

PROGETTO DI UN IMPIANTO GEOTERMICO DI PICCOLA POTENZA

Alessandro Buscemi

Geon S.r.l.

sandro.buscemi@libero.it

Camillo Airò Farulla

Università degli studi di Palermo

camillo.airofarulla@unipa.it

Giovanni Bosco

Università degli studi di Trento

giovanni.bosco@unitn.it

Marco rosone

Università degli studi di Palermo

marco.rosone@unipa.it

Sommario

Si presenta la metodologia di progetto utilizzata per il dimensionamento di un campo di sonde geotermiche verticali da asservirsi ad un impianto di riscaldamento geotermico a bassa entalpia di una villetta monofamiliare sita lungo la via Aurelia in Roma. Le proprietà termiche del sottosuolo interessato dall'opera sono state caratterizzate a partire da semplici prove di laboratorio ed il calcolo di dimensionamento delle sonde è ispirato ai criteri proposti dalla normativa tedesca per il dimensionamento d'impianti con potenza termica inferiore a 30 kW; quest'ultimo approccio è stato modificato per tenere in conto della "deriva termica" del sottosuolo legata allo sfruttamento stagionale della risorsa.

1. Introduzione

In Italia il consumo di energia termica per il riscaldamento ed il raffrescamento degli edifici rappresenta il 45% dei consumi energetici complessivi nazionali. La geotermia a bassa entalpia, che consente di incrementare l'efficienza delle pompe di calore per la climatizzazione mediante lo scambio termico con il sottosuolo, rappresenta una tecnica ancora relativamente poco diffusa alle nostre latitudini. L'efficienza di un impianto geotermico a bassa entalpia dipende da numerosi fattori tra i quali: le caratteristiche di conducibilità termiche del sottosuolo, la tipologia e la disposizione geometrica delle sonde geotermiche e la dinamica dei carichi termici dell'edificio.

In questo studio, si propone una metodologia semplificata per il dimensionamento di impianti geotermici a bassa entalpia di piccola potenza ($P < 30$ kW) per i quali non si eseguono, nella maggior parte dei casi, le costose prove di risposta termica delle sonde in situ (TRT).

I risultati delle analisi svolte mettono in luce l'importanza di una corretta caratterizzazione termica del sottosuolo definita a partire dalle proprietà geotecniche di base dei terreni e di come queste grandezze possano essere utili a calibrare gli strumenti di calcolo numerico finalizzati al dimensionamento delle sonde ed alla valutazione dello sfruttamento della risorsa termica.

2. Definizione della stratigrafia geotermica di progetto

Al fine di caratterizzare il sottosuolo interessato dalla realizzazione del campo di scambiatori geotermici, sotto il profilo delle proprietà termiche, sono state eseguite delle prove termiche su sei campioni indisturbati prelevati a differenti profondità lungo un sondaggio geognostico profondo eseguito nell'area oggetto di studio. Con la tecnica del *Thermal Needle System*, eseguita secondo la norma *ASTM D5334-05*, è stata misurata in laboratorio la conducibilità termica dei terreni prelevati in foro.

I risultati sperimentali sono sintetizzati in Tab. 1, nella quale si riporta il grado di saturazione S_r , la porosità n e la conducibilità termica λ [W/m K]. Interpretando i dati misurati mediante il modello di Côté e Konrad (2005) sono state stimate le seguenti grandezze:

- la conducibilità termica satura λ_{sat} ;
- la conducibilità termica secca λ_{dry} ;
- la conducibilità termica normalizzata k_e o numero di Kersten (Johansen, 1975);
- la conducibilità termica della componente solida λ_s .

Una sintesi delle elaborazioni svolte è descritta nella Tab 2. Si riconosce che la conducibilità termica nei terreni è, essenzialmente, una funzione del contenuto d'acqua e della composizione mineralogica della fase solida. In particolare, per profondità comprese tra 60-70 m rispetto al piano campagna si riscontrano valori più elevati di conducibilità della fase solida (λ_s pari a circa 3,7 W/m K) che derivano, presumibilmente, da una maggiore presenza di quarzo nella composizione mineralogica del terreno.

Mediante il medesimo modello di Côté e Konrad è stato possibile, quindi, definire una stratigrafia di progetto in cui i valori di conducibilità termica λ e calore specifico volumetrico C_p [MJ/m³ K] sono stati dedotti utilizzando sia i risultati delle misure termiche già descritte sia i valori di porosità n e grado di saturazione S_r stimati alle diverse profondità lungo la verticale d'indagine, come riportato in Tab. 3 e Fig. 1.

Infine, attraverso una media delle grandezze termiche, pesata sugli spessori dei differenti strati, sono stati definiti i seguenti valori sintetici di conducibilità termica e calore specifico che definiscono la modellazione termica del sottosuolo (volume termicamente significativo) interessata dall'impianto:

$$\begin{aligned}\lambda_s &= 1,57 \text{ W/m K;} \\ C_{ps} &= 2,60 \text{ MJ/m}^3 \text{ K.}\end{aligned}$$

3. Calcolo della resistenza termica della geosonda mediante analisi numeriche

Per valutare la capacità di scambio termico per unità di lunghezza delle sonde, è stato definito un modello numerico bidimensionale della sezione media di una sonda geotermica verticale del tipo a "singola U". Il modello è stato implementato sul software commerciale COMSOL Multiphysics che consente di risolvere le equazioni di conservazione dell'entalpia mediante la tecnica numerica degli elementi finiti (FEM). Le caratteristiche geometriche e le specifiche tecniche della sonda ad U sono le seguenti:

diametro sonda (perforazione):	$D_b = 140 \text{ mm};$
profondità della sonda	$L_b = 150 \text{ m};$
tipo di tubo:	singola U in PEAD PE100 PN16 SDR11
diametro esterno tubo:	$D_p = 40 \text{ mm};$
portata del fluido termovettore:	$Q_w = 1,14 \text{ m}^3/\text{h};$
temperatura indisturbata dell'ammasso:	$T_0 = 16 \text{ [}^\circ\text{C]}.$

Il modello numerico è stato, quindi, calibrato utilizzando i valori di conducibilità e calore specifico medi del terreno già calcolati nel paragrafo precedente per il sito interessato dall'opera. Dall'analisi dei risultati delle simulazioni è stata, infine, valutata la resistenza termica equivalente per unità di lunghezza della geosonda, così come definita dalla seguente relazione (Lamarche e Beauchamp, 2010):

$$R_{bt} = \frac{T_f - T_b}{q_{th}} \quad \left[\frac{\text{m K}}{\text{W}} \right],$$

in cui si è indicato con:

T_f è la temperatura media del fluido termovettore nella sonda [K];

T_b è la temperatura media della pareti della sonda [K];

q è il flusso di calore specifico per unità di lunghezza della sonda [W/m].

Tutte le simulazioni sono state condotte parametricamente, considerando l'effetto di differenti miscele di "grout" sulla resa della sonda geotermica:

boiaccia acqua-bentonite al 20%;

boiaccia acqua-bentonite al 30%;

boiaccia acqua- 20% bentonite - 40% quarzite;

I risultati delle simulazioni FEM in termini di R_b sono sintetizzati in Tab 4. L'andamento delle curve isoterme in condizioni "quasi stazionarie" (dopo 720 h di funzionamento) nell'intorno dello scambiatore è rappresentato in Fig. 2. Per i successivi calcoli di dimensionamento si è deciso di considerare una resistenza termica unitaria pari a $R_b=0.13 \text{ m K/W}$, in linea con i valori tipici desumibili dalla letteratura per questa tipologia di scambiatori.

4. Dimensionamento di un impianto geotermico di potenza termica pari a 20 kW

Il campo di scambiatori geotermici oggetto di questo studio è stato dimensionato per il riscaldamento di una villa monofamiliare ubicata lungo la Via Aurelia in Roma. Le specifiche di progetto dell'impianto di riscaldamento considerate nel calcolo sono le seguenti:

superficie da riscaldare: 200 m^2

sistema di emissione mediante pavimenti radianti:

$T_{pr}=35^\circ\text{C}$;

richiesta di energia termica unitaria (classe energetica B):

$q_{th}=95 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$;

energia termica totale annua:

$E_{th}=11800 \text{ kWh/a}$;

potenza di picco della pompa di calore geotermica:

$P_{th}=18\text{-}20 \text{ kW}_{th}$

numero di ore equivalenti con $P_{th}=10 \text{ kW}$:

$t_{hr}=611.44 \text{ ore}$

Per il dimensionamento del numero e della lunghezza di ciascuna sonda è stata definita una procedura semplificata, simile a quella descritta dalla normativa tedesca (VDI4640) per impianti geotermici a bassa entalpia di potenza inferiore ai 30 kW; la differenza principale deriva nell'implementazione di un metodo iterativo che consente tenere in conto l'effetto di "deriva termica" del sottosuolo legato allo sfruttamento della risorsa termica.

Per modellare le variazioni termiche del terreno all'interfaccia con la sonda è stato utilizzato il modello monodimensionale della "sorgente di calore lineare" descritto da (Ingersoll, 1948). La procedura proposta può descriversi mediante i seguenti passi di calcolo:

- 1) definizione della temperatura operativa media di funzionamento invernale della pompa di calore (temperatura di scambio lato evaporatore): $T_{soil}=10^\circ\text{C}$;
- 2) scelta della pompa di calore: W-W (B10/W35), $P_{th}=19.3 \text{ kW}$, $\text{COP}=5.66$, $Q_{whp}=3420 \text{ [l/h]}$;
- 3) definizione del numero di sonde: $n_{sonde}= Q_{whp}/Q_w=3$;
- 4) calcolo della potenza termica di geo-scambio nelle condizioni operative di progetto (scambio lato evaporatore della pompa di calore per B10/W35):

$$P_{soil} = P_{th} \left(\frac{\text{COP}-1}{\text{COP}} \right) = 15.89 \text{ kW}$$

- 5) calcolo della temperatura media del fluido termovettore nella sonda:

$$T_f = T_s - \frac{P_{soil}}{2\rho_w C_{pw} Q_w} = 10 - \frac{15.89}{8} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

- 6) definizione della resa termica unitaria di ciascuna sonda a partire da una temperatura $T_{b,i}$ del terreno di primo tentativo:

$$q_{th,i} = \frac{T_{b,i} - T_f}{R_{bt}} \quad [\text{W/m}];$$

- 7) calcolo di primo tentativo della lunghezza di ciascuna sonda:

$$L_{b,i} = \frac{1000 P_{soil}}{n_{sonde} q_{th,i}} \quad [\text{m}];$$

- 8) calcolo della $T_{b,i+1}$ mediante l'equazione semplificata della "linea sorgente" di (Ingersoll, 1948):

$$T_{b,i+1} = T_0 - \frac{q_{th,i}}{4\pi\lambda_s} \left[\frac{r_b^2}{4\alpha t^*} - \gamma - \ln\left(\frac{r_b^2}{4\alpha t^*}\right) - \frac{r_b^4}{64\alpha^2 t^{*2}} \right]$$

In cui si è indicato con:

$\gamma = 0.5772156649$ la costante di Eulero

T_0 la temperatura indisturbata dell'ammasso di terreni ($T_0 = 16^{\circ}\text{C}$ nel caso di Roma);

λ_s la conducibilità termica media del terreno ($\lambda_s = 1.57 \text{ W/m K}$)

r_b il raggio della perforazione ($r_b = 0.07 \text{ m}$);

$\alpha = \lambda_s / C_{ps}$ la diffusività termica del terreno ($\alpha = 6.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$);

$t^* = t_{ht}$ ore "equivalenti" espresse in secondi ($t^* = 611.44 \times 3600 = 2201036 \text{ s}$);

- 9) iterazione tra il passo 6) ed il passo 8) fino a che la soluzione converge ($T_{b,i+1} = T_{b,i}$).

Utilizzando tale procedura, è stata calcolata la lunghezza di ciascuna delle tre sonde che costituiscono il campo geotermico per il caso in esame ($L_b = 190 \text{ m}$). La distanza tra le tre sonde è stata fissata pari a 8 m, in modo da ridurre l'interferenza termica tra le verticali e consentire la "rigenerazione" della risorsa geotermica nel periodo estivo.

Il *COP* medio invernale che caratterizza il funzionamento della pompa di calore è quello di progetto (punto 1, *COP* = 5.66) al quale corrisponde un consumo di energia elettrica per il funzionamento della pompa di calore pari a circa $E_{ele} = 2085 \text{ kWh}_{ele}$.

Se fosse stato scelto un *COP* di progetto più basso (ad esempio *COP* = 4.5) la lunghezza di ciascuna delle sonde sarebbe stata limitata a circa $L_b = 140 \text{ m}$, con un risparmio dei costi d'investimento iniziali del 35%. Di contro, l'efficienza energetica sarebbe ridotta del 26% per effetto dei maggiori consumi elettrici della pompa di calore ($E_{ele} = 2629 \text{ kWh}_{ele}$).

Bibliografia

- ASTM D5334-05, "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005
- Côté J, & Konrad JM (2005) "A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials", Canadian Geotechnical Journal, 42:443–458.
- Ingersoll LR (1948) "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump", ASHVE Transactions, Vol.54.
- Johansen O (1975) "Thermal conductivity of soils". Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim, CRREL draft transl. 637, 1977.
- Lamarche L, Kaji S, Beauchamp B (2010) "A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems", Geothermics, 39(2):187–200.

Tab 1. Misure di conducibilità termica effettuate in laboratorio

Campione	profondità dal p.c. [m]		S _r	n	λ [W/m K]
1	34,5	35,0	0,91	0,34	1,50
2	57,0	57,5	0,91	0,34	1,53
3	60,0	60,5	0,88	0,33	1,91
4	72,5	73,0	0,95	0,35	1,94
5	75,0	75,8	0,86	0,34	1,39
6	77,5	78,0	0,90	0,34	1,42

Tab 2. Conducibilità termiche elaborate utilizzando il modello Côté e Konrad (2005)

Campione	λ _{sat} [W/m K]	λ _{dry} [W/m K]	K _e	λ _s [W/m K]
1	1,58	0,29	0,95	2,6
2	1,57	0,29	0,95	
3	2,03	0,30	0,93	3,7
4	1,98	0,29	0,97	
5	1,49	0,29	0,92	2,4
6	1,48	0,29	0,94	

Tab 3. Stratigrafia geotermica di progetto

Terreno	profondità dal p.c. [m]		λ [W/m K]	C _p [MJ/m ³ K]
Riporto	0	1	1,0	3,0
Tufi	1	6	1,1	2,7
Limo argilloso e sabbioso	6	10	1,4	2,6
Sabbia, limo, argilla	10	18	1,4	2,6
Sabbia e sabbia ghiaiosa	18	26	1,4	2,8
Sabbia	26	32	1,5	2,6
Argilla sabbiosa	32	150	1,6	2,6

Tab 4. Resistenze termica equivalenti della sonda geotermica

λ _{grout} [W/m K]	R _b [m K/ W]
0,78	0,19
0,82	0,18
1,50	0,13

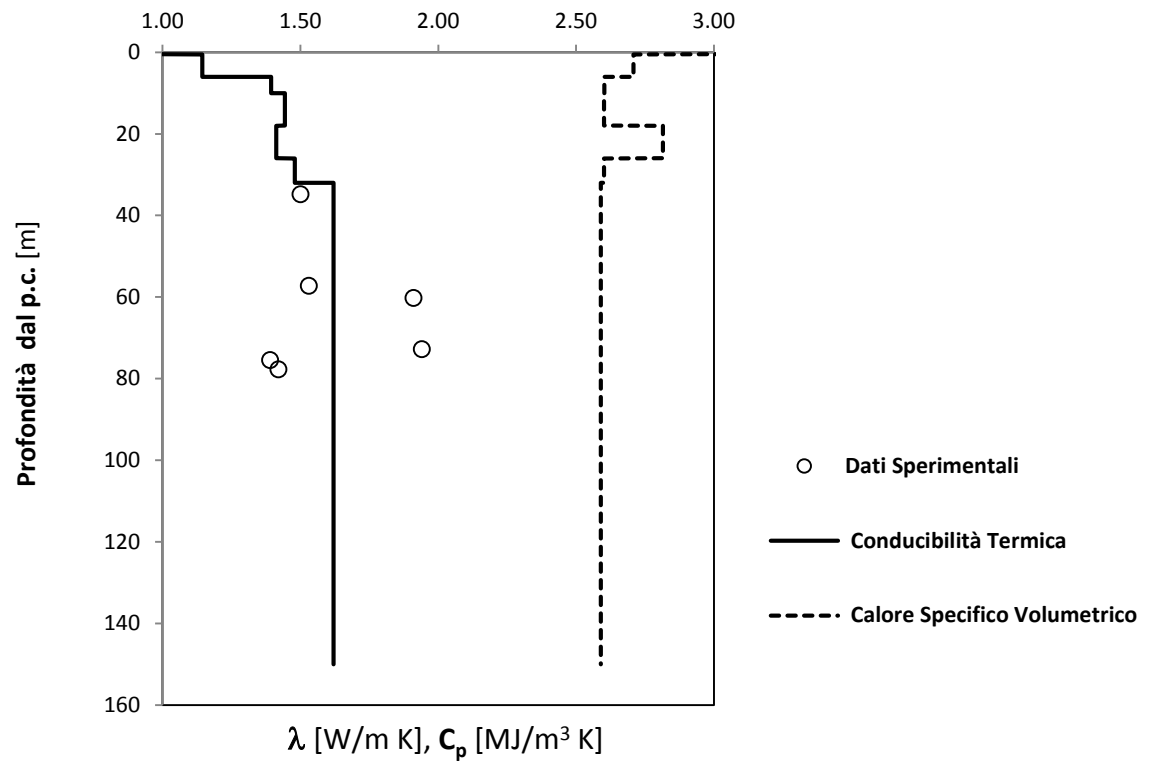


Fig 1. Profilo di conducibilità termica e calore specifico lungo la profondità

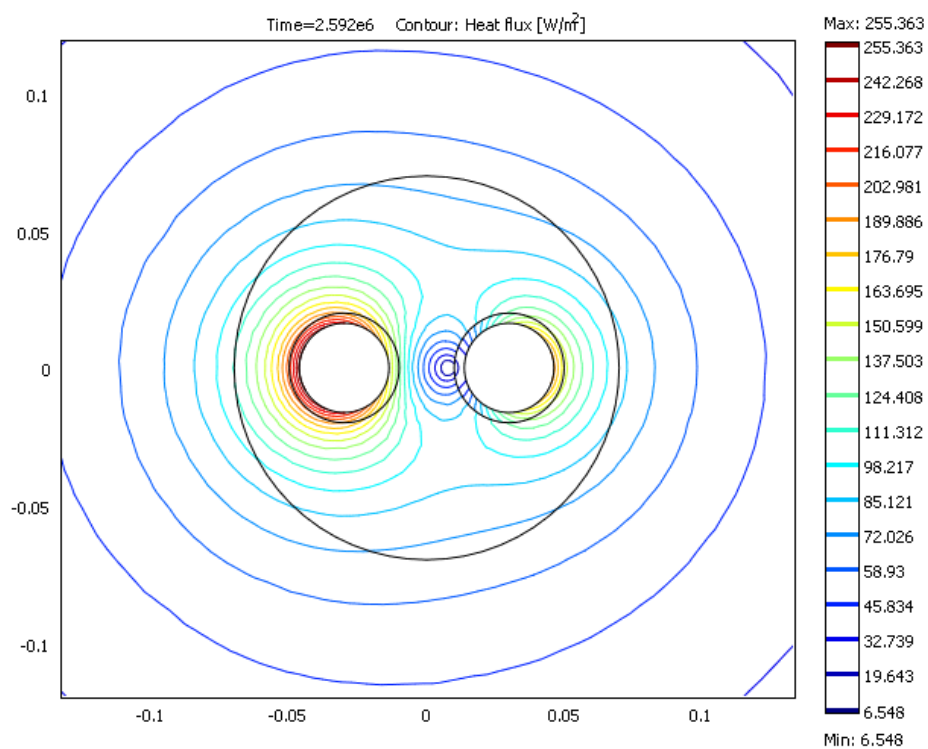


Fig 2. Isotherme nell'intorno della sonda geotermica (simulazioni FEM)