

Geotermia: ruolo del geologo e metodi per la caratterizzazione termica dei terreni

Gabriele Cesari¹, Micaela Pastore², Tiziano Righini¹, Roberto Larghetti³

¹ Geologo, libero professionista

² Ingegnere, libero professionista

³ Ingegnere, PhD Università Urbino

1. PREMESSA

La sensibilità ai temi ambientali, le sfide energetiche e le esigenze derivanti dai cambiamenti climatici in atto sono diventati temi centrali nel dibattito e nello sviluppo economico di tutti i paesi. In questi ultimi anni il settore delle fonti energetiche rinnovabili sta rapidamente crescendo, in particolare per quanto riguarda la produzione di energia elettrica (da fotovoltaico, eolico, biomassa, ma anche idroelettrico e geotermoelettrico). Eppure, non meno rilevante è il peso dell'energia termica (che a livello europeo costituisce circa il 50% del fabbisogno energetico) e – di conseguenza – il contributo che possono dare le fonti energetiche termiche (assieme all'efficientamento energetico degli edifici) in termini di riduzione di emissioni e di utilizzo di fonti fossili non rinnovabili.

Nel campo della produzione di energia termica rinnovabile un ruolo importante è rappresentato dagli impianti di geotermia a bassa entalpia, realizzati mediante pompe di calore geotermiche abbinata a scambiatori di calore inseriti nel terreno (sonde geotermiche verticali). Questo sistema di climatizzazione è stato introdotto in Italia solo nell'ultimo decennio, ma è una tecnologia diffusa ed affermata già da alcuni decenni in paesi avanzati del Nord Europa e dell'America ed è stata riconosciuta dall'EPA (Ente di Protezione Americana) *"Il sistema di riscaldamento e raffreddamento più efficiente dal punto di vista energetico e più compatibile dal punto di vista ambientale"*. [Report EPA-DOE-430-R-93-004].

Questo articolo è il frutto di esperienze professionali ed attività di ricerca svolte dagli autori nell'ambito della progettazione e realizzazione di campi di sonde geotermiche a servizio di impianti di climatizzazione con pompa di calore (impianti a circuito chiuso o "closedloop"). La multidisciplinarietà degli autori rispecchia la complessità della materia in esame - la geotermia a bassa entalpia - che certamente richiede differenti competenze professionali che devono interagire come in ogni sistema complesso. L'articolo vuole indicare in particolare il ruolo centrale che la geologia ha in questo campo, certa-

mente per la determinazione del modello geologico ed idrogeologico in cui si inserisce l'opera in progetto, ma anche per la definizione delle caratteristiche termiche dei terreni attraverso adeguate metodologie di indagini (alcune delle quali ancora in fase di definizione) e per il supporto alla progettazione del cosiddetto "scambiatore geotermico" ossia della sonda (o del gruppo di sonde) che garantisce lo scambio di calore con il terreno.

Non meno importante è il ruolo del geologo per la determinazione dei rischi geologici ed ambientali connessi alla realizzazione dei campi sonde - anche se questo aspetto non è trattato diffusamente nel presente articolo e meriterebbe un approfondimento specifico.

Infine, è bene ricordare che la realizzazione di sonde verticali (generalmente profonde tra 80 e 150 metri) consente di fornire notevoli informazioni sulla composizione del sottosuolo che possono risultare utili anche ai fini della determinazione di contesti geologici favorevoli alla presenza di *reservoir* geotermici di media e alta entalpia.

2. BREVE STORIA DELLA GEOTERMIA

La geotermia è la scienza che studia l'esistenza ed il possibile utilizzo della risorsa energetica costituita dal calore presente nel sottosuolo. La geotermia classica nasce in Italia, nella zona del Monte Amiata in Toscana, quando nel 1904 il Conte de Larderel sperimenta l'utilizzo dell'energia contenuta nei vapori caldi risalenti dal sottosuolo e - convertendo l'energia geotermica in energia meccanica prima ed elettrica poi - riesce ad accendere una lampadina [BIANCHI MC.2005]. È l'intuizione iniziale di un settore che porterà quasi 60 anni dopo all'avvio di una vera e propria industria di produzione di energia elettrica in particolare a Larderello (insediamento il cui nome deriva appunto dal Conte de Larderel) ed in altre aree della regione, dove viene prodotto circa il 25% del fabbisogno di energia elettrica di tutta la Toscana. Questa risorsa geotermica ad alta entalpia è legata al contesto geologico-strutturale di tutto il versante tirre-

nico che - per effetto di movimenti tettonici - è stato interessato in passato da intense attività vulcaniche e che attualmente è caratterizzato da rilevanti anomalie geotermiche positive. Successivamente, negli anni 80 a Ferrara si fa strada l'idea di utilizzare una risorsa meno pregiata - oggi classificabile come media entalpia - rinvenuta all'interno di alcune perforazioni eseguite da AGIP negli anni '60 a scopo di ricerca idrocarburi e abbandonate per esito negativo (Domenico D' Olimpo 2010) . L'acqua proveniente dai pozzi di 1.500 m. di profondità possedeva una temperatura di circa 100 gradi centigradi. Fu pertanto proposta l'idea di utilizzare tale acqua per il teleriscaldamento della città. Negli anni '90 fu realizzato dall'azienda municipalizzata il sistema geotermico che alimenta la rete di teleriscaldamento della parte Ovest della città, completato con un pozzo di reimmissione in falda per rendere più sostenibile lo sfruttamento del *reservoir*. Attualmente il sistema è gestito dal Gruppo Hera Spa che sta valutando il raddoppio di tale impianto geotermico anche nella parte Est della città, in considerazione del fatto che lo stesso contesto geologico favorevole (determinato dal sistema delle pieghe della dorsale ferrarese) si trova anche in tale area. Lo sviluppo della risorsa geotermica in Italia, dopo l'intensa fase iniziale degli anni 70-80 si è notevolmente rallentato anche a causa della minore importanza data ai temi energetici negli ultimi decenni del secolo scorso, oltre che per una situazione di monopolio della risorsa (da parte della società statale di gestione dell'Energia Elettrica) che ne ha ostacolato la diffusione nei fatti: per anni ci si limitava a ricercare le stesse caratteristiche ottimali della risorsa idrogeotermale del Monte Amiata. Nel frattempo in molti paesi del Nord America e del Nord Europa si è affermata una nuova tecnologia per l'utilizzo del calore del sottosuolo per il riscaldamento delle abitazio-

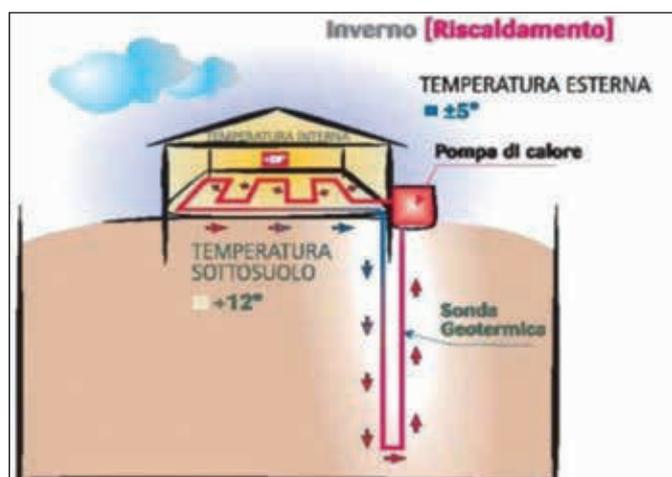


Figura 1 - Schema di impianto geotermico

ni. Si tratta della cosiddetta geotermia a bassa entalpia, impianti geotermici abbinati a pompe di calore in grado di trasferire calore da un corpo freddo (il terreno o la falda) ad un ambiente più caldo (l'edificio). A differenza delle tecnologie precedentemente sviluppate nel nostro paese questa applicazione è praticamente realizzabile in ogni contesto geologico ed ha un campo di utilizzo molto vasto (dalla piccola abitazione al complesso commerciale/industriale), specie in abbinamento ai moderni impianti di distribuzione del calore a bassa temperatura (pannelli radianti in particolare).

3. GLI IMPIANTI GEOTERMICI CON POMPA DI CALORE

Il funzionamento di un impianto geotermico per la climatizzazione degli edifici è caratterizzato dallo scambio di calore che avviene tra l'edificio (mediante l'impianto di distribuzione) ed il terreno (mediante il campo sonde geotermiche). Ciò che permette il trasferimento di calore da un corpo freddo ad un ambiente più caldo (come ad esempio l'edificio, in fase invernale) è il ciclo frigorifero della pompa di calore che costituisce il motore dell'impianto geotermico (Figura 1).

E' facilmente intuibile come il primo elemento da conoscere per il dimensionamento e la progettazione di un impianto di questo tipo è il fabbisogno energetico dell'edificio nelle sue differenti condizioni di funzionamento (riscaldamento invernale, raffrescamento estivo e produzione di acqua calda sanitaria). Il fabbisogno energetico è chiaramente funzione delle caratteristiche costruttive dell'edificio, principalmente del suo involucro, degli infissi e delle coperture.

Poiché negli impianti alimentati da pompe di calore i consumi (elettrici nel caso di pompe di calore elettriche, di gas con pompe di calore ad assorbimento) sono proporzionali alla potenza termica della pompa di calore è opportuno che tale potenza sia adeguatamente calibrata per coprire i picchi di potenza senza ricorrere ad inefficienti sovradimensionamenti. Inoltre, l'efficienza delle pompe di calore (misurata mediante il cosiddetto "COP" - coefficiente di prestazione - che è pari al rapporto tra potenza termica erogata dalla pompa di calore e potenza elettrica assorbita dal compressore) è tanto maggiore quanto minore è la temperatura di esercizio dell'impianto di distribuzione interna. Per i motivi sopra esposti gli impianti geotermici si abbinano molto bene con edifici di classe energetica pregiata (A/B) e con impianti di distribuzione a bassa temperatura (pannelli radianti o ventilconvettori).

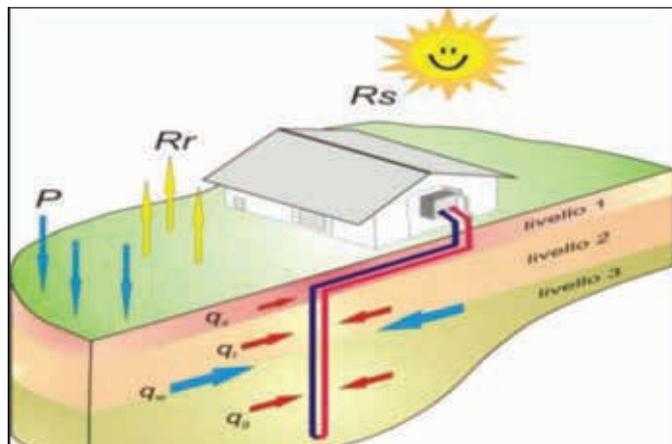


Figura 2 - Scambio di calore nel terreno

4. LO SCAMBIO DI CALORE NEL SOTTOSUOLO ED IL MODELLO GEOLOGICO

Dal punto di vista del comportamento termico è possibile suddividere il sottosuolo in almeno tre livelli (Figura 2):

- **Zona superficiale** – comprende il suolo e il primo sottosuolo, con uno spessore di circa 1-2 metri alle nostre latitudini. Questa è una zona molto sensibile alle variazioni stagionali e giornaliere della temperatura atmosferica. Il flusso di calore verso il sottosuolo (q_s) sarà dato dalla somma della porzione di radiazione solare che riesce a penetrare nel terreno e dal trasporto operato nel sottosuolo dalle precipitazioni (P);
- **Zona poco profonda** – varia da 1-2 metri fino a 15-20 metri di profondità in funzione delle caratteristiche geologiche, legate alla litologia delle rocce presenti e all'assetto idrogeologico dell'area. In questa zona la temperatura risente ancora delle variazioni stagionali (a volte anche con uno sfasamento significativo), sebbene si assesti maggiormente attorno alla temperatura media atmosferica annuale.
- **Zona profonda** – oltre 15-20 m di profondità, in funzione delle caratteristiche geologiche dell'area. In questa zona la temperatura è praticamente costante tutto l'anno ed inizialmente pari alla temperatura media atmosferica, con variazioni in profondità in funzione del gradiente geotermico presente (che solitamente inizia a mostrare i suoi effetti a partire da 100-150 metri di profondità). Questo **livello** viene definito **omotermico**. Il calore ricevuto da questo strato è legato alle proprietà termiche delle rocce e dal gradiente geotermico locale. Tralasciando il fattore irraggiamento (che agisce positivamente nella zona superficiale, in cui generalmente sono collocati i tratti di collegamenti orizzontali), la propagazione del calore nel sottosuolo avviene secondo due modalità principali: per **conduzione** (tipo di scam-

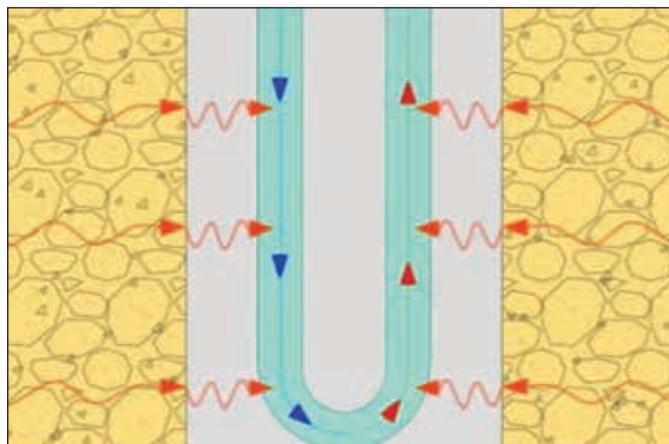


Figura 3 - Scambio di calore per conduzione

bio termico che avviene in un mezzo solido, quando è presente un gradiente termico tra le superfici del corpo stesso. Si genera così un flusso di calore tra le superfici a temperatura maggiore verso quelle a temperatura inferiore come ben visibile in Figura 3); per **avvezione** (che incrementa lo scambio termico a causa del flusso convettivo dell'acqua che fluisce nel sottosuolo). L'approccio metodologico della Norma di progettazione UNI 11467:2011 parte dalla semplificazione rispetto al valore di conducibilità del terreno, assunto uniforme per tutta la massa interessata allo scambio termico con il fluido circolante nelle sonde. Per determinare tale valore di conducibilità si fa riferimento ad intervalli di valori che si presume derivino da indagini e test svolti sui vari tipi di terreno e che sono riassunti sotto forma di tabella (cfr. Tabella 1).

Peraltro, la norma non riporta alcuna considerazione in merito alla scelta del litotipo di riferimento da cui ricavare il valore di conducibilità da utilizzare nei calcoli. In pratica, non è specificato se occorre prendere come riferimento il litotipo prevalente in termini di spessore (con riferimento alla profondità presunta delle sonde di progetto) o – precauzionalmente – il litotipo che presenta i valori di conducibilità più bassi tra tutti quelli attraversati dalla perforazione.

Infine, le tabelle trascurano completamente il fattore di scambio termico dato dalla avvezione (ovvero il contributo del flusso di falda), limitandosi a differenziare il valore di conducibilità dei terreni permeabili nel caso di terreni saturi o terreni "secchi". Recenti studi [N Diao et al.2004] dimostrano infatti come flussi di falda con velocità superiori a 10⁻⁶ m/sec influenzano profondamente il campo di temperature attorno alla sonda stessa assicurando eccellenti prestazioni del sistema (terreno-sonda-pompa di calore) a lungo termine. Le proprietà termiche del terreno possono essere misurate in situ attraverso

Rocce	Conducibilità W/(mK)			Capacità termica MJ/(m ³ K)		
	min	med	max	min	med	max
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3	2,45	2,6
Diorite	2	2,6	2,9	2,9	2,9	2,9
Gabbro	1,7	1,9	2,9	2,6	2,6	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1	2,55	3
Pendotite	3,8	4	5,3	2,7	2,7	2,7
Rolite	3,1	3,3	3,4	2,1	2,1	2,1
Gneiss	1,9	2,9	4	1,8	2,1	2,4
Marmo	1,3	2,1	3,1	2	2	2
Metaquarzte	5,8	5,8	5,8	2,1	2,1	2,1
Micasisti	1,5	2	3,1	2,2	2,2	2,2
Sisti argillosi	1,5	2,1	2,1	2,2	2,35	2,5
Calcere	2,5	2,8	4	2,1	2,25	2,4
Marna	1,5	2,1	3,5	2,2	2,25	2,3
Quarzte	3,6	6	6,6	2,1	2,15	2,2
Salgemma	5,3	5,4	6,4	1,2	1,2	1,2
Arenare	1,3	2,3	5,1	1,6	2,2	2,8
Rocce argilose	1,1	2,2	3,5	2,1	2,25	2,4
Ghiaia secca	0,4	0,4	0,5	1,4	1,5	1,6
Ghiaia satura	1,8	1,8	1,8	2,4	2,4	2,4
Morena	1	2	2,5	1,5	2	2,5
Sabbia secca	0,3	0,4	0,8	1,3	1,45	1,6
Sabbia satura	1,7	2,4	5	2,2	2,55	2,9
Argilla/limo secca	0,4	0,5	1	1,5	1,55	1,6
Argilla/limo satura	0,9	1,7	2,3	1,6	2,5	3,4
Torba	0,2	0,4	0,7	0,5	2,15	3,8
Bentonite	0,5	0,6	0,8	3,9	3,9	3,9
Cemento	0,9	1,6	2	1,8	1,8	1,8
Ghiaccio		2,32		1,87	1,87	1,87
Plastica		0,39		0	0	0
Aria		0,02		0,0012	0,0012	0,0012
Acciaio		60		3,12	3,12	3,12
Acqua		0,58		4,19	4,19	4,19

Tabella 1 – Caratteristiche termiche dei principali tipi di terreno



Figura 4 - Strumentazione per il test di risposta termica dei terreni

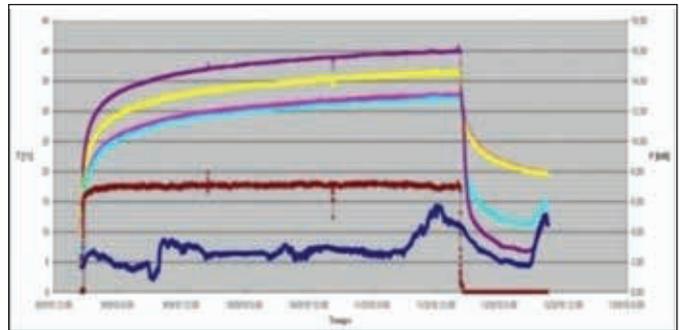


Figura 5 - Grafico delle temperature registrate durante un GRT

un test di risposta termica (TRT, detto anche “Ground Response Test” - GRT) che consiste nella misura dell’alterazione termica del fluido termovettore che circola nella sonda di prova sottoposta ad un’immissione di calore con potenza costante per una durata generalmente pari a 50 o 72 ore (Figura 4).

Questo metodo, largamente approvato in diversi paesi, permette di determinare la resistenza termica del pozzo (Rb) e la conducibilità termica (λ), mediante l’analisi della curva delle temperature di mandata e ritorno dalla sonda geotermica rispettivamente nel periodo transitorio (fase iniziale del test) e stazionario (Figura 5).

Prima dell’immissione di energia termica la registrazione dei dati di temperatura dell’acqua circolante in sonda permette la determinazione della temperatura indisturbata del terreno, altro importante elemento progettuale di un impianto geotermico. Occorre considerare fin d’ora che il risultato del test non tiene conto dell’andamento discreto dei valori di conducibilità dei terreni, fornendo unicamente un valore medio e anche in questo caso non considera l’apporto convettivo della falda, misurando in realtà una “conducibilità apparente” del terreno.

Le considerazioni sopra esposte e le esperienze acquisite mediante la progettazione di molti impianti geotermici a bassa entalpia conducono a considerare che uno degli elementi di partenza fondamentale per la corretta progettazione di un sistema di scambio geotermico è la ricostruzione di un modello geologico del sito di progetto che descriva gli aspetti del sottosuolo che possono influenzare il trasferimento di calore nel terreno (formazioni geologiche, assetto lito-stratigrafico, caratteri geostutturali, assetto idrogeologico, ecc....) o costituire dei fattori di rischio o degli elementi di vulnerabilità (versanti instabili, acquiferi multifalda, siti contaminati, aree di ricarica di acquiferi o zone di tutela di pozzi e sorgenti). La Figura 6 riporta un esempio di modello geologico utilizzato come riferimento nel corso di uno dei campi sonde realizzati (v. del Gomito a Bologna, cfr. paragrafi successivi).

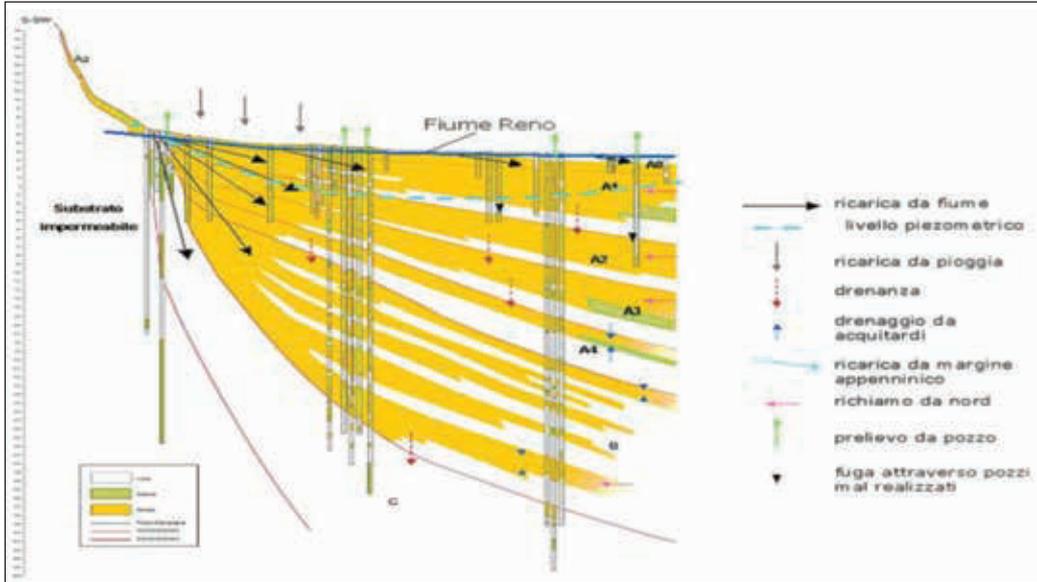


Figura 6 - Sezione geologica di riferimento (tratta da sito web Servizio Geologico Regione Emilia-Romagna https://applicazioni.regioneEmiliaRomagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=geologia)

Solamente mediante la definizione di un modello geologico di riferimento è possibile valutare la fattibilità tecnica, economica e ambientale di un sistema di geoscambio e determinarne la tipologia ideale (scambio con collettori orizzontali, sistemi "open loop" con scambio mediante acqua di falda, scambio mediante pali di fondazione o "strutture geoenergetiche", scambio con sonde geotermiche verticali). Ovviamente, tale valutazione preliminare di fattibilità deve tenere in considerazione dell'altro elemento progettuale fondamentale: il fabbisogno energetico dell'edificio e dell'impianto di progetto (Figura 7).

La definizione del modello geologico di riferimento consente anche di ottenere una "stratigrafia presunta", utile sia alla definizione della tecnica di perforazione più idonea al contesto (considerando anche gli altri elementi al contorno, strutturali ed infrastrutturali), sia alla stima preliminare del potenziale di scambio termico del terreno, che nel caso di impianti di piccolissime dimensioni, inferiori cioè a 20-30 kW, può risultare sufficiente per dimensionare la lunghezza dello scambiatore geotermico,

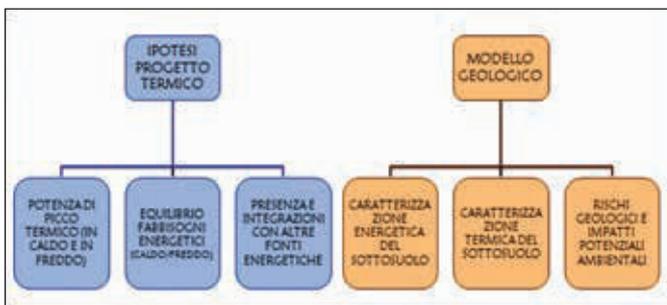


Figura 7 - Verifica di fattibilità tecnica ed ambientale di un sistema di scambio geotermico

co, utilizzando un coefficiente di sicurezza pari almeno a 1,1/1,15, ovvero sovradimensionando lo scambiatore di 10-15%. In pratica, per i piccoli impianti il dimensionamento preliminare del campo sonde geotermiche verticali si ottiene mediante la definizione di un valore medio di conducibilità termica calcolato con una media pesata che tenga conto dello spessore dei differenti strati del terreno (Figura 8).

STRATIGRAFIA PRESUNTA		PROFONDITÀ (m)	SPESORE (m)	LITOTIPO	UMIDITÀ (%)	CONDUCIBILITÀ TERMICA (W/mK)	POTENZA DESTRAZIONE (kW)	VALORE TERORICO POTENZA ESTRIBILI (kW)
struttura	1	0,0	0,0	Argile (m e fr) sabbia	seco	0,4	22,4	134,4
ghiaie	2	0,0	17,0	Grav	seco	0,4	22,4	246,4
ghiaie	3	0,0	21,0	Argile (m e fr) sabbia	umido	0,8	35,0	130,0
ghiaie	4	21,0	25,0	Grav	umido	1,5	56,0	254,0
ghiaie	5	21,0	31,0	Argile (m e fr) sabbia	umido	1,7	41,2	251,2
ghiaie	6	31,0	44,0	Grav	umido	1,5	56,0	720,0
ghiaie	7	44,0	59,0	Argile (m e fr) sabbia	umido	1,7	41,2	1454,8
ghiaie	8	59,0	59,0	Grav	umido	1,5	56,0	204,0
ghiaie	9	59,0	10,0	Argile (m e fr) sabbia	umido	1,7	41,2	412,0
TOTALE							4296,0	
Residuo							42,0	

Figura 8 - Determinazione della conducibilità e della "resa" media del terreno su base stratigrafica

5. SINTESI DELLE RICERCHE IN ATTO E NORME DI PROGETTAZIONE

Un ampio lavoro di ricerca sulle prestazioni termiche e la sostenibilità di campi sonde BHE è attualmente disponibile in letteratura. Diversi studi hanno considerato la valutazione dei test di risposta termica (TRT), le analisi dei meccanismi di trasferimento di calore interni in un'unica sonda geotermica, la sostenibilità a lungo termine dei campi di sonde geotermiche in assenza di movimento delle falde, gli effetti del movimento delle acque sotterranee, oltre allo sviluppo di metodi di progettazione per i campi di sonde geotermiche.

Per quanto riguarda l'esecuzione e l'interpretazione dei TRT le due metodologie più semplici si basano su approcci analitici: il metodo di Mogensen è basato sulla risoluzione del campo di temperatura prodotta da una fonte di calore lineare infinita (*infinite-line-source method*) [Mogensen 1983]; il metodo di Kavanaugh e Rafferty considera la variazione di temperatura prodotta da una sorgente di calore cilindrica infinita avente il raggio della sonda geotermica (*Infinite-cylindrical-source method*) [Kavanaugh e Rafferty, 2003]. Gli approcci più evoluti considerano modelli tridimensionali [Marcotte e Pasquier, 2008], [Lamarche et al., 2010], utilizzando anche codici di simulazione numerici agli elementi finiti [Bozzoli et al., 2011]. Numerosi studi e ricerche sono riferite alla definizione della sostenibilità a lungo termine dei campi sonde, considerando alternativamente terreni dove gli effetti del movimento delle falde sotterranee sono trascurabili [Rybach L., 2002], campi sonde con carichi invernali ed estivi completamente sbilanciati [Rybach et al., 2004], campi sonde con distribuzione infinita di sonde, in assenza di flusso e di equilibrio dei carichi [Lazzari et al., 2010].

Altri studi hanno inoltre valutato gli effetti del flusso di acque sotterranee sulle prestazioni dei campi. In particolare, [Chiasson et al., 2000] ha impiegato un modello numerico ad elementi finiti per simulare gli effetti del flusso di acque sotterranee su un singola sonda in differenti materiali geologici. Le simulazioni hanno mostrato che il flusso di falda migliora significativamente il trasferimento di calore avvertito in contesti geologici ad elevata conducibilità idraulica, come sabbia, ghiaie e rocce ad elevata permeabilità per fratturazione. Infine, [Zanchini et al., 2012] hanno studiato gli effetti del flusso delle acque sotterranee sulle prestazioni a lungo termine dei campi di sonde geotermiche soggetti a carichi invernali ed estivi sbilanciati, utilizzando una forma adimensionale ottenuta da simulazioni ad elementi finiti realizzati attraverso COMSOL Multiphysics.

Tutte le esperienze di ricerca sovra-elencate hanno permesso di accrescere le conoscenze sui metodi di analisi e dimensionamento dei campi sonde. Tuttavia le metodologie proposte sono di difficile applicazione nei dimensionamenti dei campi proprio per l'eccessivo onere computazionale di queste ultime.

Per questa ragione nel corso degli anni sono nati metodi di calcolo e software basati sulle esperienze di ricerca pregresse. Un semplice metodo di progettazione per campi sonde è stato sviluppato da [Kavanaugh e Rafferty, 1997] ed è consigliato dalle norme (ASHRAE 2007). Esso è basato sulla soluzione dell'equazione del trasferimento di calore di un cilindro di lunghezza infinita in mezzo a un solido omogeneo, e considera la sovrapposizione di tre impulsi di calore, ciascuna con una potenza costante, che rappresentano rispettivamente, gli squilibri termici stagionali, il carico termico medio mensile nel corso del mese di progettazione e l'impulso termico di picco durante il giorno di progetto. Su tale metodo di calcolo si basano i software commerciali di calcolo per il dimensionamento dei campi sonde, in particolare i software EED (Basato sulle G-Function) e Geotermus. La Norma Uni 11467, sulla progettazione dell'impianto geotermico, indica gli elementi di input relativi al carico termico dell'edificio necessari alla determinazione della potenza termica del generatore di progetto (pompa di calore). La Norma stessa illustra le metodologie di calcolo del dimensionamento dello scambiatore al suolo (campo sonde verticali, nel caso più diffuso) che possono essere più o meno semplificate a seconda delle dimensioni dell'impianto (ASHRAEE, EED, simulazioni ecc...).

Tali metodologie di calcolo si basano tutte sulla semplificazione relativa al modello di scambio di calore tra il fluido che circola nelle sonde ed il terreno, secondo la quale lo scambio di calore è proporzionale a due valori fondamentali: la differenza di temperatura tra il fluido ed il terreno adiacente alla sonda e la conducibilità del terreno attorno alla sonda. Chiunque abbia dimestichezza con la composizione del sottosuolo capisce immediatamente che tale semplificazione può essere causa di approssimazioni inaccettabili, qualora non sia adeguatamente approfondita la conoscenza di un modello geologico di riferimento da cui estrapolare il dato da utilizzare nei calcoli. E' la stessa semplificazione che non può essere accettata per esempio nel caso di progettazione geotecnica di un intervento edilizio: oggi non si può più progettare qualsiasi struttura di fondazione senza avere determinato un modello geologico del sottosuolo che consenta un'adeguata caratterizzazione geotecnica dei terreni stessi.

6. SPERIMENTAZIONI E OSSERVAZIONI DERIVANTI DALL'ESPERIENZA PROFESSIONALE

La stima delle proprietà termiche dei terreni sulla base del modello geologico di riferimento non consente ancora di tenere in giusta considerazione il contributo della componente avvertiva dello scambio di calore che si ha negli strati di terreno saturo (falde) che interessano lo sviluppo verticale delle sonde geotermiche.

Tale limitazione è soprattutto dovuta alla scarsità di informazioni inerenti il contesto idrogeologico della zona in cui viene realizzato il campo ed ai notevoli costi da sopportare per uno studio idrogeologico adeguato.

Durante l'esecuzione di numerosi test di risposta termica dei terreni e di misure termometriche effettuate lungo la verticale della sonda in differenti situazioni (dopo l'installazione della sonda, durante il test di resa termica, dopo qualche giorno dal termine del test, ecc...) si è osservato che la temperatura del terreno varia in modo molto differente da strato a strato, principalmente per effetto delle caratteristiche termiche del terreno (componente di conducibilità) e del suo grado di saturazione (componente di avvezione). La realizzazione di un profilo termico del terreno durante la fase di riscaldamento e/o di raffreddamento del TRT, combinato ai dati geologici ed idrogeologici, permette quindi di discretizzare lo scambio del calore in diversi livelli (vedi Figura 9). Questa metodologia consente di ottenere una distribuzione verticale della conducibilità termica del sottosuolo.

Un approfondimento di questa metodologia di indagine sperimentale è stato eseguito nel corso della realizzazione dell'impianto geotermico di Bologna (via del Gomito) a servizio di un nuovo complesso residenziale di 30 unità abitative. Il campo sonde geotermico – realizzato a fine 2010 dall'azienda presso cui lavorano gli autori – è costituito da 14 sonde verticali di profondità 104 m.

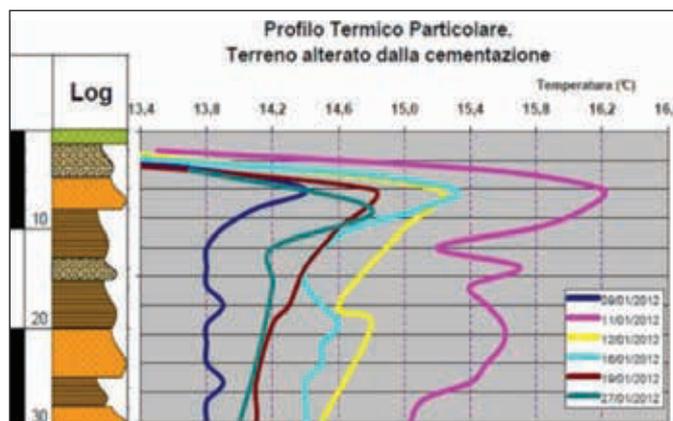


Figura 9 - Misure termiche in sonda dopo la cementazione, paragonate alla stratigrafia del terreno

In tale occasione è stata anzitutto realizzata una campagna di indagine per la caratterizzazione geologica ed idrogeologica dei terreni attraversati dal campo sonde, facendo riferimento alle raccomandazioni A.G.I e A.N.I.S.I.G., mediante la realizzazione di un sondaggio geognostico spinto alla profondità di m. 50 (con successiva installazione di piezometro) e mediante la stratigrafia desunta dai cuttings di perforazione delle 14 sonde geotermiche eseguite (Figura 10).

Sulla base del modello geologico disponibile preliminarmente (cfr. figura 6) le perforazioni eseguite hanno permesso di ricostruire l'assetto idrogeologico di dettaglio, riportato in Figura 11. In esso si può osservare che il sottosuolo del complesso residenziale in esame è costituito da un alternanza di termini fini (argille limose e limi argillosi) e di terreni grossolani (ghiaia in matrice sabbiosa) che costituiscono i principali livelli acquiferi. In accordo con la definizione dei caratteri idrostratigrafici della Regione Emilia-Romagna, gli acquiferi interessati dalle perforazioni realizzate sono principalmente:

- A0 – tra 5 e 25 metri: acquifero freatico superficiale (AES8 Subsistema di Ravenna);

STRATIGRAFIA e DESCRIZIONE		Prof. (m)	Falda		
			Prof. (m)	Cont. (m)	Press. (m)
5	Limo argilloso-sabbioso di colore bruno	5.5	15.0	1.0	1.0
10	Sabbie medio fini limose	7.5			
15	Limo argilloso sabbioso di colore grigio	15.5			
20	Limo argilloso con livelli sabbie fini limose	21.0			
25	Sabbie fini e grossolane grigie con clasti	25.0			
30					
35					
40	Limi argillosi sabbiosi con livelli a limi sabbiosi grigi	44.0			
45					
50	Ghiaia in matrice sabbiosa con clasti centimetrici	56.0			
60					
65					
70	Limo argilloso di colore bruno	71.0			
75					
80	Ghiaia in matrice sabbiosa	79.0			
85					
90	Argilla limosa grigia	88.0			
95					
100	Ghiaia in matrice sabbiosa	93.0			
105	Argilla limosa grigia	105.0			

Figura 10 - Stratigrafia del terreno relativa alla svg n°9 (sonda sulla quale è stato eseguito il TRT), desunta dall'analisi dei cuttings di perforazione

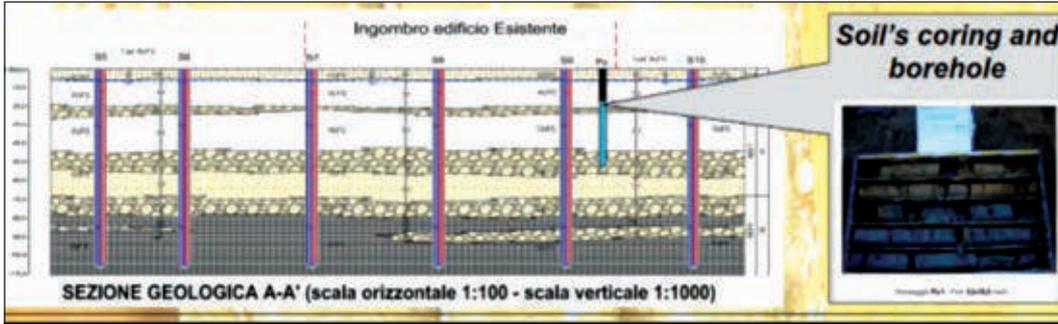


Figura 11 - Ricostruzione dell'assetto idrogeologico di dettaglio derivante dalle perforazioni eseguite

- A1 (AES7 "Subsistema di Villa Verucchio") – tra 45 e 55 metri;
 - A2 (AES6 "Subsistema di Bazzano – tra 70 e 95 metri.
- Il piezometro realizzato è stato ubicato a valle "idrogeologica" del campo geotermico, finalizzato al monitoraggio a lungo termine dell' eventuale alterazione termica e chimica prodotta dall'attivazione dell'impianto. Il piezometro è stato allestito con tratto fessurato dai 45m fino ai 50m dal p.c., andando quindi ad intercettare il complesso acquifero A1 (AES7 "Subsistema di Villa Verucchio"). Tale falda confinata, ha mostrato livelli piezometrici statici variabili fra circa m. 18,4 (soggiacenza dal p.c.) a m. 17,70 (soggiacenza dal p.c.) durante l'arco di tempo in cui si sono effettuati i monitoraggi cui si accennerà nel prosieguo. Nell'ambito dell'indagine è stata condotta anche una prova di permeabilità tipo Lefranc, che ha permesso di definire un valore pari a 6,51E-06 m/s. Al fine di caratterizzare dal punto di vista termico il serbatoio geotermico sono state realizzate le seguenti indagini:
- l'esecuzione di un test di risposta termica del terreno;
 - una campagna di misure termometriche del terreno;
 - un monitoraggio periodico del livello piezometrico e della temperatura della suddetta falda.

In data 9-11 gennaio '11 è stato eseguito il TRT sulla sonda SGV-9. L'analisi dei risultati del test TRT ha portato alla determinazione delle seguenti proprietà termiche:

- conducibilità termica media effettiva del sottosuolo nell'intorno della sonda geotermica = 1,85 W/(mK);
- resistenza termica del foro in esame = 0,062 K/(W/m).

La stima empirica della conducibilità è stata ottenuta stimando l'inclinazione della retta interpolante le misurazioni termiche rispetto al logaritmo del tempo. Ottenuta la pendenza della retta, si applica la formula seguente:

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot H}$$

dove: λ è la conducibilità termica, Q è la potenza termica iniettata nella sonda, H è la lunghezza della sonda e K è la pendenza della retta.

Il profilo termico eseguito alcuni giorni dopo il test di risposta termica (profilo rosso in figura 12) mostra come la temperatura tende a stabilizzarsi a partire da circa 15 m

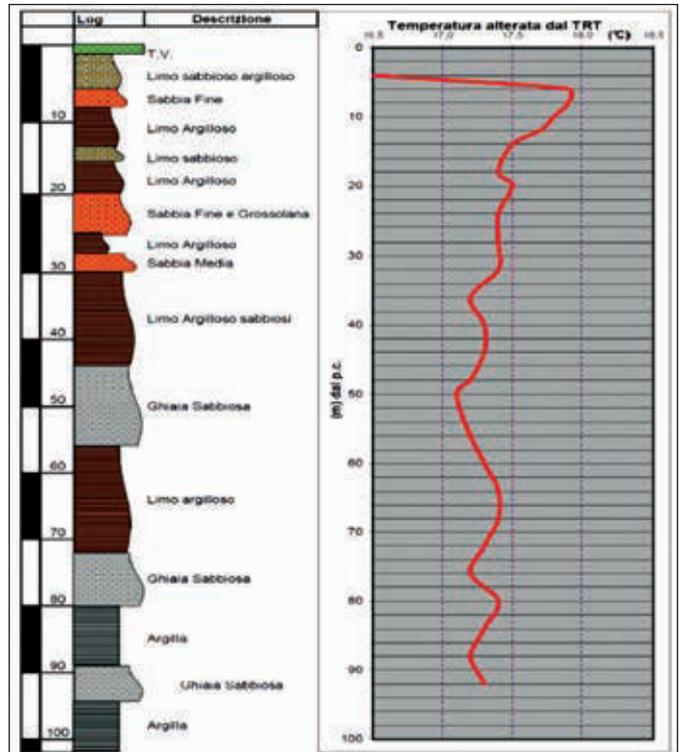


Figura 12 - Temperatura del terreno in seguito all'alterazione termica del TRT

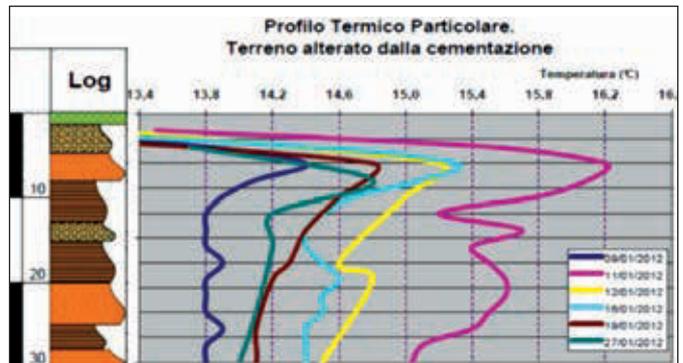


Figura 13 - Stratigrafia del terreno e profilo termico in sonda, dopo la cementazione

permeabilità non elevate, a differenza dei terreni grossolani ed interessati da circolazione di acqua di falda. Sono state inoltre realizzate misure termiche mediante

N°Sonda	51	52	53	54	55	56	57	58	59	610	611	612	613	614
T.media (°C)	13,9	13,9	13,8	13,9	13,9	13,9	13,9	13,8	14,0	13,9	13,9	13,8	13,8	13,9
T. a 45 m dal p.c. (°C)	13,9	13,9	13,8	13,9	13,9	14,0	14,1	13,7	13,9	13,7	13,8	13,8	13,8	13,9

Figura 14 - Temperatura indisturbata media del terreno ad una profondità di m 55 dal p.c.

inserimento di un termofreatimetro all'interno di un tubo di ciascuna sonda geotermica del campo dalle quali si sono riscontrate temperature medie di 13,8-13,9°C ed un gradiente locale di circa 0,62°C/100m, gradiente basso motivato dalla presenza delle falde acquifere (figura 14). Infine, dai dati ottenuti dal monitoraggio periodico nel piezometro si può vedere come la temperatura media dell'acqua rimanga attorno a circa 14°C, mentre si osserva una temperatura media di 13,8°C a m. 50 dal p.c., in corrispondenza del tratto finestrato del piezometro (Figura 15). Sulla base delle osservazioni sopra esposte si può meglio comprendere che i valori di conducibilità ottenuti dal TRT sono da intendersi come "conducibilità equivalente" ossia come risultante del fattore conduzione e del fattore avvezione. Infatti, il modello di interpretazione del test suppone che lo scambio termico avvenga completamente per conduzione, mentre abbiamo ampiamente documentato come il contributo avvevitivo dello scambio di calore può essere molto rilevante, come nel caso in esame.

7. PROGETTI DI RICERCA PER LE METODOLOGIE DI INDAGINE TERMICA SUI TERRENI

Le evidenze empiriche sopra descritte sono state approfondite nel corso di numerosi altri casi studio durante l'esecuzione di test ed impianti geotermici e mediante una collaborazione in atto da alcuni anni con l'Università degli Studi di Urbino – Dipartimento di Scienze della Terra, che per prima ha svolto attività di ricerca in quest'ambito, evidenziando l'importanza dei profili termici nella caratterizzazione termica dei terreni.

Nel corso dell'anno 2013 Geo-Net –società di ingegneria

Data	Ora	T. Ext (°C)	Livello piez. da p.c. (m)	T. a metri 50.0 da p.c. (°C)	T. Media (°C)
12/01/2012	16.30	6.5	17.74	14.4	14.7
16/01/2012	12.20	0.0	17.72	13.8	14.1
19/01/2012	16.00	1.0	17.72	13.9	14.1
27/01/2012	11.00	-1.0	17.70	13.8	14.0
30/01/2012	10.44	8.0	17.70	13.8	13.9
31/01/2012	15.20	0.0	17.70	13.9	14.0
02/02/2012	12.30	5.0	17.70	13.9	14.0
16/03/2012	10.32	17.0	17.70	13.7	13.9
26/07/2012	11.20	32.0	18.40	13.9	13.9

Figura 15 - Monitoraggio periodico del livello statico e della temperatura della falda confinata nel piezometro di monitoraggio

(per cui lavorano gli autori professionisti) e che progetta e realizza impianti geotermici - ha finanziato un progetto di ricerca dell'Università di Urbino con l'obiettivo di passare dalle evidenze empiriche alla determinazione di un modello di trasferimento di calore che consideri le caratteristiche termiche del terreno in modo discretizzato, valutando il contributo differente dei termini convettivi ed avvevitivi. Inoltre, il progetto si pone l'obiettivo di definire una metodologia di indagine termica sui terreni in grado di fornire una corretta ricostruzione delle caratteristiche termiche dei terreni stessi (strato per strato, e non come valor medio, come risulta oggi dai test di risposta termica universalmente diffusi).

L'utilizzo di simulazioni ad elementi finiti ed in particolare analisi di tipo CFD (Computational Fluid-dynamic) hanno consentito di esplorare diversi scenari possibili. Le indagini hanno riguardato lo studio del comportamento a breve e lungo termine di sonde geotermiche realizzate in terreni caratterizzati da diverso comportamento termoidraulico.

Diversi sono stati gli studi delle performance di sonde geotermiche realizzati con l'ausilio di modelli numerici. I casi oggetto di studio si riferiscono a diversi scenari:

- Diverse condizioni di carico termico applicato [A. PRIARONE 2009];
- Diverso interesse relativo tra le sonde, al fine di individuare la distanza limite oltre la quale si può innescare interferenza e quindi perdita delle prestazioni energetiche nel tempo [A. PRIARONE 2009];
- Diverse condizioni idrogeologiche dei terreni (presenza o meno di falda e diverse velocità di quest'ultima), al fine di individuare l'effetto dei moti delle acque sotterranee sulle caratteristiche termiche dello strato da esse attraversate, ed in particolare del coefficiente globale di scambio termico da esso indotte [S. LAZZARI A. PRIARONE AND E. ZANCHINI 2011].

Tutti i modelli disponibili in letteratura sono stati realizzati considerando il terreno come mezzo omogeneo e con le stesse caratteristiche per tutta la profondità della sonda. Questa considerazione permette di semplificare di molto la modellazione e quindi di utilizzare un modello bidimensionale riducendo di molto i gradi di complessità del sistema studiato.

Lo scopo che ci si è prefissi con la presente ricerca è invece quello di capire l'effetto delle variazioni delle caratteristiche del comportamento termico e idrogeologico degli strati sulle prestazioni termiche globali delle sonde che attraversano tali strati. Si sono quindi estese le esperienze da diversi autori al caso tridimensionale. Questa fase è stata assai onerosa a causa dell'incremento esponenziale dei gradi di complessità del mo-

dello, generati dalla non uniformità degli strati (e quindi dalla necessità di simulare la sonda nel suo complesso). Inoltre la simulazione del moto avvertivo dell'acqua di falda in un mezzo poroso (il terreno), genera sforzi computazionali elevati, poiché si deve simulare la reale modalità di diffusione del fluido negli strati attraversati (che i modelli bidimensionali non considerano).

L'approccio simulativo ha consentito di analizzare i fenomeni in atto durante lo scambio termico tra sonda e terreno sia nella fase di realizzazione che in quella di servizio della sonda stessa. Nel corso di questo periodo di studio si è simulato il comportamento di diversi siti in cui sono state realizzate sonde geotermiche accoppiando la simulazione di perturbazioni termiche rapide del pozzo come quelle che avvengono durante un TRT, sia il comportamento di un terreno in cui è installato un campo sonde e in cui viene svolto un monitoraggio di lungo periodo, analizzando la variazione di temperatura nel fluido della sonda e nel terreno a diverse distanze dalla sonda stessa al variare della stagione termica e quindi della potenza immessa o sottratta al terreno dalla pompa di calore (Figura 16).

L'utilizzo dei soli dati provenienti dalle misure effettuate nel corso delle indagini in sito non consentono di comprendere a pieno tutti i fenomeni fisici di scambio tra sonda e terreno, in quanto non è possibile separare i vari contributi che vanno a definire l'energia totale scambiata dalla sonda stessa, rendendo tali dati quantomeno di difficile interpretazione. I modelli numerici, opportunamente tarati sulla base di dati sperimentali dei sensori diventeranno uno strumento di supporto indispensabile per la corretta interpretazione dei dati provenienti dalle indagini in sito. Infatti, attraverso di essi è possibile individuare le caratteristiche termo-idrauliche dei singoli strati di terreno attraversati dalla sonda per qualsiasi condizione al contorno agente su di essa. Inoltre sarà possibile identificare tutti i fenomeni fisici in atto e interpretare condizioni particolari come difetti di esecuzione della sonda o eventuali resistenze parassite. L'integra-

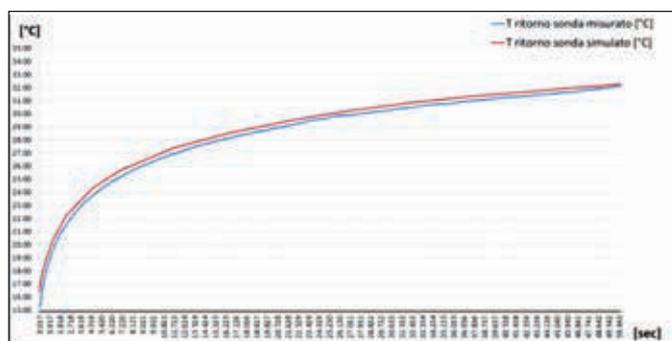


Figura 16 - Confronto tra i dati di una prova TRT misurata e simulata

zione tra i modelli numerici così ottenuti e le indagini in sito potrà diventare un sistema di supporto alla corretta progettazione di campi sonde per qualsiasi configurazione e per qualunque condizione geomorfologica e idraulica del terreno da esse interessato.

In Figura 17 è riportato un esempio delle potenzialità offerte da tali modelli. In particolare è stato rappresentata la simulazione tridimensionale ad elementi finiti [L. SCHIAVI 2009] relativa a una prova TRT al fine di valutare di quanto il modello "Line Source" (con cui viene schematizzato lo scambio termico tra sonda e terreno per la determinazione della resistenza del foro e la conducibilità del terreno stesso) si discosta dal modello di scambio tridimensionale realmente agente. Le analisi mostrano come il modello lineare applicato nel Thermal Response Test rappresenti un modello sufficientemente accurato per la stima di tali parametri. Tuttavia l'approccio tridimensionale appare necessario quando devono essere considerate altre complessità geometriche e geomorfologiche.

8. CONCLUSIONI

Sulla base delle osservazioni sperimentali e del progetto di ricerca in atto che coinvolgono l'attività professionale degli autori ed il Dipartimento Scienze della Terra dell'Università di Urbino, descritti nel presente articolo, appare evidente il ruolo centrale che la geologia deve ricoprire nella progettazione e realizzazione di impianti geotermici a bassa entalpia. Come per la realizzazione di qualsiasi opera nel sottosuolo, la ricostruzione di un modello geologico di riferimento adeguatamente approfondito risulta il primo fondamentale passo per un approccio corretto. Nella definizione delle caratteristiche termiche dei terreni, successivo elemento di conoscenza indispensabile,

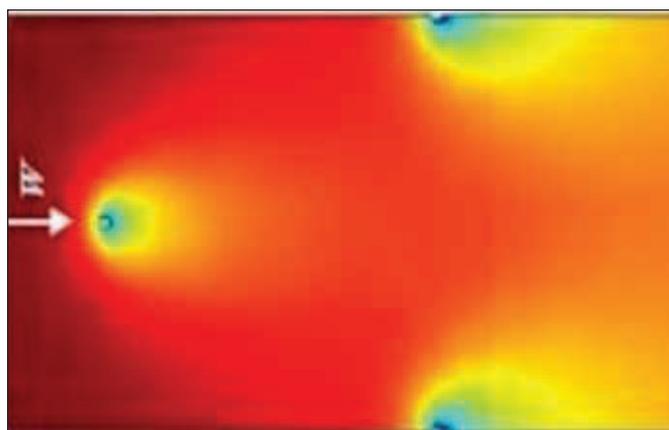


Figura 17 - Distribuzione della temperatura in una sezione di terreno bidimensionale influenzata da una falda in pressione con velocità W

sono attualmente disponibili strumenti e metodologie universalmente riconosciute ed adottate quali il TRT (o GRT) che, come detto, non considerano adeguatamente la reale struttura del contesto geologico, quasi sempre caratterizzato da successioni di strati di terreno o formazioni rocciose con differenti caratteristiche. Tali strumenti non considerano nemmeno il contributo importante derivante dal movimento dell'acqua di falda – ove presente. Le sperimentazioni introdotte in collaborazione con l'Università degli Studi di Urbino vogliono colmare questa lacuna per porre le basi di una progettazione geotermica in grado di simulare meglio il comportamento termico del terreno sottoposto allo scambio termico mediante sonde verticali a servizio di pompe di calore geotermiche. Infine, l'articolo vuole essere uno stimolo ad un adeguato approfondimento di studi ed indagini che i colleghi geologi sono sempre più frequentemente chiamati ad eseguire nell'ambito della progettazione di tali tipologie di impianti termici a fonti rinnovabili.

BIBLIOGRAFIA

- L'ECOUYER M., ZOI C., HOFFMAN J. (1993) – The potential of advanced residential space conditioning technologies for reducing pollution and saving consumers money. EPA-DOE-430-R-93-004.
- BIANCHI MC., Francesco De Lardere¹, uomo ed imprenditore,(2005.) pp 209-224. In: Ciardi M. e Cataldi R. (a cura di/cdited by), 'Il Calore della Terra. Contributo alla Storia della Geotermia in Italia". ETS, Pisa, pp. XVI + 344.
- DOMENICO D'OLIMPIO, Geotermia e teleriscaldamento: l'esempio di Ferrara.(2010) EcoEdility.it.
- N. DIAO, Q. LI, Z. FANG, Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater (2004) International Journal of thermal Sciences 43 1203–1211.
- MOGENSEN, P., Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. In:Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice, (1983) pp. 652–657, Sweden, Stockholm
- KAVANAUGH S.P. AND RAFFERTY K., Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. (1997) Ashrae publications, Atlanta, U.S.A.
- MARCOTTE D. AND PASQUIER P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity tests. (2008),pp. 2407 – 2415), Renewable Energy, 33
- BOZZOLI F. AND OTHERS, Estimation of soil and grout thermal properties through a TSPEP (two-step parameter estimation procedure) applied to TRT (thermal response test) (2011), pp 839–846, Energy, 36
- LAMARCHE L. AND BEAUCHAMP B., A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. (2007).pp 188 – 198, Energy and Building, 39
- LAMARCHE L. AND BEAUCHAMP B. New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical borehole (2007),pp 1408 – 1419, International Journal for Heat and Mass Transfer, 50
- RYBACH L.,La Geotermia – ieri, oggi, domani, 2007, numero speciale del Notiziario U.G.I. allegato al n. 1-2/2007 di "Geologia Tecnica & Ambientale", 27-75, Pisa
- RYBACH, L., Regulatory framework for geothermal in Europe – with special reference to Germany, France, Hungary, Romania, and Switzerland, 2003, pp 118, 120 ,132, in Geothermal training programme
- CHIASSON A.D. Advances in modeling of ground-source heat pump systems, 1999, Master of Science Thesis. Oklahoma State University, U.S.A.
- CHIASSON A.D. AND OTHERS, A Preliminary Assessment Of The Effects Of Ground-Water Flow On Closed-Loop Ground-Source Heat Pump Systems, 2000, pp 380-393 ASHRAE Transactions, 106
- ZANCHINI E, LAZZARI S, PRIARONE A. Long-term performance of large borehole heat exchanger fields with unbalanced seasonal loads and groundwater flow. Energy 2012 pp 38, 66-77
- A. PRIARONE, S. LAZZARI, AND E. ZANCHINI Numerical Evaluation of Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields." Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Milan
- S. LAZZARI A. PRIARONE AND E. ZANCHINI "Validation of a Simplified Model to Determine the Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields with Groundwater Advection" Proceedings of the COMSOL Conference 2011 Stuttgart
- L. SCHIAVI "3D Simulation of the Thermal Response Test in a U-tube Borehole Heat Exchanger" Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Milan.