

LE GALLERIE METROPOLITANE COME SCAMBIATORI DI CALORE:  
UNA IDEA DI APPLICAZIONE A TORINO

*Original*

LE GALLERIE METROPOLITANE COME SCAMBIATORI DI CALORE:  
UNA IDEA DI APPLICAZIONE A TORINO / Perino, A., Barla, M.. - ELETTRONICO. - (2014). (Incontro Annuale  
Ricercatori di Geotecnica - IARG 2014 Chieti 14-15-16 luglio 2014).

*Availability:*

This version is available at: 11583/2556342 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*

(Article begins on next page)

## LE GALLERIE METROPOLITANE COME SCAMBIATORI DI CALORE: UNA IDEA DI APPLICAZIONE A TORINO

Andrea Perino

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino*  
*andrea.perino@polito.it*

Marco Barla

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino*  
*marco.barla@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 raffreddare gli edifici in superficie. Nell'ambito di una ricerca in corso al Politecnico di Torino, la nota descrive una possibile applicazione alla metropolitana di Torino descrivendo alcuni risultati di analisi numeriche finalizzate a studiare gli effetti dell'attivazione termica del rivestimento della galleria sulla falda preesistente.

### 1. Introduzione

Questa nota descrive alcune attività legate alla ricerca in corso per lo Studio di fattibilità ENERTUN (Responsabile scientifico: Marco Barla) finanziato dalla Regione Piemonte, nell'ambito del Polo di Innovazione Regionale Enemhy e condotto in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino e la Desa Srl. Il programma di ricerca ha l'obiettivo di sviluppare un innovativo sistema di sfruttamento del calore del sottosuolo, trasformando il rivestimento delle gallerie urbane in uno scambiatore di calore.

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. La maggior parte dell'attività di ricerca e delle applicazioni pratiche ha inoltre riguardato fondazioni (pali energetici) o strutture di contenimento (paratie). Sono pochi gli esempi documentati di applicazioni in galleria (Markiewicz & Adams 2003, Schneider & Moormann 2010, Franzius & Pralle 2011).

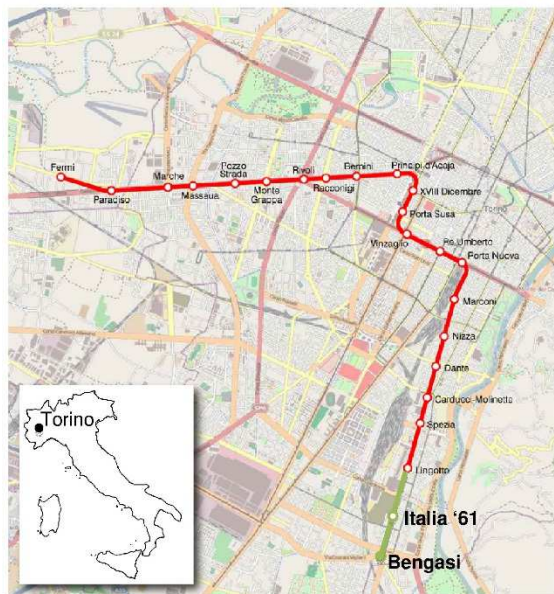
Le strutture sotterranee possono essere attivate termicamente installando all'interno del calcestruzzo una rete di tubi in materiale plastico. Il fluido che scorre nei tubi costituisce il mezzo per il trasferimento del calore dal terreno agli edifici e viceversa. L'estrazione del calore dal fluido termovettore viene eseguita dalle pompe di calore, il cui funzionamento è sostanzialmente simile a quello di un frigorifero, con ciclo invertito.

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 e collegamenti tra un concio e l'altro eseguiti in sito attraverso appositi manicotti (Pralle et al., 2009).

L'attivazione termica del rivestimento può produrre effetti sia sulla temperatura interna della galleria che su quella del terreno circostante. Gli effetti sulla temperatura dell'aria interna della galleria sono più o meno importanti a seconda che si tratti di una galleria cosiddetta fredda o calda. Una galleria è definita fredda quando l'aria interna ha una temperatura prossima a quella dell'aria esterna, calda quando l'aria interna è riscaldata sia dal terreno circostante che dal traffico, in genere ferroviario, circolante al suo interno. Le gallerie fredde possono essere efficientemente usate come scambiatori di calore in grado di assolvere, una volta connessi ad una pompa di calore, alla domanda di riscaldamento e di raffrescamento di un edificio. In questo caso il calore è estratto dal sottosuolo quando l'impianto funziona in riscaldamento mentre viene immesso nel sottosuolo quando l'impianto opera in raffrescamento. L'attivazione termica del rivestimento di una galleria calda è invece conveniente solo in riscaldamento. In questo ultimo caso si ha però il vantaggio della riduzione della temperatura dell'aria interna della galleria.

## **2. La linea 1 della metropolitana di Torino**

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 (Fig. 1).



*Fig 1. Tracciato della linea 1 della metropolitana di Torino con evidenziato il prolungamento sud.*

La metropolitana di Torino utilizza il sistema automatico VAL 208 (Veicolo Automatico Leggero) costituito da veicoli senza conducente in grado di garantire un forte miglioramento della sicurezza rispetto ai sistemi tradizionali, un'altissima affidabilità, un'elevata capacità di trasporto (oltre 15.000 passeggeri per ora e per direzione) ed una notevole frequenza treni.

La galleria principale è stata realizzata a profondità variabili tra 15-20 m mediante quattro TBM EPB di 7.8 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 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. Infatti sia la trazione motrice che l'azione frenante sono distribuite su tutte le ruote dei convogli determinando una produzione di calore molto bassa.

### 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<sup>2</sup> 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).

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 livello di falda lungo il tracciato della galleria è stato determinato con misure piezometriche e con previsioni a lungo termine.

Il modello geotecnico del sottosuolo di Torino è stato definito avendo a disposizione numerose indagini geotecniche e analisi numeriche eseguite in passato. Per il tratto interessato dalla metropolitana sono state individuate quattro unità geotecniche (GU) (Barla & Vai 1999, Barla & Barla 2005, Barla & Barla 2012) con i parametri indicati nella Tab. 1.

Tab 1. Parametri di deformabilità e di resistenza utilizzati per fini progettuali (Barla & Barla, 2012)\*

Unità	Descrizione	C%	D <sub>r</sub>	γ <sub>n</sub>	E	ν'	φ'	c'
		%	%	kN/m <sup>3</sup>	MPa	-	°	kPa
GU1	strato superficiale (riporto e limo sabbioso argilloso)		50÷60	17÷19	10÷20	0.35	36÷37	0
GU2	sabbie e ghiaie da sciolte a poco cementate	0÷25	50÷70	18÷21	190÷240	0.30	37÷39	0÷30
GU3	sabbie e ghiaie da poco a mediamente cementate	25÷50	60÷80	19÷22	240÷300	0.30	37÷42	15÷80
GU4	sabbie e ghiaie da mediamente a fortemente cementate	50÷75	60÷80	19÷22	300÷340	0.30	39÷48	50÷200

\* C% = percentuale di cementazione, D<sub>r</sub> = densità relativa, γ<sub>n</sub> = peso di volume naturale, E = modulo di Young,

ν = coefficiente di Poisson, φ' = angolo di resistenza al taglio, c' = coesione

### 4. Possibile attivazione termica delle gallerie del prolungamento sud della linea 1

Il prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino potrebbe costituire una buona opportunità per testare il funzionamento della tecnologia dell'attivazione termica del rivestimento della galleria 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) il quale è posto 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 con TBM EPB di caratteristiche analoghe ai precedenti tratti. La profondità media del tratto di galleria è di 16.5 m e lo scavo avverrà al di sotto del livello di falda.

La galleria è realizzata in prossimità del nuovo grattacielo (in fase di costruzione) di 220 m di altezza

dove troveranno sede gli uffici della Regione Piemonte (Fig. 2). L'attivazione termica del rivestimento della galleria, attraverso l'installazione di una rete di tubi in polietilene in grado di trasportare il fluido termovettore (Fig. 2), potrebbe consentire di fornire energia termica alla nuova torre.

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. Ogni anello presenta all'interno una rete di tubi. 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 al di sotto del 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  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Attivando 1350 m del rivestimento del prolungamento sud della linea 1 ed assumendo in via cautelativa un flusso di calore estratto pari a  $10 \text{ W/m}^2$ , si potrebbero estrarre circa 450 kW, tali da coprire almeno la metà del fabbisogno annuo di riscaldamento/raffrescamento del grattacielo.

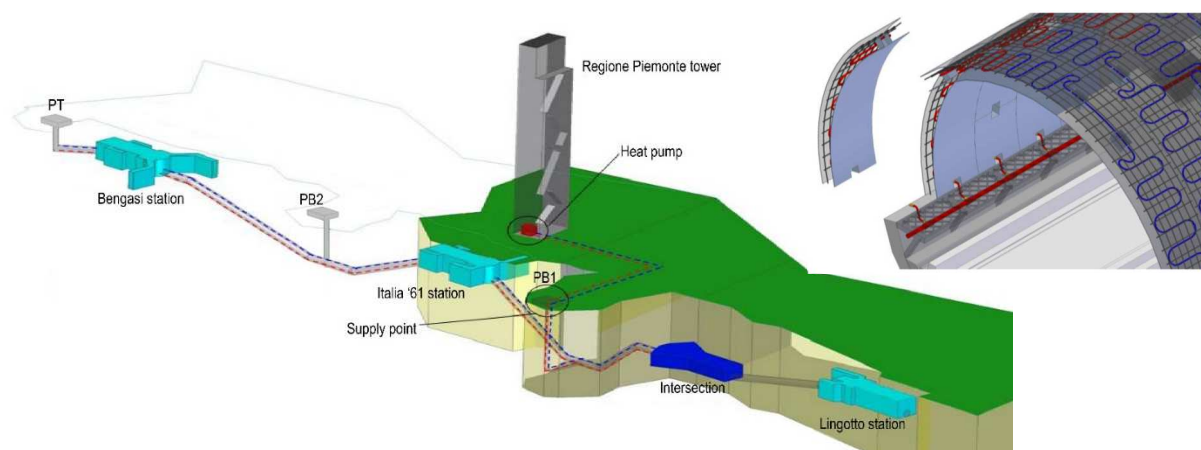


Fig 2. Schema dell'impianto geotermico a servizio del grattacielo della Regione Piemonte (la scala delle distanze verticali e orizzontali è diversa) realizzato utilizzando le gallerie del prolungamento sud della linea 1 della metropolitana di Torino e spaccato dell'impianto per l'attivazione termica del rivestimento della galleria.

## 5. Analisi numeriche preliminari

Con l'obiettivo di studiare l'effetto sull'ambiente circostante dell'attivazione termica del rivestimento della galleria del prolungamento della linea 1 sono state eseguite una serie di analisi di flusso termoidraulico agli elementi finiti (FEM) con il codice di calcolo FEFLOW (Diersch, 2009). Il lavoro è stato svolto nell'ambito di un progetto di ricerca del Politecnico di Torino.

Nel sito di interesse la superficie libera della falda è posta a 12 m dal piano campagna e lo spessore dell'acquifero è di circa 22-23 m.

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. 2 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  $14^{\circ}\text{C}$  e fluisce in direzione sud-est verso il fiume Po.

Un modello FEM costituito da 81449 elementi ed un'estensione di  $10.34 \text{ km}^2$  è stato realizzato con il codice FEFLOW con l'intento di simulare l'effetto dell'attivazione termica dell'intero tratto del prolungamento sud. La Fig. 3 riporta un'immagine del modello FEM.

Tab 2. Parametri idraulici, idro-dispersivi e termici dell'acquifero (Barla et al. 2013)

Parametri	Valore	Parametri	Valore
Conducibilità idraulica orizzontale $K_h$ (m/s) · 10 <sup>-3</sup>	3.8÷4.5	Capacità termica della parte solida $c_{ps}$ (MJ/m <sup>3</sup> /K)	2.0
Rapporto di conducibilità idraulica $K_v/K_h$	0.05	Conducibilità termica dell'acqua $\lambda_w$ (J/m/s/K)	0.65
Coefficiente di immagazzinamento $S_y$ (-) · 10 <sup>-2</sup>	4.0	Conducibilità termica della parte solida $\lambda_s$ (J/m/s/K)	2.80
Porosità $n$ (%)	25	Dispersività longitudinale $\alpha_L$ (m)	3.1
Capacità termica dell'acqua $c_{wDw}$ (MJ/m <sup>3</sup> /K)	4.2	Dispersività trasversale $\alpha_T$ (m)	0.3

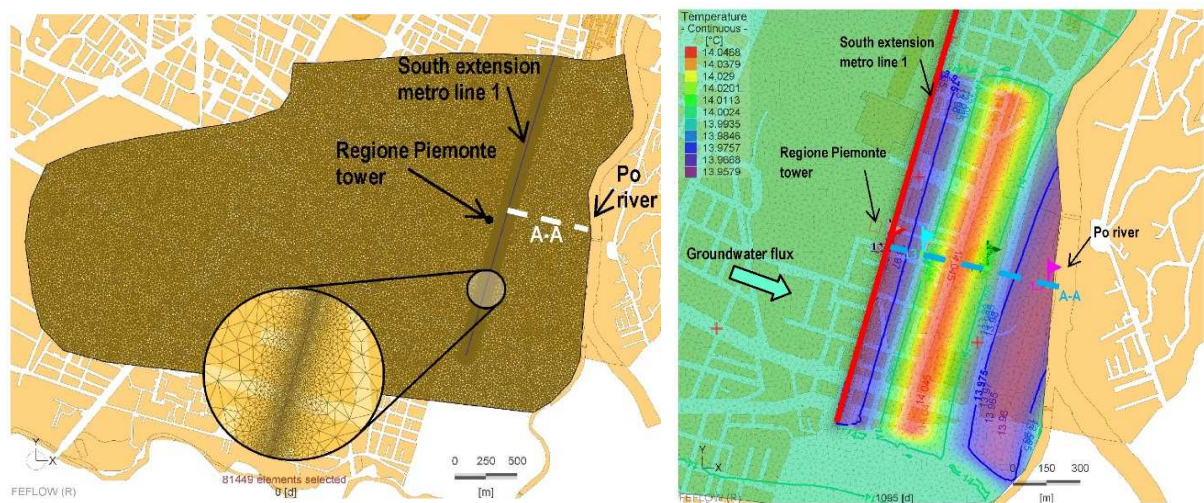


Fig 3. Modello FEM utilizzato nelle analisi (a) e plume termico al termine del terzo anno di simulazione nell'ipotesi di funzionamento H3 (b).

La prima fase di calcolo è consistita nella definizione del flusso idraulico dell'acquifero. Il livello idrico di primo tentativo della superficie libera della falda è stato preso dallo studio di Civita & Pizzo (2001). I livelli idrici di monte e di valle sono stati variati utilizzando una procedura trial-and-error (Spritz & Moreno 1996) in modo tale da minimizzare le differenze tra i livelli idrici misurati e quelli calcolati.

Una volta calibrato il modello dal punto di vista idraulico sono state eseguite le analisi numeriche secondo tre ipotesi di funzionamento dell'impianto geotermico proposto:

1. Estrazione continua di calore dal terreno (H1);
2. Estrazione variabile di calore in funzione della domanda di energia termica che si ha durante una stagione di riscaldamento (H2);
3. Estrazione/iniezione di calore per assolvere alla domanda di riscaldamento durante la stagione invernale e di raffreddamento durante la stagione 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. L'ipotesi di funzionamento H2 lavora 1280 ore/anno in riscaldamento mentre l'ipotesi H3 opera anche in raffreddamento per 810 ore/anno. Le ore di riscaldamento/raffreddamento sono state assunte con variazione mensile. La data di inizio della simulazione è il primo gennaio.

L'estrazione e l'iniezione di calore sono state simulate applicando un flusso di calore, positivo o negativo, lungo l'asse della galleria, assunto conservativamente e in accordo a precedenti esperienze pari a 10 W/m<sup>2</sup>. Un valore più attendibile potrebbe essere ottenuto attraverso prove in situ.

La modellazione ha consentito di evidenziare che, in assenza di flusso idraulico, la temperatura nel

terreno nelle immediate vicinanze del rivestimento:

- decresce drasticamente nella condizione di funzionamento H1;
- decresce di circa 3.2°C nella condizione H2 con un recupero annuale non completo della temperatura naturale della falda;
- decresce di circa 2°C (periodo di riscaldamento) e cresce di circa 1°C (periodo di raffreddamento) nell'ipotesi di funzionamento H3.

In presenza di flusso idrico dell'acquifero l'impatto dell'attivazione termica del rivestimento sulla temperatura di falda è drasticamente ridotto. La temperatura naturale di falda si recupera completamente escludendo riduzioni/incrementi progressivi nel tempo. Quando il sistema lavora in raffreddamento, la temperatura della falda in prossimità del rivestimento cresce sopra il valore indisturbato della temperatura di falda (14°C), il fenomeno contrario si ha quando il sistema lavora in riscaldamento. L'effetto del funzionamento dell'impianto sulla temperatura di falda risulta essere lo stesso dopo 1, 2 o 3 anni di funzionamento, quindi il recupero della temperatura di falda è completo nel corso di un anno. L'evoluzione del plume termico denota che il flusso idrico spinge il plume verso il fiume Po alternando incrementi e abbassamenti di temperatura contenuti entro 1°C (Fig. 3).

## **6. Conclusioni**

Lo studio presentato, che è in buon accordo con ricerche precedenti, mette in luce che l'attivazione termica del rivestimento dell'estensione sud della linea 1 della metropolitana di Torino consente di sfruttare l'energia termica immagazzinata nel terreno con importanti benefici economici ed ambientali e senza influenze di lungo termine sulla falda.

## **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. 11<sup>th</sup> 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), pp. 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
- 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.