

Introduction to thermal response tests

Introduzione ai test di risposta termica

Matteo Cultrera

Department of Geosciences, University of Padua, Italy
matteo.cultrera@gmail.com

Keywords: *thermal response tests, heat transfer, ground source heat exchanger.*

Parole chiave: thermal response tests, trasmissione del calore, scambiatori di calore nel terreno.

Obiettivi del test di risposta termica

Il test di risposta termica (*thermal response test*, TRT) rappresenta un efficace metodo di misurazione per stimare le diverse proprietà di trasmissione del calore di una sonda geotermica e del terreno circostante al fine di valutare le prestazioni termiche di un sistema di geoscambio.

Tra i parametri più importanti si ricordano la conducibilità termica complessiva del terreno e la resistenza termica del perforo. Anche altri parametri termici sono necessari per il corretto dimensionamento delle sonde, quali la diffusività e la capacità termica e altri parametri idrogeologici, quali la porosità dei terreni, la conducibilità idraulica, la velocità di flusso idrico sotterraneo.

Come indicato anche in altri numeri di questa rivista, vi sono numerose analogie tra l'idrogeologia e il geoscambio/termogeologia (Cultrera 2012a). Infatti, è possibile tracciare un parallelismo tra i TRT e le prove di pompaggio standard normalmente eseguite nell'ambito dell'idrogeologia. In particolare, si considera un sistema che – inizialmente in equilibrio – viene turbato (termicamente); la risposta viene monitorata nel tempo, per valutare le proprietà del sistema. Sebbene questi test in idrogeologia siano stati studiati da molti decenni, le analisi delle misure di temperatura nel contesto dei TRT rappresenta un argomento relativamente nuovo e potrebbe beneficiare dell'applicazione di concetti relativi a prove di pompaggio (Raymond et al. 2011).

Cenni teorici e strumentazione

La strumentazione del TRT è generalmente installata su un rimorchio per un più agevole trasporto presso i siti di prova (Gehlin 2002).

Semplificando, l'apparato per il TRT va collegato a una sonda geotermica a circuito chiuso già posata nel sottosuolo. I parametri che potranno essere controllati direttamente sono (Fig. 1): temperatura in uscita dal TRT (temp. *outlet*); temperatura in entrata (temp. *inlet*); la potenza imposta (*heater*); e la portata del fluido vettore (*pump*), che può essere costituito da acqua.

Il test può essere eseguito sia cedendo calore nel sottosuolo, che estraendone, ovvero raffreddandolo. Alcuni autori ritengono che questa seconda tipologia di prova – almeno dal punto di vista teorico – risulti più appropriata in quanto un incremento del calore induce una riduzione del contenuto d'acqua nel sottosuolo, con conseguente modifica delle condizioni al contorno del test stesso (Signorelli et al. 2007).

La potenza scambiata (P) è funzione della differenza di tem-

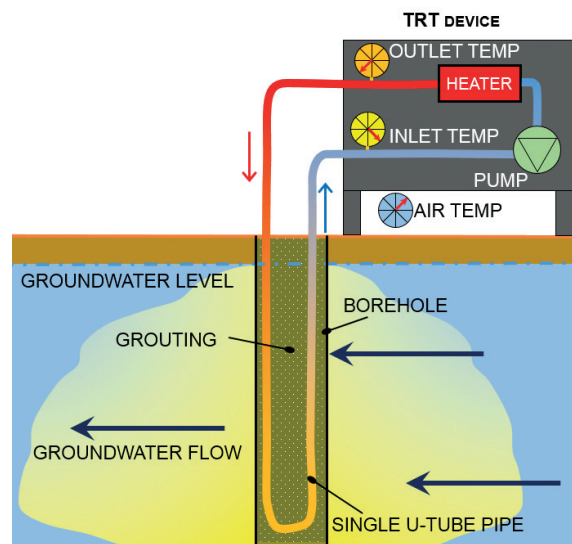


Fig.1: Schema semplificato di un dispositivo standard per la realizzazione di prove di risposta termica.

Fig.1: Example of a standard system to perform thermal response tests.

peratura tra quella imposta in uscita e quella registrata in ingresso ($T_{out}-T_{in}$), a parità di portata del fluido termovettore (Q_f) oltre alla capacità termica di quest'ultimo (la capacità del sistema di immagazzinare e rilasciare il calore, ρc_f):

$$P = \rho c_f * Q_f * (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

La temperatura in ingresso (quindi in uscita dalla sonda geotermica, T_{in}) dipende dalla conducibilità termica volumica λ , dalla capacità termica volumica del mezzo circostante (ρc), dalla porosità (Φ), dalla permeabilità idraulica k e dalla velocità di flusso idrico sotterraneo v_D :

$$T_{in} = f(\lambda, \rho c, \Phi, k, v_D) \quad (2)$$

La definizione dei principali parametri termici e idrogeologici, pertanto, richiede l'utilizzo dei termini noti (temperatura e portata del fluido vettore), oltre alla definizione delle condizioni iniziali del sistema.

Condizioni al contorno

Temperatura indisturbata del terreno

La misura iniziale della temperatura del terreno indisturbato rappresenta uno dei parametri più importanti per una corretta progettazione di un impianto di geoscambio (pompe di calore); inoltre una buona stima della temperatura del terreno indisturbato risulta fondamentale per la corretta progett-

tazione delle sonde geotermiche. Allo stesso tempo, tale informazione è indispensabile per calcolare la resistenza termica del pozzo. Pertanto, la temperatura del terreno indisturbato dovrebbe essere determinata accuratamente prima di dare seguito al TRT (Gehlin e Nordell 2003).

Un metodo comune per determinare la temperatura del terreno indisturbato è quello di misurare la temperatura nel perforo facendo circolare il fluido vettore in assenza di riscaldamento per almeno 30 minuti. In tal modo, la temperatura del fluido così registrata corrisponde alla temperatura media del terreno indisturbato (Zhang et al. 2014).

Temperatura e condizioni esterne

I dispositivi TRT sono spesso dotati di termometri esterni in grado di misurare e registrare le variazioni di temperatura dell'aria, poiché tale parametro tende ad avere un impatto non trascurabile nei primi metri del sottosuolo, dove le variazioni diurne e stagionali inducono un significativo impatto nel trend generale delle temperature. Tale impatto è ancora più rilevante nella fascia vadosa e per sonde geotermiche superficiali.

Impatto delle acque sotterranee nel thermal response test

Gli impianti a circuito chiuso, sono prevalentemente (ma non esclusivamente) installati in terreni a bassa permeabilità, dove la conduzione rappresenta il meccanismo dominante di trasferimento del calore (Cultrera 2012b).

In ogni caso, anche per sistemi in cui il trasferimento di calore avviene prevalentemente per conduzione, il flusso delle acque sotterranee non dovrebbe comunque essere sottovalutato. Infatti, il movimento delle acque sotterranee migliora anche sensibilmente il trasferimento di calore tra il fluido circolante nel circuito e il terreno.

Nel caso in cui la fase advettiva non sia trascurabile una soluzione di tipo analitico potrebbe risultare inadatta per una corretta stima di tutti quei processi/parametri che contribuiscono all'interpretazione del TRT. Per tale ragione, in questi casi un TRT può correttamente essere interpretato mediante il ricorso ad un codice numerico, che tenga conto sia dell'equazione del trasporto del calore che quella relativa al flusso delle acque sotterranee (Brunner e Simmons 2012). Il modello numerico fornisce una stima più affidabile della conducibilità termica del sottosuolo poiché è in grado di rappresentare fenomeni diversi fenomeni che interagiscono con il calore ceduto durante il TRT.

Modelli matematici per il thermal response test

La letteratura scientifica abbonda di modelli matematici in grado di simulare sonde verticali nei TRT, la maggior parte dei quali sono basati su approcci di tipo analitico, metodi numerici o misti.

Il ricorso a metodi analitici nel calcolo del trasporto del calore ebbe inizio già negli anni Venti e in anni più recenti si assiste a un incremento delle soluzioni numeriche ed ibride (analitico e numerico combinate), grazie soprattutto allo sviluppo dei codici di calcolo da una parte e delle macchine calcolatrici dall'altra.

Approcci analitici

Sorgente lineare

Il modello analitico line source model (LSM, modello della sorgente lineare) assimila l'asse del foro ad una retta verticale, quale sorgente del calore stesso. Il modello ignora i dettagli della geometria complessa della sonda geotermica a U e le differenze delle proprietà termiche tra boiaccia cementizia e terreno circostante. Pertanto, la temperatura misurata agli stadi iniziali del test tende a discostarsi dal modello rettilineo del LSM soprattutto nei suoi stadi iniziali.

È adottata una resistenza termica complessiva, quale sommatoria di tutte le diverse resistenze termiche tra il fluido circolante e il sottosuolo.

Di seguito si propone l'equazione (integrale esponenziale) che descrive il campo della temperatura è funzione sia del raggio (r) che del tempo (t), secondo un flusso di calore costante q , ceduto nel sottosuolo (Gehlin 2002):

$$T(r, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3)$$

Il termine a include una serie di parametri termici (conducibilità e capacità termica).

Senza entrare nel merito sui diversi metodi di risoluzione di questa equazione, si osserva che l'errore tra valore calcolato dal LSM e reale si riduce significativamente per:

$$\frac{at}{r^2} \geq 5 \quad (4)$$

Dalla precedente relazione, si osserva come l'approssimazione migliora al crescere del tempo di esecuzione del test.

La temperatura del fluido T_f può essere approssimato quindi utilizzando la formula (Hwang et al. 2010):

$$T_f = \frac{q}{4\pi\lambda} \left(\ln \left(\frac{4at}{r^2} \right) - \gamma \right) + qR_b + T_0 \quad (5)$$

dove γ è la costante di Eulero (0.5772...), T_0 è la temperatura indisturbata del sottosuolo ed R_b la resistenza di foro.

È quindi possibile confrontare la temperatura del fluido tra quella stimata dalla soluzione analitica e quella effettivamente misurata.

Sorgente cilindrica

Una evoluzione del precedente metodo analitico è costituito dal modello della sorgente cilindrica, nel quale la sorgente lineare precedentemente descritta viene estesa ad una sorgente cilindrica di raggio costante (Ingersoll et al. 1954).

In genere, tale modello prevede la definizione della temperatura esterna del cilindro.

Anche in questo caso esistono diverse possibili soluzioni. Il risultato finale di tali soluzioni suggerisce in ogni caso un tempo di analisi sufficientemente lungo per ovviare ai possibili scarti tra i valori predetti e quelli reali, legati alla semplificazione dei parametri dei materiali che costituiscono l'intorno della sonda geotermica.

Metodi numerici

Un importante vantaggio dei modelli numerici è che possono simulare più fedelmente i TRT, includendo, tra le altre cose: variazioni della potenza termica e delle fluttuazioni della portata del fluido, la disomogeneità del terreno e del foro, il gradiente geotermico, la presenza di flusso delle acque sotterranee a diverse profondità, temperatura, direzione.

Tra gli svantaggi, si ricorda che lo sviluppo di un modello numerico è più complesso in quanto richiede la precisa definizione della geometria del sistema. Inoltre, risulta necessario conoscere i numerosi parametri termici ed idrogeologici.

Conclusioni

Oggigiorno, l'importanza del TRT per la corretta progettazione di sistemi a pompa di calore geotermica non è più in discussione; tale test, viene infatti richiesto in tutti gli standard di riferimento, oltre che nelle linee guida, regolamenti, norme (ASHRAE, ISO, DVI, ecc.). Inoltre, le diverse linee guida insistono sul concetto che il test dovrebbe essere protratto per un periodo non inferiore alle 48-72 ore, in modo da stimare con maggiore precisione le proprietà termiche dei terreni circostanti le sonde geotermiche.

Come detto, la conoscenza delle proprietà termiche del sottosuolo è un prerequisito indispensabile per la corretta progettazione per qualsiasi tipologia di scambiatore di calore nel sottosuolo sonde geotermiche.

La scelta del dispositivo per il TRT e l'interpretazione dei risultati deve essere valutata di volta in volta a seconda delle necessità progettuali, tempi di esecuzione, budget a disposizione del progettista. Si ricorda che un'accurata valutazione del rendimento delle sonde geotermiche si ripercuote sulla corretta selezione della pompa di calore, sulla scelta del tipo di sonda geotermica e sulla sua profondità.

Una valutazione preliminare delle principali caratteristiche termiche e idrogeologiche del sottosuolo consentono di massimizzare gli investimenti economici e di ridurre l'impatto ambientale indotto nel sottosuolo. In una parola, una corretta progettazione si accorda perfettamente con il concetto di sostenibilità.

BIBLIOGRAFIA

- Brunner P, Simmons CT (2012) HydroGeoSphere: a fully integrated, physically based hydrological model. *Ground Water* 50:170-176. doi: 10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x.
- Cultrera M (2012a) La termogeologia, una nuova branca dell'idrogeologia? "Thermogeology, a new branch for hydrogeology?" *Ital J Groundw* 1:2. doi: 10.7343/AS-007-12-0007.
- Cultrera M (2012b) Sistemi a circuito aperto/circuito chiuso: un confronto "Open loop and close loop. A comparison". *Ital J Groundw* 2:2. doi: 10.7343/AS-010-12-0019.
- Gehlin S (2002) Thermal response test. Methods development and evaluation. Department of Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- Gehlin S, Nordell B (2003) Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. Available from: <https://pure.ltu.se/portal/files/1542127/Article.pdf>
- Hwang S, Ooka R, Nam Y (2010) Evaluation of estimation method of ground properties for the ground source heat pump system. *Renew Energy* 35:2123-2130. doi: 10.1016/j.renene.2010.01.028
- Ingersoll L, Zoble O, Ingersoll A (1954) Heat conduction with engineering. Geological and other application. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Raymond J, Therrien R, Gosselin L, Lefebvre R (2011) A review of thermal response test analysis using pumping test concepts. *Ground Water* 49:932-945. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x.
- Signorelli S, Bassetti S, Pahud D, Kohl T (2007) Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics* 36:141-166.
- Zhang C, Guo Z, Liu Y, et al (2014) A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems. *Renew Sustain Energy Rev* 40:851-867. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.018