

Conducibilità termica distribuita da un test di risposta termica (TRT) su una sonda geotermica

Thermal conductivity distributed from a Thermal Response Test (TRT) in a borehole heat exchanger (BHE)

Blasi A., Menichetti M.

Riassunto: Il *Thermal Response Test (TRT)* rappresenta uno degli strumenti più versatili per determinare i parametri termici del sottosuolo necessari alla progettazione e al dimensionamento delle sonde geotermiche. Il *TRT* permette di ricavare la conducibilità termica (λ) media dell'intero spessore di terreno attraversato, la resistenza termica del foro (R_b) nel sistema sonda / cemento / terreno e la temperatura indisturbata del terreno (T_g).


La temperatura del sottosuolo è influenzata da fattori climatici, topografici, geologici e idrogeologici; le variazioni verticali di temperatura permettono di determinare le caratteristiche termiche in funzione della litologia e soprattutto della presenza di falde freatiche.

Parole chiave: Test di Risposta Termica (*TRT*), conducibilità termica, sonda geotermica, profili verticali di temperatura, geoscambio.

Keywords: *Thermal Response Test (TRT)*, *thermal conductivity*, *borehole heat exchanger (BHE)*, *vertical temperature log*, *geoexchange*.

I profili verticali di temperatura, ottenuti durante e dopo il *TRT*, consentono di ricavare la conducibilità termica distribuita per ciascun intervallo stratigrafico. È possibile verificare il contributo che le differenti litologie e la presenza della falda acquifera portano allo scambio termico terreno/sonda, il cosiddetto geoscambio. Le misure eseguite in un sito sperimentale mostrano come le litologie marnose e marnoso-argillose abbiano una maggiore inerzia termica rispetto ai livelli arenacei e quindi valori di conducibilità termica inferiori. Questi ultimi sono caratterizzati da una conducibilità termica più alta e tendono a raffreddarsi molto più velocemente favorendo il geoscambio. La determinazione della conducibilità termica distribuita permette di stabilire importanti indicazioni in fase di progettazione per ottenere la massima efficienza nello scambio termico, rendendo l'installazione maggiormente vantaggiosa dal punto di vista economico e con un ridotto impatto sull'ambiente.

Abstract: *The Thermal Response Test (TRT) is the most versatile tool to determine the thermal propriety of the underground for designing and sizing of the borehole heat exchangers (BHE). The TRT permits to get the average thermal conductivity (λ) across the whole stratigraphy, the thermal resistance (R_b) of the borehole / grout / rocks and the undisturbed temperature of the soil (T_g). The ground temperature is influenced by climate, topographical, geological and hydrological factors. Vertical temperature changes allows to get the relationships with the lithology and especially with the groundwater. Vertical temperature log, acquired during and after the TRT, permits to calculate the distributed thermal conductivity over each stratigraphic interval. This method permits to verify how the different lithologies and the groundwater contribute to the heat exchange in the borehole/ground system, so called geoexchange. The experimental site test indicates that the marls and clayed-marls levels show a higher thermal inertia than the sandstone ones and then lower values of thermal conductivity. The sandstones have a higher thermal conductivity with a rapid cooling and they provide the main contribution to the ground heat exchange. The distributed thermal conductivity is an useful tool for designing the BHE with the best performance, a better economic return and with low environmental impacts.*

Alessandro BLASI 
 Marco MENICHETTI
 Università di Urbino "Carlo Bo"
 Dipartimento di Scienze della Terra,
 della Vita e dell'Ambiente (DiSTeVA)
 Campus Scientifico "Enrico Mattei"
 61029 Urbino
 alessandro.blasi@uniurb.it
 marco.menichetti@uniurb.it

Ricevuto: 19 giugno 2012 / Accettato: 18 ottobre 2012
 Pubblicato online: 30 dicembre 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

Introduzione

L'utilizzo delle proprietà termiche del sottosuolo per il condizionamento degli edifici attraverso il **geoscambio**, realizzato con un sistema terreno / sonda geotermica / pompa di calore, è una tecnologia relativamente semplice ma particolarmente sensibile alla geologia dell'area. Questa metodologia può essere utilizzata in quasi tutti i contesti geologici e il suo impiego è influenzato dalle proprietà termiche e fisiche del sottosuolo, in particolare dalla sua conducibilità (λ) e capacità termica (c). Questi parametri sono in stretta relazione con la litologia, l'idrogeologia e le caratteristiche geologiche generali del sottosuolo le quali possono essere indagate con delle prove in situ, note come test di resa termica. I test di rendimento termico sono definiti in letteratura con gli acronimi *TRT* (*Thermal Response Test*) o *GRT* (*Ground Response Test*) (Ingersoll et al., 1954). Queste prove sono eseguite su sonde geotermiche già messe in opera e permettono di ricavare la conducibilità termica (λ) della colonna di terreno attraversata dalla sonda stessa e di valutare la resistenza termica del foro (R_b) (Gehlin, 2002). I test sono eseguiti su scambiatori termici per i quali sono già stati prestabiliti la geometria (U, doppia U, spirale), la profondità di perforazione e il materiale di riempimento (Eskilson e Claesson, 1988). Un *TRT* permette di ricavare la conducibilità termica "effettiva" che integra le caratteristiche geologiche del terreno lungo tutta la colonna della sonda, includendo la presenza eventuale di falde, il tipo di riempimento della perforazione, il fluido termovettore e le caratteristiche della sonda stessa (Paud e Matthey, 2001; Menichetti et al., 2009). Durante il *TRT*, il trasferimento termico, operato dalla sonda verso il terreno circostante, determina una variazione di temperatura che stabilisce l'efficienza della sonda geotermica in esercizio nel corso dell'estrazione o del prelievo di calore. Con questa procedura operativa non si hanno indicazioni sul contributo che il singolo intervallo stratigrafico può apportare allo scambio termico, limitando così molto l'interpretazione geologica dei dati, soprattutto per quanto riguarda la profondità di alloggio delle sonde nel terreno; la perforazione, infatti, influenza in maniera rilevante i costi di realizzazione di un intero impianto per il condizionamento dell'edificio (Menichetti e Renzulli, 2009).

L'obiettivo di questa nota è d'indicare una metodologia operativa nell'esecuzione di un *TRT* per ottenere un profilo verticale della conducibilità termica del sottosuolo. Il nuovo metodo consente di avere indicazioni non solo sull'efficienza del geoscambio complessivo ma anche sul contributo di ciascun intervallo stratigrafico. Dalle informazioni ottenute è possibile eseguire una progettazione che raggiunga la massima efficienza rispetto allo scambio termico, che risulti maggiormente vantaggiosa dal punto di vista economico e che abbia un impatto ridotto rispetto alle modificazioni termiche del sottosuolo.

Metodologie

L'idea di misurare in situ la resa termica del sottosuolo è stata presentata da Morgensen e da altri due studenti della *Royal*

Institute of Technology (KTH), Svezia, durante una conferenza a Stoccolma nel giugno 1983 (Gehlin, 2002). Il metodo proposto utilizza un'apposita apparecchiatura che consente di far circolare all'interno di una sonda geotermica, per molte ore, un fluido termovettore con una potenza termica costante (Fig. 1). Attraverso il monitoraggio continuo della temperatura e della portata del fluido termovettore si porta ed è mantenuto, per un determinato intervallo di tempo, il sistema sonda/terreno in un regime stazionario. Tramite l'analisi dell'andamento della temperatura nel tempo è possibile risalire al valore della conducibilità termica del terreno (λ) e della resistenza termica del foro (R_b) (Eskilson e Claesson, 1988).

In letteratura i modelli che permettono di simulare il processo di trasferimento termico in una sonda geotermica verticale utilizzano analisi numeriche o soluzioni analitiche (Ingersoll et al., 1954).

Nei modelli numerici è assunto un trasferimento termico transitorio per conduzione tra la sonda e il terreno in 1D o 2D. Il processo termico può essere simulato numericamente risolvendo il problema in coordinate cilindriche (Yavuzturk e Spitler, 2001):

$$\frac{\alpha}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \alpha \left(\frac{d^2 T}{dz_b^2} \right) = \frac{dT}{dt} - \frac{H}{\rho c} \quad (1)$$

Dove $H = Q/V_{sonda}$ è il flusso di calore immesso (Q) attraverso il volume della sonda (V_{sonda}) avente superficie r , $\alpha = \lambda/\rho c$ è la diffusività termica della roccia, ρ la densità del terreno, c la capacità termica, z_b la profondità della sonda. In presenza della falda deve essere tenuto in considerazione il suo flusso che complica il problema e aumenta notevolmente i tempi di calcolo; esistono diversi codici di calcolo che permettono di risolvere questo tipo di difficoltà (Austin et al., 2000).

I metodi analitici più comunemente utilizzati sono quello della sorgente lineare (Ingersoll et al., 1954) e quello della sorgente cilindrica (Signorelli, 2004), dei quali esistono diverse varianti (Austin et al., 2000).

Il modello della sorgente termica lineare infinita prevede l'immissione nel terreno, per un certo tempo, di un carico termico q (W/m) che mantiene costante il ΔT , la differenza tra la temperatura in entrata (T_{in}) e quella in uscita (T_{out}) dalla sonda (Ingersoll et al., 1954; Eskilson e Claesson, 1988). Attraverso la variazione dei vari parametri nel tempo è possibile stimare la conducibilità termica (W/mK) media nell'intorno della sonda geotermica. Negli ultimi anni sono state sviluppate alcune apparecchiature di dimensioni ridotte, trasportabili su piccoli automezzi che consentono di eseguire il test nelle più disparate condizioni ambientali e di cantiere. Il modello termico della sorgente cilindrica approssima lo scambio termico in una sonda cilindrica considerata di dimensioni infinite con un flusso termico costante. Il cilindro è dimensionato con un diametro equivalente alle tubazioni della sonda (Signorelli, 2004).

La soluzione per una sorgente cilindrica con flusso termico costante è:

$$T^q(r,t) = \frac{q}{\lambda} G(l,p) \quad \begin{cases} l = \frac{at}{r^2} \\ p = \frac{r}{r_0} \end{cases} \quad (2)$$

Dove $G(l, p)$ è la funzione della sorgente cilindrica:

$$G(l, p) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^{\infty} f\beta d\beta \quad (3)$$

$$f(\beta) = (e^{-\beta^2 z} - 1) \cdot \frac{[J_0(p\beta)Y_1(\beta)J_1(\beta)]}{\beta^2 [J_1^2(\beta) + Y_1^2(\beta)]} \quad (4)$$

Dove J_0, J_1, Y_0, Y_1 sono le funzioni di Bessel del primo e del secondo ordine.

La soluzione è ottenuta attraverso delle procedure interattive che adottano il metodo della sorgente termica cilindrica per calcolare indirettamente la conducibilità termica (Ingersoll e Plass, 1948). La diffusività (α) e la conducibilità termica (λ) effettiva del terreno sono ricavate invertendo il processo usato per calcolare la lunghezza della sonda geotermica. La metodologia è basata su un test termico di diverse ore. La resistenza termica del foro (R_b), derivata da un impulso termico giornaliero, è confrontata con il valore calcolato dal numero di Fourier (l) e dalla funzione della sorgente cilindrica $G(l, p)$. Nella procedura si assume un valore di α e di λ del terreno fino a quando i valori della resistenza termica del foro non coincidono (Menichetti et al., 2009).

La teoria della sorgente lineare è una semplificazione della sorgente cilindrica e deriva dal modello termico di Kelvin, applicato alle sonde geotermiche da Ingersoll e Plass (1948) e sviluppato in seguito da Morgensen (1983) per interpretare il TRT. Questo tipo di approccio adotta la soluzione analitica della risposta di una sorgente lineare all'interno di un mezzo omogeneo isotropo infinito. Il flusso verticale lungo la sonda è assunto trascurabile mentre il flusso laterale è considerato costante. La variazione della temperatura nell'intorno della sonda è in funzione del tempo t , della distanza radiale r_b dall'asse della perforazione e della quantità di calore q iniettata nel terreno (Carslaw e Jager, 1959; Ingersoll et al., 1954):

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_{r_b^2}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong T_0 + \frac{Q/z}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \quad (5)$$

Dove T_0 è la temperatura indisturbata del terreno, q è la quantità di calore costante immessa (Q) in riferimento alla lunghezza della sonda (z), $\gamma = 0.577$ è la costante di Eulero. Questa equazione non è valida per brevi intervalli temporali, poichè la capacità termica delle varie componenti della sonda geotermica ha un'influenza rilevante sul campo termico esterno. Inoltre l'approssimazione dell'integrale comporta un errore massimo del 2.5% quando $ta/d^2 > 5$, indicando con d il diametro della sonda. E' necessario, quindi, togliere dall'analisi del test le prime ore di funzionamento (Ingersoll et al., 1954), denominate "periodo transitorio".

Un altro aspetto importante del TRT è la stazionarietà del sistema nel tempo. Deerman e Kavanaugh (1991) suggeriscono che questo tempo possa essere pari a $z^2/9a$. Inoltre se il test è condotto con una durata di circa $t = 20$ ore si ha una deviazione standard di λ del $\pm 15\%$, mentre per un test della durata $t = 50$ ore si ha una deviazione standard del $\pm 5\%$, quindi è necessario eseguire il test nell'arco di almeno 72 ore. Nel calcolo dell'energia immessa nel sottosuolo attraverso la sonda geotermica, infine, sono considerate le perdite di calore verso l'ambiente esterno lungo le tubazioni e la strumentazione; secondo le situazioni ambientali e le apparecchiature questi valori possono variare tra 1% e 25% dell'energia totale immessa (Fig. 1).

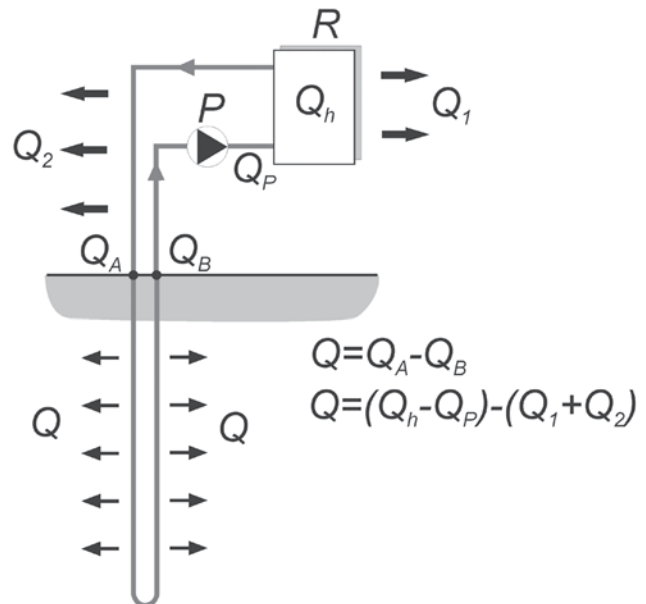


Fig. 1 - Schema di una macchina termica per il Thermal Response Test (TRT) su una sonda geotermica e i bilanci termici. Legenda: R - riscaldatore; P - pompa di circolazione del fluido termovettore; Q_h - calore ceduto dal riscaldatore al fluido; Q_p - calore fornito dalla pompa al fluido; Q_1 - calore disperso dal riscaldatore verso l'ambiente; Q_2 - calore disperso dalle tubazioni verso l'ambiente; Q - calore trasmesso dalla sonda al terreno; Q_A - calore immesso nella sonda geotermica; Q_B - calore in uscita dalla sonda geotermica.

Fig. 1 - Sketch of a Thermal Response Test (TRT) equipment for BHE. Legend: R - heater; P - fluid circulation pump and the energetic thermal balance; Q_b - heat transferred from the fluid heater; Q_p - heat supplied from the pump to the fluid; Q_1 - heat lost from the heater in to the environment; Q_2 - heat lost from the pipes to the environment; Q - heat transfer from BHE to the ground; Q_A - heat input in the BHE; Q_B - heat output from BHE

Per una sorgente lineare di lunghezza z , la temperatura media della sonda T_m causata dal flusso di calore specifico radiale $q = Q/z$ attraverso la sonda stessa è data da:

$$T_m = T(r = r_b, t) + qR_b = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \underbrace{\left\{ qR_b + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] \right\}}_b + T_0 \quad (6)$$

Dove R_b è la resistenza termica del foro (K/Wm^{-1}) considerata tra la parete della perforazione e il fluido di circolazione. Usando una simulazione numerica si dimostra che T_m corrisponde alla media della temperatura in ingresso e in uscita del fluido dalla sonda: $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ (Pahud e Matthey, 2001).

Dall'equazione si denota che T_m è una funzione lineare del logaritmo tempo t :

$$T_m = a \ln(t) + b \quad (7)$$

La conducibilità termica (λ) della roccia può essere quindi ricavata dalla pendenza a della relazione, per cui:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_m(t_2) - T_m(t_1)} \quad (8)$$

Considerando errori sistematici e casuali, che possono aver luogo durante le operazioni di esecuzione di un *TRT*, questa procedura può essere considerata una buona approssimazione della misura della conducibilità termica del terreno con errori del $\pm 10\%$ (Chad et al., 2002).

La precisione del *TRT* è condizionata soprattutto (Menichetti et al., 2009):

- dalle caratteristiche termiche dei riempimenti del foro che generalmente hanno una bassa conducibilità termica (Piscaglia et al., 2009);
- dalle variazioni verticali di flusso di calore dovute alle oscillazioni naturali del gradiente geotermico;
- dal trasferimento termico predominante che avviene per advezione, laddove è presente un sottosuolo con una falda che fluisce con velocità non trascurabile;
- dalla durata dell'esecuzione.

La resistenza termica del foro (R_b) è un parametro importante per il dimensionamento delle sonde geotermiche e può essere ricavato direttamente dall'equazione (6)

$$R_b = \frac{T_s}{q} \quad (9)$$

Dove T_s è la differenza tra la temperatura media del fluido (T_m) e la temperatura del sottosuolo (T_g). Dall'equazione risulta evidente che, durante il test, il valore della conducibilità termica effettiva del substrato varia nel tempo.

L'interpretazione di un *TRT* richiede una conoscenza di tutti i parametri riguardanti la sonda e l'apparecchiatura, la quale tende a mantenere costante sia la potenza termica immessa nel sottosuolo sia il valore del ΔT ; i parametri di temperatura (T_{in} , T_{out}) e la potenza immessa Q sono registrati in continuo per la valutazione della conducibilità termica (Fig. 2).

Il monitoraggio della temperatura esterna, della portata della pompa e della potenza termica in uscita dalla macchina permette di valutare con maggiore accuratezza l'andamento del test e la possibile presenza d'inconvenienti tecnici nel

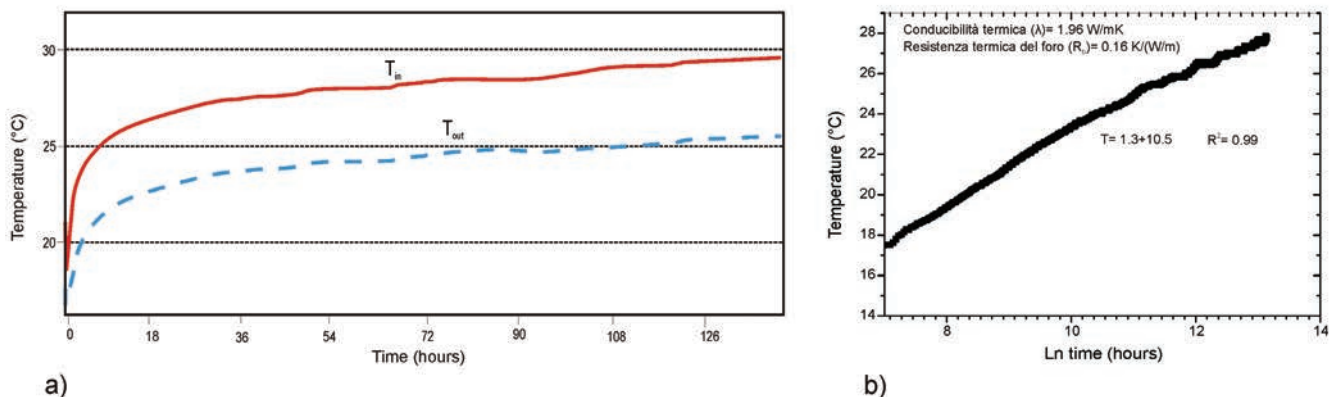


Fig. 2 - Risultati del *Thermal Response Test (TRT)* eseguito su una sonda a U profonda 100 metri: (a) variazione della temperatura in ingresso (T_{in}) e in uscita (T_{out}) nel tempo, (b) valutazione della conducibilità termica usando l'approssimazione della sorgente lineare.

Fig. 2 - Results of a *TRT* in a 100 metres deep BHE: (a) variation of the inlet temperature (T_{in}) and output (T_{out}) over time, (b) evaluation of the thermal conductivity using the theory of linear source

corso delle 72/96 ore della durata della prova. Il calcolo della conducibilità termica effettiva del terreno è eseguito attraverso il grafico che riporta la temperatura media del fluido T_m nel tempo in scala logaritmica (Fig. 2).

I valori della resistenza termica, che si ottengono da questo tipo di test, variano da 0.1 K/(W/m), per una sonda cilindrica coassiale o a doppia U con un ottimo scambio termico con il terreno, fino a circa 0.15 K/(W/m) per una sonda ad U con riempimento costituito da una malta bentonica e una messa in posto senza particolari precauzioni per tenere i tubi a contatto con la parete del foro (Menichetti et al., 2009).

Presso il Campus Scientifico "Enrico Mattei" dell'Università di Urbino è stato realizzato un campo sperimentale con 9 sonde geotermiche, a singola U profonde 100 metri (Fig. 3). Il sistema geotermico integra, con l'ausilio di 10 ventilconvettori, l'impianto di climatizzazione della biblioteca e di alcune aule didattiche.

Il Campus universitario è localizzato a 4 km dal centro storico della città di Urbino, in un'area collinare a una quota di 325 metri s.l.m. caratterizzata da una morfologia dolce con versanti poco acclivi interessati da processi erosivi areali.

La geologia dell'area ha un assetto stratigrafico, fino a circa 100 metri di profondità, costituito da un'alternanza di livelli marnosi ed arenacei. Gli strati sono inclinati di circa 20° verso NE e costituiscono il fianco sud-occidentale di una sinclinale asimmetrica vergente a NE e appartenente alle strutture dell'Appennino marchigiano esterno. La massa rocciosa è interessata da almeno due sistemi di fratturazione, uno orientato NE-SW e l'altro NW-SE, entrambi particolarmente sviluppati nei livelli arenacei. Infine è presente una piccola falda freatica, dislocata nei livelli arenacei a circa 40 metri di profondità, la cui velocità di flusso è molto modesta.

Durante la realizzazione di alcune sonde è stato inserito nel terreno un tubo di monitoraggio per rilevare le variazioni di temperatura sia durante il funzionamento dell'impianto che nello svolgimento del TRT (Fig. 4). La presenza della tubazione a fianco della sonda, all'interno dello stesso foro cementato, comporta un incremento di circa il 15% della resistenza termica del sistema.

La temperatura pre-test del sottosuolo, rilevata nelle sonde geotermiche considerate, è di circa 15.8°C, con un profilo verticale che presenta variazioni di alcuni decimi di grado in

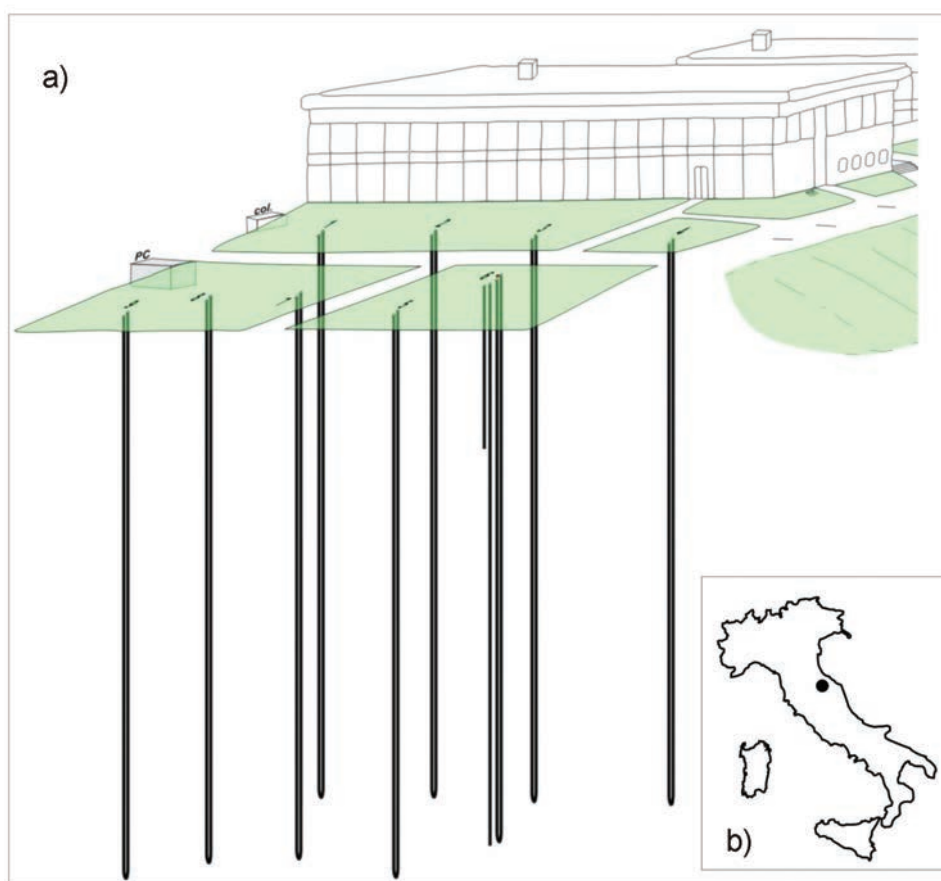


Fig. 3 - (a) Schema dell'impianto geotermico con 9 sonde geotermiche con geometria ad U profonde 100 metri (b) del Campus Scientifico "Enrico Mattei" dell'Università di Urbino: è indicata l'ubicazione della pompa di calore (PC) e del collettore delle sonde (col).

Fig. 3 - Sketch of 9 BHE with U geometry and 100 meters deep, (b) located at the Scientific Campus "Enrico Mattei", Urbino University: the position of the heat pump (PC) and the carrier fluid manifold (col) is shown.

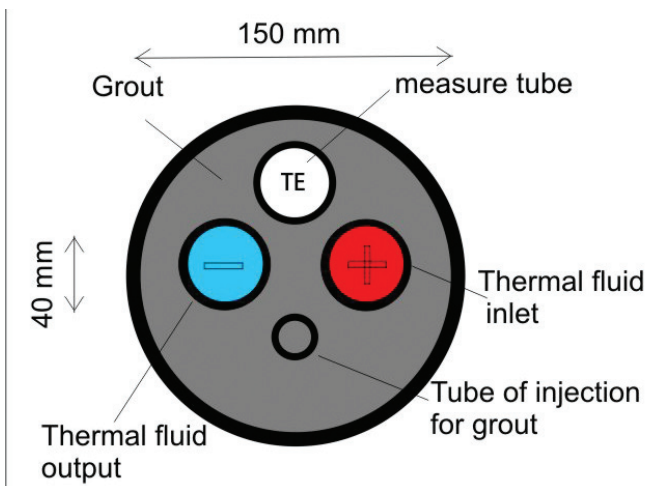


Fig. 4 - Sezione di una sonda geotermica installata nel Campus Scientifico "Enrico Mattei".

Fig. 4 - Cross section of the BHE installed in the Scientific Campus "Enrico Mattei", Urbino University.

prossimità della superficie, a causa dell'influenza dei fattori climatici e in corrispondenza della zona dove è presente la piccola falda freatica. In precedenza, durante e dopo l'esecuzione del TRT, sono stati acquisiti profili verticali di temperatura spaziali di circa 5 metri, in modo da registrare le variazioni di temperatura connesse ai diversi livelli litologici della Marnosa Arenacea, unica formazione rilevata durante le perforazioni.

L'esecuzione di profili verticali di temperatura durante il test o immediatamente dopo la sua esecuzione, permette di calcolare la conducibilità termica (λ) di ogni strato del sottosuolo. E' possibile con la stessa metodologia, inoltre, determinare il raffreddamento del terreno in seguito all'esecuzione del test in modo da ricavare la diffusività termica (α) e la velocità di ritorno alle condizioni termiche di pre-test.

Risultati

Nel campo geotermico sperimentale sono stati eseguiti diversi TRT, sia sulla stessa sonda sia in sonde vicine, che hanno fornito valori di complessivi di conducibilità termica (λ) pressoché simili.

L'analisi della conducibilità termica distribuita attraverso i diversi livelli stratigrafici è stata effettuata con una apparecchiatura che ha permesso l'immissione di una potenza termica (Q) di circa 7.5 kW/h, con una portata costante di 13 l/m del fluido termovettore che ha operato lo scambio termico durante le 65 ore della durata della prova (Fig. 5). La macchina termica, mediante la quale è stato effettuato il test, è costituita da parti meccaniche, elettriche ed elettroniche poste all'interno di un contenitore di dimensioni di circa 1 m³ e del peso di circa 250 kg. Il fluido termovettore circola nel sistema idraulico attraverso una pompa elettrica, la potenza termica è fornita da alcune resistenze elettriche che permettono di erogare fino a 10.5 kW, mentre la portata della pompa di circolazione può essere modulata da 600 a 3000 l/h. Alcuni termometri consentono di acquisire i dati di temperatura durante il test e sono posti sia all'interno del sistema di riscaldamento

del fluido termovettore, formato da una caldaia di 20 litri, sia all'uscita dei tubi collegati alle sonde. L'apparecchiatura e l'acquisizione dati sono gestiti da dispositivi elettronici specifici, infatti, durante l'esecuzione del test è possibile controllare i dati tecnici e poter notare eventuali anomalie di funzionamento.

Nel corso dell'esecuzione del TRT, la differenza di temperatura del fluido termovettore (ΔT) immessa (T_{in}) e in uscita (T_{out}) dal terreno è stata mantenuta a circa 4°C. All'inizio del test la temperatura d'uscita del fluido (T_{out}) è stata di 16.8°C, mentre quella d'ingresso (T_{in}) era di 19.1°C, raggiungendo a fine test rispettivamente 36.3°C e 40.2°C a causa del riscaldamento progressivo del terreno circostante la sonda (Fig. 6). I profili eseguiti durante il TRT mostrano variazioni di temperatura di alcuni gradi tra un intervallo stratigrafico e l'altro che tendono ad accentuarsi nel corso del riscaldamento progressivo operato dal geoscambio.



Fig. 5 - Installazione del TRT nel sito sperimentale.

Fig. 5 - Setting of TRT in the experimental site.

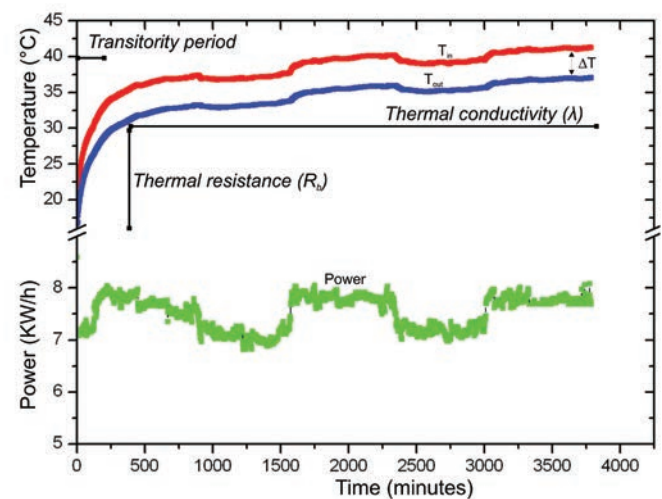


Fig. 6 - Andamento della T_{in} , T_{out} nella sonda geotermica e della potenza erogata durante il TRT.

Fig. 6 - Trend of the T_{in} , T_{out} in the BHE and thermal power supply during TRT.

Il valore della conducibilità termica del terreno, calcolata utilizzando la relazione [8] è di 2.25 W/mK, mentre quello medio ricavato dal monitoraggio delle temperature alle varie quote durante il test è stato di 2.1 W/mK (Fig. 7).

Al termine della prova, rimosso il macchinario e quindi senza circolazione del fluido termovettore nella sonda, sono stati eseguiti, per alcuni giorni, dei profili verticali di temperatura. Dopo circa 7 ore dal termine del test la diminuzione

media della temperatura è stata di 7.3°C fino a raggiungere i 6°C nei due giorni successivi. Il raffreddamento del sistema, infatti, è molto più rapido nelle prime ore dopo il TRT per poi decrescere in maniera esponenziale nei giorni seguenti. Passati circa 3 giorni dal test, il substrato ha raggiunto temperature prossime a quelle precedenti al test e trascorsa una settimana ha praticamente annullato tutte le variazioni termiche indotte dal TRT (Blasi, 2012; Fig. 8).

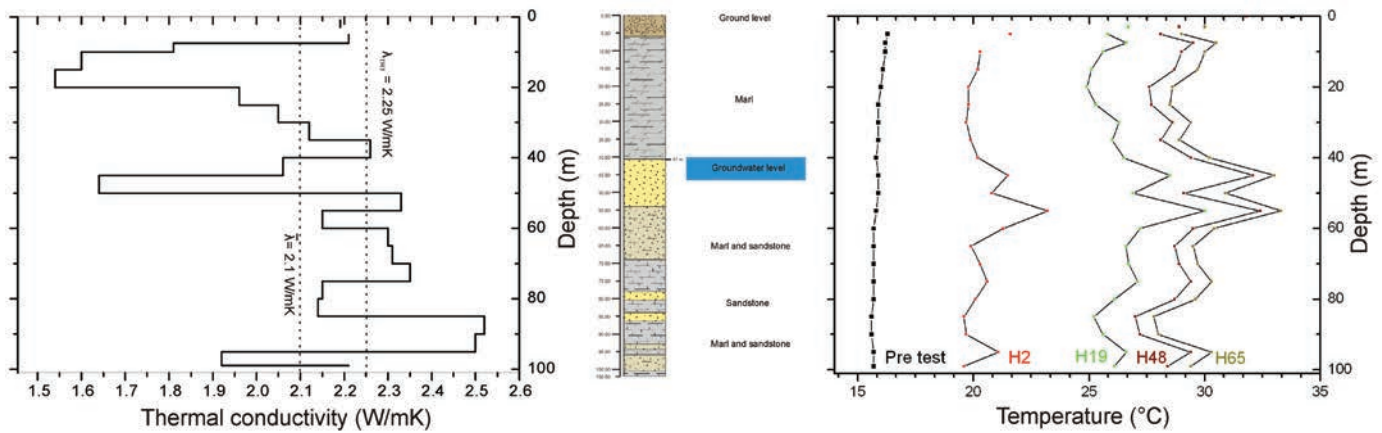


Fig. 7 - Variazione della conducibilità termica in funzione della profondità (grafico a sinistra) e dei diversi livelli stratigrafici; profili di temperatura durante il TRT a diverse ore (H) (grafico a destra).

Fig. 7 - Relationship among thermal conductivity and stratigraphy (left graph) and vertical temperature log during TRT at different time in hours (H) (right graph).

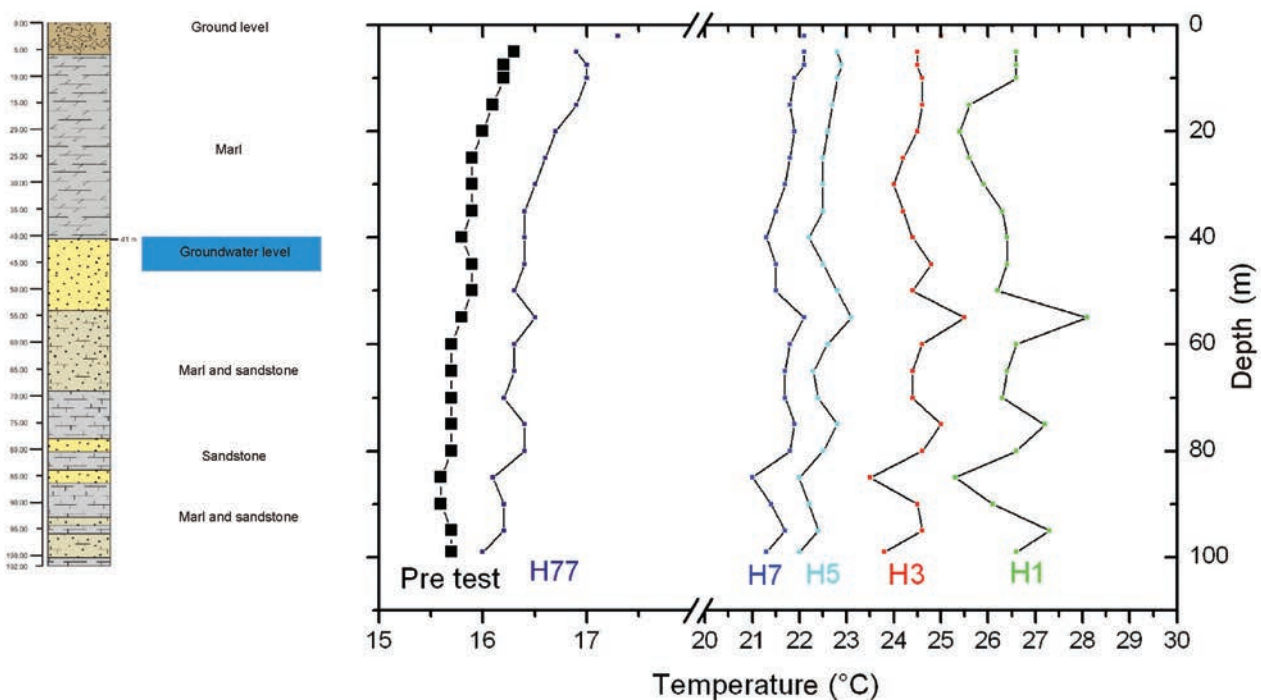


Fig. 8 - Stratigrafia della perforazione e i profili verticali di temperatura dopo il TRT a diverse ore di distanza (H).

Fig. 8 - Stratigraphy of the bore and vertical temperature log after TRT at different time in hours (H).

Discussione

I profili di temperatura eseguiti durante e dopo l'esecuzione del *TRT* indicano che i diversi livelli stratigrafici presenti nel sottosuolo scambiano calore con la sonda in maniera differente. È possibile determinare per ciascuno di questi intervalli stratigrafici il valore della conducibilità termica: negli strati arenacei la temperatura tende ad aumentare con un gradiente minore rispetto agli orizzonti marnosi e argillosi, caratterizzati da conducibilità e diffusività termica più bassa.

I valori di temperatura media acquisiti ogni 5 metri sono stati utilizzati per calcolare, utilizzando la relazione [8], il valore di conducibilità termica del sottosuolo. I valori più bassi di conducibilità (<2 W/mK) corrispondono ai primi 20 metri e a 45 metri di profondità, in corrispondenza degli intervalli stratigrafici più marnosi. I valori più alti (2.2-2.5 W/mK) sono stati riscontrati nella parte medio-bassa (50-85 metri di profondità) della porzione di terreno attraversata dalla sonda geotermica, dove sono presenti livelli con litologie marnose e arenacee con la presenza della modesta falda freatica; nella parte più profonda, alcuni livelli marmoso-arenacei hanno un più basso contenuto in acqua e valori inferiori di conducibilità termica (1.9/2.2 W/mK). Il valore medio di conducibilità termica (2.1 W/mK) per l'intera sonda è molto prossimo a quello ricavato dal *TRT* (2.25 W/mK).

Il raffreddamento della sonda al termine del *TRT* è veloce nelle prime 24 ore, per poi cominciare a stabilizzarsi soprattutto in presenza di una stratigrafia omogenea (Blasi e Menichetti, 2012).

Gli strati marnosi-argillosi e marnosi situati alle profondità di -55, -75 e tra -90/-100 metri, dove sono state registrate le temperature più alte, hanno un geoscambio inferiore; per contro negli orizzonti arenacei e marnosi-arenacei posti a profondità di -50, tra -60/-70 e -80, -85 metri, a causa di una conducibilità e diffusività termica maggiore, il calore è trasmesso nel substrato più facilmente e le temperature sono più basse rispetto a quelle degli altri strati (Blasi, 2012).

La conducibilità termica (λ) ricavata con la metodologia classica del *TRT*, utilizzando la relazione [8], è di 2.25 W/mK mentre quella media ottenuta dalla misura delle temperature alle varie quote durante il test è stata di 2.1 W/mK. Tale differenza tra i due valori, dell'ordine di 0.1-0.15 W/mK, è dovuta al basso contributo termico dato dagli strati più superficiali che fino a 50 metri di profondità hanno una conducibilità inferiore a 2 W/mK.

La stratigrafia termica del sottosuolo così ottenuta permette d'individuare il contributo di ciascun livello sviluppando ulteriori importanti indicazioni sul dimensionamento delle sonde e del geoscambio; nel caso analizzato, i livelli stratigrafici più profondi sono quelli a maggior efficienza termica.

In fase progettuale, nel calcolo della lunghezza complessiva necessaria al geoscambio nel sistema terreno / sonda geotermica / pompa di calore / edificio è preferibile prevedere lo sviluppo in profondità delle sonde geotermiche così da ottimizzare i costi di realizzazione dell'impianto e uno sfruttamento adeguato della risorsa geotermica.

Conclusioni

La metodologia operativa proposta per ottenere una conducibilità termica del sottosuolo distribuita, utilizzando misure di temperatura eseguite durante e dopo l'esecuzione di un *TRT*, permette di avere indicazioni non solo sul geoscambio complessivo ma anche del contributo di ciascun intervallo stratigrafico. Risultati pressoché simili sono possibili eseguendo profili di temperatura in qualsiasi tipo di sonde geotermiche, immediatamente dopo la realizzazione del test termico. In questo caso gli strati marnosi-arenacei e arenacei (con più alta conducibilità termica) hanno un migliore scambio termico rispetto agli orizzonti marnosi e argillosi che sono contraddistinti da una maggiore inerzia termica. L'analisi del raffreddamento del terreno nell'intorno della sonda permette di osservare che gli strati arenacei hanno una maggiore diffusività termica rispetto a quelli marnosi e marnosi-argillosi.

I valori della conducibilità termica distribuita ricavati nei vari livelli del sottosuolo, determinano un'analisi più accurata del geoscambio terreno/sonda alle varie profondità. La differenza tra il valore medio della conducibilità distribuita rispetto a quella calcolata con il metodo classico, utilizzando il modello della sorgente termica lineare applicato all'intera colonna di terreno, deve essere considerata nella progettazione della sonda sulla sua profondità d'impianto e sulla sua geometria ottimale.

Questa metodologia proposta, semplice da attuare, indica come sia importante un'analisi geotermica accurata del sottosuolo affinché il sistema di geoscambio terreno/sonda sia più efficiente possibile.

Bibliografia

- Austin W., Yavuzturk C., Spitler J.D. (2000). Development of an in situ system for measuring ground thermal properties. *ASHRAE Transactions* 106 (1): 365-379
- Blasi A. (2012). Aspetti geologici del geoscambio: test termici, profili di temperatura e monitoraggio nella geotermia a bassa entalpia "Geological aspects of the geoexchange: thermal test, vertical temperature log and monitoring in low enthalpy geothermal energy". Tesi di Dottorato XXIV Ciclo, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo: 171
- Blasi A., Menichetti M. (2012). Conducibilità termica discreta da un test di risposta termica (TRT) su una sonda geotermica "Thermal conductivity of a Thermal Response Test (TRT) in a borehole heat exchanger". *Engineering, Hydro, Environmental Geology* 14B: 31-32
- Carslaw H.S., Jaeger J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, second edition, Oxford: 412
- Chad A., Stephen M., Kavanaugh P. (2002). Ground Thermal Conductivity Testing-Controlled Site Analysis. Ac-02-15-3, *ASHRAE Transactions* 108

- Deerman J.D., Kavanaugh S.P. (1991). Simulation of vertical U-tube ground coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution. *ASHRAE Transactions* 97: 287-295
- Eklöf C., Gehlin S. (1996). TED-A mobile equipment for thermal response test. MSc-thesis 198E, Lulea University of Technology, Sweden: 62
- Eskilson P., Claesson J. (1988). Simulation model for thermally interaction heat extraction borehole. *Numerical Heat Transfer* 13: 149-165
- Gehlin S. (2002). Thermal response test-Method development and evaluation. PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden: 215
- Gehlin S., Hellström G., Sanner B., Spitler J.D. (2005). Thermal Response Test-Current Status and World-Wide Application. *Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey*
- Ingersoll L.R., Plass H.J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *Heating Piping & Air Conditioning*: 119-222
- Ingersoll L.R., Zobel O.J., Ingersoll A.C. (1954). *Heat conduction: with engineering and geological applications*. McGraw-Hill, New York, Second edition: 259
- Menichetti M., Renzulli A. (2009). Geotermia a bassa entalpia e misure di temperatura in pozzo "Low enthalpy geothermal energy and temperature measurements in well". *Rendiconti online Società Geologica Italiana* 6: 333-334
- Menichetti M., Renzulli A., Piscaglia F., Blasi A. (2009). Geotermia a bassa entalpia: temperatura e conducibilità termica del sottosuolo "Low enthalpy geothermal energy: temperature and thermal conductivity of the underground". In: AA.VV. *Sistemi avanzati di produzione per la geotermia*, Energy Resources Ed., Ancona: 39-80
- Morgensen P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. *Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, Sweden: 652-657
- Pahud D., Matthey B. (2001). Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ. *Energy and Buildings* 33: 503-507
- Piscaglia F., Renzulli A., Menichetti M., Blasi A. (2009). La messa in opera di sonde geotermiche: stato dell'arte e prospettive di ricerca sulle metodologie di perforazione e le miscele di riempimento "The installation of borehole heat exchangers: current status and prospects of research on the methods of drilling and grout". In: AA.VV. *Sistemi avanzati di produzione per la geotermia*, Energy Resources Ed., Ancona: 93-107
- Signorelli S. (2004). Geoscientific investigation for the use of shallow low-enthalpy systems. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich: 91-96
- Yavuzturk C., Splitter J.D. (2003). Field validation of a short time step model for vertical ground-loop heat exchanger. *ASHRAE Transactions* 109: 1-12



- RICERCHE GEOLOGICHE
- TRATTAMENTO DELLE ACQUE
- TECNOLOGIE D'AMBIENTE
- PROTEZIONE DALLA CORROSIONE
- INFORMATICA APPLICATA

ECOGEO S.R.L.

Società Unipersonale

Via F.lli Calvi, 2 - 24122 BERGAMO

Tel. 035/27.11.55 Fax 035/23.98.82

N. R.E.A. BG 345358 - Capitale Sociale: € 30.000,00 i.v.

C.F. Part. IVA e N. Iscriz. R.I. 03051330169

<http://www.ecogeo.net> e-mail: info@ecogeo.net

Posta Elettronica Certificata: ecogeo@pec.ecogeo.net

- LABORATORI D'ANALISI
- SERVIZI D'INGEGNERIA
- ARCHITETTURA & DESIGN
- ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE
- SICUREZZA E IGIENE AMBIENTALE

