inserite le sonde, esse per facilitare il trasporto sono consegnate in bobine, quindi nella fase d'installazione verranno mano in mano srotolate all'interno del pozzo (Fig.16a) per facilitare la discesa in testa alla sonda viene fissata una zavorra che sarà a perdere sul fondo. Come sappiamo il circuito della sonda prevede una parte di discesa del fluido e una di risalita, questo circuito chiuso è possibile grazie alla predisposizione di elementi in PVC rigido ad U in estremità. Nella foto possiamo vedere la fase di installazione, una punta a U (Fig 16b) , una a doppia U (Fig 16c) ed una sonda installata nel contesto del fondo del pozzo geotermico, aiutata dalla zavorra (Fig.16d)



Figura 16a , installazione sonda



Figura 16b , sonda a U



Figura 16c , sonda a doppia U



Figura 16d , sonda installata

link: http://www.geotermiaitalia.it/it/faq_geotermia.html

➤ CEMENTAZIONE

Inserita la sonda, per verificare che durante l'installazione non si sia danneggiato il condotto si procede mediante l'immissione di aria compressa nel tubo d'ingresso, e misurando tramite manometro la pressione di uscita, si collauda la tenuta della sonda. Se non vi sono perdite, si procede iniettando malta ad alta resa termica (Fig. 17a) la quale interponendosi tra tubatura e terreno contribuisce a costituire la sonda geotermica nel suo insieme, essa garantisce anche che non vi sia aria tra sonda e parete del pozzo, la quale costituirebbe un dannoso isolamento termico. Di seguito possiamo vedere come si presenta in superficie una sonda ultimata (Fig.17b):



Figura 19a , cementazione



Figura 17b , cementazione

➤ COLLEGAMENTI ORIZZONTALI

Installate le sonde, è necessario collegare l'estremità della sonda alla rete (Fig. 18.1a e 18.2a), la quale manterrà in serie le sonde (Fig. 18b), e le collegherà nei collettori posti in prossimità della centrale termica (Fig.18c):



Figura 18.1° , collegamento testa sonda



Figura 18.1°a , collegamento testa sonda



Figura 18b , collegamenti orizzontali



Figura 18c , collettori

link: http://www.geotermiaitalia.it/it/faq_geotermia.html

➤ VANO TECNICO

Procedendo all'interno dell'edificio, o comunque all'interno di un vano tecnico, verrà installato un serbatoio nel quale si immagazzinerà l'acqua del circuito radiante, e la pompa di calore che mediante l'utilizzo di energia elettrica riscalderebbe il circuito con l'utilizzo del fluido termovettore proveniente dalle sonde. Di seguito (Fig.19 e Fig. 20) possiamo vedere alcune installazioni :



Figura 19 , centrale termica



Figura 20 , centrale termica

link: http://www.geotermiaitalia.it/it/faq_geotermia.ht

link: http://www.geotermiaitalia.it/it/faq_geotermia.html

[GEOTERMIA ITALIA; link: http://www.geotermiaitalia.it/it/faq_geotermia.html]

CAPITOLO 6

ASPETTI ECONOMICI DELL'INTERVENTO

6.1 COSTO ECONOMICO DELL'IMPIANTO

L'utilizzo di impianti geotermici in Italia non è ancora molto diffuso, e quindi al momento i costi di impianto sono piuttosto elevati, anche se sono giustificati da un successivo risparmio annuo sulle spese di riscaldamento molto importante. Ovviamente non abbiamo un dato univoco sul quale calcolare un preventivo, poiché la spesa di impianto varia molto in funzione del fabbisogno termico e del sottosuolo. Grazie ad un'indagine tra varie aziende sul territorio nazionale che installano questi impianti, è stato possibile ridurre in tabella un costo unitario per KW prodotto. Questo costo unitario varia anche in funzione della potenza totale dell'impianto stesso. Di seguito viene riportato in tabella quanto detto:

Potenza installata (kW)	SGV + collegamenti (€/kW)	Centrale termofrigorifera (€/kW)	Totale (€/kW)
10 - 20	1.600	2.000	3.600
21-50	1.200	1.200	2.400
51-100	1.200	800	2.000
101-500	1.200	600	1.800
501-1500	900	500	1.400

Si nota come ci si poteva aspettare, che per potenze ridotte i costi unitari sono più alti, questo ci fa pensare che più un impianto sarà grande più sarà veloce l'ammortizzamento del costo iniziale.

Nel nostro caso, l'impianto dimensionato nel capitolo precedente che prevede 19 sonde geotermiche profonde 130 m, a monte di un fabbisogno termico di 97 KW, e quindi rientrante nella terza fascia di prezzo, si stimano 193'000€ per l'installazione dell'impianto, e come previsto nel capitolo precedente 10'000€ per l'installazione di

29 ventilconvettori (fancoil).

Per un totale di 203'000€ per l'impianto completo.

6.2 COSTI DI ESERCIZIO

I costi di esercizio di un impianto geotermico combinato a pompa di calore, sono i soli dovuti al costo dell'energia elettrica consumata dalla pompa di calore. Sono molto contenuti in quanto in fase di riscaldamento, il COP (efficienza) di riferimento di una pompa di calore è assumibile pari al 3,8. Ciò indica che per produrre 100 Kw di potenza termica, necessitano solo 26 KW di potenza elettrica. Il mercato dell'energia elettrica è libero, ed interessato da piani di marketing, e quindi il costo varierà da contratto a contratto. Per contestualizzare l'intervento si è fatto riferimento ai prezzi disponibili online (Fig.21).

Fly Energia	0.061 €/kWh
E.ON Energia	0.064 €/kWh
Enel Energia E-light	0.064 €/kWh
Edison Luce Sconto Sicuro	0,073 €/kWh
Tariffa regolata AEEG	0,08125 C/kWh

Figura 21 , prezzi di mercato dell'elettricità

Fly Energia, E.ON Energia, Enel Energia, Edison, AEEG

Questi prezzi sono riferiti alla sola parte di consumo, e non includono i costi fissi previsti annualmente dal gestore, pertanto al fine di includerli si è ritenuto necessario adottare il costo di 0,150 €/kWh per il nostro calcolo. Indubbio sarà l'aumento nel futuro del costo dell'energia elettrica, tanto quanto però sarà sicuramente quello del Gas Metano, il quale oltre che non essere presente nel territorio italiano e quindi acquistato all'estero, è una fonte in via di esaurimento. Mentre l'energia elettrica può essere prodotta con fonti rinnovabili, e all'interno del territorio nazionale.

Detto ciò per il nostro caso studio si stima un costo annuo per l'energia elettrica pari a 2'991€ per il riscaldamento, 747€ per il raffrescamento, per un totale di 3'740€ annui di costi di esercizio.

6.3 COSTI DI MANUTENZIONE

Una stima della vita media di un impianto geotermico può essere fatta più su i componenti che sull'intero impianto. Le pompe di calore geotermiche hanno una vita utile di almeno 20-25 anni, mentre le sonde geotermiche possono funzionare senza problemi per molte decine d'anni (secondo alcune fonti fino a 80-100 anni). Per tutti gli anni di funzionamento dell'impianto, non vi è pressoché alcuna necessità di manutenzione. Viene programmata una piccola manutenzione 2 volte all'anno in concomitanza all'inversione del ciclo della pompa, cioè a inizio e fine inverno.

6.4 CONSIDERAZIONI FINALI CASO STUDIO

Analizzato tutto è ora di trarre un piccolo bilancio economico ed ecologico. Ad oggi per questo plesso scolastico si bruciano 30mila m³ di gas metano, producendo 57ton di CO₂, spendendo 21'161€ in gas per il riscaldamento. Inoltre non è prevista la funzione di raffrescamento estivo, con relativa perdita di qualità dell'aria nei mesi estivi nonché benessere termico.

La nostra proposta consiste nell'adozione di un impianto ibrido geotermico e pompa di calore, il quale prevede la sostituzione di tutti gli elementi radianti con ventilconvettori (la rete di distribuzione rimane inalterata), l'installazione di 19 sonde geotermiche profonde 130m all'interno del lotto, l'installazione di una centrale termica a pompa di calore con capacità di carico massimo pari a 25KW. Questa soluzione implementa la funzione di raffrescamento all'impianto di condizionamento dell'aria, nei mesi estivi. La spesa totale comprensiva di impianto e terminali è stimata in 203'000€ impianto completo.

A fronte di questa spesa si anno i seguenti benefici:

- Costi annui per il condizionamento pari a 3'740€
- Risparmio annuo pari al 82%
- Riduzione delle emissioni di CO₂ di circa il 95%
- Maggior velocità nel raggiungere le temperature fissate, riducendo quindi i tempi di preaccensione dell'impianto

- Miglioramento del benessere termico dovuto alla possibilità di raffrescamento estivo, mancante prima
- Possibilità di prevedere un impianto fotovoltaico, per provvedere al fabbisogno energetico della pompa di calore.

CAPITOLO 7

CONFRONTO TRA RISCALDAMENTO TRADIZIONALE E IMPIANTO GEOTERMICO PER GLI EDIFICI SCOLASTICI DEL COMUNE DI CESENA

Abbiamo analizzato nei precedenti capitoli in territorio cesenate, abbiamo indagato nel sottosuolo per capirne le qualità e le caratteristiche. Abbiamo valutato quali tipi di impianti sarebbe corretto utilizzare, e abbiamo elaborato un sommario predimensionamento di un impianto-tipo. Ora è interessante vedere quali effetti economici avrebbe l'applicazione di questa tipologia di riscaldamento agli edifici scolastici di competenza del comune di Cesena. Ad oggi il Comune per il riscaldamento di 44 edifici scolastici (Asili Nido, Scuole Materne e Scuole Primarie) brucia annualmente 718 mila m³ di Gas Metano, producendo circa 1360 Tonnellate di CO₂, spendendo annualmente 500'263 €. Un'importante spesa per le casse comunali, che grazie alla tecnologia degli impianti geotermici si potrà sicuramente contenere.

7.1 IMPIANTI TRADIZIONALI, COSTI E CONSUMI

Il Comune di Cesena ha da pochi anni istituito l'ufficio "Energie per la città", il quale si occupa della gestione di tutto ciò che riguarda il risparmio energetico, ottimizzazione energetica e il monitoraggio dei consumi di risorse. Lo studio possiede un software ove viene archiviata ogni informazione utile di ogni edificio comunale sia a livello di caratteristiche dell'edificio e dell'impianto di riscaldamento, sia le bollette di consumo di gas. Tramite un'opzione di questo software è stato possibile esportare un tabella entro la quale vengono elencate tutte queste caratteristiche per ogni singola utenza. In questo foglio elettronico troviamo: il nome e destinazione d'uso dell'edificio, l'ubicazione, il volume dell'edificio riscaldato in m³, i giorni di accensione dell'impianto di riscaldamento, le ore di accensione annue, il consumo

annuo in m³ di gas, e la spesa effettiva annua in €. Ai fini di calcolo abbiamo inserito il valore di Potenza Termica necessaria ottenuto dalla relazione sulla Legge 10 di ogni singolo edificio.

Di seguito viene riportata la tabella appena descritta:

EDIFICIO	INDIRIZZO	Volume Riscaldato [Mc]	Giorni di accensione	Consumo Gas Annuo [mc]	Spesa annua	kwh in 1 anno	Ore accensione annue (riscaldamento)	Potenza Termica [Kw]
ASILO NIDO IL PRATO	Viale Carducci 65	4630	191	15322	€ 10.953,00	137898	2350	59
SCUOLA MATERNA IPODROMO	Via Domenico Avogadro	5761	191	12573	€ 8.594,44	113157	2350	48
SCUOLA MATERNA MACERONE	Via Olof Palme 80	3618	191	36252	€ 22.695,00	326268	2350	139
ASILO NIDO MULINI	Via Rasi Spinelli 91	4360	191	11836	€ 8.467,00	106524	2350	45
SCUOLA MATERNA VIGNE II	Via N. Casali	4078	191	12284	€ 8.697,00	110556	2350	47
SCUOLA MATERNA E NIDO CASE FINALI	Via Paradiso n° 130	2817	191	8620	€ 6.152,00	77680	2350	33
SCUOLA MATERNA VIGNE I	Via Tommasini n° 2	2475	191	14095	€ 10.124,00	126855	2350	54
EX CENTRO DIURNO PER ANZIANI ORA SCUOLA MATERNA	Via S. Minato n° 30	1970	186	5590	€ 4.098,00	50310	2350	21
SCUOLA MATERNA S. MAURO IN VALLE	Via S. Minato 70	3423	191	18153	€ 12.938,00	163377	2350	70
SCUOLA MATERNA CALABRINA	Via Targhini 4045	2230	191	11022	€ 7.906,00	99198	2350	42
SCUOLA MATERNA CASE MISSIROLI	Via Ruffo n° 370	1429	191	10984	€ 6.765,00	98856	2350	42
SCUOLA MATERNA FIORITA	Via Lombardia n° 179	3402	191	16422	€ 11.700,00	147798	2350	63
SCUOLA MATERNA OLTRE SAVIO	Via Quarto dei Mille 175	3076	191	14248	€ 10.169,00	128232	2350	55
SCUOLA MATERNA OSSERVANZA	P.le Violante da Montefeltro 20	1506	191	4252	€ 3.214,00	38268	2350	16
SCUOLA MATERNA PIEVESISTINA	Via Diemano 4850	2521	191	14378	€ 10.206,00	129402	2350	55
SCUOLA MATERNA PONTE PIETRA	SS. Cesenatico 1667	2448	191	16744	€ 11.859,00	150696	2350	64
SCUOLA MATERNA PORTA FIUME (SAFFI)	Via Saffi 53	1493	191	6779	€ 4.866,00	61011	2350	26
SCUOLA MATERNA SAN LAZZARO	Via Emilia Levante 1320	783	191	4919	€ 3.594,00	44271	2350	19
SCUOLA MATERNA SAN VITTORE	Via S. Vittore n° 1374	994	191	5236	€ 3.830,00	447124	2350	20
SCUOLA MATERNA S. VITTORE AMPLIAMENTO	Via S. Vittore n° 1374	1209	191	3944	€ 2.909,00	35496	2350	15
SCUOLA MATERNA TORRE DEL MORO	Via Ventimiglia n° 98	2833	191	17460	€ 12.415,00	157140	2350	67
SCUOLA MATERNA RONTA	Via Ravennate 5366	2327	191	12165	€ 8.697,00	109485	2350	47
SCUOLA ELEMENTARE E MATERNA BORELLO	Piazza Indipendenza n° 30	4949	191	28384	€ 19.462,00	256456	2350	109
SCUOLA MATERNA CARDUCCI	Via Zara n° 2	9580	191	28213	€ 19.169,00	253977	2350	108
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE MARTORANO	Via Ravennate 2439	4850	191	8566	€ 6.092,00	77274	2350	33
SCUOLA MATERNA ELEMENTARE PONTE ABBADESSE	Via Sorrioli n° 135	13219	186	13135	€ 9.242,00	118215	2350	50
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE VILLA CHIAVICHE	Via Pisignano 185 \ Via Recoaro 97	7917	191	15852	€ 11.161,00	142668	2350	61
SCUOLA ELEMENTARE SAIANO	Via Provinciale Sorrioli n° 4980	1497	186	6778	€ 4.916,00	61002	1958	31
SCUOLA ELEMENTARE CALIUSE	Via Capranica 233	4492	186	15983	€ 11.401,00	143847	1958	73
SCUOLA ELEMENTARE CARDUCCI	Viale Carducci 43	8084	186	23126	€ 15.707,00	208134	1958	106
SCUOLA ELEMENTARE CASE FINALI	Via Fiorenzuola 120	5365	186	34393	€ 24.236,00	309537	1958	158
SCUOLA ELEMENTARE GATTOLINO	Via Medici n° 1136	4144	186	13730	€ 8.538,00	123570	1958	63
SCUOLA ELEMENTARE PONTE PIETRA	Via Cesenatico n° 1675	6274	186	35546	€ 24.976,00	319914	1958	163
SCUOLA ELEMENTARE RONTA	Via Ravennate n° 5366	3154	186	11692	€ 8.347,00	105228	1958	54
SCUOLA ELEMENTARE S.VITTORE	Via San Vittore n° 4410	3240	186	9797	€ 6.999,00	88173	1958	45
SCUOLA ELEMENTARE VIGNE	Via A. Zelli n° 35	14290	186	29398	€ 20.832,00	264582	1958	135
SCUOLA ELEMENTARE S. GIORGIO	Via San Giorgio n° 3042	3100	186	24859	€ 17.659,00	223731	1958	114
SCUOLA MATERNA, ELEMENTARE E MEDIA VILL'ARCO	Via Cataldo n° 355	15114	191	13947	€ 9.484,00	125523	2350	53
SCUOLA MATERNA E MEDIA CALIUSE	Via Capranica 283-303	6612	191	10277	€ 6.833,00	92493	2350	39
SCUOLA MEDIA ED ELEMENTARE SAFFI	Piazza S. Domenico 30/34	21150	186	24412	€ 15.759,00	219708	1958	112
SCUOLA MEDIA N° 2	Via G. Pascoli n° 256	9400	186	36819	€ 25.894,00	331371	1958	169
SCUOLA ELEMENTARE E MEDIA S. CARLO	Via Pozzuoli n° 194	8878	191	17479	€ 12.415,00	157311	1958	80
SCUOLA MEDIA BORELLO	Via Taormina n° 175	3215	186	12553	€ 9.010,00	112977	1958	58
SCUOLA ELEMENTARE PIEVESESTINA	Via Diemano n° 4758	7114	186	30050	€ 21.161,00	270450	1958	138

7.2 IMPIANTO GEOTERMICO, COSTI INSTALLAZIONE E CONSUMI

Alla luce dei calcoli effettuati nel capitolo 5, possiamo programmare un foglio di calcolo Excel in modo tale da ripeterli per ogni singolo edificio.

Utilizzando come dato iniziale la Potenza Termica dell'edificio, utilizzando sempre il $COP=3,8$, è possibile calcolare la potenza elettrica della pompa di calore nonché mediante le ore stimate di utilizzo di esse il consumo annuo di energia elettrica con la relativa spesa economica. Come già visto conoscendo la potenza totale e la potenza elettrica con una semplice sottrazione possiamo calcolare la potenza necessaria lato sonde, la quale tramite la resa termica del terreno ci permette di calcolare la lunghezza massima del campo sonde. Per il dimensionamento di quest'ultimo, si sono apportate alcune modifiche per rendere più veritiero il dimensionamento, infatti pur utilizzando il dimensionamento approssimato abbiamo ricalcolato la resa termica del terreno indirettamente dal calcolo esaustivo ASRHAE. Essa infatti la poniamo pari a 33 Wm. Detto ciò dalla seguente tabella è possibile vedere il dimensionamento della pompa di calore, il suo consumo annuo con relativa spesa, e il dimensionamento del campo sonde.

Questi dati si possono osservare nella seguente tabella:

EDIFICIO	Pt [kW]	Pr70% [kW]	COP	Pe [kW]	Kwh anno rasc.	Kwh anno raff.	Kwh anno tot	Spesa annua energia elettrica rasc. 0,15	Ore riscaldamento	Spesa annua energia elettrica raff.	ore raffrescamento	Spesa annua energia elettrica tot.	Pa-Pe [kW]	Resa termica Sonda [W/m]	Lunghezza tot [m]	Profondità sonde [m]	N° sonde
ASILO NIDO IL PRATO	59	41		11	8172	2043	10215	€ 1.225,79	2327	€ 308,45	756	€ 1.632,24	30		917		8
SCUOLA MATERNA IPRODROMO	48	34		9	6706	1676	8382	€ 1.065,87	2327	€ 251,47	756	€ 1.257,34	25		753		6
SCUOLA MATERNA MACERONE	139	97		26	19335	4834	24169	€ 2.900,24	2327	€ 725,06	756	€ 3.625,30	72		2170		18
ASILO NIDO MULINI	45	32		8	6313	1578	7891	€ 946,91	2327	€ 236,73	756	€ 1.183,63	23		708		6
SCUOLA MATERNA VIGNE II	47	33		9	6552	1638	8190	€ 982,75	2327	€ 245,69	756	€ 1.228,43	24		735		6
SCUOLA MATERNA E NIDO CASE FINALI	33	23		6	4587	1149	5747	€ 689,62	2327	€ 172,40	756	€ 862,02	17		516		4
SCUOLA MATERNA VIGNE I	54	38		10	7518	1879	9397	€ 1.127,63	2327	€ 281,91	756	€ 1.409,54	28		844		7
EX CENTRO DIURNO PER ANZIANI ORA SCUOLA MATERNA	21	15		4	3100	775	3875	€ 464,96	2327	€ 116,24	786	€ 581,20	11		335		3
SCUOLA MATERNA S. MAURO IN VALLE	70	49		13	9662	2420	12102	€ 1.452,28	2327	€ 363,07	756	€ 1.815,35	36		1087		9
SCUOLA MATERNA CALABRINA	42	30		8	5879	1470	7348	€ 881,78	2327	€ 220,45	756	€ 1.102,23	22		660		6
SCUOLA MATERNA CASE MISSIROLI	42	29		8	5858	1465	7323	€ 878,74	2327	€ 219,69	756	€ 1.098,43	22		657		6
SCUOLA MATERNA FIORITA	63	44		12	8759	2190	10948	€ 1.313,80	2327	€ 328,45	756	€ 1.642,25	32		983		8
SCUOLA MATERNA OLTRE SAVIO	55	38		10	7599	1900	9499	€ 1.139,87	2327	€ 284,97	756	€ 1.424,84	28		853		7
SCUOLA MATERNA OSSERVANZA	16	11		3	2268	567	2835	€ 340,17	2327	€ 85,04	756	€ 425,21	8		255		2
SCUOLA MATERNA PIESERVIZINA	55	39		10	7668	1917	9586	€ 1.150,27	2327	€ 287,57	756	€ 1.437,84	28		861		7
SCUOLA MATERNA PONTE PIETRA	64	45		12	8930	2233	11163	€ 1.339,56	2327	€ 334,89	756	€ 1.674,45	33		1002		8
SCUOLA MATERNA PORTA FIUME (SAFFI)	26	18		5	3616	904	4519	€ 542,34	2327	€ 135,58	756	€ 677,92	13		406		3
SCUOLA MATERNA SAN LAZZARO	19	13		3	2624	666	3291	€ 393,53	2327	€ 98,38	756	€ 491,91	10		294		2
SCUOLA MATERNA SAN VITTORE	20	14		4	2793	698	3491	€ 418,89	2327	€ 104,72	756	€ 523,61	10		313		3
SCUOLA MATERNA S.VITTORE AMPLIAMENTO	15	11		3	2104	536	2628	€ 315,53	2327	€ 78,68	756	€ 394,41	8		236		2
SCUOLA MATERNA TORRE DEL MORO	67	47		12	9312	2328	11640	€ 1.396,84	2327	€ 349,21	756	€ 1.746,05	34		1045		9
SCUOLA MATERNA RONTA	47	33		9	6488	1622	8110	€ 973,23	2327	€ 243,31	756	€ 1.216,53	24		728		6
SCUOLA MATERNA BORELLO	109	76		20	15139	3785	18923	€ 2.270,78	2327	€ 567,70	756	€ 2.838,48	56		1699		14
SCUOLA MATERNA CARDUCCI	108	76		20	15047	3762	18809	€ 2.257,10	2327	€ 564,28	756	€ 2.821,38	56		1689		14
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE MARTORANO	33	23		6	4579	1145	5724	€ 686,90	2327	€ 171,72	756	€ 858,62	17		514		4
SCUOLA MATERNA ELEMENTARE PONTE ABBADISSE	50	35		9	7284	1821	9104	€ 1.092,53	2327	€ 273,13	786	€ 1.365,66	26		786		7
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE VILLA CHIAVICHE	61	42		11	8455	2114	10568	€ 1.268,20	2327	€ 317,05	756	€ 1.585,24	31		949		8
SCUOLA ELEMENTARE SAIANO	31	22		6	4510	1128	5638	€ 676,53	1939	€ 169,13	786	€ 845,66	16		487		4
SCUOLA ELEMENTARE CALISESE	73	51		14	10635	2659	13294	€ 1.595,30	1939	€ 398,63	786	€ 1.994,13	38		1148		10
SCUOLA ELEMENTARE CARDUCCI	106	74		20	15388	3847	19235	€ 2.306,26	1939	€ 577,06	786	€ 2.885,32	55		1661		14
SCUOLA ELEMENTARE CASE FINALI	158	111		29	22886	5721	28607	€ 3.432,85	1939	€ 858,21	786	€ 4.291,06	82		2470		21
SCUOLA ELEMENTARE GATTOLINO	63	44		12	9136	2284	11420	€ 1.370,42	1939	€ 342,61	786	€ 1.713,03	33		986		8
SCUOLA ELEMENTARE PONTE PIETRA	163	114		30	23653	5913	29566	€ 3.547,93	1939	€ 886,98	786	€ 4.434,91	84		2553		22
SCUOLA ELEMENTARE RONTA	54	38		10	7780	1945	9725	€ 1.167,01	1939	€ 291,75	786	€ 1.458,76	28		840		7
SCUOLA ELEMENTARE S.VITTORE	45	32		8	6519	1630	8149	€ 977,86	1939	€ 244,47	786	€ 1.222,33	23		704		6
SCUOLA ELEMENTARE VIGNE	135	95		25	19562	4890	24452	€ 2.934,28	1939	€ 733,57	786	€ 3.667,85	70		2112		18
SCUOLA ELEMENTARE S. GIORGIO	114	80		21	16542	4135	20677	€ 2.481,23	1939	€ 620,31	786	€ 3.101,54	59		1786		15
SCUOLA MATERNA ELEMENTARE E MEDIA VILL'ARCO	53	37		10	7439	1860	9298	€ 1.115,79	2327	€ 278,95	756	€ 1.394,74	28		835		7
SCUOLA MATERNA E MEDIA CALISESE	39	28		7	5481	1370	6852	€ 822,16	2327	€ 205,65	756	€ 1.027,73	20		615		5
SCUOLA MEDIA ED ELEMENTARE SANFI	112	79		21	16244	4061	20305	€ 2.436,62	1939	€ 609,15	786	€ 3.045,77	58		1754		15
SCUOLA MEDIA N° 2	169	118		31	24500	6125	30625	€ 3.674,99	1939	€ 918,75	786	€ 4.593,74	87		2645		22
SCUOLA ELEMENTARE E MEDIA S. CARLO	80	56		15	11187	2797	13984	€ 1.678,03	1939	€ 419,51	756	€ 2.097,54	41		1256		11
SCUOLA MEDIA BORELLO	58	40		11	8353	2088	10441	€ 1.252,94	1939	€ 313,24	786	€ 1.566,18	30		902		8
SCUOLA ELEMENTARE PIEVESESTINA	138	97		25	19996	4999	24995	€ 2.999,36	1939	€ 749,84	786	€ 3.749,20	71		2159		18

7.3 BILANCIO ECONOMICO DELL'INTERVENTO

Utilizzando i dati sui costi dell'impianto elaborati tramite un'indagine tra le aziende installatrici, (ricordando che questo valore è scaglionato in funzione della potenza dell'impianto), è stato possibile calcolare il costo di ogni singolo impianto geotermico, al quale sommando il costo per la sostituzione dei radiatori con i ventilconvettori si ottiene il costo totale dell'intervento. Ricordando la spesa annua per l'energia elettrica necessaria alla pompa di calore, il costo totale dell'impianto, il risparmio annuo (differenza tra spesa attuale per il gas metano e quello futuro per l'energia elettrica) è stato possibile calcolare il risparmio annuo in percentuale e gli anni di ammortamento.

Di seguito in tabella i dati:

EDIFICIO	Spesa energia elettrica	Costo impianto	Costo installazione Venitlconvettori	Costo TOTALE	Risparmio Annuo	N°Anni ammortamento	Risparmio Annuo [%]
ASILO NIDO IL PRATO	€ 1.532,24	€ 98.582,40	€ 6.984,69	€ 105.567,09	€ 9.420,76	11	86%
SCUOLA MATERNA IPPODROMO	€ 1.257,34	€ 80.895,22	€ 8.690,88	€ 89.586,10	€ 7.337,10	12	85%
SCUOLA MATERNA MACERONE	€ 3.625,30	€ 194.372,43	€ 5.458,01	€ 199.830,44	€ 19.069,70	10	84%
ASILO NIDO MULINI	€ 1.183,63	€ 76.153,33	€ 6.577,37	€ 82.730,70	€ 7.283,37	11	86%
SCUOLA MATERNA VIGNE II	€ 1.228,43	€ 79.035,78	€ 6.151,95	€ 85.187,73	€ 7.468,57	11	86%
SCUOLA MATERNA E NIDO CASE FINALI	€ 862,02	€ 55.461,45	€ 4.249,65	€ 59.711,09	€ 5.289,98	11	86%
SCUOLA MATERNA VIGNE I	€ 1.409,54	€ 90.687,83	€ 3.733,71	€ 94.421,54	€ 8.714,46	11	86%
EX CENTRO DIURNO PER ANZIANI ORA SCUOLA MATERNA	€ 581,20	€ 35.966,30	€ 2.971,89	€ 38.938,18	€ 3.516,80	11	86%
SCUOLA MATERNA S. MAURO IN VALLE	€ 1.815,35	€ 116.797,17	€ 5.163,84	€ 121.961,01	€ 11.122,65	11	86%
SCUOLA MATERNA CALABRINA	€ 1.102,23	€ 70.916,02	€ 3.364,11	€ 74.280,13	€ 6.803,77	11	86%
SCUOLA MATERNA CASE MISSIROLI	€ 1.098,43	€ 70.671,52	€ 2.155,75	€ 72.827,27	€ 5.666,57	13	84%
SCUOLA MATERNA FIORITA	€ 1.642,25	€ 105.659,85	€ 5.132,16	€ 110.792,01	€ 10.057,75	11	86%
SCUOLA MATERNA OLTRE SAVIO	€ 1.424,84	€ 91.672,24	€ 4.640,37	€ 96.312,60	€ 8.744,16	11	86%
SCUOLA MATERNA OSSERVANZA	€ 425,21	€ 41.036,32	€ 2.271,91	€ 43.308,23	€ 2.788,79	16	87%
SCUOLA MATERNA PIEVESISTINA	€ 1.437,84	€ 92.508,66	€ 3.803,11	€ 96.311,77	€ 8.768,16	11	86%
SCUOLA MATERNA PONTE PIETRA	€ 1.674,45	€ 107.731,61	€ 3.692,98	€ 111.424,59	€ 10.284,55	11	86%
SCUOLA MATERNA PORTA FIUME (SAFFI)	€ 677,92	€ 65.424,56	€ 2.252,30	€ 67.676,86	€ 4.208,08	16	86%
SCUOLA MATERNA SAN LAZZARO	€ 491,91	€ 47.473,58	€ 1.181,21	€ 48.654,79	€ 3.102,09	16	86%
SCUOLA MATERNA SAN VITTORE	€ 523,61	€ 50.532,97	€ 1.499,52	€ 52.032,49	€ 3.306,39	16	86%
SCUOLA MATERNA S. VITTORE AMPLIAMENTO	€ 394,41	€ 38.063,80	€ 1.823,86	€ 39.887,66	€ 2.514,59	16	86%
SCUOLA MATERNA TORRE DEL MORO	€ 1.746,05	€ 112.338,38	€ 4.273,78	€ 116.612,17	€ 10.668,95	11	86%
SCUOLA MATERNA RONTA	€ 1.216,53	€ 78.270,13	€ 3.510,45	€ 81.780,57	€ 7.480,47	11	86%
SCUOLA ELEMENTARE E MATERNA BORELLO	€ 2.838,48	€ 152.186,55	€ 7.465,92	€ 159.652,47	€ 16.623,52	10	85%
SCUOLA MATERNA CARDUCCI	€ 2.821,38	€ 151.269,70	€ 14.452,11	€ 165.721,82	€ 16.347,62	10	85%
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE MARTORANO	€ 858,62	€ 55.242,69	€ 7.316,57	€ 62.559,26	€ 5.233,38	12	86%
SCUOLA MATERNA ELEMENTARE PONTE ABBADESSE	€ 1.365,66	€ 84.511,15	€ 19.941,81	€ 104.452,95	€ 7.876,34	13	85%
SCUOLA MATERNA ED ELEMENTARE VILLA CHIAVICHE	€ 1.585,24	€ 101.992,44	€ 11.943,36	€ 113.935,80	€ 9.575,76	12	86%
SCUOLA ELEMENTARE SAIANO	€ 845,66	€ 52.331,93	€ 2.258,33	€ 54.590,26	€ 4.072,34	13	83%
SCUOLA ELEMENTARE CALISESE	€ 1.994,13	€ 102.835,30	€ 6.776,50	€ 109.611,80	€ 9.406,87	12	83%
SCUOLA ELEMENTARE CARDUCCI	€ 2.885,32	€ 148.793,67	€ 12.195,29	€ 160.988,96	€ 12.821,68	13	82%
SCUOLA ELEMENTARE CASE FINALI	€ 4.291,06	€ 199.157,42	€ 8.093,49	€ 207.250,91	€ 19.944,94	10	82%
SCUOLA ELEMENTARE GATTOLINO	€ 1.713,03	€ 106.007,29	€ 6.251,52	€ 112.258,81	€ 6.824,97	16	80%
SCUOLA ELEMENTARE PONTE PIETRA	€ 4.434,91	€ 205.834,03	€ 9.464,78	€ 215.298,81	€ 20.541,09	10	82%
SCUOLA ELEMENTARE RONTA	€ 1.458,76	€ 90.272,19	€ 4.758,03	€ 95.030,22	€ 6.888,24	14	83%
SCUOLA ELEMENTARE S. VITTORE	€ 1.222,33	€ 75.641,18	€ 4.887,77	€ 80.528,95	€ 5.776,67	14	83%
SCUOLA ELEMENTARE VIGNE	€ 3.667,85	€ 189.147,98	€ 21.557,49	€ 210.705,47	€ 17.164,15	12	82%
SCUOLA ELEMENTARE S. GIORGIO	€ 3.101,54	€ 159.943,86	€ 4.676,57	€ 164.620,44	€ 14.557,46	11	82%
SCUOLA MATERNA, ELEMENTARE E MEDIA VILL'ARCO	€ 1.394,74	€ 89.735,59	€ 22.800,55	€ 112.536,14	€ 8.089,26	14	85%
SCUOLA MATERNA E MEDIA CALISESE	€ 1.027,73	€ 66.122,66	€ 9.974,67	€ 76.097,33	€ 5.805,27	13	85%
SCUOLA MEDIA ED ELEMENTARE SAFFI	€ 3.045,77	€ 157.067,85	€ 31.906,29	€ 188.974,13	€ 12.713,23	15	81%
SCUOLA MEDIA N° 2	€ 4.593,74	€ 213.205,51	€ 14.180,57	€ 227.386,08	€ 21.300,26	11	82%
SCUOLA ELEMENTARE E MEDIA S. CARLO	€ 2.097,54	€ 112.460,63	€ 13.393,10	€ 125.853,73	€ 10.317,46	12	83%
SCUOLA MEDIA BORELLO	€ 1.566,18	€ 96.919,84	€ 4.850,06	€ 101.769,90	€ 7.443,82	14	83%
SCUOLA ELEMENTARE PIEVESISTINA	€ 3.749,20	€ 193.342,98	€ 10.731,98	€ 204.074,96	€ 17.411,80	12	82%
TOT	€ 79.909,62	€ 4.604.273,98	€ 339.460,25	€ 4.943.734,24	€ 420.353,82	12	85%

Analizzando questa tabella otteniamo un importo relativo al costo totale dell'intervento sulla conversione ad energia geotermica per il riscaldamento e raffrescamento delle scuole del Comune di Cesena pari a circa 4'943'700 €

A fronte di questo investimento otteniamo i seguenti benefici:

- Spesa annua complessiva pari a di 79'909 €, costituita da 63,9 mila€ per il riscaldamento invernale e 15,9 mila€ per il raffrescamento estivo
- Risparmio annuo complessivo di 420 mila € pari al 84%
- Riduzione delle emissioni di CO₂ di circa 1300 Tonnellate (- 95%)
- Miglioramento della qualità dell'aria all'esterno degli edifici
- Maggior velocità nel raggiungere le temperature fissate, riducendo quindi i tempi di preaccensione dell'impianto
- Minor gradiente termico all'interno dei vani
- Miglior capacità di regolazione della temperatura in ogni singolo vano
- Miglioramento del benessere termico estivo grazie all'introduzione della capacità refrigerante all'impianto
- Minori costi di manutenzione
- Possibilità di prevedere un impianto fotovoltaico per provvedere al fabbisogno energetico della pompa di calore con relativo abbattimento dei costi di gestione

Considerando il costo totale, e sapendo che il comune dovrà indire una gara di appalto per la realizzazione di questo progetto, si ipotizza un costo totale effettivo inferiore, il quale influenzerà positivamente i tempi di ammortamento di ogni singolo impianto. Inoltre la CEE stanZIA finanziamenti per i comuni con progetti atti al contenimento delle emissioni inquinanti, il quale azzererebbe gli anni di ammortamento.

CONCLUSIONI

Con quanto descritto ed esaminato in questa tesi, si è considerato l'impiego di energia geotermica per il condizionamento di edifici pubblici (scuole e asili) nel Comune di Cesena, valutandone l'aspetto tecnico-economico e ambientale. La geotermia è una fonte pulita e rinnovabile, facilmente sfruttabile.

Studi multidisciplinari hanno permesso di definire le tecniche di sfruttamento del sottosuolo, il dimensionato di un impianto-tipo di medio-alta Potenza Termica valutandone l'efficienza.

La stessa metodologia di analisi economica, tralasciando le variabili ambientali (geologia del sottosuolo), ha permesso di stimare la potenzialità di risparmio estesa a tutte le 44 scuole del Comune di Cesena.

Il fabbisogno energetico di ogni singola unità sarebbe soddisfatto da impianti con capacità stimata di 33W/m, portando a necessità di impianto variabili tra 2 e 22 sonde geotermiche di lunghezza di 130m.

L'investimento di 4,9mil€ sarebbe ammortizzato tra i 10 e i 16 anni in base all'edificio scolastico (caratteristiche costruttive). Il risparmio di esercizio rispetto alla spesa corrente energetica a carico del comune sarebbe di circa l'80%. Non ultimo si contribuirebbe ad una importante riduzione di emissioni di CO₂. Nel futuro si dovrà cercare di progettare edifici scolastici sempre più efficienti a livello energetico, limitando in tal modo il fabbisogno termico dell'edificio. Questa tipologia d'impianto, coadiuvato ad un impianto fotovoltaico, produrrebbe risparmi notevolissimi, in quanto il fabbisogno elettrico del primo sarebbe completamente coperto dal secondo. D'altra parte si è notata una carenza dal punto di vista normativo per quanto riguarda la concessione delle autorizzazioni, perciò si rende necessario da parte degli Enti coinvolti la predisposizione di linea guida per lo sfruttamento consapevole dell'energia geotermica.

BIBLIOGRAFIA

SAVIO B. MINCHIO F. (2008) *Geotermia e pompe di calore*, Vago di Lavagno (VR), geotermia.org

TREVI S.P.A. (2011) *Impianti geotermici con sonde verticali, Guida alla progettazione.*

Miniguia AICAR (2009)

http://it.wikipedia.org/wiki/Energie_rinnovabili

<http://www.istitutocalvino.it/studenti/siti/terra/minacce/risorse/gas.html>

<http://lezionitecnologia.jimdo.com/energia/energia-da-fonti-rinnovabili/geotermica/>

<http://eilantha.splinder.com/post/9463712/linee-e-zone-geotermiche>

http://www.geotermiamarche.it/geotermia_classificazione.php

<http://www.geothermal-energy.org/files-34.html>

http://www.agt.altervista.org/Energia_Geotermica.pdf

<http://www.slideshare.net/Calbeira/normativa-sulla-geotermia>

<http://www.energoclub.it/doceboCms/page/72/Potenziale.html>

<http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/geotermia.htm>

<http://www.provincia.fc.it/ambiente/protezione.civile>

<http://www.provincia.fc.it/pianificazione/vas/>

<http://www.regione.emiliaromagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia>

<http://www.autorita.energia.it/it/d2d3.htm>

http://www.eni.com/it_IT/azienda/cultura-energia/fattori-conversione-energia/fattori-conversione-energia.shtml

<http://www.enel.it/it->

[IT/reti/enel_distribuzione/venditori_tariffe/usi_diversi/mta1.aspx](http://www.enel.it/it-IT/reti/enel_distribuzione/venditori_tariffe/usi_diversi/mta1.aspx)

<http://www.geosaving.it/>

<http://www.altraenergia.com/geotermico4.asp>

<http://www.geotermiaitalia.it/it/geotermia.html>

<http://www.delfo.forli-cesena.it/dd7cesena/7circolovigne/pievesestina/index.htm>

http://www.caldaie-climatizzatori.com/dettagli_prodotto.php?fb=fb&id=565

http://europa.eu/index_it.htm

Materiale tecnico:

TREVI S.P.A. (2011) *Impianti geotermici con sonde verticali, Guida alla progettazione.*



Miniguia AICAR (2009)

Ufficio comunale, Energie per la Città



RINGRAZIAMENTI

Ringrazio innanzitutto il prof. Gianluca Marcato il quale si è reso molto disponibile nel risolvere ogni mio dubbio e perplessità, dedicando ogni qual volta ci sia stato bisogno il suo tempo. Ringrazio per un preziosissimo aiuto tecnico la società TREVI s.r.l. in particolare l'ing. Simone Laprovitera, il Comune di Cesena in particolare la dott.ssa Manuela Graffieti, l'ufficio tecnico Energie per la Città in particolare Silvia Morigi, e per collaborazioni puntuali ma di rilievo il geol. Alberto Fiumana, il geom. Marco Calà e l'arch. Umberto Pinoni. Ringrazio mio padre Alessandro per avermi fatto appassionare all'argomento trattato, e ringrazio per il preziosissimo aiuto Giovanni Minghelli.

Un doverosissimo ringraziamento va alla mia famiglia, Alessandro, Monica e Francesca, che in questi anni mi hanno sempre sostenuto e incoraggiato a dare sempre il meglio, e ringrazio i miei nonni che hanno sempre creduto in me.

Ringrazio Antonella la quale mi è stata sempre vicino anche nei momenti più difficili, e con la quale ho condiviso quelli più belli.

Ringrazio i miei amici grazie ai quali ho collaborato alla realizzazione di diversi progetti nel mio percorso di studi, con i quali ho sempre trascorso momenti di gioia, e trovato l'occasione di alleggerire le tensioni dovute al carico di studio. In particolare : Carlo Alberto, Enrico, Giacomo B, Glauco, Gessica, Elena, Giacomo R, e Andrea.