POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Gallerie energetiche in ambiente urbano

Original
Gallerie energetiche in ambiente urbano / Barla, M., DI DONNA, A.. - ELETTRONICO. - (2015). (Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica (IARG) 2015 Cagliari 24-26giugno 2015).

Availability:
This version is available at: 11583/2608954 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

GALLERIE ENERGETICHE IN AMBIENTE URBANO

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

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

Sommario

L'attivazione termica dei rivestimenti delle gallerie urbane può consentire di sfruttare l'inerzia termica del sottosuolo al fine di riscaldare o raffrescare gli edifici in superficie. La nota descrive una possibile applicazione alla metropolitana di Torino descrivendo alcuni risultati di analisi numeriche finalizzate a quantificare la potenza di scambio termico e a studiare gli effetti dell'attivazione termica del rivestimento della galleria sulla falda preesistente eseguite nell'ambito di una ricerca in corso al Politecnico di Torino.

1. Introduzione

L'utilizzo delle strutture sotterranee come fonti di energia geotermica è iniziato una trentina di anni fa in Austria e si è poi esteso ad altri paesi europei: Svizzera, Germania, Gran Bretagna, Francia, Russia. In linea di principio, qualsiasi struttura sotterranea (pali e platee di fondazione, diaframmi, rivestimenti delle gallerie, tiranti) può essere attrezzata in modo da diventare uno scambiatore di calore (Brandl 2006, Adam & Markiewicz 2009). Lo sviluppo di questa applicazione in Europa non è stato omogeneo e interferisce peraltro con le regole nazionali sull'efficienza termica degli edifici e delle infrastrutture.
Le strutture sotterrane possono essere attivate termicamente installando all'interno del calcestruzzo una rete di tubi in materiale plastico. Il fluido che scorre nei tubi costituisce il mezzo per il trasferimento del calore dal terreno agli edifici e viceversa. L'estrazione del calore dal fluido termovettore viene eseguita dalle pompe di calore, il cui funzionamento è sostanzialmente simile a quello di un frigorifero, con ciclo invertito.
La maggior parte delle applicazioni pratiche è relativa a fondazioni (pali energetici) o strutture di contenimento. Sono pochi gli esempi documentati di applicazioni in galleria (Markiewicz & Adams 2003, Schneider & Moormann 2010, Franzius & Pralle 2011). Nel caso delle gallerie, l'attivazione termica del rivestimento può avvenire principalmente in due modi: per i rivestimenti gettati in opera mediante tubi in polietilene reticolato ad alta densità (PE-Xa) fissati al geotessuto posto tra il rivestimento di prima fase e quello definitivo (Markiewicz & Adams, 2003); per i rivestimenti in conci, mediante la prefabbricazione in stabilimento con tubi già inclusi (Pralle et al., 2009).
Le geostrutture energetiche sono oggetto di interesse di ricerca in ambito nazionale ed europeo sottolineato anche dal recente avvio della COST Action TU1405 GABI (European network for shallow geothermal energy applications in buildings and infrastructures) che vede gli Autori di questa nota tra i promotori. Il lavoro qui descritto è però il risultato di un altro progetto, ovvero dello Studio di fattibilità ENERTUN (Responsabile scientifico: Marco Barla) finanziato dalla Regione Piemonte, nell'ambito del Polo di Innovazione Regionale Enermhy e condotto dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino in collaborazione con la Desa Srl. Lo studio ha preso a riferimento la galleria della linea 1 della Metropolitana di Torino per investigare la

fattibilità dell'utilizzo dei rivestimenti in conci prefabbricati delle gallerie urbane come scambiatori di calore.

2. Studio dell'attivazione termica delle gallerie del prolungamento sud della linea 1

La realizzazione della linea 1 della metropolitana di Torino ha costituito una grande innovazione per il sistema dei trasporti della città. La linea è entrata in funzione prima delle olimpiadi invernali di Torino 2006. Tra il 2006 ed il 2011 è stato realizzato un primo prolungamento per consentire il collegamento tra le stazioni di Porta Nuova e Lingotto. La lunghezza totale della linea attualmente in servizio è di 13.4 km con 21 stazioni. Un nuovo prolungamento sud (1.9 km con 2 stazioni) è in costruzione e collegherà la stazione Lingotto a piazza Bengasi.
La galleria principale è stata realizzata a profondità variabili tra 15-20 m mediante quattro TBM EPB di 6.8 m di diametro e 80 m di lunghezza. Il rivestimento della galleria è costituito da 7 conci prefabbricati per ogni anello di profondità di circa 1.4 m. L'avanzamento è avvenuto completando circa 7 anelli al giorno e quindi con una velocità di avanzamento media di circa 10 m/giorno.
Lo scavo della galleria è avvenuto per buona parte sotto falda e superando diverse importanti interferenze rappresentate da edifici, dalle gallerie ferroviarie del passante, gallerie stradali, un parcheggio sotterraneo e dalle gallerie storiche di Pietro Micca (realizzate in seguito all'assedio di Torino da parte delle truppe franco-spagnole nel maggio del 1706).
La galleria della metropolitana di Torino può essere considerata una galleria fredda in quanto la ventilazione è garantita da una serie di pozzi che immettono l'aria esterna all'interno della galleria e i convogli viaggiano su gomma.
Il prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino costituisce una buona opportunità per testare il funzionamento della tecnologia ENERTUN nel sottosuolo di Torino. La porzione di linea di interesse è posta nella parte sud-est della città ed include due stazioni Italia '61 e Bengasi, due pozzi di ventilazione (PB1 e PB2), un pozzo terminale (PBT) a 200 m oltre l'ultima stazione (Bengasi) ed un'intersezione per consentire il futuro collegamento con la stazione ferroviaria del Lingotto. Lo scavo è realizzato ancora con TBM EPB. La profondità media del tratto di galleria è di 21.5 m e lo scavo avverrà al di sotto del livello di falda.

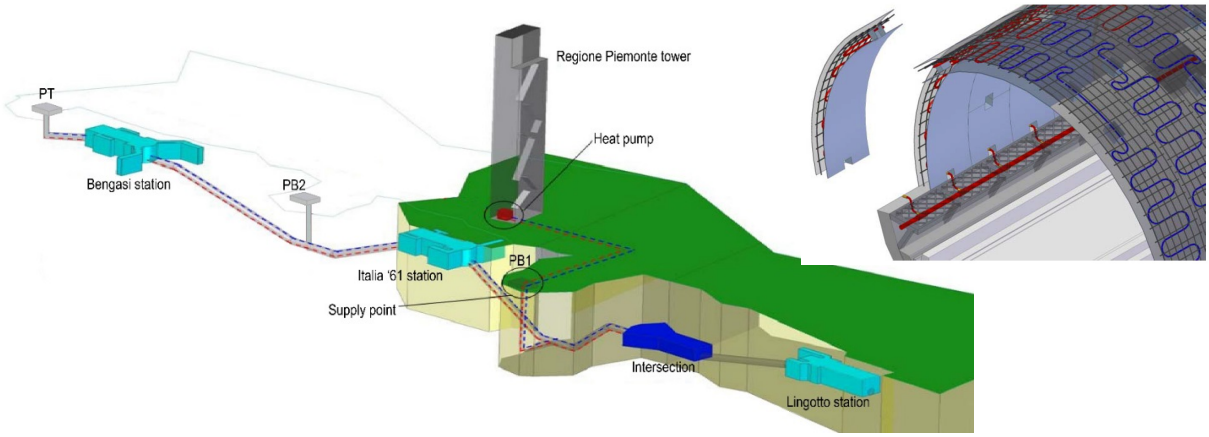


Fig 1. Schema dell'impianto geotermico (la scala delle distanze verticali e orizzontali è diversa) realizzato utilizzando le gallerie del prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino e spaccato dell'impianto per l'attivazione termica del rivestimento della galleria.

Nel sistema ENERTUN, ogni anello di rivestimento presenta al proprio interno una rete di tubi. L'anello di rivestimento ha uno spessore di 30 cm e i tubi in polietilene in grado di trasportare il fluido termovettore possono essere inseriti sull'estradosso esterno, a 10 cm dal bordo, con spaziatura di 30 cm, diametro esterno di 25 mm e spessore di 2,3 mm. I tubi per queste applicazioni sono realizzati in polietilene reticolato ad alta densità (Pe-Xa). Le pareti del tubo sono costituite da tre strati

concentrici: uno strato più interno è costituito da polietilene ad alta densità, uno strato intermedio in materiale polimerico ed uno strato esterno impermeabile all'ossigeno e costituito da copolimeri in etil vinil alcol (EVOH). I tubi sono in grado di resistere ad alte pressioni, temperature ed alla corrosione. La connessione dei tubi tra un concio e l'altro e con la condotta di mandata e ritorno avviene, dopo la posa, tramite appositi manicotti che rimangono facilmente ispezionabili. Per garantire un'agevole ispezione durante la vita utile della struttura i tubi principali di mandata e di ritorno possono essere sistemati sotto il marciapiede di sicurezza posto ai lati della galleria. Il fluido termovettore è costituito da glicole propilenico miscelato con acqua in grado di lavorare anche sotto i -20°C.
La galleria è realizzata in prossimità del nuovo grattacielo di 220 m di altezza dove troveranno sede gli uffici della Regione Piemonte (in costruzione, Fig 1). L'attivazione termica del rivestimento della galleria (che può avvenire per una lunghezza di 1350 m) potrebbe consentire di fornire energia termica alla nuova torre.

3. Il sottosuolo di Torino

L'area interessata dalla metropolitana di Torino è posta sulla parte ovest della valle del Po ed ha una superficie complessiva di 130 km^2 di cui l'80% è compreso tra il torrente Stura di Lanzo, il fiume Po ed il torrente Sangone. Il rimanente 20% è costituito dall'area collinare che si estende fino alle colline del Monferrato. L'area della città di Torino sorge al fondo della conoide alluvionale del torrente Dora Riparia. Dal punto di vista morfologico quest'area si presenta molto piatta con una leggera pendenza da ovest verso est con quote da 260-270 m s.l.m. a circa 220 m s.l.m. (Bottino & Civita, 1986; Civita & Pizzo, 2001).
Il sottosuolo di Torino è costituito da sabbie e depositi ghiaiosi da mediamente a molto dense e al di sotto di 8-10 m di profondità sono frequentemente presenti lenti di conglomerato (suolo cementato).
Il modello geotecnico del sottosuolo di Torino è stato definito avendo a disposizione numerose indagini geotecniche e analisi numeriche eseguite in passato (Barla & Vai 1999, Barla & Barla 2005, Barla & Barla 2012). Il livello di falda lungo il tracciato della galleria è stato determinato con misure piezometriche e con previsioni a lungo termine. La superficie libera della falda è posta a 12 m dal piano campagna e lo spessore dell'acquifero è di circa 22-23 m con una velocità media di 1.5 m/giorno nella direzione del fiume Po. Nelle analisi numeriche il terreno attorno alla galleria è stato assunto isotropo ed omogeneo. I parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero sono indicati nella Tab 1 e sono il risultato di prove di pompaggio, con monitoraggio della temperatura, eseguite per tre mesi consecutivi (Barla et al. 2013). L'acqua dell'acquifero ha una temperatura media durante l'anno di 14°C.

Tab 1. Parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero (Barla et al. 2013)

Parametri	*Valore*	*Parametri*	*Valore*
Conducibilità idraulica orizzontale k_h (m/s) $\cdot 10^{-3}$	3.8÷4.5	Capacità termica della parte solida $c_s\rho_s$ (MJ/m^3/K)	2.0
Conducibilità idraulica verticale k_s (m/s) $\cdot 10^{-3}$	0.19-0.225	Conducibilità termica dell'acqua λ_w (W/mK)	0.65
Coefficiente di immagazzinamento S_y (-)$\cdot 10^{-2}$	4.0	Conducibilità termica della parte solida λ_s (W/m/K)	2.80
Porosità n (-)	0.25	Dispersività longitudinale α_L (m)	3.1
Capacità termica dell'acqua $c_w\rho_w$ (MJ/m^3/K)	4.2	Dispersività trasversale α_T (m)	0.3

4. Efficienza del sistema

Con l'obiettivo di studiare l'efficienza dell'attivazione termica del rivestimento della galleria del prolungamento della linea 1, sono state eseguite una serie di analisi di flusso termo-idraulico agli elementi finiti (FEM) con il codice di calcolo FEFLOW (Diersch, 2009). Un modello 3D è stato realizzato per riprodurre una porzione strumentata della galleria. Il modello è composto da 648999 nodi, 1250928 elementi prismatici a sei nodi e 2465 elementi monodimensionali che simulano i tubi.

La Fig 2 mostra le dimensioni e le condizioni di bordo assunte nel modello. La direzione del flusso idraulico è perpendicolare all'asse della galleria, di conseguenza si è assunto che ogni anello non influenzi quelli adiacenti da un punto di vista termico e pertanto si è simulato un solo anello di spessore 1.4 m.

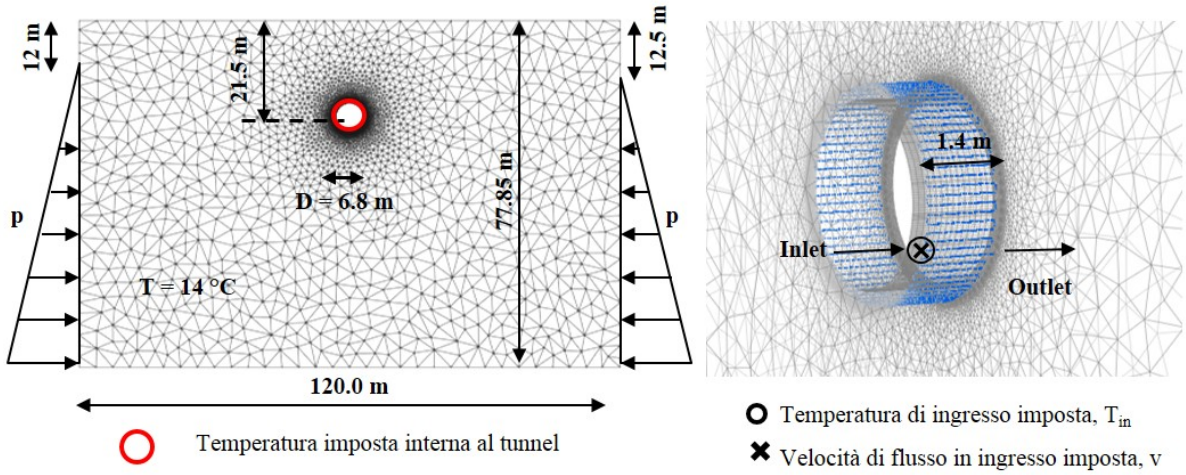


Fig 2. Geometria e dimensioni del modello 3D.

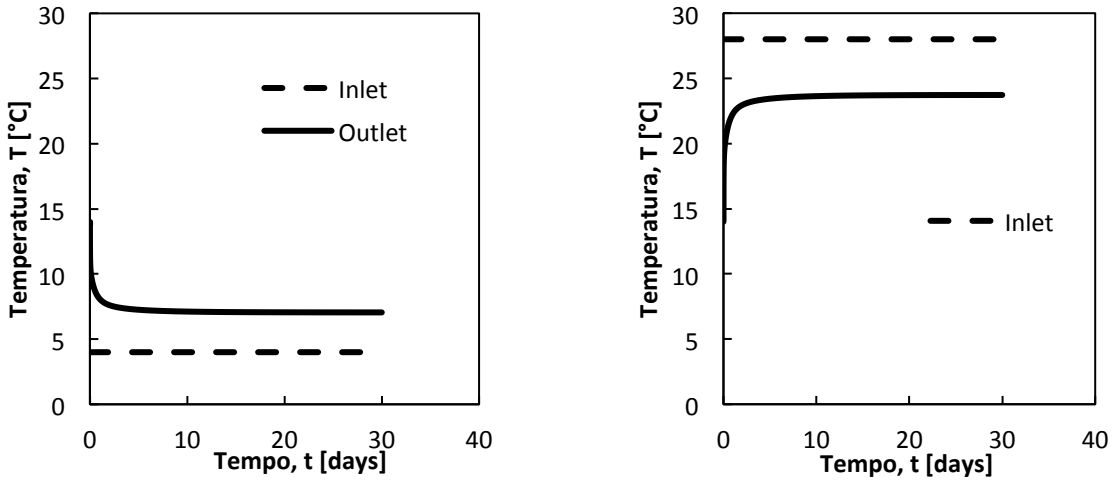


Fig 3. Temperatura di ingresso e di uscita in (a) inverno e (b) estate.

Tab 2. Calore scambiato in inverno e in estate.

Stagione	Potenza totale scambiata, Q [kW]	Potenza scambiata al metro quadro, Q [W/m^2]	Potenza scambiata per metro lineare di galleria, Q [W/m]
Inverno	1.67	52.76	1193.42
Estate	2.34	73.87	1670.81

Le condizioni operative del sistema geotermico sono state simulate facendo circolare il fluido termovettore nei tubi ad una temperatura e velocità iniziale assegnate e frutto di uno studio di ottimizzazione (temperatura compresa tra 4 e 28°C rispettivamente in inverno e in estate e velocità di 0.4 m/s).

La quantità di calore (espressa in W) che si può scambiare può essere calcolata dalla differenza tra la temperatura di ingresso e quella di uscita (risultato della modellazione numerica) del fluido termovettore dal circuito ($Q = mc_w|T_{wo} - T_{wi}|$). Il risultato del calcolo in termini di temperature entranti e uscenti è riportato nella Fig 3a e b, rispettivamente per le condizioni invernali e estive. La

differenza di temperatura calcolata dopo 30 giorni di funzionamento è compresa tra 3 e 4°C che corrispondono a un calore scambiabile di 1.7 kW in inverno e 2.3 kW in estate (Tab 2). Sulla base di questi valori, l'attivazione termica del prolungamento sud della linea 1 si rivela particolarmente favorevole rispetto ad altri casi in letteratura (Franzius & Pralle 2011) per effetto soprattutto del flusso idraulico significativo e perpendicolare all'asse della galleria.

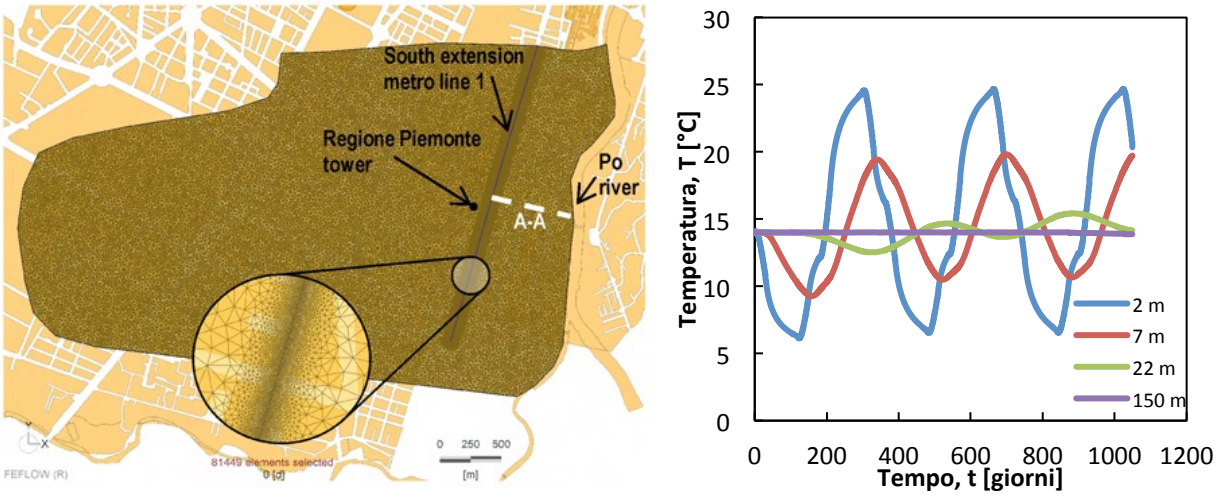
5. Sostenibilità nel lungo termine

Per studiare l'effetto dell'attivazione termica del rivestimento della galleria sull'ambiente circostante, sono state eseguite una nuova serie di analisi di flusso termo-idraulico agli elementi finiti (FEM) con un modello 2D e lo stesso codice già adottato. Il modello FEM è costituito da 81449 elementi ed un'estensione di 10.34 km^2 (Fig 4a), le condizioni e le proprietà sono analoghe a quelle del modello 3D precedente. Sono state eseguite le analisi numeriche secondo tre ipotesi di funzionamento dell'impianto geotermico proposto:

1. solo funzionamento estivo per il raffrescamento (H1);
2. solo funzionamento invernale per il riscaldamento (H2);
3. funzionamento sia durante la stagione invernale che quella estiva (H3).

Le analisi sono state eseguite in condizioni di flusso idrico stazionario e di flusso termico transitorio. La durata delle simulazioni è di 3 anni. La stagione di riscaldamento è stata assunta dal 15 ottobre al 15 aprile in accordo con i regolamenti regionali.

I risultati del calcolo mostrano che nelle due condizioni di funzionamento H1 e H2, il calore immesso o estratto non si recupera totalmente e vi è un lieve decremento o incremento della temperatura della falda nel tempo. La soluzione H3 appare decisamente più favorevole in quanto consente un recupero termico molto più veloce (Fig 4b). L'evoluzione del plume termico denota che il flusso idrico spinge il plume verso il fiume Po, alternando incrementi e abbassamenti di temperatura



(a) (b)

Fig 4. (a) Modello FEM 2D e (b) temperatura a differenti distanze dalla galleria nei tre anni di funzionamento.

6. Analisi dei costi

Le analisi numeriche hanno consentito di determinare le rese termiche dello scambiatore geotermico con funzionamento in modalità riscaldamento e raffrescamento.

Ipotizzando un funzionamento dell'impianto per 1800 ore annue in riscaldamento e per 1400 ore annue in raffrescamento è stata determinata l'energia termica che il sistema sarebbe in grado di fornire ad una o più utenze. Questo ha consentito di determinare il costo annuo per produrre tale energia e confrontarlo con le altre tipologie di impianti geotermici (a ciclo chiuso con sonde verticali ed a ciclo aperto ad acqua di falda) e con gli impianti tradizionali, utilizzando gli attuali costi dei combustibili in

Italia. Emerge che il sistema ENERTUN implichi riduzione di costi operativi dal 75 al 145% rispetto agli altri sistemi considerati. Considerando il costo da sostenere per l'attivazione termica del rivestimento della galleria, sia dal punto di vista impiantistico che edile, si è determinato che essi siano inferiori all'1% del costo di realizzazione della galleria.

7. Conclusioni

Lo studio presentato ha messo in luce che l'attivazione termica del rivestimento della galleria della metropolitana di Torino consente di sfruttare l'energia termica immagazzinata nel terreno con importanti benefici economici ed ambientali. In particolare è stato possibile concludere che:

- il modello numerico sviluppato si è rivelato efficace nel quantificare il calore che può essere scambiato con il sottosuolo sia in estate che in inverno;
- grazie alle condizioni favorevoli del flusso idraulico a Torino, il sistema ENERTUN può scambiare tra 53 e 74 W/m^2 di rivestimento, rispettivamente in inverno e in estate consentendo di coprire un fabbisogno termico di 2822 kW in riscaldamento e 3756 kW in raffrescamento;
- la variazione della temperatura della falda nell'intorno della galleria è modesta, con variazioni minori di 5°C a 10 m di distanza dal contorno della galleria e completo recupero dopo il ciclo annuale;
- il costo aggiuntivo per attivare termicamente la galleria è risultato inferiore all'1% del costo totale dell'opera ed è il 41% inferiore dell'utilizzo di sonde verticali, a parità di fabbisogno termico.

Considerando la natura locale della sorgente di calore, le gallerie energetiche possono essere efficacemente adottate per il teleriscaldamento di aree urbane densamente popolate.

Bibliografia

Adam D, Markiewicz R. (2009). Géotechnique 59 (3), pp. 229-236.

Barla G, Antolini F, Barla M, Bonini M, Debernardi D, Perino A. (2013). Consultancy contract (n. rep. 52 del 15.12.2011) "Analisi e Verifica delle Condizioni di Esercizio in Sicurezza del Palazzo Uffici Provinciali di Corso Inghilterra 7 tenuto conto del Centro Direzionale di Intesa Sanpaolo". Technical report on pumping tests. Politecnico di Torino.

Barla G, Vai L. (1999). Indagini geotecniche per la caratterizzazione del sottosuolo di Torino lungo il tracciato del passante ferroviario. XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma.

Barla M, Barla G. (2005). Assessing design parameters for tunnelling in a cemented granular soil by continuum and discontinuum modelling. Proc. 11th Iacmag Conference, Torino, 19-24 June 2005, Vol. 4, pp. 475-484, Patron Editore.

Barla M, Barla G. (2012). Torino subsoil characterisation by combining site investigations and numerical modelling. Geomechanik und Tunnelbau 5 (3), pp. 214-231.

Bottino G, Civita M. (1986). Engineering geological features and mapping of subsurface in the metropolitan area of Turin, North Italy. 5th International IAEG Congress, Buenos Aires, pp. 1741-1753.

Brandl H. (2006). "Energy foundations and other thermo-active ground structures", Geotechnique 56(2), 81-122.

Civita M, Pizzo S. (2001). L'evoluzione spazio-temporale del livello piezometrico dell'acquifero libero nel sottosuolo di Torino. GEAM, 38, 4, pp.271 – 287.Diersch, H.J.G. 2009. DHI Wasy Software - Feflow 6.1 - Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System: Reference Manual. DHI Wasy GmbH, pp. 292, Berlin, Germany

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

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

Markiewicz R, Adam D. (2003). Utilisation of Geothermal Energy using Earthcoupled Structure - Theoretical and Experimental Investigations, Case Histories. In: Geotechnical Problems With Man-Made And Man Influenced Grounds. XIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 2, 25-28 August 2003, Prague.

Pralle, N, Franzius J N, Gottschalk D. (2009). City district – mobility and energy supply: synergy potential of geothermal activated tunnels. VDI Bautechnik 84: 98–103 (in German).

Schneider M, Moormann C. (2010). GeoTU6 – a geothermal research project for tunnels. Tunnel 2, pp. 14-21.