

## **STUDIO SPERIMENTALE E NUMERICO DEL COMPORTAMENTO TERMICO E STRUTTURALE DI GALLERIE ENERGETICHE**

Alessandra Insana  
*Politecnico di Torino*  
*alessandra.insana@polito.it*

Marco Barla  
*Politecnico di Torino*  
*marco.barla@polito.it*

### **Sommario**

La nota verte sull'indagine delle prestazioni termiche e strutturali di una tecnologia caratterizzata da una duplice funzione, quella delle gallerie energetiche. Esse, combinando i ruoli di supporto strutturale e di produzione di energia termica, implicano la coesistenza di carichi meccanici e termici, che causano alterazioni cicliche stagionali della temperatura, delle sollecitazioni e delle deformazioni nel rivestimento. Lo studio si concentra sull'analisi sperimentale in vera grandezza e numerica del rivestimento di gallerie energetiche e sulla formulazione di una struttura procedurale completa da utilizzare nella pratica di progettazione. L'obiettivo è quello di identificare, quantificare e analizzare i principali aspetti coinvolti nella progettazione e nella costruzione di gallerie energetiche rispetto a gallerie tradizionali.

### **1. Introduzione**

Tra le risorse rinnovabili la geotermia a bassa entalpia è oggi largamente diffusa in molti paesi per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici grazie ad una forma di energia termica pulita e localmente accessibile. Oltre a sistemi convenzionali a circuito aperto e a circuito chiuso, le geostrutture energetiche rappresentano la tecnologia più recente che utilizza la risorsa geotermica superficiale. In particolare in questa nota si tratteranno le gallerie energetiche, le cui prime applicazioni risalgono all'inizio degli anni 2000, come descritto in Adam e Markiewicz (2009) e Moormann et al. (2016). Nel 2016 il brevetto ENERTUN (numero brevetto italiano: 102016000020821, numero brevetto europeo: 16834047.9) ha migliorato le prestazioni energetiche e idrauliche rispetto alla configurazione esistente. Con l'obiettivo di indagare la tecnologia, nel seguito si descrive sinteticamente lo studio effettuato dagli Autori per la comprensione degli aspetti progettuali associati alla realizzazione di una galleria energetica.

### **2. Il primo prototipo italiano di galleria energetica**

Al fine di testare il comportamento del concio energetico ENERTUN, è stato realizzato un campo sperimentale di rivestimento energetico nel prolungamento Sud della galleria della Linea 1 della Metropolitana di Torino nel tratto Lingotto-Bengasi, in fase di costruzione nel 2017 e ad oggi in esercizio. Due anelli di rivestimento sono stati strumentati con la configurazione "ground&air" delle serpentine geotermiche per un totale di 12 concetti energetici. Le tubazioni sono state disposte all'interno della gabbia di armatura in prossimità dell'estradosso e dell'intradosso in modo da poter testare alternativamente tutte le tre configurazioni possibili (Fig. 1). Dopo aver effettuato il getto di calcestruzzo e aver atteso il tempo di maturazione, i concetti sono stati montati in sito a circa 42 m a Nord dalla stazione Bengasi.



Fig. 1 Esempio di gabbia di armatura di uno dei conci strumentati con le serpentine prima del getto.

Vista la natura sperimentale dello studio e l'interesse ad indagare il comportamento tensodeformativo del rivestimento per effetto delle azioni termiche indotte dall'attivazione energetica, i conci sono stati strumentati con sensori di deformazione a corda vibrante e con celle di pressione idrauliche orientati in diverse direzioni secondo lo schema mostrato in Fig. 2 (si vedano Insana, 2020 e Barla et al., 2019 per ulteriori dettagli in merito). Infine presso la stazione Bengasi sono stati posizionati la pompa di calore, il sistema di acquisizione dei dati e il ventilconvettore per la dissipazione dell'energia termica prodotta.

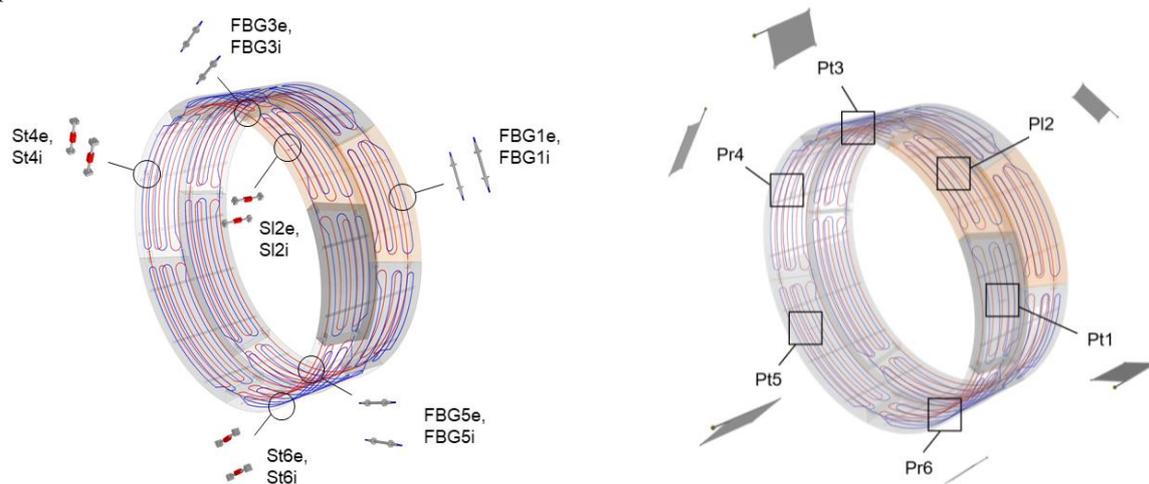


Fig. 2 Illustrazione del sistema di monitoraggio installato nel prototipo di anelli energetici.

Nel settembre 2017 ha avuto inizio la campagna sperimentale avente lo scopo di valutare l'efficienza e l'affidabilità del prototipo di galleria energetica nonché i possibili impatti sul rivestimento. Dopo una prima fase di monitoraggio delle condizioni indisturbate, nella quale sono state osservate le variazioni tensodeformative indotte unicamente dalla variazione di temperatura dell'aria in galleria ed è stato appurato il corretto funzionamento del sistema installato, si è avviata una serie di prove in modalità di riscaldamento invernale, di raffreddamento estivo e di raffreddamento della galleria (rappresentativa di gallerie profonde), sia continue sia cicliche. La Fig. 3 mostra il confronto tra una fotografia tradizionale ed un'immagine realizzata con termocamera nel corso di una prova di raffreddamento estivo in modalità "ground". La maggiore temperatura, legata al tentativo di stoccare e disperdere il calore nel terreno, rende possibile distinguere gli anelli energetici da quelli tradizionali.

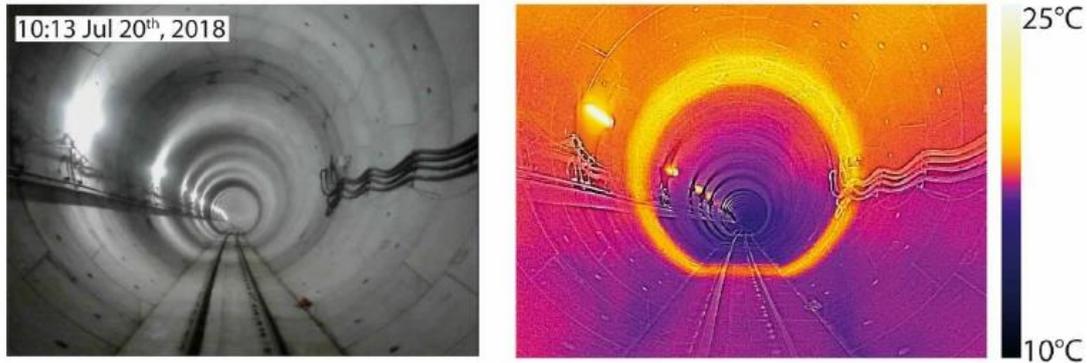


Fig. 3 Confronto tra vista tradizionale e fotografia termica durante la modalità “ground cooling”.

### 3. Il progetto termico

Il primo step nella valutazione delle prestazioni di una galleria energetica risiede nell’analisi della sua potenzialità geotermica, la quale è funzione di caratteristiche sito-specifiche quali le proprietà fisiche e termoidrauliche del terreno che la circonda ed anche del regime di velocità e della temperatura dell’aria interna. Nel seguito sono descritti brevemente i risultati delle prove condotte, la valutazione del potenziale geotermico del caso torinese e il tentativo di generalizzazione a condizioni di sito diverse.

#### 3.1 Studio sperimentale

I dati raccolti dalle prove condotte, seppur in numero limitato, hanno permesso di evincere le potenze termiche che caratterizzano il prototipo (Fig. 4), comprese tra 41 e 51  $\text{W/m}^2$  in modalità “ground heating”, 45-61  $\text{W/m}^2$  in modalità “ground cooling” e 53-55  $\text{W/m}^2$  in modalità “air heating”, paragonabili con quelle ottenute da studi numerici preliminari in letteratura (Barla et al., 2016) e superiori a casi esistenti in letteratura grazie all’effetto benefico del flusso di falda che consente di ripristinare il reservoir geotermico e di non esaurire la risorsa.

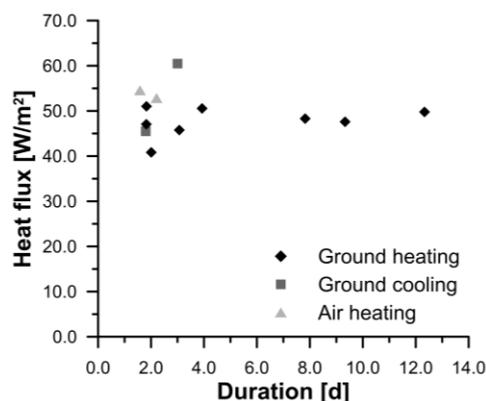


Fig. 4 Prestazione energetica del prototipo in funzione della portata del fluido termovettore.

#### 3.2 Studio numerico

La mole di dati sperimentali registrati è stata utilizzata non solo per le valutazioni espresse al Par. 3.1, ma anche per calibrare e validare un modello numerico 3D termo-idraulico (TH) agli elementi finiti nel quale è stata riprodotta fedelmente la geometria delle serpentine geotermiche installate in situ (Fig. 5, sx). La Fig. 5 a destra mostra il soddisfacente confronto tra i risultati numerici in termini di temperatura nel rivestimento e le misure di temperatura ad opera delle barrette a corda vibrante provviste di termistore NTC annegate nello spessore di calcestruzzo.

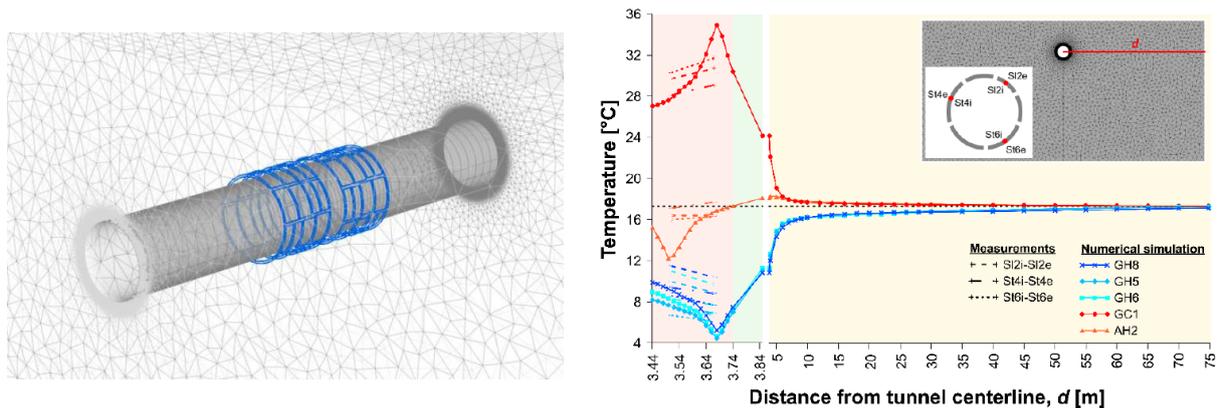


Fig. 5 Dettaglio delle tubazioni simulate nel modello numerico 3D TH (sx) e confronto tra risultati sperimentali e numerici in termini di temperature nel rivestimento (dx).

Successivamente sono state effettuate alcune analisi parametriche con l'obiettivo di analizzare condizioni diverse dal caso torinese in termini di temperatura dell'aria in galleria, velocità e direzione del flusso di falda, conducibilità termica totale del terreno. Interpolando i risultati ottenuti per alcune combinazioni dei parametri sopracitati, è stato possibile costruire gli abachi riportati in Fig. 6 (Insana e Barla, 2020; Insana, 2020). A scopo illustrativo nella figura sono indicati gli abachi ottenuti nel caso più favorevole di falda perpendicolare all'asse della galleria).

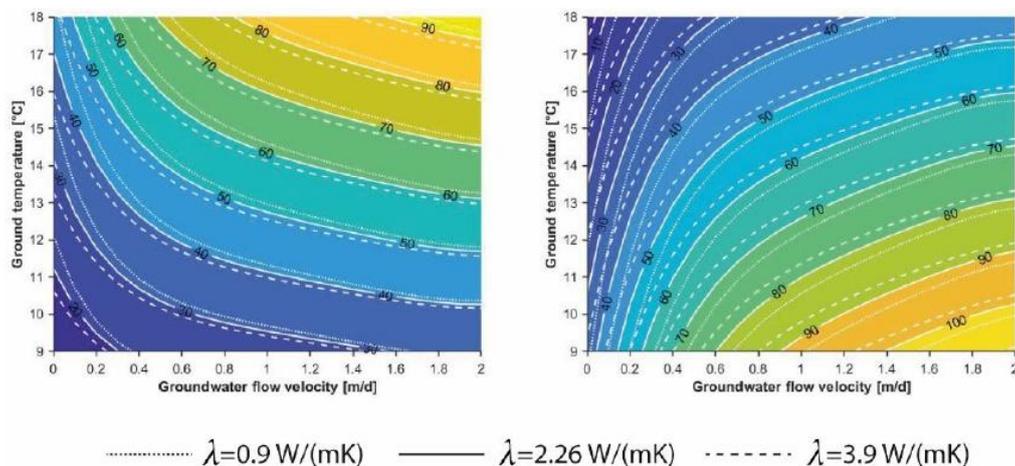


Fig. 6 Abachi di progetto per la valutazione del potenziale geotermico in  $\text{W/m}^2$  ottenuti nel caso di falda perpendicolare con configurazione ENERTUN "ground", caso invernale (sx) e caso estivo (dx).

Si nota come la massima potenza specifica si ottenga nel caso di massima velocità di flusso della falda, massima conducibilità idraulica e massima temperatura del terreno in inverno e viceversa in estate. Al diminuire della velocità della falda, la conducibilità inizia a giocare un ruolo importante. Le prestazioni migliorano significativamente quando la direzione del flusso passa da parallela a obliqua e relativamente poco quando si passa da direzione obliqua a perpendicolare.

Gli abachi sono stati infine validati rispetto a dati esistenti in letteratura e relativi sia a casi reali sia a studi numerici. Nella maggior parte dei casi si è ottenuto un buon accordo, con qualche eccezione le cui giustificazioni sono descritte in Insana (2020).

#### 4. Il progetto strutturale

Il secondo aspetto che è fondamentale approfondire è quello relativo al progetto strutturale. In nessun caso, infatti, l'integrità degli elementi in calcestruzzo può essere messa a repentaglio. Pertanto risulta di vitale importanza la comprensione delle variazioni delle quantità meccaniche fondamentali,

deformazioni e tensioni indotte dai cicli termici.

#### 4.1 Studio sperimentale

In Fig. 7 è rappresentato un esempio delle variazioni di temperatura, deformazioni e tensioni osservate nel rivestimento nel corso di una prova in modalità invernale della durata di quasi 8 giorni. La circolazione del fluido termovettore nelle serpentine determina una riduzione delle temperature nel rivestimento di circa 4-6°C e deformazioni circonferenziali e longitudinali di contrazione elastiche comprese tra 50 e 80  $\mu\epsilon$ . Le celle di pressione indicano una diminuzione di compressione radiale e circonferenziale tra 0.2 e 0.5 MPa. La risposta è sostanzialmente reversibile e non insorgono variazioni di tensione in direzione longitudinale.

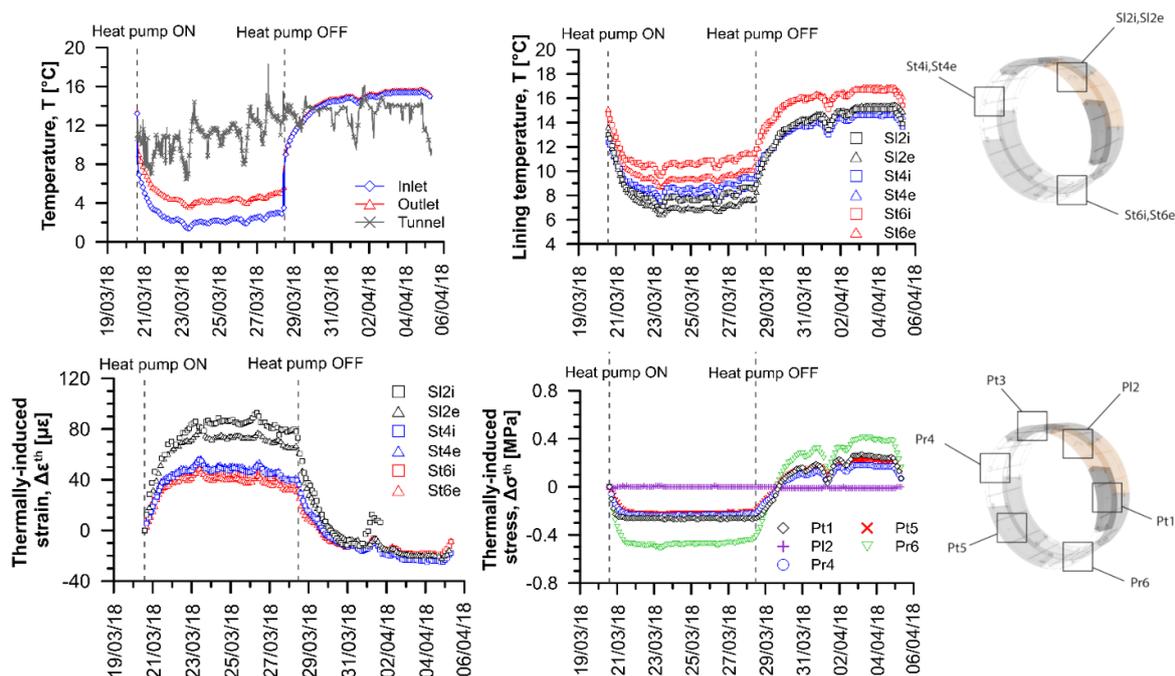


Fig. 7 Esempio di test invernale con circuito “ground”.

La rappresentazione di tutti i dati raccolti su un diagramma di variazione di deformazione in funzione della variazione di temperatura mostra valori dell'ordine di 10  $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ . Le variazioni di tensione in funzione della variazione di temperatura rivelano invece valori dell'ordine di 0.1 MPa/ $^\circ\text{C}$  per i test in modalità invernale e 0.1-0.5 MPa/ $^\circ\text{C}$  per i test in modalità estiva. Il comportamento invernale deve essere analizzato attentamente in quanto potrebbero insorgere tensioni di trazione.

#### 4.2 Studio numerico

Ad integrazione del monitoraggio è stato realizzato un modello bidimensionale alle differenze finite in FLAC (Itasca, 2016) nel quale, dopo aver riprodotto le fasi di scavo della galleria e l'installazione del rivestimento, sono state valutate le variazioni di tensione e deformazione nel rivestimento per effetto di un determinato campo di temperatura. La modellazione si è suddivisa in un primo step, nel quale sono stati modellati alcuni dei test sperimentali realizzati, e in un secondo step, nel quale si è ipotizzato un funzionamento decennale dell'impianto geotermico. In Fig. 8 sono illustrate le sollecitazioni calcolate e la deformata ottenuta al termine della fase di scavo e di ciascuna delle tre tipologie di prova effettuate. L'attivazione termica del rivestimento produce una convergenza addizionale massima rispetto alla fase di scavo di circa 1.2 mm (0.02%) verso l'interno della galleria in inverno (e viceversa in estate), confrontabile con quanto indicato anche in Nicholson et al. (2014). Quando il circuito air è in funzione, si osservano convergenze verso l'interno della galleria, di un

ordine di grandezza inferiore. Le sollecitazioni mostrano un incremento di sforzo normale in estate e una riduzione in inverno che sono risultati accettabili sia a Stato Limite Ultimo sia a Stato Limite di Esercizio.



Fig. 8 Azioni interne ottenute alla fine delle simulazioni termo-meccaniche di alcuni dei test effettuati.

## 5. Conclusioni

La nota sintetizza la caratterizzazione sperimentale e numerica del comportamento termico e strutturale della tecnologia bivalente delle gallerie energetiche. La campagna sperimentale condotta ha fornito risultati unici in letteratura, in particolar modo per quanto riguarda il comportamento termomeccanico. Sotto il profilo del progetto termico, sono stati quantificati i range di potenza termica scambiata nelle differenti modalità e configurazioni di prova e sono stati aggiornati ed integrati gli abachi di progetti presenti in letteratura. Dal punto di vista del progetto strutturale, sono state chiarite le conseguenze che le variazioni di temperatura originate all'interno del rivestimento hanno sullo stato tensionale e deformativo.

## Bibliografia

- Adam, D., Markiewicz, R. (2009). "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers". *Géotechnique*, 59(3), 229–236.
- Barla M., Di Donna A., Insana A. (2019). "A novel real scale experimental prototype of energy tunnel". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87, 1-14.
- Barla M., Di Donna A., Perino A. (2016). "Application of energy tunnels to an urban environment". *Geothermics* 61, 104–113.
- Insana (2020). Thermal and structural performance of energy tunnels. PhD thesis, Politecnico di Torino, 436 pp.
- Insana, A., Barla, M. (2020). "Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel". *Renewable Energy* 152, 781-792.
- Itasca (2016). Flac ver.7.0 user's manual.
- Moormann, C., Buhmann, P., Friedemann, W., Homuth, S., Pralle, N. (2016). "Tunnel geothermics – International experience with renewable energy concepts in tunnelling". *Geomechanik Tunnelbau* 9, 467-480.
- Nicholson D.P., Chen Q., De Silva M., Winter A., Winterling R. (2014). "The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK". *Engineering Sustainability* 167 (3), 118–134.