

Nuove frontiere per la geotermia

Trasformare i tunnel urbani in scambiatori geotermici, per fornire riscaldamento e condizionamento in applicazioni impiantistiche in ambito civile: è l'idea alla base del progetto EnerTun, già in corso di sperimentazione.

L'uso delle geostrutture ai fini energetici costituisce uno dei campi di applicazione più interessanti per l'ingegneria geotecnica, strutturale e termomeccanica. Potenzialmente, infatti, qualsiasi manufatto edilizio e opera infrastrutturale può permettere lo sfruttamento dello scambio termico fra il sottosuolo e le strutture sotterranee, ai fini dell'incremento della sostenibilità degli insediamenti umani. Ciò nonostante, rispetto ad altre nazioni europee, in Italia questi sistemi sono poco considerati e i progetti realizzati sono estremamente rari. Ciò nonostante un gruppo di ricercatori del Politecnico di Torino, guidato dal prof. ing. Marco Barla, sta sviluppando il progetto EnerTun, un innovativo sistema per trasformare le gallerie delle linee metropolitane in veri e propri

Inaugurata in occasione dei Giochi Olimpici invernali del 2006, la Linea 1 della Metropolitana di Torino è formata da gallerie realizzate con il sistema a conci prefabbricati, poste a profondità comprese fra -15 m e -20 m (Incolta).



scambiatori geotermici. Rispetto alle fondazioni degli edifici e a molte altre strutture sotterranee, i “tunnel energetici” presentano un’ampia superficie di scambio termico e interessano un maggior volume di terreno: possono essere distinti in gallerie “fredde” (temperatura dell’aria interna < 15 °C per tutto l’anno, bassa frequenza di transito, scarsità di frenature) e “calde” (temperatura più elevata, anche per effetto del transito di veicoli e convogli e/o per la presenza di altri impianti). Finanziato dalla Regione Piemonte nell’ambito del Polo di Innovazione Regionale Enermhy, in collaborazione con la società di ingegneria torinese Desa, il progetto di ricerca ha già investigato i complessi aspetti tecnici, operativi ed economici connessi all’idea originale e, attualmente, è giunto alla sua fase sperimentale, che contempla la costruzione di un test field nell’ambito del cantiere per il prolungamento della Linea 1 della Metropolitana di Torino.

Aspetti tecnici generali

L’attivazione termica delle strutture sotterranee avviene introducendo al loro interno, durante la fase di costruzione, una rete di tubazioni attestata su una o più pompe di calore attraverso le quali, nella fase di esercizio, circola il fluido preposto allo scambio termico. Nel caso delle gallerie, la massa del conglomerato che forma la struttura del tunnel e il suolo circostante possono essere utilizzati sia

SCHEDA DI PROGETTO

Ente promotore

Polo di Innovazione Regionale Enermhy

Progetto EnerTun

Politecnico di Torino – Dip. Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Desa Srl

Responsabile scientifico

Prof. ing. Marco Barla

Collaboratori

Ing. Alice Di Donna, ing. Alessandra Insana

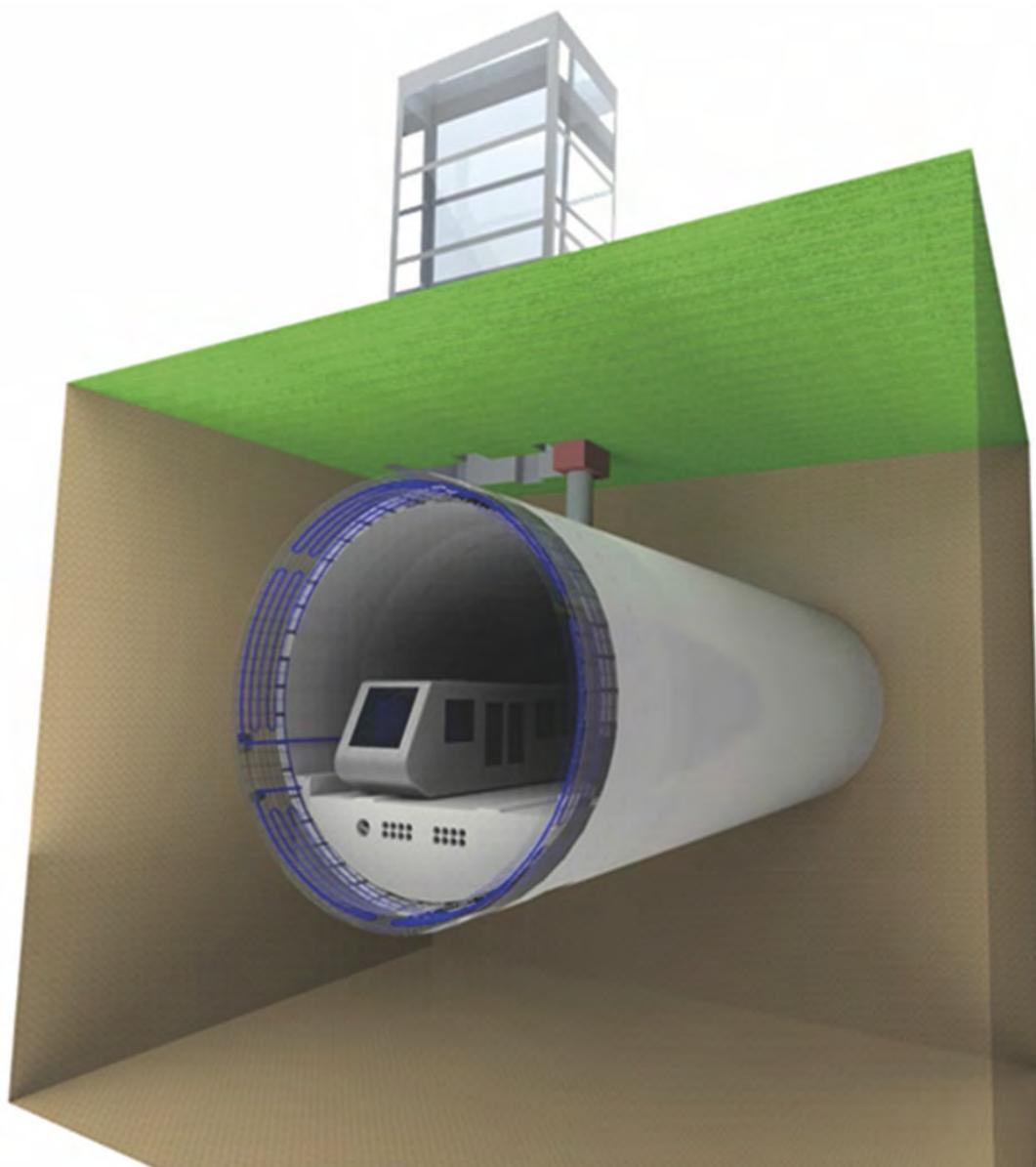
Ente finanziatore

Regione Piemonte

per estrarre energia termica, sia per accumularla, a vantaggio degli edifici collegati all’impianto. In caso di necessità, ad esempio per i tunnel molto profondi o prossimi a sorgenti geotermiche, lo stesso impianto si presta anche al raffreddamento dell’aria presente nel tunnel. Queste applicazioni sono applicabili indipendentemente dalle metodologie costruttive utilizzate. Se la galleria è realizzata in opera, le singole sonde sono normalmente fissate allo strato di geotessuto, che separa ogni anello (arcata) dello scudo esterno dal rivestimento



Il prof. ing. Marco Barla, coordinatore del gruppo di ricerca EnerTun.



Rappresentazione del progetto EnerTun applicato alla galleria della Metropolitana di Torino: il sistema si basa sull’attivazione geotermica dei tunnel per consentire lo scambio di calore con il sottosuolo (Barla, Di Donna - Polo di Innovazione Regionale Enermhy).



Ing. Alice Di Donna, ricercatrice



Ing. Alessandra Insana, dottoranda

Pochi mesi ai test

L'ing. Alice Di Donna è ricercatrice presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino: «Il sistema EnerTun si presta allo scambio geotermico finalizzato sia al riscaldamento che al raffreddamento di utenze limitrofe. Le simulazioni che abbiamo condotto sono di tipo accoppiato termo-idraulico e termo-meccanico, e comportano quindi tutte le difficoltà legate alla complessità di questi approcci. Un aspetto aggiuntivo che abbiamo dovuto considerare rispetto agli impianti basati su sonde geotermiche interne alle strutture di fondazione è il contributo dell'aria presente all'interno dei tunnel, impostando le conseguenti condizioni di bordo. Oltre al suo impiego al servizio degli impianti di climatizzazione, stiamo valutando anche l'opportunità di utilizzare questa tecnologia per raffreddare i tunnel "caldi" che, oggi, necessitano di grandi impianti di ventilazione per il controllo della temperatura dell'aria al loro interno, anche con l'obiettivo di contenere i relativi costi. Attualmente il sistema è oggetto di una richiesta di brevetto PCT e ci stiamo preparando

alla sperimentazione sul campo. I conci attivi, equipaggiati con le sonde geotermiche e con i sensori, sono in corso di realizzazione. Compatibilmente con l'avanzamento del cantiere delle nuove gallerie della Metropolitana di Torino, i conci saranno posati in opera nei prossimi mesi, perciò contiamo di dare inizio ai test entro l'estate 2017. Se i dati confermeranno le potenzialità evidenziate dalle simulazioni, auspichiamo che il sistema trovi un'applicazione diffusa quantomeno in ambiti urbani, iniziando ad esempio dalla Linea 2 della Metropolitana di Torino che si trova ora nella fase della progettazione preliminare».

interno, e poi annegate nelle gettate di finitura. Nel caso di gallerie formate da conci prefabbricati, le sonde sono inserite nei conci durante la produzione in stabilimento e vengono collegate fra loro dopo la loro posa in opera. In tutti i casi le varie sonde convergono verso le linee di distribuzione principali collegate alla centrale di pompaggio e scambio termico. Le sonde (diametro esterno 15÷35 mm; spessore 1,5÷3 mm) sono generalmente composte da strati concentrici (esterno in EVOH; intermedio in materiale polimerico; interno in PE-Xa) e sono resistenti alle alte pressioni e temperature, nonché alla corrosione chimica. All'interno delle dei conci di rivestimento delle gallerie, il cui spessore varia normalmente fra 30 e 50 cm in funzione delle condizioni geotecniche del terreno e delle caratteristiche geometriche della galleria, le sonde possono essere posizionate:

- solo in prossimità dell'estradosso del tunnel (5÷15 cm), per favorire lo scambio termico con il terreno (sistema "ground");
- solo in prossimità dell'intradosso (5÷15 cm), per privilegiare lo scambio termico con l'aria presente nella galleria (sistema "air");



Sopra, un anello con sonde geotermiche disposte in modo tradizionale; sotto, lo stesso anello con sonde disposte in direzione trasversale rispetto all'asse principale della galleria, come previsto dal progetto EnerTun (Barla, Di Donna - Polo di Innovazione Regionale Enermyh).

- in entrambe le posizioni (sistema "ground & air"), con due reti distinte. All'interno degli anelli il tracciato delle sonde si sviluppa a serpentina, con tratti lineari orizzontali e perpendicolari all'asse principale (longitudinale) della galleria e curve di diametro compreso fra 20 e 40 cm. Il collegamento fra le sonde avviene in serie, a comporre circuiti connessi in parallelo con le linee di mandata e ritorno, sempre tramite appositi manicotti ispezionabili. Queste reti sono attraversate da una miscela di acqua e glicole in grado di operare fra -20 °C e 95 °C. Come in qualsiasi impianto geotermico, le temperature del terreno e del fluido influenzano parametri determinanti per il dimensionamento dell'impianto. In generale è ritenuta idonea una differenza di 3÷5 °C fra la temperatura d'ingresso e quella di uscita del fluido, anche ai fini del dimensionamento delle pompe. A seconda delle condizioni di progetto, l'energia termica ceduta o accumulata nelle strutture delle gallerie varia tipicamente fra 10 W e 30 W per ogni m² di superficie attiva del tunnel. Questi valori crescono qualora le superfici di scambio termico sono a contatto con uno strato di



terreno in cui è presente una falda acquifera. L'inserimento delle reti di scambio termico nei conci non comporta significativi incrementi della durata delle lavorazioni e avviene a fronte di costi aggiuntivi estremamente contenuti rispetto all'importo complessivo delle opere. Il problema principale di questa tecnologia consiste nella distanza dalle potenziali utenze: per questa ragione, l'applicazione alle gallerie urbane (viabilistiche e della metropolitana) costituisce un'interessante opportunità.

Confronto virtuale

Nella prima fase del progetto EnerTun, il gruppo di ricerca si è focalizzato sullo studio di nuove soluzioni per la disposizione delle sonde all'interno delle strutture a conci, con il triplice obiettivo di diminuire le perdite di carico, aumentare l'efficienza di scambio termico e ottimizzare l'operatività delle reti geotermiche. In particolare è stato sviluppato un modello tridimensionale di rivestimento in configurazione ground, nel quale i tratti lineari delle sonde sono orientati in direzione trasversale rispetto all'asse principale della galleria, ovvero risultano allineati alla dimensione principale del conco stesso. Si tratta di una disposizione delle sonde particolarmente indicata nel caso di gallerie che attraversano perpendicolarmente le linee di flusso delle falde presenti nel sottosuolo. Questa soluzione è stata confrontata con un modello di conco caratterizzato dal sistema tradizionale di posa delle sonde, considerando: due anelli di galleria di identiche dimensioni e caratteristiche costruttive, posti in analoghe condizioni ambientali invernali ed estive, mantenendo uguale la tipologia e la lunghezza totale delle sonde. Il confronto è avvenuto sulla base di un modello bidimensionale a grande scala dell'acquifero che permea il sottosuolo di Torino.

Energy tunnel a Jenbach (Austria): dettaglio del sistema di fissaggio delle sonde geotermiche sull'armatura posta all'estradosso di un conco, prima della gettata di calcestruzzo (Rehau).

La quantificazione delle prestazioni dei modelli è avvenuta mediante analisi numeriche agli elementi finiti di tipo accoppiato termo-idraulico. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato numerosi vantaggi da parte del conco EnerTun rispetto al sistema tradizionale. Il primo aspetto positivo dell'innovativa disposizione delle sonde dentro i conci è legato alla diminuzione delle perdite di carico, compresa tra il 20% e il 30% per ogni singolo anello, dovuta al fatto che i tratti lineari delle sonde sono di lunghezza maggiore e, di conseguenza, le curve sono in numero inferiore. Nel caso in cui la galleria sia orientata con asse perpendicolare alle linee di flusso della falda, ponendo la temperatura del fluido termovettore all'ingresso della rete delle sonde come dato di input, il miglioramento dell'efficienza dello scambio termico tra conco e terreno è risultato compreso tra il 5% e il 10%. Considerando il caso dei tunnel della metropolitana di Torino, che si sviluppano all'interno di una falda in movimento in condizioni geometriche, geotecniche e termoidrauliche conosciute, nel funzionamento in condizioni invernali (estrazione di calore dal sottosuolo) il calcolo della temperatura del fluido termovettore in uscita ha restituito un incremento pari al 6,1%.

Dal tunnel al grattacielo

Sulla base delle simulazioni effettuate, l'attivazione geotermica del conco EnerTun si presta perciò a incrementare l'efficienza dello scambio geotermico, con un sostanziale miglioramento nel caso di gallerie che si sviluppano in direzione perpendicolare al flusso dell'ac-

Le simulazione in sintesi

Sabbie e depositi ghiaiosi, da mediamente a molto densi, e lenti di conglomerato, a partire da -8÷-10 m di profondità, compongono il sottosuolo della città di Torino, il cui modello è stato definito grazie a numerose indagini geotecniche e analisi numeriche eseguite in passato. Misure piezometriche eseguite in corrispondenza del tracciato della nuova galleria della metropolitana, con previsioni a lungo termine, indicano la presenza della prima falda a -12 m di profondità con uno spessore medio di circa 22,5 m. L'acqua scorre verso sud-est a una velocità di 1,5 m/g e presenta una temperatura media costante di 14 °C. Lo studio dell'efficienza del sistema di attivazione termica della galleria è stato effettuato tramite una serie di analisi di flusso termoidraulico agli elementi finiti (FEM). Il modello 3D riproduce una porzione strumentata della galleria: è composto da 648.999 nodi, 1.250.928 elementi prismatici a sei nodi e 2.465 elementi monodimensionali che simulano le sonde.

Poiché la direzione del flusso dell'acqua di falda risulta perpendicolare all'asse della galleria, non è stata considerata alcuna influenza termica fra i vari anelli che compongono la galleria, perciò la simulazione ha interessato un singolo anello.

La circolazione del fluido termovettore è stata simulata assumendo velocità pari a 0,4 m/s e temperature di ingresso pari a 4 °C (inverno) e 28 °C (estate). In tabella i risultati ottenuti dalla simulazione (durata del periodo simulato 1 mese), con ΔT 3÷4 °C (tra temperatura d'ingresso e d'uscita del fluido):

qua della falda, a fronte di una netta diminuzione delle perdite di carico dell'intero impianto. Nel corso delle simulazioni è stata anche determinata la resa dello scambiatore geotermico, ipotizzandone l'utilizzazione al servizio della costruenda torre della Sede Unica della Regione Piemonte (architettura Studio Fuksas; impianti Al Engineering). Quest'ultima è in fase di avanzata costruzione nelle vicinanze del cantiere per il prolungamento della Linea 1 della Metropolitana di Torino: il progetto impiantistico della torre ne prevede la climatizzazione mediante un impianto geotermico composto da circa 150 sonde (profondità 150 m) attestate su pompe di calore (potenzialità circa 1 MW).

L'ipotesi ha interessato:

- l'attivazione termica di 1,9 km di galleria;
- l'impiego di pompe di calore geotermiche con COP 4 ed EER 5;
- il funzionamento annuo per 1.800 ore (riscaldamento) e per 1.400 ore (raffrescamento).

In questo caso la simulazione ha restituito un potenziale geotermico di 2.822 kWt (53 W/m²) e di 3.756 kWf (74 W/m²). I risultati sono stati confrontati in via preliminare con quelli di altre tipologie di impianti, geotermici (a ciclo chiuso con sonde verticali e a ciclo aperto ad acqua di falda) e di tipo tradizionale.

Considerando i prezzi attuali dei combustibili e la spesa aggiuntiva per l'impiego del sistema EnerTun (+0,78% del costo totale del nuovo tunnel della metropolitana), l'impianto basato sull'attivazione energetica della galleria si è rivelato più vantaggioso dal punto di vista economico rispetto agli altri impianti considerati (-41% nel confronto con lo scambio termico mediante campo a sonde verticali), con la sola eccezione dell'impianto geotermico a circuito aperto.

Il tempo di rientro dell'investimento è stato stimato in 5 anni. Sotto

RISULTATI OTTENUTI DALLA SIMULAZIONE.

Stagione	Potenza		
	Totale scambiata (kW)	Al metro quadrato (W/m ²)	Per metro lineare di galleria (W/m)
Inverno	1,67	52,76	1.193,42
Estate	2,34	73,87	1.670,81

Un'ulteriore simulazione FEM ha studiato l'effetto dell'attivazione termica della galleria sulla temperatura dell'acqua della falda: è stata condotta con un modello 2D composto da 81.449 elementi su un'estensione di 10,34 km², in condizioni (flusso idrico stazionario; flusso termico transitorio) e con proprietà analoghe a quelle del modello 3D precedente, considerando distintamente il solo funzionamento stagionale (in inverno e in estate) e quello annuale. I risultati (durata del periodo simulato 3 anni) hanno evidenziato come le due ipotesi di funzionamento stagionale comportino leggere ma progressive alterazioni della temperatura dell'acqua di falda, che diminuiscono all'aumentare della distanza dal tunnel attivato energeticamente. Il ritorno alla temperatura originaria dell'acqua di falda è più veloce nel caso dell'utilizzo durante il ciclo annuale, con completo recupero delle condizioni termiche originarie.

il profilo ambientale, l'influenza del sistema EnerTun sulla temperatura dell'acqua della falda circostante è stata valutata in 5 °C a una distanza di 10 m dalle superfici attive del tunnel. L'accoppiamento di questa tecnologia sostenibile, basata su una fonte rinnovabile per la generazione distribuita dell'energia termica a bassa temperatura in ambito urbano, comporta anche la riduzione del surriscaldamento interno della galleria, causato dal traffico di esercizio, e della conseguente necessità di ventilazione forzata della stessa, restituendo ulteriori vantaggi connessi ai costi di gestione dell'infrastruttura.

Sperimentazione sul campo

Il test field interesserà il cantiere del prolungamento della Linea 1 della Metropolitana di Torino, entrata originariamente in funzione in occasione dei Giochi Olimpici Invernali del 2006. L'intera infrastruttura (lunghezza totale attualmente in servizio 13,4 km) è formata da 21 stazioni collegate da 2 gallerie, una per senso di marcia dei convogli, realizzate con il sistema a conci prefabbricati a profondità comprese fra -15 m e -20 m. La sua sezione circolare (diametro esterno 7,4 m; diametro interno 6,8 m) è stata costruita utilizzando frese meccaniche del tipo EPB (earth pressure balance), in grado di minimizzare i fenomeni di subsidenza connessi allo scavo in terreni poco coerenti e ricchi di acqua.

Fra l'involucro esterno dei tunnel e il terreno sono state iniettate schiume cementizie impermeabilizzanti.

Si tratta di una galleria "fredda", in quanto la ventilazione avviene mediante pozzi e i convogli viaggiano su gomme anziché su binari, la cui realizzazione procede alla velocità media di 7 anelli al giorno (10 m/g), costruiti prevalentemente sotto la falda evitando numerose interferenze (edifici, tunnels del passante ferroviario e stradali, par-



Posa in opera dei conci geotermici nella galleria ferroviaria ad alta velocità a Jenbach, Austria: i 27 anelli attivati sfruttano una superficie di scambio ampia circa 2.000 m², con prestazioni nell'ordine di 10 W/m² (Rehau).

Un esempio austriaco

Lungo la linea ferroviaria ad alta velocità che collegherà Verona con Monaco di Baviera, una sezione lunga 54 m della galleria a doppio binario (diametro 12 m; lunghezza totale circa 3,5 km) di tipo "freddo", situata nei pressi di Jenbach (Austria), è stata costruita utilizzando il sistema "energy tunnel".

Entrato in funzione nel 2012, l'impianto è al servizio di un edificio comunale posto a breve di distanza e costituisce una vera e propria compensazione a vantaggio della comunità locale: è stato dimensionato considerando l'uso ciclico del calore, per il solo riscaldamento invernale, in modo da favorire la rigenerazione termica del terreno. Le sonde geotermiche sono state inserite all'estradosso dei conci (lunghezza 2 m; spessore 50 cm) durante il processo di prefabbricazione, vincolandole alle armature prima della gettata finale di calcestruzzo. Una volta posati in opera, i conci e le chiavi di volta hanno composto 27 anelli, con 13 circuiti a serpentina (interasse delle sonde 30÷40 cm) che sfruttano una superficie di scambio ampia circa 2.000 m². La sezione termicamente attiva della galleria non attraversa alcuna falda: la temperatura media dell'aria nel tunnel è attorno a 12 °C, mentre quella del terreno è di 10 °C. L'energia estratta è pari a 10 W/m². Le linee di distribuzione transitano attraverso il tunnel di soccorso e raggiungono la centrale termica comunale, dove è installato anche il sistema di supervisione che utilizza sensori delle temperature del fluido termovettore, dei conci e dell'aria interna al tunnel.

Le prove di funzionamento eseguite sull'impianto hanno evidenziato la stretta correlazione fra la tipologia del flusso del fluido nelle sonde (laminare, di transizione, turbolento) con la quantità di calore scambiata per unità di superficie, che cresce al crescere del numero di Reynolds.

cheggio sotterraneo e cunicoli utilizzati anticamente per la difesa militare della città). Il prolungamento, attualmente in realizzazione nella zona sud-orientale della città, è relativo alla tratta Lingotto – Bengasi (lunghezza totale 1,9 km circa; profondità media -21,5 m): oltre a 2 nuove stazioni comprende anche 2 pozzi di ventilazione, 1 pozzo terminale posto a circa 200 m dall'ultima stazione e un'intersezione per il futuro collegamento con la stazione ferroviaria Lingotto. Ciascun anello della nuova galleria (larghezza circa 1,4 m, spessore 30 cm) è composto da 6 conci prefabbricati. Quelli destinati al test field, che interesserà due anelli, sono attualmente in realizzazione: le sonde (diametro 20 mm; spessore 2 mm) vengono inserite nei conci, a 10 cm di distanza dall'estradosso e con un interasse di circa 30 cm, ricoprendole con la gettata di conglomerato. Si tratta complessivamente di circa 250 m di tubazioni per anello da collegare fra loro e poi alla pompa di calore reversibile (6 kW), che sarà impiegata per i test di funzionamento in condizioni

© RIPRODUZIONE RISERVATA

Bibliografia

Il presente articolo è frutto della rielaborazione dei seguenti testi:

- Marco Barla, Alice Di Donna: "Gallerie energetiche in ambiente urbano", Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2015 (IARG 2015); Cagliari, 24-26/06/2015
- Marco Barla, Alice Di Donna: "Il ruolo delle condizioni geotecniche sull'efficienza delle gallerie energetiche", Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2015 (IARG 2015); Cagliari, 24-26/06/2015
- Marco Barla, Alice Di Donna, Andrea Perino: "Application of energy tunnels to an urban environment", Geothermics 61 (2016), pagg. 104-111; Elsevier Ltd