

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA in
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

(CLASSE DELLE LAUREE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE N.8)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA, GEOTECNICA ed AMBIENTALE

RELAZIONE SINTETICA DELL' ELABORATO DI LAUREA

ESTRAZIONE DI CALORE DAL SOTTOSUOLO

MEDIANTE FONDAZIONI ENERGETICHE

RELATORI

Prof. Ing. G. Urciuoli

Prof. Ing. B. D'Acunto

CORRELATORE

Dott. Ing. Marianna Pirone

CANDIDATA

Michela Ciccolella 324/248

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

Premessa

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica e del mondo tecnico scientifico verso il problema della sostanziale dipendenza dall'utilizzo di combustibili fossili per il riscaldamento e la produzione di energia elettrica, con il conseguente aumento delle emissioni di gas serra quali CO₂, ha favorito la ricerca di nuove soluzioni tecniche volte allo sfruttamento di fonti energetiche alternative, tra cui la fonte energetica geotermica. Si sono quindi moltiplicate le applicazioni geotermiche volte non solo alla produzione di energia elettrica ma anche alla climatizzazione residenziale: è in questo contesto che si inserisce la recente diffusione di modelli numerici studiati ad hoc per l'analisi delle dinamiche termiche che interessano i sottosuoli sfruttati per scopi geotermici. I modelli oggi disponibili sul mercato sono tuttavia molto semplificati ed in particolare trascurano il contributo del fenomeno advettivo sull'evoluzione del campo di temperature nel sottosuolo: scopo di questo elaborato di tesi è stato sviluppare un modello numerico implementato in matlab per una migliore analisi degli impatti termici sul terreno tenendo conto anche della presenza della falda in moto.

Abstract

Il termine **geotermia** deriva dai termini greci “gè”, terra, e “thermòs”, calore, e significa letteralmente “calore della terra”: l'energia geotermica è infatti una fonte di energia rinnovabile legata al calore endogeno della Terra; vulcani, sorgenti termali, soffioni e geysers documentano la presenza di calore immagazzinato nella crosta terrestre, derivante dal calore residuo di formazione del pianeta e continuamente alimentato dalle reazioni di decadimento di alcuni isotopi presenti in profondità nelle rocce. Il calore geotermico viene costantemente trasferito dall'interno della Terra verso la superficie e la sua trasmissione avviene per conduzione, ossia senza trasporto di materia, e per convezione (e/o advezione), cioè trasportato da un fluido vettore costituito da acqua (in fase liquida o sottoforma di vapore) o gas. Ogni potenziale impiego della risorsa geotermica dipende dalla temperatura disponibile alle profondità raggiunte dallo scavo; sono state sviluppate specifiche tecnologie per ciascuna applicazione. In relazione al parametro temperatura i sistemi geotermici si possono distinguere in:

- **sistemi ad alta entalpia**, se le temperature disponibili sono superiori ai 150°C;
- **sistemi a bassa entalpia**, qualora esse siano inferiori ai 50°C.

Tra le applicazioni a bassa entalpia va citata la pompa di calore geotermica, oggetto del presente elaborato di tesi. La pompa di calore è una macchina inversa che permette di trasferire calore da un sistema ad una certa temperatura, set A, detto anche sorgente fredda, ad un sistema a temperatura superiore, set B, chiamato pozzo caldo, a spese di lavoro meccanico L, secondo lo schema termodinamico mostrato in figura 1.

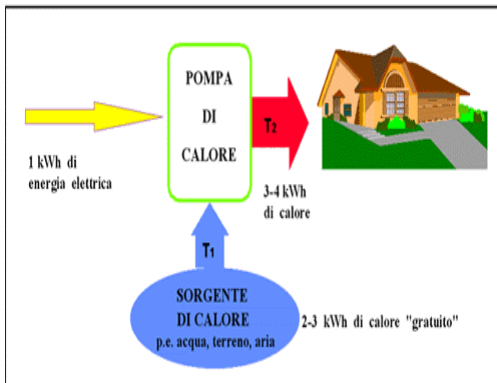


Figura 1-Schema termodinamico di una pompa di calore

Se con il set A si indica una componente dell'ambiente esterno (aria, acqua, suolo) e con il set B l'acqua o l'aria da distribuire all'edificio da climatizzare, in condizioni invernali, il funzionamento della pompa di calore seguirà lo schema mostrato in figura, mentre in condizioni estive si avrà un'inversione dei flussi di calore per permettere la refrigerazione dell'edificio. Il processo avviene

attraverso una serie di scambi termici tra tre fluidi distinti, di tipo e caratteristiche diversi: due (termovettori) esterni alla macchina, che collegano la pompa di calore rispettivamente all'ambiente esterno e a quello da climatizzare attraverso due circuiti distinti (primario e secondario), e uno (refrigerante) interno, che permette lo scambio termico tra i precedenti e che, cambiando di stato passando attraverso opportuni dispositivi, è parte integrante del ciclo frigorifero. L'impiego del terreno consente l'adozione di un sistema di refrigerazione alternativo, noto come *geocooling*, realizzato sfruttando direttamente la differenza di temperatura naturale esistente con l'ambiente da climatizzare. Se vengono soddisfatti questi requisiti è possibile "bypassare" la pompa di calore garantendo il funzionamento del sistema in refrigerazione attraverso lo scambio diretto di calore tra il fluido del circuito primario e quello del circuito secondario. Gli impianti di condizionamento di questo tipo sono composti da tre elementi principali:

- **pompa di calore**
- **il terminale di scambio:** è il dispositivo di scambio termico interno all'edificio;
- **sistema di geoscambio:** che consente lo scambio termico con il sottosuolo.

Una volta scelto il particolare tipo di impianto, è quindi possibile scrivere il modello numerico di riferimento; nello specifico, si considera un impianto a servizio di un edificio composto da quattro appartamenti servito da una pompa di calore collegata a fondazioni energetiche. La geometria studiata è scelta in modo da considerare il solo sottosuolo posto

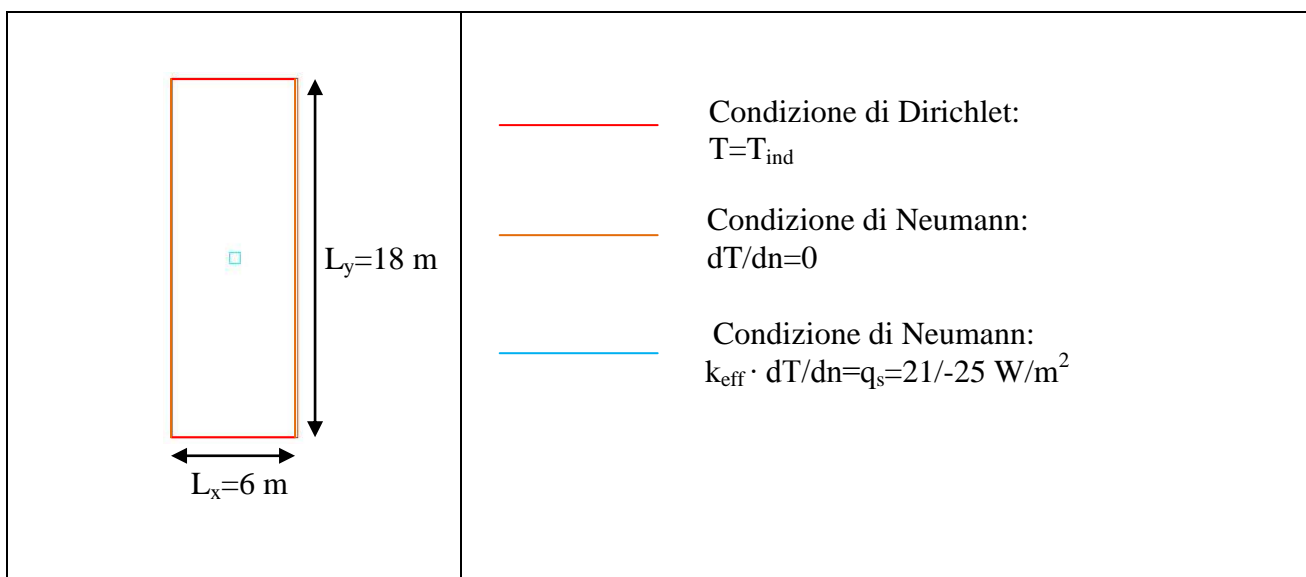
nelle immediate vicinanze della struttura di fondazione, esclusa dal dominio oggetto di studio; si considera una sezione trasversale dell'intorno del palo, le cui dimensioni sono scelte ipotizzando un allineamento orizzontale delle strutture di geoscambio. Il modello matematico è invece formulato a partire dall'equazione di governo del fenomeno studiato, ossia l'equazione convettivo-diffusiva:

$$nR \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} = a \Delta T$$

in cui:

- ✓ n è la porosità del terreno esaminato;
- ✓ R è il coefficiente di ritardo definito come $R = 1 + \frac{(1-n)c_{ps}\rho_s}{nc_{pl}\rho_l}$ in cui con c_{ps} e c_{pl} si indicano rispettivamente il calore specifico della fase solida e liquida mentre con ρ_s e ρ_l le rispettive densità;
- ✓ v_x è la velocità di filtrazione, supposta costante;
- ✓ a è la diffusività effettiva del mezzo definita dal rapporto tra la conduttività effettiva del mezzo e la capacità termica della sola fase liquida.

L'equazione scritta è un'equazione differenziale alle derivate parziali spazio-tempo dipendente, la cui risoluzione è subordinata alla definizione di: 1) condizioni iniziali, date dal campo di temperatura indisturbato iniziale, con valore pari a quello esterno medio annuale, poiché si considera una profondità tale da non risentire delle escursioni termiche esterne, 2) condizioni al bordo sintetizzate in tabella.



L'equazione studiata viene quindi approssimata con un metodo numerico alle differenze finite, il metodo esplicito di Eulero upwind ottenendo la relazione:

$$u_{i,k}^{j+1} = p_2 u_{i+1,k}^j + p_1 u_{i-1,k}^j + q(u_{i,k-1}^j + u_{i,k+1}^j) + (1 - p_1 - p_2 - 2q)u_{i,k}^j$$

In cui:

$$r_1 = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad r_2 = \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \quad s = \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

$$p_1 = \begin{cases} \frac{r_1 a + s |v_x|}{nR} & \text{se } v_x > 0; \\ \frac{r_1 a}{nR} & \text{se } v_x \leq 0; \end{cases} \quad p_2 = \begin{cases} \frac{r_1 a}{nR} & \text{se } v_x > 0 \\ \frac{r_1 a - s |v_x|}{nR} & \text{se } v_x \leq 0 \end{cases} \quad q = \begin{cases} \frac{r_2 a}{nR} & \text{se } v_x > 0 \\ \frac{r_2 a}{nR} & \text{se } v_x \leq 0 \end{cases}$$

Le proprietà termiche del dominio studiato sono invece sintetizzate nella tabella seguente:

	k_{eff} W/m°C	$\rho_s C_{ps}$ MJ/m ³ °K	ρC_p MJ/m ³ °K	n	R	K m/s	$a \cdot 10^6$ m ² /s	$a_{\text{eff}} \cdot 10^6$ m ² /s
Sabbia secca	0.4	1.45	1.45	0.39	-	10 ⁻⁵	0.27	-
Sabbia satura	2.4	1.45	2.6	0.39	1.2	10 ⁻⁵	0.92	0.57
Limo saturo	1.7	1.55	2.5	0.40	1.08	10 ⁻⁶	0.68	0.41
Argilla satura	1.7	1.55	2.5	0.42	1.05	10 ⁻¹⁰	0.68	0.41

Una volta costruito il modello numerico di riferimento è stata sviluppata una serie di simulazioni volte a:

- ✓ determinare l'influenza del termine advettivo sulla risposta termica del sottosuolo allo sfruttamento geotermico;
- ✓ condurre un'analisi parametrica sulla velocità di filtrazione;
- ✓ valutare l'influenza delle condizioni climatiche esterne sulla risposta del sottosuolo;
- ✓ stimare gli effetti termici dello sfruttamento geotermico sul lungo periodo;
- ✓ valutare la risposta termica di un sistema integrato geotermico-solare termico.

Sulla base dei risultati ottenuti si è quindi elaborata una serie di rappresentazioni grafiche che hanno messo in evidenza come:

- ✓ l'aliquota convettiva determini un rapido ritorno del sottosuolo al valore di temperatura indisturbato laddove la trasmissione conduttiva produce generalmente uno squilibrio termico;

- ✓ in presenza di fenomeno convettivo-diffusivo il cono di estrazione presenta un carattere asimmetrico giustificato dalla presenza del flusso advettivo che gioca a favore del prelievo se concorde al flusso termico, a sfavore in caso contrario;
- ✓ l'effetto benefico della componente advettiva decresce al decrescere della velocità di filtrazione fino ad annullarsi per un certo valore di soglia che va valutato caso per caso; al di sotto di tale valore di soglia l'effetto del termine advettivo si risente generalmente nell'asimmetria del cono di estrazione;
- ✓ per valori di velocità inferiori a 10^{-10} m/s si può considerare il processo di scambio termico puramente conduttivo;
- ✓ un funzionamento solo invernale dell'impianto determina in assenza di un termine di trasporto advettivo il depauperamento termico del sottosuolo la cui entità è strettamente legata al carico termico richiesto e quindi alle condizioni climatiche della zona servita dall'impianto;
- ✓ la realizzazione di un impianto geotermico, sempre conveniente in terreni attraversati da un significativo flusso idrico sotterraneo, è quindi un investimento la cui convenienza in assenza di falda va valutata caso per caso, essendo un sistema a efficienza decrescente nel tempo;
- ✓ l'integrazione di un sistema geotermico e di un sistema solare termico può ovviare all'inconveniente della perdita di prestazione nel tempo.

Alla luce dei risultati emersi, risulta evidente che la corretta modellazione della componente di trasporto advettiva è fondamentale in quanto nei terreni sciolti ciò che influenza la risposta termica offerta dal sottosuolo è appunto la componente convettiva dovuta alla falda in moto; il modello numerico sviluppato consente quindi di effettuare le opportune valutazioni sulla risposta termica del sottosuolo sfruttato dall'impianto così da valutare in via predittiva le performance del sistema nel tempo scegliendo così tra le diverse alternative progettuali la più conveniente.