POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Il ruolo delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie energetiche

Original
Il ruolo delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie energetiche / DI DONNA, A., Barla, M.. - ELETTRONICO. - (2015). (Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica (IARG) 2015 Cagliari 24-26giugno 2015).

Availability:
This version is available at: 11583/2608955 since:

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright
default_conf_editorial [DA NON USARE]

-

(Article begins on next page)

10 November 2026

IL RUOLO DELLE CONDIZIONI GEOTECNICHE SULL'EFFICIENZA DELLE GALLERIE ENERGETICHE

Alice Di Donna
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica,Politecnico di Torino
alice.didonna@polito.it

Marco Barla
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica,Politecnico di Torino
marco.barla@polito.it

Sommario

In questa nota vengono presentati i risultati di alcune simulazioni numeriche agli elementi finiti in grado di riprodurre gli aspetti che governano la risposta termo-idrica delle gallerie energetiche, con lo scopo di studiarne l'efficienza in funzione delle condizioni del sottosuolo. In particolare, sono analizzati gli effetti delle proprietà del terreno (conducibilità termica ed idraulica) e delle condizioni iniziali (flusso di falda e temperature del sottosuolo) sulla quantità di calore che può essere scambiato con il terreno. Le analisi parametriche hanno consentito di definire degli abachi di calcolo da utilizzarsi in fase di progettazione preliminare.

1 Introduzione

Le strutture geotecniche sotterranee, come le fondazioni profonde o superficiali, i diaframmi, i rivestimenti delle gallerie o i tiranti, vengono sempre più impiegati, in Europa e non mondo, come scambiatori di calore con il terreno, allo scopo di fornire energia per il riscaldamento e il condizionamento degli edifici limitrofi (Laloui & Di Donna 2013). Un crescente interesse per l'applicazione di questa tecnologia ai rivestimenti delle gallerie ha portato a svariati studi scientifici, volti a studiare la fattibilità e l'efficienza di tali sistemi (Markiewicz & Adam 2009; Barla et al. 2015; Barla & Perino 2014a; Franzius & Pralle 2011; Lee et al. 2012; Nicholson et al. 2013; Zhang et al. 2013). Ciò nonostante, i casi reali di gallerie energetiche sono limitati per ora all'Austria e alla Germania, probabilmente a causa della scarsa conoscenza disponibile riguardo l'efficienza del sistema legata alle condizioni in-sito specifiche di ciascun caso. Per ovviare a questa problematica, questa nota propone una procedura di dimensionamento preliminare basata su degli abachi di progetto sviluppati numericamente e validati mediante confronto con i risultati sperimentali oggi disponibili.

2 Modello numerico

Le analisi numeriche presentate di seguito sono state realizzate tramite il software agli elementi finiti FEFLOW© (Diersch 2009). Si rimanda al manuale del codice per i dettagli circa la formulazione matematica termo-idraulica accoppiata in esso contenuta.

2.1 Geometria del modello

Il modello 3D usato per le simulazioni discusse nel seguito riproduce un anello di rivestimento di una galleria energetica e si basa sugli studi presentati da Barla et al. (2015). L'influenza degli anelli limitrofi sul processo di scambio termico è trascurata, assumendo che il flusso di falda sia sempre perpendicolare all'asse della galleria. Il modello ha altezza 77.85 m, larghezza 120 m e spessore 1.4 m (Fig 1). Il centro della galleria è posto a 21.5 m di profondità dal piano campagna, lo scavo ha diametro di 6.8 m e il rivestimento uno spessore di 30 cm. L'aria all'interno del tunnel è considerata assumendo uno strato limite interno alla galleria di spessore 30 cm. La temperatura imposta internamente alla galleria corrisponde a quelle misurata in sito nella galleria della linea 1 della Metro Torino tra Giugno 2010 e Maggio 2011 (Barla et al., 2015). Gli elementi monodimensionali utilizzati

per simulare i tubi all'interno del rivestimento sono posti a 10 cm dall'estradosso e a spirale con un interasse di 30 cm. Hanno diametro 25 mm e spessore 2.3 mm (Tab 1) e sono realizzati come rappresentato in Fig 2. Il materiali surplus è necessario per consentire lo scambio di calore tra l'elemento monodimensionale (rappresentato da un nodo) e la parete della tubazione. I parametri del surplus, dei tubi, del calcestruzzo di rivestimento e dello strato limite di aria interno alla galleria sono riportati in Tab 2. La temperatura iniziale è uguale in tutto il dominio, mentre il livello di falda viene inizializzato imponendo un gradiente idraulico tra i bordi laterali del modello. Il funzionamento del sistema è simulato imponendo un flusso all'interno delle tubazioni con una velocità e una temperatura di ingresso fissate. Come suggerito da Barla et al. (2015), la temperatura di ingresso è posta pari a 4 °C inverno e 28 °C in estate, mentre la velocità di flusso in ingresso è assunta pari a 0.4 m/s.

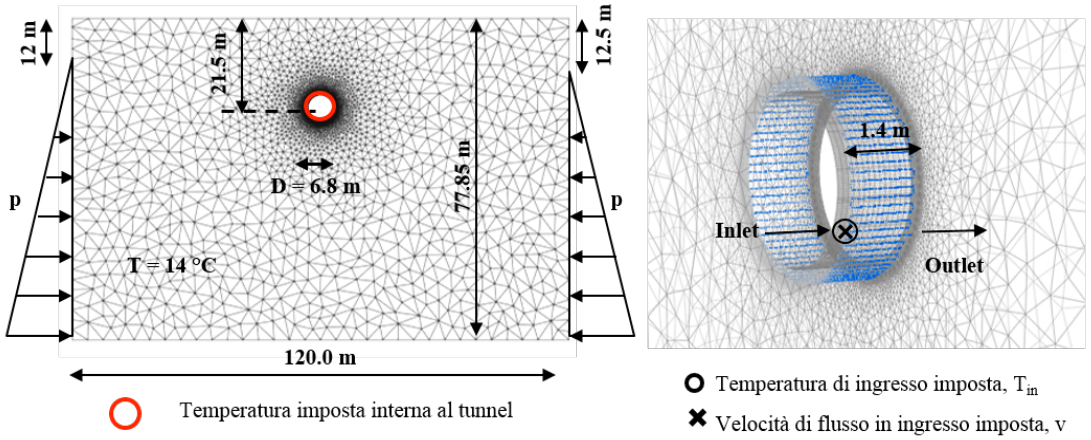

Fig 1. Geometria e dimensioni del modello 3D.

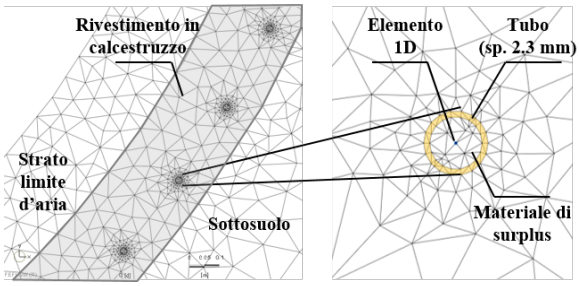

Fig 2. Modellazione dei tubi per lo scambio termico.

Tab 1. Caratteristiche dei tubi.

Diametro esterno, D [mm]	25
Spessore del tubo, s [mm]	2.3
Sezione effettiva, A [mm^2]	326.8
Raggio idraulico, r_{hyd} [mm]	5.1

Tab 2. Proprietà termo idrauliche dei materiali.

Proprietà	Surplus	Tubi	Calcestruzzo	Aria galleria
Conducibilità idraulica orizzontale, $k_x=k_z$ [m/s]	10^{-4}	10^{-16}	10^{-16}	10^{-2}
Conducibilità idraulica verticale, k_y [m/s]	10^{-4}	10^{-16}	10^{-16}	10^{-2}
Coefficiente di immagazzinamento, S [m^{-1}]	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}
Porosità, n [-]	0.0	0.0	0.0	1.0
Capacità termica del fluido, $\rho_w c_w$ [MJ/m^3/K]	-	-	-	10^{-3}
Capacità termica del solido, $\rho_s c_s$ [MJ/m^3/K]	10^{-18}	2.16	2.19	-
Conducibilità termica del fluido, λ_w [W/m/K]	-	-	-	0.53
Conducibilità termica del solido, λ_s [W/m/K]	1000	0.38	2.3	-
Dispersività longitudinale, α_L [m]	-	-	-	5
Dispersività trasversale, α_T [m]	-	-	-	0.5

3 Analisi parametriche

Il caso della galleria del prolungamento sud delle linea 1 della Metro Torino è considerato nel seguito come configurazione di riferimento. Successivamente vengono analizzati diversi scenari, al variare

della conducibilità termica del terreno, velocità del flusso di falda e temperatura del sottosuolo. Per il caso di riferimento, la temperatura iniziale del terreno è imposta pari a 14 °C, la velocità del flusso di acqua di falda pari a 1.5 m/giorno e la conducibilità termica del terreno pari 2.8 W/mK. Le proprietà termo-idrauliche del terreno sono raccolte in Tab 3. Il calore Q, espresso in Watt, estratto in inverno e trasferibile nel sottosuolo in estate può essere calcolato come:

$$Q = mc_w|T_{wo} - T_{wi}| \quad (1)$$

in cui m è la velocità di flusso massica in kg/s, T_{wi} la temperatura imposta in ingresso ai tubi e T_{wo} quella calcolata in uscita. I risultati per il caso di riferimento sono riportati nella Tab 4, in termini di Watt totali, Watt al metro quadro di rivestimento della galleria e Watt al metro di lunghezza della stessa. La migliore efficienza individuata per la fase estiva è dovuta alla maggiore differenza, rispetto al caso invernale, tra la temperatura imposta in ingresso e quella del terreno. Il sistema risulta essere particolarmente favorevole rispetto ai dati disponibili in letteratura per altri casi di studio (e.g. Franzius and Pralle 2011), a causa dell'elevata velocità del flusso di falda. Al fine di studiare l'influenza delle condizioni di falda e del tipo di terreno sulla quantità di calore estraibile e iniettabile nel terreno, è stato effettuato uno studio parametrico, variando:

- la temperatura iniziale del terreno tra 8°C e 18°C;
- la velocità del flusso di falda tra 0 e 2 metri al giorno;
- La conducibilità termica del terreno tra 0.9 e 3.9 W/mK.

Tab 3. Proprietà termo idrauliche del terreno.

Proprietà del terreno	
Conducibilità idraulica orizzontale, $k_x=k_z$ [m/s]	$4.15\ 10^{-3}$
Conducibilità idraulica verticale, k_y [m/s]	$2.075\ 10^{-4}$
Coefficiente di immagazzinamento, S [m^{-1}]	10^{-4}
Porosità, n [-]	0.25
Capacità termica del fluido, $\rho_w c_w$ [$MJ/m^3/K$]	4.2
Capacità termica del solido, $\rho_s c_s$ [$MJ/m^3/K$]	2.0
Conducibilità termica del fluido, λ_w [W/m/K]	0.65
Conducibilità termica del solido, λ_s [W/m/K]	2.8
Dispersività longitudinale, α_L [m]	3.1
Dispersività trasversale, α_T [m]	0.3

Tab 4. Calore estratto e iniettato dal/nel terreno in inverno e estate per il caso di riferimento.

Stagione	**Calore totale scambiato, Q [kW]**	**Calore scambiato al metro quadro, Q [W/m^2]**	**Calore scambiato al metro lineare, Q [W/m]**
Inverno	1.67	52.76	1193.42
Estate	2.34	73.87	1670.81

3.1 Effetto della temperatura del terreno

La Fig 3 riporta l'effetto della temperatura del terreno sul calore scambiato in inverno (riscaldamento) ed estate (raffreddamento). In inverno (Fig 3a) l'efficienza del sistema cresce con la temperatura del terreno, man mano che la differenza tra le temperatura del fluido in ingresso e quella del terreno aumenta. In estate (Fig 3b), l'efficienza del sistema decresce con la temperatura del terreno, man mano che la differenza tra le temperatura del fluido in ingresso e quella del terreno diminuisce. Indipendentemente dalla velocità del flusso di falda e della conducibilità termica del terreno, il calore scambiato aumenta del 25% del suo valore iniziale (a T = 8°C) per °C di aumento della temperatura del terreno in inverno e diminuisce del 5% in estate.

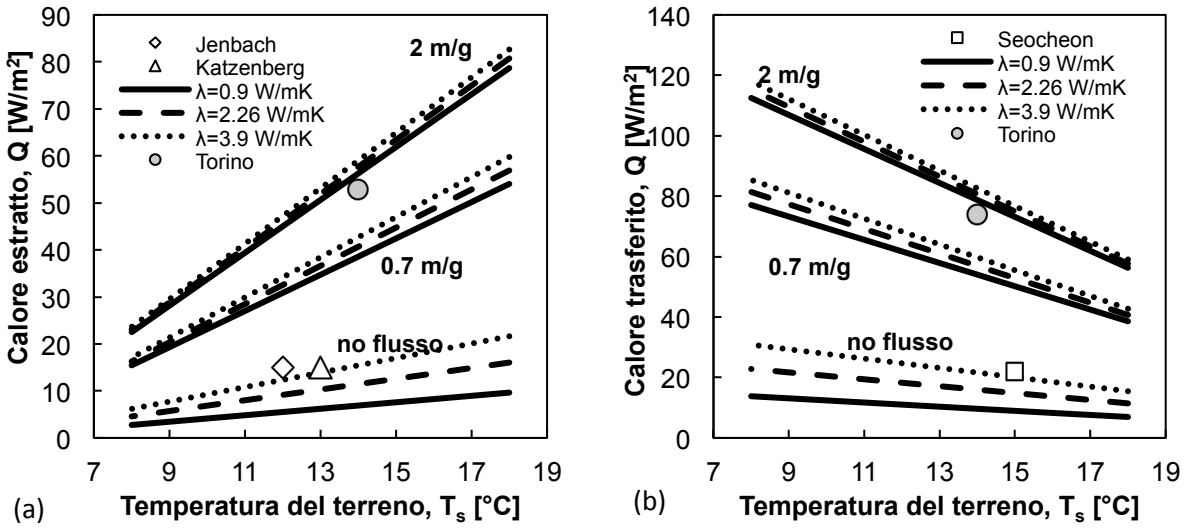

Fig 3. Effetto della temperatura sul calore scambiato (le indicazioni affianco alle curve indicano la velocità di flusso di falda): (a) inverno (dati sperimentali di Franzius and Pralle (2011)) and (b) estate (dati sperimentali di Lee et al. (2012)).

3.2 Effetto del flusso di falda

La Fig 4 illustra l'effetto della velocità di flusso di falda sul calore scambiato in inverno ed estate. In entrambi i casi il calore scambiato cresce al crescere della velocità di flusso di falda. A pari conducibilità termica del terreno, l'aumento di calore scambiato all'aumentare della velocità di flusso di falda, rispetto al valore iniziale (a falda statica) è lo stesso, indipendentemente dalla temperatura iniziale del terreno. Confrontando i risultati a diverse conducibilità termiche del terreno si evince invece che tale aumento è molto più elevato nel caso di conducibilità termiche ridotte, cioè quando la componente conduttiva dello scambio termico è meno importante.

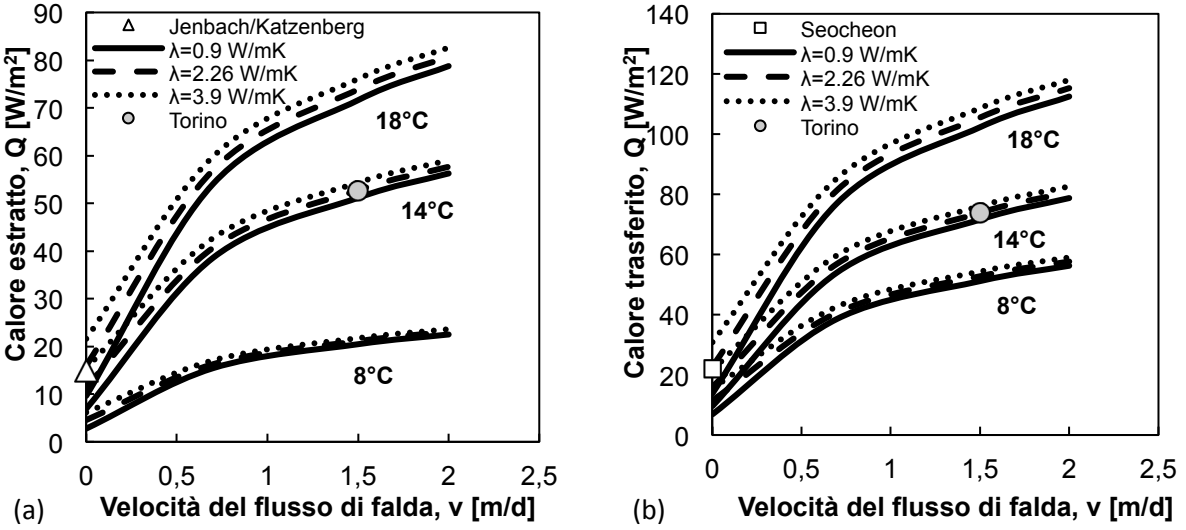

Fig 4. Effetto della velocità di flusso di falda sul calore scambiato (i numeri affianco alle curve si riferiscono a T_s): (a) inverno (dati sperimentali da Franzius and Pralle (2011)) e (b) estate (dati sperimentali da Lee et al. (2012)).

3.3 Effetto della conducibilità termica del terreno

I risultati riguardanti l'effetto della conducibilità termica del terreno sul calore scambiato sono riassunti nella Fig 5. In entrambi i casi il calore scambiato cresce al crescere della conducibilità termica del terreno, ma tale effetto diventa man mano più significativo al ridursi della velocità di flusso di falda ed è molto più evidente nel caso di falda statica.

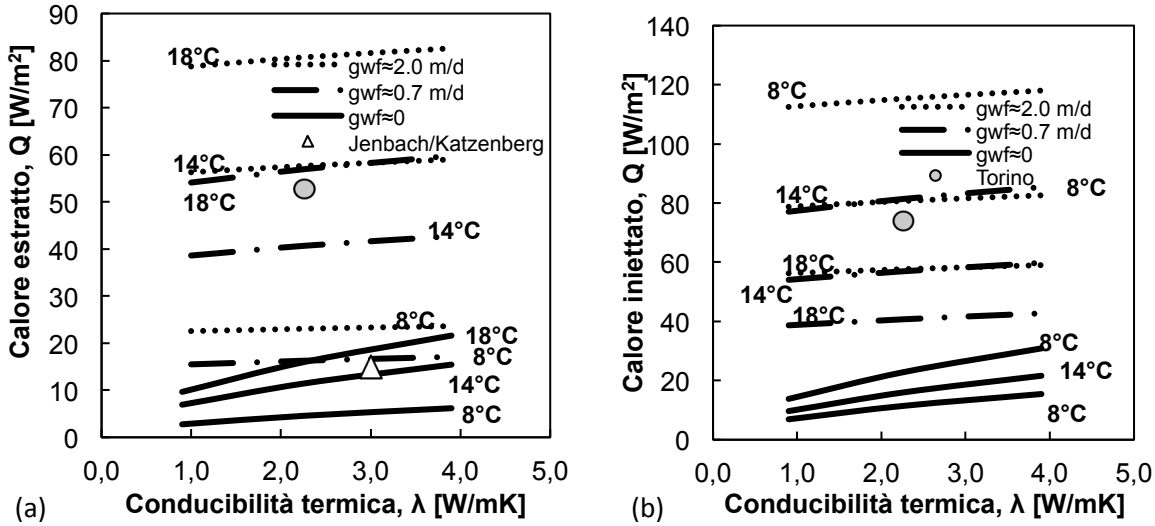

Fig 5. Effetto della conducibilità termica del terreno sul calore scambiato (i numeri affianco alle curve indicano T_s): (a) inverno (dati sperimentali da Franzius and Pralle (2011)) e (b) estate (dati sperimentali da Lee et al. (2012)).

Il calore scambiato cresce del 25% rispetto al valore iniziale (per λ = 0.9 W/mK) per unità di incremento di conducibilità termica in assenza di flusso di falda e di solo 1% nel caso di velocità del flusso di falda pari a 2 m/giorno.

3.4 Confronto con dati sperimentali

Per validare i risultati ottenuti, sono stati riportati in Fig 3, Fig 4 e Fig 5 i dati sperimentali disponibili nelle letteratura relativi a casi a grandezza reale. Per il caso invernale sono stati considerati i dati forniti da Franzius & Pralle (2011) per il tunnel di Jenbach e il test sperimentale tedesco di Katzenberg (Fig 3a, Fig 4a e Fig 5a). Secondo questi autori, la conducibilità termica del terreno in queste zone è circa 3 W/mK mentre la temperature del terreno è 12 e 13°C rispettivamente per Jenbach e Katzenberg. Per entrambi i casi si può assumere assenza di flusso di falda perpendicolare all'asse della galleria. Con riferimento al caso estivo, sono stati considerati i dati presentati da Lee et al. (2012) per la galleria di Seocheon, in Corea del sud (Fig 3b, Fig 4b e Fig 5b). I dati di monitoraggio indicano valori di calore scambiato che corrispondono in maniera soddisfacente a quelli previsti dal modello.

4 Abachi di progetto

Sulla base dei risultati presentati in questa nota, sono stati realizzati due abachi da utilizzarsi in fase di progettazione preliminare per quantificare il calore estraibile dal terreno in inverno e trasferibile nel terreno in estate, a seconda delle condizioni del sito (velocità del flusso di falda, conducibilità termica e temperatura del sottosuolo). L'abaco per la condizione invernale (Fig 6a) evidenzia come le condizioni più favorevoli siano quelle con massima velocità di flusso di falda e massima temperatura del terreno. Valori ragionevoli di calore estratto variano tra 10 e 70 W/m^2. L'abaco estivo (Fig 6b) mostra che le condizioni più favorevoli sono quelle con massima velocità di flusso di falda e minima temperatura del sottosuolo. Valori ragionevoli di calore trasferibile nel terreno sono tra 10 e 100 W/m^2. I dati sperimentali considerati precedentemente (Lee et al. 2012; Franzius and Pralle 2011) sono riportati negli abachi per completezza, insieme ai valori del caso di studio della Metro Torino (Barla et al. 2015).

5 Conclusioni

I risultati mostrano buona corrispondenza con i dati sperimentale disponibili in letteratura. Due abachi di progetto, uno per le condizioni invernali e uno per le condizioni estive, sono stati realizzati per assistere i progettisti in fase preliminare e fornire un'indicazione sommaria del potenziale scambio termico in funzione del luogo.

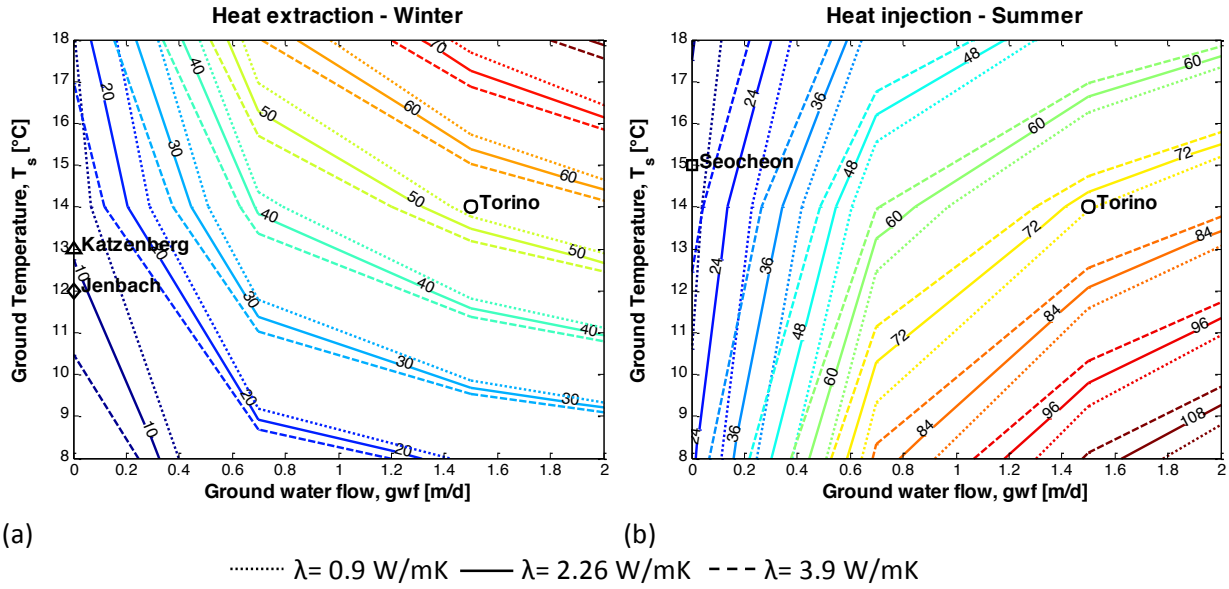

Fig 6. Abachi di progetto riportanti il calore scambiato in W/m^2 per (a) inverno e (b) estate (dati sperimentali da Franzius and Pralle (2011) e Lee et al. (2012)).

Bibliografia

Barla, M., Di Donna, A. & Perino, A., 2015. Application of energy tunnels to a urban environment. *Geothermal energy*, submitted.

Barla, M. & Perino, A., 2014a. Energy from geo-structures: a topic of growing interest. *Environmental geotechnics*, 2(1), pp.3–7.

Barla, M. & Perino, A., 2014b. Geothermal heat from the Turin metro south extension tunnels. In *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014: Tunnels for a better life*. Iguaçu, Brazil.

Diersch, H.J.G., 2009. DHI Wasy Software - Feflow 6.1 - Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System: Reference Manual.

Dupray, F., Mimouni, T. & Laloui, L., 2013. Alternative uses of heat-exchanger geostructures. In L. Laloui & A. Di Donna, eds. *Energy geostructures: innovation in underground engineering*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.

Franzius, J.N. & Pralle, N., 2011. Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. *Proceedings of the ICE - Civil Engineering*, 164(1), pp.35–40.

Laloui, L. & Di Donna, A., 2013. *Energy geostructures: innovation in underground engineering*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.

Lee, C. et al., 2012. Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel. *Renewable Energy*, 42, pp.11–22.

Markiewicz, R. & Adam, D., 2009. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique*, 59(3), pp.229–236.

Nicholson, D.P. et al., 2013. Developments in thermal piles and thermal tunnel lining for city scale GSHP systems. *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.

Zhang, G. et al., 2013. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchangers. *Cold Regions Science and Technology*, 88, pp.59–66.