

Laboratory thermal conductivity measurements on gravel samples

Misure di laboratorio della conducibilità termica su campioni di ghiaia

Antonio Galgaro^{1,3}, Matteo Cultrera^{1*}, Giorgia Dalla Santa¹, Fabio Peron²

¹ Department of Geoscience, University of Padua, via Gradenigo, 6, I-35131 Padova (Italy) - *matteo.cultrera@gmail.com

² Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi – IUAV – Venice (Italy)

³ CNR – IGG, Institute of Geosciences and Georesources, via Gradenigo, 6, I-35131 Padova (Italy)

Keywords: Heat geoexchange systems; gravel; thermal conductivity; GSHP; Cheap-GSHPs.

Parole chiave: Sistemi di geoscambio; ghiaia; conducibilità termica; GSHP; Cheap-GSHPs.

I sistemi di pompe di calore che scambiano calore con il sottosuolo (*Ground Source Heat Pumps, GSHP*) devono essere progettati dimensionando le pompe di calore in funzione sia dei carichi termici di progetto che della capacità degli scambiatori di calore (*Ground Source Heat Exchanger, GSHE*) di trasferire l'energia necessaria verso gli edifici.

Di conseguenza, al fine di progettare correttamente i sistemi di condizionamento (*Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC*), i progettisti devono commisurare il fabbisogno energetico degli edifici con le proprietà termiche del sottosuolo. Generalmente, nota la sequenza stratigrafica con un certo grado di approssimazione, si utilizzano i valori bibliografici relativi agli strati interessati dallo scambiatore al terreno per dimensionare preliminarmente la pompa di calore. Inoltre, noto l'assetto geologico, idrogeologico e geotermico, i progettisti di GSHP e GSHE dovrebbero predisporre una valutazione ambientale, tale da minimizzare l'impatto del sistema nel sottosuolo (ASHRAE 2011; Di Sipio et al. 2013; Galgaro et al. 2015 VDI 2010).

Solitamente le aree urbane e le attività antropiche hanno luogo nelle pianure alluvionali e nelle aree vallive. Di conseguenza, le proprietà termiche dei materiali alluvionali dovrebbero essere studiate più in dettaglio poiché hanno un impatto piuttosto considerevole sulla capacità di scambio termico e sulla conseguente efficienza dei sistemi da progettare. In effetti, il progetto europeo Cheap-GSHPs ha messo in evidenza come la maggior dei sistemi di pompe di calore siano localizzati in depositi fluviali non consolidati (Bertermann et al. 2018; Cultrera 2017; Cultrera et al. 2018; De Carli et al. 2018; Galgaro et al. 2018, 2017; Müller et al. 2018).

Tra i materiali alluvionali, le ghiaie sono decisamente tra i più diffusi. Da un punto di vista prettamente deposizionale, questo tipo di materiale non consolidato è solitamente associato ad altri sedimenti, come la sabbia e il limo; di conseguenza, le ghiaie sabbiose rappresentano uno dei tipi più comuni di sedimenti e che dovrebbero essere oggetto di misure di laboratorio, per una caratterizzazione di dettaglio.

Sfortunatamente, la misura delle proprietà termiche a livello di laboratorio è particolarmente complessa a causa delle avversità tecniche e tecnologiche (Kömle et al. 2010). Infatti, i parametri termici delle ghiaie sono generalmente derivati indirettamente dalle interpretazioni dei test di risposta termica Test (TRT) su GSHE, nei casi in cui questa litologia sia

Modern Ground Source Heat Pumps (GSHPs) systems must be designed by taking into account the ground thermal properties, in order to properly plan the capability of the heat pumps to transfer calories through the Ground Source Heat Exchangers (GSHE) to the subsoil (and vice versa).

As a result, in order to properly plan the best fitting Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) systems, designers need to couple the energy building loads requirements to the ground thermal properties. Usually, some available information about the geological stratigraphy around the GSHE and soils' thermal properties bibliography data could provide the preliminary estimation of the main parameters to proper design the GSHP with the related GSHE. Moreover, according to the geological, hydrogeological and geothermal setting, the GSHPs and GSHE planners should be able to also provide an environment assessment (ASHRAE 2011; Di Sipio et al. 2013; Galgaro et al. 2015; VDI 2010).

On the other hands, alluvial plains and valley floors usually host most of the urban areas and anthropic activities such as cities, commercial districts and industrial region. As a result, for HVAC applications, thermal properties of alluvial materials should be studied more in detail since they have quite a considerable impact on the HVAC efficiency. One of the outcomes of the Cheap-GSHPs project is that most of the GSHPs systems laid on unconsolidated material (Bertermann et al. 2018; Cultrera 2017; Cultrera et al. 2018; De Carli et al. 2018; Galgaro et al. 2018, 2017; Müller et al. 2018). Among alluvial materials, gravel lithology is quite relevant and comprehensively distributed. From a geological perspective, this type of unconsolidated sediment is usually associated to other different unconsolidated sediments, such sand and silt; as a result, sandy gravel represent one of the most common type of unconsolidated sediments that should be collected in the field in order to check its thermal properties at laboratory level.

Gravel thermal properties measurements at laboratory level are quite challenging due to the several technical and logistic issues to face, given the difficulty to guarantee a good contact between the sample and a plate probe or a needle (Kömle et al. 2010). Therefore, thermal properties of gravel are usually obtained through indirect measurements. Indeed, indirect gravel thermal measurements come from Thermal Response Tests (TRT) on GSHE (Cultrera 2016). So, this well-developed methodology allows the definition of the average thermal properties of a field representative elementary volume of geological material. Unfortunately, GSHEs commonly cross several strata with different thermal properties and therefore the TRT cannot distin-

quella dominante (Cultrera 2016). L'interpretazione dei TRT consente quindi di definire le proprietà medie termiche medie di un volume rappresentativo elementare di terreno. I GSHE comunemente attraversano molteplici tipologie di materiali geologici caratterizzati da diverse proprietà termiche e quindi il TRT non può distinguere il contributo di ciascun litotipo. Pertanto, l'interpretazione di TRT fornisce una stima media delle proprietà termiche complessive di tutti i sistemi GSHE, ma non è in grado di stimare i singoli contributi dei parametri termici delle ghiaie (Cultrera et al. 2017; Zarrella et al. 2017).

Di conseguenza, il problema della definizione delle proprietà termiche della ghiaia rimane quindi ancora irrisolto. Come detto, la definizione dei parametri termici della ghiaia risulta essenziale per un esito positivo della progettazione di un sistema a circuito chiuso. Il rischio maggiore è che il sistema possa essere sovra o sotto dimensionato. Sfortunatamente, non esiste un metodo diretto ufficialmente riconosciuto per misurazione dei parametri termici delle ghiaie in laboratorio (Jones 1988, Woodside and Messmer 1961).

Nel corso del progetto Cheap-GSHPs, le proprietà termiche delle ghiaie sono state ricavate per mezzo del sistema a "piastra calda protetta" Taurus Instruments TLP 800, il cui settaggio è stato modificato in modo da poter finalizzare le misure presso il laboratorio IUAV FISTEC (Environmental Technical Laboratorio di Fisica dell'Università di Venezia) (Dalla Santa et al. 2017). La configurazione della strumentazione adottata è descritta dalla fig. 1; in questo caso il calore si trasferisce dalla piastra calda verso quella fredda. Le due piastre sono mantenute a temperatura costante in modo da raggiungere condizioni di tipo stato stazionario.

Secondo la legge di Fourier, la rapidità con cui avviene il flusso di calore all'interno di un materiale dipende dalle sue proprietà termiche, ovvero principalmente dalla conducibilità termica e dalla capacità termica.

Sono stati testati molti tipi di ghiaia, raccolti in diverse località in Italia e Germania. Secondo le analisi granulometriche, il materiale ha una composizione prevalentemente ghiaioso grossolana e presenta un contenuto in sabbia inferiore al 40%; il contributo delle frazioni inferiori a 0,06 mm è trascurabile.

guish the contribution of each layer to the overall heat transfer process. Therefore, the TRT interpretation provides the overall thermal properties (average) of the whole GSHE systems, but it is unable to provide specific information regarding layers such as unconsolidated gravels (Cultrera et al., 2017; Zarrella et al., 2017).

Consequently, the issue related to the definition of gravel thermal properties is still unresolved and the risk that a geoechange system might be over- or undersized is very close to making that happen. Unfortunately there are no methods for direct measurements of gravel thermal parameters, aside few tests for small size diameter clasts or indirect interpretation of field testing (Jones, 1988; Woodside and Messmer, 1961).

Within the Cheap-GSHPs project, gravel thermal properties have been detected by the means of a guarded hot plate Taurus Instruments TLP 800, where some changes in the setup have been made in order to finalize the thermal measurements at the IUAV FISTEC laboratory (Environmental Technical Physics Laboratory of Venice University) (Dalla Santa et al. 2017). The configuration of the modified guarded hot plate is described by fig. 1; here the heat flow is transfer from the hot plate towards the cold plate and the guard ring constrains the one direction heat flow. The two plates keep constant their temperatures and several thermometers record the temperature changes in order to mark the timing when a steady state condition is reached.

According to the Fourier law, inside this device the heat rate transfer is related to the material properties, meaning thermal conductivity and heat capacity.

Many different types of gravel material have been tested and collected from different locations in Italy and Germany. According to the sieve analysis, the material has mainly coarse to fine gravel composition and usually less than 40% of sand content, while the clasts smaller than 0.06 mm are negligible.

The material has been analysed considering different water content ratios, in order to also verify the moisture impact on the thermal properties.

Preliminary results are quite interesting for this new gravel laboratory thermal measurement methodology. Indeed, at dry conditions gravel material shows very low thermal conductivity, ranging from 0.3 to 0.5 W/mK (fig. 2).

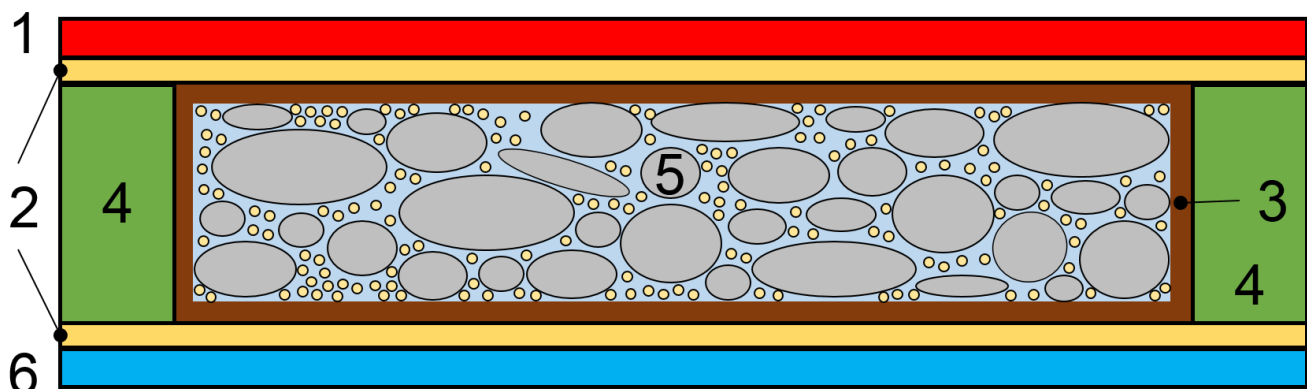


Fig.1: Configurazione di un sistema a piastra protetta calda per la misura delle proprietà termiche delle ghiaie. 1: piastra calda; 2: layer di protezione; 3: contenitore del campione; 4: anelli di guardia; 5: campione; 6: piastra fredda.

Fig.1: configuration of the guarded hot plate device tested for measuring thermal properties of gravels. 1: hot plate; 2: protected layer; 3: basting box; 4: guard ring; 5: filling material; 6: cold plate.

Il materiale è stato analizzato considerando diversi rapporti di contenuto di acqua, al fine di verificare l'impatto dell'umidità sulle proprietà termiche.

Questa nuova metodologia di misurazione della ghiaia in laboratorio presenta dei risultati preliminari piuttosto interessanti. Infatti, la ghiaia anidra mostra una conducibilità termica molto bassa, compresa tra 0,3 e 0,5 W/mK.

La conducibilità termica aumenta rapidamente con il contenuto di acqua. Si può osservare una correlazione diretta tra contenuto d'acqua e conducibilità termica; la fig.2 illustra in maniera chiara questa relazione di tipo esponenziale (Fricke et al. 1992). Quando il contenuto di umidità è di circa l'80%, non

The thermal conductivity quickly increases according to the water content. Actually there is a direct correlation between water content and thermal conductivity; fig.2 shows more closely the exponential behaviour (Fricke et al. 1992).

When the moisture content is about 80%, there is no significant variation in thermal conductivity.

In real cases, groundwater level detection becomes truly crucial in order to assign the thermal conductivity to the geological material. Without groundwater, the thermal conductivity is going to be very low. The presence of air in the pores, moreover, increase the thermal resistance of the subsoil and the resulting heat transfer capacity in dry gravel material turns out to be very limited. On the other hand,

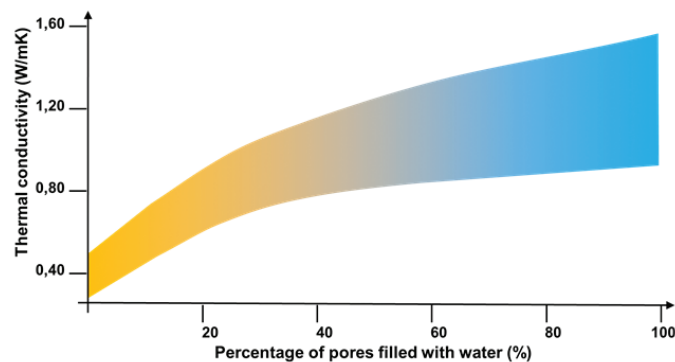


Fig.2: Thermal conductivity of 7 different gravel samples obtained at different moisture content.

Fig.2: Conducibilità termica di 7 diversi campioni di ghiaia a misurata a diverse condizioni di umidità.

vi è alcuna variazione significativa nella conducibilità termica.

In casi reali, è quindi necessario verificare il livello della falda freatica per assegnare la conducibilità termica ai terreni di tipo ghiaioso. In assenza di acque sotterranee, la conducibilità termica risulta molto bassa. La presenza di aria nei pori, inoltre, aumenta la resistenza termica del sottosuolo ed il trasferimento di calore viene conseguentemente rallentato. Viceversa, nel caso di flusso di acque sotterranee in mezzi porosi come la ghiaia, il trasferimento di calore viene incrementato sia da una conducibilità termica elevata (come la fig. 2 illustra) che dai movimenti advettivi tipici presenti in falda.

In conclusione, per piccoli carichi di fabbisogno energetico (inferiori ai 15 kW) terreni caratterizzati da ghiaia umida/satura sono molto favorevoli, mentre in caso di ghiaia anidra è richiesta un'analisi più di dettaglio. In quest'ultimo caso, dovrebbero essere valutate soluzioni alternative. Per carichi maggiori, i sistemi a circuito aperto sono più convenienti da un punto di vista energetico (Lo Russo e Civita 2009).

ds, when there are groundwater movements through unconsolidated gravel sediments, the heat transfer is going to be supported both by the enhanced thermal conductivity (as fig. 2 shows) and by the advective groundwater movements.

In conclusion, for small energy loads requirements (less than 15 kW), wet gravel conditions are very favourable, while dry gravel conditions require a more detailed analysis in order to size the capability of GSHEs of providing the required energy loads. In the latter case, alternative solutions should be evaluated. For larger loads requirements, open loop systems are going to be much more competitive (Lo Russo and Civita 2009).

Ringraziamenti: Questo lavoro fa parte del programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione europea nell'ambito dell'accordo di sovvenzione n. 657982. Gli autori sono molto grati al dr. Diego Mortillaro di Geotecnica Veneta per la fornitura di parte della ghiaia proveniente da diverse località Italiane. Gli autori vogliono inoltre ringraziare il sig. Mario Celebrin e il sig. Massimiliano De Bei di laboratorio FISTEC dello IUAV - Università di Venezia.

Acknowledgment: This work is part of the Cheap-GSHPs project which has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No. 657982. We are very thank to dr. Diego Mortillaro of Geotecnica Veneta for providing the necessary gravel material from different location around Italy. The authors want to gratefully thank Mr. Mario Celebrin and Mr. Massimiliano De Bei of FISTEC laboratory of IUAV – Università di Venezia.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCE

- ASHRAE, 2011. Geothermal Energy, in: Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications, ASHRAE Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Bertermann, D., Bernardi, A., Pockelè, L., Galgaro, A., Cultrera, M., de Carli, M., Müller, J., 2018. European project "Cheap-GSHPs": installation and monitoring of newly designed helicoidal ground source heat exchanger on the German test site. *Environ. Earth Sci.* 77. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7343-4>
- Cultrera, M., 2017. The EU project Cheap-GSHPs. *Ital. J. Groundw.* 6. <https://doi.org/10.7343/as-2017-286>
- Cultrera, M., 2016. Introduction to thermal response tests. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.* 5. <https://doi.org/10.7343/as-2016-234>
- Cultrera, M., Boaga, J., Di Sipio, E., Dalla Santa, G., De Seta, M., Galgaro, A., 2017. Modelling an induced thermal plume with data from electrical resistivity tomography and distributed temperature sensing: a case study in northeast Italy. *Hydrogeol. J.* <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1700-3>
- De Carli, M., Bernardi, A., Cultrera, M., Dalla Santa, G., Di Bella, A., Emmi, G., Galgaro, A., Graci, S., Mendrinòs, D., Mezzasalma, G., Pasquali, R., Pera, S., Perego, R., Zarrella, A., 2018. A Database for Climatic Conditions around Europe for Promoting GSHP Solutions. *Geosciences* 8, 71. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020071>
- Dalla Santa, G., Peron, F., Galgaro, A., Cultrera, M., Bertermann, D., Müller, J., Bernardi, A., 2017. Laboratory Measurements of Gravel Thermal Conductivity: A New Methodological Approach, in: *Energy Procedia*. Presented at the European Geosciences Union General Assembly 2017 - EGU Division Energy, Resources & Environment (ERE), Vienna, Austria, pp. 671–677. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.287>
- Di Sipio, E., Chiesa, S., Destro, E., Galgaro, A., Giaretta, A., Gola, G., Manzella, A., 2013. Rock Thermal Conductivity as Key Parameter for Geothermal Numerical Models, in: *Energy Procedia*. pp. 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.011>
- Fricke, B.A., Misra, A., Becker, B.R., Stewart, W.E., 1992. Soil thermal conductivity: effects of saturation and dry density. Presented at the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings V International Conference, Clearwater Beach, Florida, USA.
- Galgaro, A., Cultrera, M., Pasquier, P., Santa, G.D., Schenato, L., 2018. Soil thermal conductivity from early TRT logs using an active hybrid optic fibre system, in: *Proceedings of the IGSHPA Research Track 2018*. Presented at the IGSHPA Research Track, International Ground Source Heat Pump Association, Stockholm, Sweden, p. 9. <https://doi.org/10.22488/okstate.18.000023>
- Galgaro, A., Dalla Santa, G., Cultrera, M., Bertermann, D., Müller, J., De Carli, M., Emmi, G., Zarrella, A., Di Tuccio, M., Pockelè, L., Mezzasalma, G., Psyk, M., Righini, D., Bernini, M., Bernardi, A., 2017. EU project "Cheap-GSHPs": the geoexchange field laboratory, in: *Energy Procedia*. Presented at the European Geosciences Union General Assembly 2017, EGU Division Energy, Resources & Environment (ERE), Vienna, Austria, pp. 511–519. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.175>
- Galgaro, A., Di Sipio, E., Teza, G., Destro, E., De Carli, M., Chiesa, S., Zarrella, A., Emmi, G., Manzella, A., 2015. Empirical modeling of maps of geo-exchange potential for shallow geothermal energy at regional scale. *Geothermics* 57, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.06.017>
- Jones, B.W., 1988. Thermal conductivity probe: Development of method and application to a coarse granular medium. *J. Phys.* [E] 21, 832.
- Kömle, N.I., Hütter, E.S., Feng, W.J., 2010. Thermal conductivity measurements of coarse-grained gravel materials using a hollow cylindrical sensor. *Acta Geotech.* 5, 211–223. <https://doi.org/10.1007/s11440-010-0126-z>
- Lo Russo, S., Civita, M.V., 2009. Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study. *Geothermics* 38, 335–345.
- Müller, J., Galgaro, A., Dalla Santa, G., Cultrera, M., Karytsas, C., Mendrinòs, D., Pera, S., Perego, R., O'Neill, N., Pasquali, R., Ver-cruyse, J., Rossi, L., Bernardi, A., Bertermann, D., 2018. Generalized Pan-European Geological Database for Shallow Geothermal Installations. *Geosciences* 8, 32. <https://doi.org/10.3390/geosciences8010032>
- VDI, 2010. VDI-Standard: VDI 4640 Blatt 1. Thermal use of the underground.
- Woodside, W., Messmer, J.H., 1961. Thermal Conductivity of Porous Media. I. Unconsolidated Sands. *J. Appl. Phys.* 32, 1688–1699. <https://doi.org/10.1063/1.1728419>
- Zarrella, A., Emmi, G., Graci, S., De Carli, M., Cultrera, M., Santa, G., Galgaro, A., Bertermann, D., Mueller, J., Pockelè, L., Mezzasalma, G., Righini, D., Psyk, M., Bernardi, A., 2017. Thermal Response Testing Results of Different Types of Borehole Heat Exchangers: An Analysis and Comparison of Interpretation Methods. *Energies* 10, 801. <https://doi.org/10.3390/en10060801>