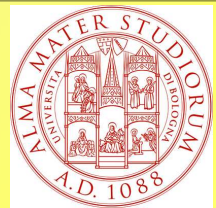


Thermal Response Test: a geostatistical approach

R. Bruno (a), S. Focaccia (a) & F. Tinti (a)

(a) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali – Università di Bologna



ABSTRACT

Il Thermal Response Test (TRT) è un test in situ utilizzato per ottenere il valore di conduttività termica dei terreni adibiti all'installazione degli impianti geotermici a bassa entalpia. I risultati del test sono influenzati da fattori statici, come le caratteristiche termiche del foro, o dinamici, come le fluttuazioni della potenza iniettata e della temperatura esterna [3]. Nell'ambito della ricerca del DICAM sulla geotermia a bassa entalpia, è stato sviluppato un approccio probabilistico per la valutazione della conduttività termica. Tale approccio permette di caratterizzare e modellizzare la variabilità dell'informazione restituita dal test, filtrando opportunamente i fattori esterni che influenzano i dati registrati e che possono rendere problematica la definizione quantitativa delle proprietà termiche dei terreni. In particolare, la metodologia si basa sulla modellizzazione geostatistica delle variabili registrate durante il test. Tutta l'analisi dati è stata condotta su test realmente eseguiti, forniti dall'azienda GEO-NET e dal sotto-comitato dell'Agenzia Internazionale dell'Energia incaricato dello sviluppo del TRT, al quale il DICAM partecipa. Infine, nell'ambito di tale Comitato, è stato progettato un sistema innovativo di TRT, che sarà messo a punto e sperimentato sul futuro campo sonde di prova della Facoltà di Ingegneria di Bologna.

THERMAL RESPONSE TEST

Attualmente, alla scala del reservoir geotermico, la misura sperimentale della conduttività termica con il maggiore grado di precisione risulta essere quella dedotta di test di risposta termica [2]. La prova consiste in una simulazione di funzionamento del sistema per un tempo limitato, effettuando un'iniezione/estrazione di calore all'interno del geo-scambiatore tramite un'apposita apparecchiatura (tester).

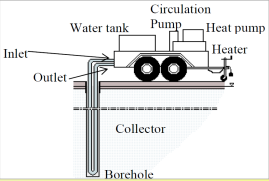


Figura 1 - Strumentazione per il TRT

Un'analisi delle variazioni delle temperature del fluido all'interno del circuito, consente di ricavare una stima delle proprietà termiche medie del reservoir geotermico nell'immediato intorno del foro.

INTERPRETAZIONE DEL TRT E PROBLEMATICHE RICONTRATE

Per l'interpretazione dei risultati esistono vari modelli possibili, tutti basati sulla teoria della conduzione termica; uno di questi è il modello di sorgente lineare (Ingelsson e Plass, 1948), a potenza costante, che è stato calato sul caso delle sonde geotermiche verticali tramite l'equazione semplificata di Hellstrom, Mogensen ed Eskilson (1987):

$$\Delta T(r_b, t) = q \cdot (R_b + R_g) = q \cdot R_b + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right)$$

Equazione 1

dove:

- t durata del test [s];
- q potenza termica iniettata / estratta nella sonda per metro lineare [W/m];
- R_b resistenza termica del foro (borehole) [K/(W/m)];
- R_g resistenza termica del terreno nell'intorno del foro (ground) [K/(W/m)];
- λ conducibilità termica del terreno [W/(m·K)];
- c capacità termica volumetrica del terreno [J/(m³·K)];
- a diffusività termica; è pari a λ/c [m²/s];
- r_b raggio del foro (borehole) [m];
- γ costante di Eulero, pari a 0,5772.
- T_f temperatura media del fluido iniettato ed estratto nella sonda misurata a bocca foro (fluid) [K];
- T_g temperatura del terreno indisturbato (ground) prima dell'apporto di calore [K];
- $\Delta T(r_b, t) = (T_f - T_g)$ differenza fra la temperatura media del fluido e del terreno [K]; è funzione del raggio del foro e del tempo.

Risolviendo tale equazione in T_f , e esprimendola in funzione del $\ln(t)$, l'equazione assume la forma di una retta: $T_f = b \ln(t) + m$, ove il coefficiente angolare è inversamente proporzionale alla conducibilità termica, $b = k/\lambda$. Ciò consente, noto b , di ricavare la conducibilità media del terreno λ , indipendentemente dal tempo.

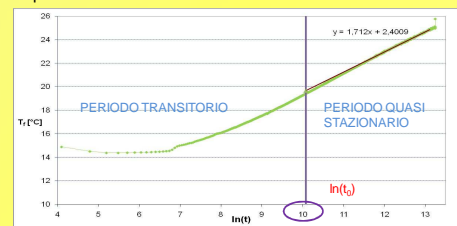


Figura 2 - Grafico tradizionale T-ln(t), in rosso la retta di regressione e in viola il t_0

Nella figura 2 è illustrata l'analisi tradizionale del TRT, ove la T_f misurata è riportata in funzione del $\ln(t)$. Una regressione eseguita sul tratto lineare permette il calcolo del coefficiente angolare b [4].

L'equazione della sorgente lineare, nella sua forma semplificata, è valida dopo un periodo transitorio (cfr. fig.2) e la sua accuratezza aumenta in linea teorica nel corso della durata del test. Per tale motivo, le criticità della soluzione sono:

- t_0 tempo di inizio dell'analisi dei dati;
- t_f tempo di termine della prova;
- dq/dt variabilità della potenza termica iniettata/estratta.

Con il metodo tradizionale, vengono adottate le seguenti approssimazioni:

- t_0 viene valutato analiticamente sulla base della stima del tempo impiegato dal flusso di calore per oltrepassare la cementazione e penetrare nel terreno;
- t_f si pone per convenzione pari a circa 72 ore, sufficienti per garantire la significatività del risultato;
- dq/dt si considera nulla poiché si cerca di mantenere costante la potenza fornita dal tester.

L'APPROCCIO GEOSTATISTICO

Come si vede dalla fig. 2, la T_f misurata presenta una significativa irregolarità pur rispettando in media il trend lineare come da teoria. I parametri ricavati dal test sono dunque dei parametri stimati [5].

È stato quindi proposto un approccio probabilistico [1] finalizzato a ottimizzare queste stime ed a controllarne la precisione.

Il modello geostatistico è il seguente

$$T_f = g(t) + Y(t) \quad g(t) = b \cdot \ln(t) + m$$

Equazioni 2 e 3

Ove

- T_f Funzione Aleatoria nel tempo,
- $g(t)$ valore atteso di T_f (la sua media) che esprime la teoria della sorgente lineare
- $Y(t)$ termine aleatorio che esprime le fluttuazioni sperimentali attorno alla media.

Il coefficiente angolare della regressione è una stima lineare a partire dai dati disponibili, ove i pesi μ_α risultano dalla minimizzazione dei residui:

$$b^* = \sum \mu_\alpha \cdot T_f(t_\alpha) \quad \text{Equazione 4}$$

L'approccio probabilistico consente di calcolare la precisione di tale stima mediante la varianza dell'errore di stima:

$$\sigma_e^2 = \sum \sum \mu_\alpha \mu_\beta \gamma(h_{\alpha\beta}) \quad [5] \quad h_{\alpha\beta} = |t_\alpha - t_\beta| \quad [6]$$

$$\gamma_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \cdot \text{var}(T_f(t_\alpha) - T_f(t_\beta)) = \frac{1}{2} \cdot E(Y_\alpha - Y_\beta)^2 \quad [7]$$

Equazione 5, 6 e 7

Ove:

- $h_{\alpha\beta}$ passo temporale
- $\gamma(h_{\alpha\beta})$ funzione variogramma della funzione aleatoria
- Y fluttuazioni attorno alla media.

Tempo di inizio della prova t_0

Il nostro approccio deriva dalla verifica del t_0 calcolato con il metodo analitico tradizionale iterativo. Si parte da una valutazione iniziale:

$$t_0 \geq \frac{5 \cdot a}{r_b^2} \quad \text{Equazione 8}$$

dove ad a si attribuisce un valore ipotizzato inizialmente sulla base di valori bibliografici.

Si considerano quindi della finestre temporali mobili di intervallo costante sulle quali si effettua il calcolo del coefficiente angolare della retta di regressione.

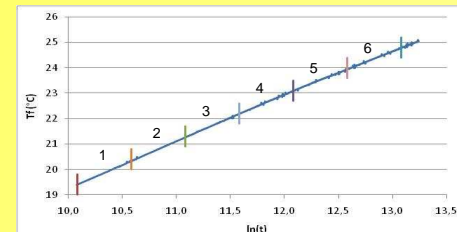


Figura 4 - Visualizzazione delle finestre mobili di dimensione costante, sul grafico $T_f - \ln(t)$

Ad ogni valore stimato viene calcolata la rispettiva precisione, che è variabile nel tempo pur essendo gli intervalli costanti. Questo perché la regressione di fatto opera sui $\ln(t)$. Ipotizzando l'errore di stima una variabile gaussiana centrata, l'intervallo $b^* \pm \sigma$ ha circa il 68% di probabilità di contenere il valore vero. Considerato che il t_0 identifica il momento in cui può essere considerata applicabile la teoria della sorgente lineare, conseguentemente dopo il t_0 vale il suddetto calcolo della precisione della stima del b^* . Se dunque non c'è congruenza fra il valore vero della pendenza e l'intervallo di variabilità teorico della stima, possiamo concludere che non si può applicare l'ipotesi della teoria della sorgente lineare.

Il calcolo tradizionale del b ha una precisione molto grande, che consente di utilizzare tale valore come il valore vero. Si identifica quindi il t_0 come il tempo in cui il coefficiente angolare "vero" fuoriesce dalla banda di variabilità teorica.

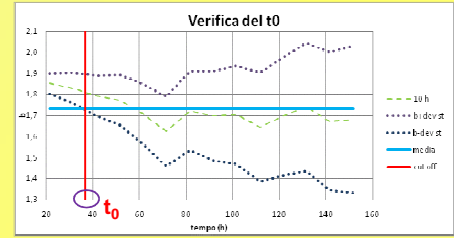


Figura 5 - Valutazione del t_0 corretto; la fascia delimita il campo di validità della pendenza. La linea rossa ci dà il t_0 e coincide con il punto in cui la pendenza media non rientra più nella fascia

Tempo di fine test t_f

La metodologia proposta considera finestre di intervalli di tempo crescenti in cui l'estremo inferiore è fisso nel tempo, t_0 , e l'altro aumenta sistematicamente. L'incremento della lunghezza delle finestre comporta un aumento della precisione della stima del b . Si può quindi scegliere come t_f il tempo in cui la precisione, misurata dalla varianza di stima, raggiunge un livello ritenuto accettabile. Il vantaggio principale di questa metodologia è che non è più necessario scegliere il t_f contestualmente all'esecuzione delle misure, bensì si può scegliere in anticipo rispetto ad esse (per es. alla fine della seconda giornata), perché è indipendente dai valori misurati. La precisione definita per il t_f caratterizzerà la stima finale del coefficiente angolare.

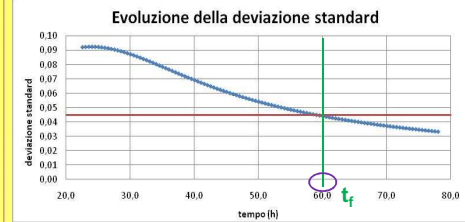


Figura 6 - Evoluzione della deviazione standard per le diverse finestre temporali shifting il tempo; in rosso il valore di cut off per la scelta del t_f

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha mostrato i vantaggi di un approccio geostatistico nell'analisi dei risultati di un TRT, ai fini del calcolo della conduttività termica dei terreni. Essi sono:

- 1) Spiegare / interpretare la variabilità delle misure;
- 2) Rendere oggettiva la scelta del momento in cui interrompere il ciclo iterativo del calcolo del t_0 ;
- 3) Consentire la definizione del t_f con un criterio oggettivo, anticipato rispetto ai valori da misurare;
- 4) Migliorare la precisione del calcolo di b , sia nel caso si adotti il sistema tradizionale, sia attraverso la tecnica della deriva (vedi Appendice).

Uno sviluppo futuro dell'approccio geostatistico è quello di studiare gli effetti diretti della variabilità della potenza fornita dal tester sulle fluttuazioni della temperatura del fluido.

APPENDICE: L'ANNEX 21

Il DICAM partecipa al Comitato Annex 21 sul Thermal Response Test dell'IEA-ECES (International Energy Agency- Energy Conservation through Energy Storage). Nell'ambito di tale comitato è stato elaborato un metodo di calcolo della pendenza alternativo alla retta di regressione lineare: il metodo geostatistico della deriva.



Figura 7 - Logo dell'Annex 21

$$D_r(h) = E [T_f(\ln(t) + h) - T_f(\ln(t))] = g(\ln(t) + h) - g(\ln(t)) = b \cdot h \quad [9]$$

$$b^* = \frac{D_r^*(h)}{h} = \frac{1}{h \cdot n_h} \sum_{i=1}^{n_h} [T_f(\ln(t_i) + h) - T_f(\ln(t_i))] \quad [10]$$

Equazione 9 e 10 - Calcolo teorico e sperimentale della deriva, ai fini dell'identificazione del coefficiente b .

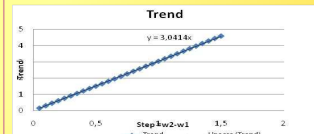


Figura 8 - Deriva su un caso reale

I risultati di tale lavoro sono stati presentati in Aprile 2010 all'Università di Bologna in occasione del 6th Expert Meeting del Comitato Internazionale e verranno pubblicati nel rapporto finale 2010 del Comitato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Matheron G. (1978) - "Estimer et choisir: essai sur la pratique des probabilités", Ecole des Mines de Paris
- [2] Gehlin, S. (2002) - "Thermal response test, method, development and evaluation" PhD Thesis, Lulea University, Sweden
- [3] Tinti F. (2008) - "Geotermia per la climatizzazione" Dario Flaccovio Editore, Palermo
- [4] Bruno R., Tinti F., Focaccia S., Mantar S. (2009) - "Recent developments of Thermal Response Test" Geotherm Expo, Ferrara Fiere
- [5] Bruno R., Focaccia S., Tinti F. (2010) - "Geostatistical modeling of a shallow geothermal reservoir" European Geothermal PhD Day, Potsdam