POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Energia termica da gallerie sottomarine: il caso del tunnel subportuale di Genova

Original
Energia termica da gallerie sottomarine: il caso del tunnel subportuale di Genova / Servin Vega, F.L., Insana, A., Barla, M.. - ELETTRONICO. - (2025), pp. 817-824. (XXVIII Convegno Nazionale di Geotecnica Venezia (ITA) 11-13 giugno 2025).

Availability:
This version is available at: 11583/3001724 since: 2025-07-10T12:41:55Z

Publisher:
Patron

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)

19 November 2026

Energia termica da gallerie sottomarine: il caso del tunnel subportuale di Genova

F.L. Servin Vega, A. Insana, M. Barla
Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

SOMMARIO: Per fronteggiare i cambiamenti climatici e la richiesta di energia termica, una delle soluzioni innovative offerte dalla comunità geotecnica è rappresentata dalle geostrutture energetiche, ossia strutture capaci di unire funzionalità strutturali allo scambio di calore con il terreno. Negli ultimi due decenni si è diffuso il concetto di galleria energetica con numerosi studi principalmente numerici. Ciononostante, non sono noti agli Autori studi riferiti all'esplorazione del potenziale geotermico di gallerie sottomarine. La ricerca qui condotta intende descrivere la procedura adottata per valutare la fattibilità dell'attivazione termica di gallerie sottomarine, con riferimento al caso del tunnel subportuale di Genova. A tal fine saranno adottati strumenti progettuali esistenti in letteratura e le valutazioni saranno confrontate con quelle ottenute per mezzo di modelli numerici avanzati ad elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico. I risultati consentono di fare luce sulla convenienza dell'attivazione termica delle gallerie sottomarine, con implicazioni significative per l'ingegneria geotecnica e la sostenibilità energetica.

1. INTRODUZIONE

Alla luce dei sempre più evidenti cambiamenti climatici, è fondamentale accelerare la transizione verso le energie rinnovabili per garantire un futuro sostenibile. L'Accordo di Parigi del 2015 rappresenta un punto di riferimento globale, impegnando i Paesi a limitare l'aumento della temperatura terrestre a 1.5 °C. Inoltre, l'Agenda 2030 delle Nazioni Unite pone tra i suoi obiettivi lo sviluppo di energie pulite e accessibili per tutti. Adottare fonti rinnovabili non solo riduce le emissioni di gas serra, ma favorisce anche l'indipendenza energetica e l'innovazione tecnologica. Questo impegno richiede una collaborazione internazionale e politiche nazionali incisive.

In questo quadro ben si inseriscono le geostrutture energetiche, ossia strutture capaci di unire funzionalità strutturali allo scambio di calore con il terreno o l'ammasso roccioso circostante, che consentono di soddisfare i bisogni termici sfruttando una fonte rinnovabile e localmente disponibile. Negli ultimi due decenni, si è diffuso in tutto il mondo il concetto di galleria energetica con numerosi studi numerici e applicazioni sperimentali (Adam & Markiewicz, 2009; Frodl et al. 2010; Franzius & Pralle, 2011; Zhang et al., 2014; Nicholson et al., 2015; Barla & Insana, 2023; Alvi et al., 2022). Oltre alle esperienze sviluppate nell'ambito delle gallerie scavate con metodi convenzionali e NATM come nel caso della galleria Lainzer di Vienna (Adam & Markiewicz, 2009) o del tratto sperimentale lungo il collegamento ferroviario urbano Stoccarda-Fasanenhof (Moormann & Schneider, 2010) sono di interesse in questa sede soprattutto le applicazioni allo scavo meccanizzato. In questo campo le principali esperienze sono quella legata ai conci installati presso Katzenbergtunnel (Franzius & Pralle, 2011) e nella galleria di Jenbach (Austria) per fornire calore a un edificio in superficie, e il concio energetico Enertun sviluppato presso il Politecnico di Torino nel 2016 e installato nel sito sperimentale della Linea 1 della metropolitana di Torino (Barla et al., 2019). I conci energetici sono particolarmente promettenti in quanto l'attivazione termica è gestita prevalentemente in stabilimento consentendo un maggior controllo del processo di realizzazione e un risparmio di tempo in fase di cantiere.

Il calore scambiato dal rivestimento con il terreno circostante può essere utilizzato in diversi modi, ad esempio:

- dirottato verso edifici in prossimità della galleria (Nicholson et al., 2014).
- utilizzato direttamente per il riscaldamento e/o raffrescamento delle stazioni della metropolitana (Barla et al., 2019; Bidarmaghz et al., 2021).
- utilizzato per attività di sghiacciamento degli impalcati dei ponti, delle rotaie e delle pavimentazioni stradali, rafforzandone sia la sicurezza che la durata (Baralis et al., 2020; De Feudis et al., 2024).

Il sistema generalmente si compone di un circuito geotermico primario (lato terreno), una pompa di calore e un circuito secondario per la distribuzione del calore all'utilizzatore finale. Il fluido termovettore generalmente adottato è acqua, eventualmente addizionata di glicole o soluzione salina che può lavorare fino a -20°C.

Questa nota intende indagare una applicazione delle gallerie energetiche ancora poco studiata, quella delle gallerie sottomarine. È noto, infatti, l'importante ruolo giocato dalla temperatura nell'intorno della galleria sulla capacità di scambio termico ottenibile tramite i rivestimenti delle gallerie (Di Donna & Barla, 2016; Insana & Barla, 2020) e come questa possa differire nelle gallerie sottomarine rispetto alle tratte in terraferma. Risulta di conseguenza di interesse comprendere, per quanto le applicazioni sottomarine possano essere non troppo numerose, se vi sia un effettivo potenziale da sfruttare. Nel seguito, per poter contestualizzare lo studio e trarre informazioni di interesse, si farà riferimento, a titolo di esempio, alla galleria subportuale in corso di progettazione nella città di Genova (Autostrade per l'Italia, 2021). Gli Autori sono a conoscenza che la possibilità di attivazione termica della galleria non è stata al momento presa in considerazione dai progettisti, tuttavia, nel contesto delle Conferenze nazionali di Geotecnica, è parso utile riferirsi ad un'opera di prossima realizzazione in Italia per valutare l'applicabilità e la potenzialità di questa tecnologia.

2. LA GALLERIA SUBPORTUALE DI GENOVA

Al fine di migliorare l'attraversamento stradale della zona dell'area del porto di Genova e di consentire la dismissione di una parte della storica sopraelevata prospiciente il mare, è in corso di progettazione una galleria stradale nota come galleria subportuale di Genova. Il progetto prevede l'attraversamento stradale del bacino interno del Porto di Genova attraverso una galleria sottomarina che collegherà la viabilità del ponente cittadino, in prossimità del polo di San Benigno, al quartiere della Foce, nel levante della città. Il tracciato, lungo circa 3.49 km, è costituito da due canne principali distinte, una per ogni senso di marcia, da realizzare mediante scavo meccanizzato con macchina TBM. Il diametro di ciascuna canna è pari a 15.40 m, ed il rivestimento sarà in conci prefabbricati di spessore 55 cm. La tratta direttamente insistente sotto il porto è di circa 450 m, dal km 2+350 al 2+800.

Inquadramento geologico e geotecnico

La Figura 1 mostra il profilo geologico longitudinale della galleria. A partire dall'imbocco Est, la galleria attraversa la Formazione del Monte Antola, caratterizzata dalla presenza di un calcare compatto con occasionali livelli di argillite calcarea. La resistenza a compressione monoassiale è compresa tra 27 e 40 MPa, con GSI=40, c'=86-280 kPa, Φ'=43-57°, γ=26-27 kN/m^3, E=1000-2000 MPa. Nel tratto di sottoattraversamento del mare sono presenti sedimenti marini, costituiti da un'alternanza di sabbie limose debolmente addensate, sabbie argillose e argille sabbiose, e le Argille di Ortovero, composte da marne argillose con la presenza di strati di limo argilloso-sabbioso compatto e sovraconsolidato e con la presenza dispersa di livelli sabbioso-ghiaiosi. Le argille di Ortovero sono caratterizzate da c'=10-15 kPa, Φ'=30°, γ=19.5 kN/m^3, E=40 MPa. I sedimenti marini presentano c'=0-10 kPa, Φ'=26-35°, γ=19 kN/m^3, E=10-40 MPa.

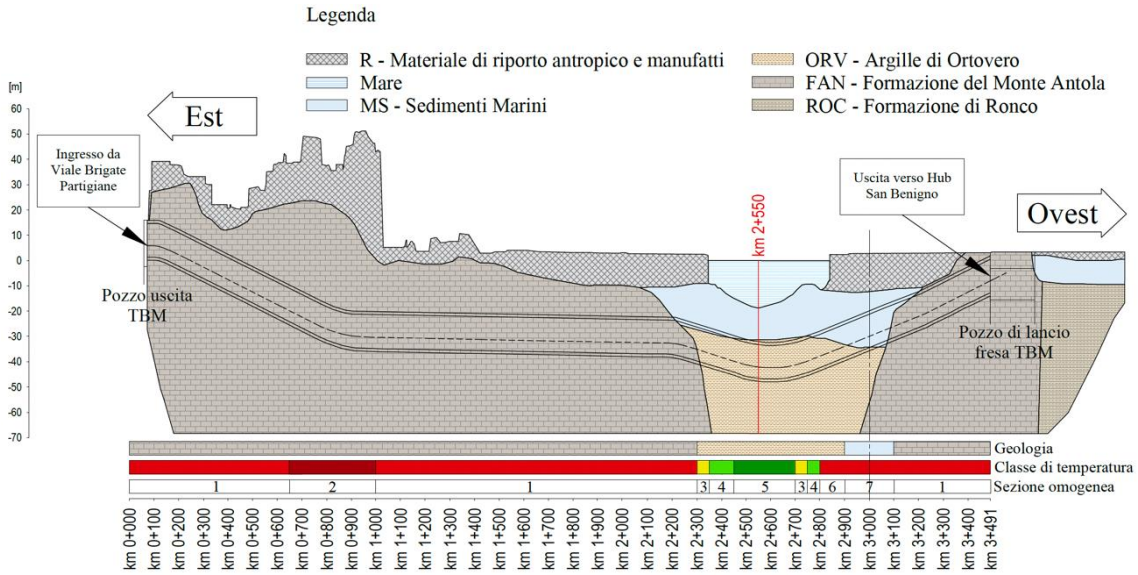


Figura 1. Profilo geologico longitudinale della galleria (modificato da Autostrade per l'Italia, 2021)

Caratteristiche geotermiche e idrogeologiche delle unità

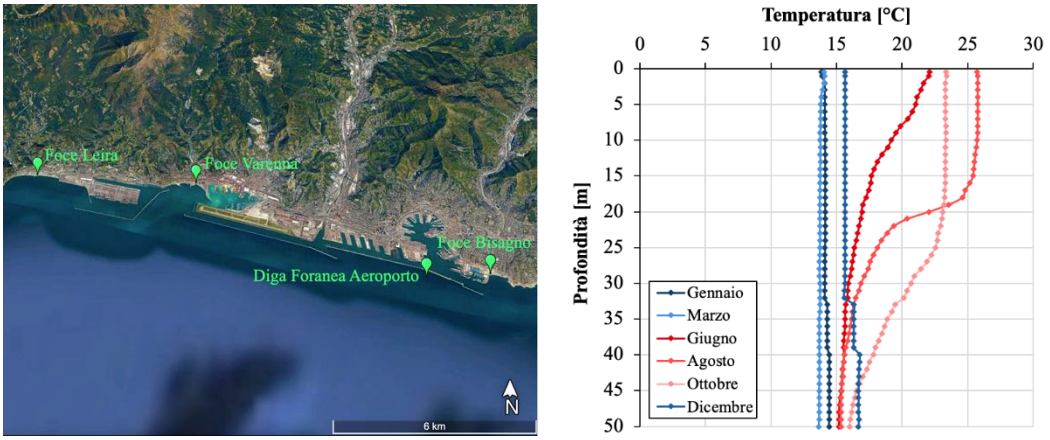
Le proprietà geotermiche relative ai terreni granulari e alle formazioni rocciose presenti nell'area interessata dall'opera sono state suddivise sulla base delle unità litostratigrafiche descritte nel paragrafo 2.1. In assenza di dati specifici, per la caratterizzazione delle unità si è fatto riferimento allo studio bibliografico e alla disponibilità di informazioni pregresse (Kumar, 2007; Goto & Matsubayashi, 2009; LaRowe et al. 2017; Robertson, 1988; Dalla Santa et al., 2020). Le proprietà adottate nel seguito dello studio sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. Proprietà geotermiche delle diverse unità.

Unità geotecnica	Conducibilità termica [W/(m·K)]	Capacità termica specifica [kJ/(kg·K)]	Porosità [-]	Permeabilità [m/s]
MS – Sedimenti marini (livelli sabbiosi)	1.2-2.25	1.30-1.93	0.3-0.75	~10^{-3}-10^{-5}
MS – Sedimenti marini (livelli coesivi)	0.25-1.52	0.69-0.97	0.3-0.75	~10^{-5}-10^{-7}
ORV – Argille di Ortovero	1.78-2.90	0.88-0.96	0.05-0.3	10^{-6}-10^{-8}
FAN – Monte Antola	0.6-5.01	0.8-0.9	< 0.05	10^{-6}-10^{-7}

Per identificare le condizioni di temperatura al contorno della galleria, si sono presi a riferimento i profili verticali della temperatura dell'acqua del mare in diverse stazioni marine di monitoraggio (Figura 2a) e la temperatura media annuale dell'aria per l'anno 2023. I dati sono stati estratti dalla banca dati dell'ARPA Liguria. L'andamento della temperatura media dell'acqua di mare è disponibile lungo diverse verticali fino ad una profondità di 50 m, come mostrato nella Figura 2b per alcuni mesi estivi e invernali. La temperatura media annuale dell'aria esterna è pari a 18.3 °C. Sulla base di queste informazioni si è potuta stimare la temperatura al contorno della galleria. La temperatura del terreno per i primi 40 m di profondità (profondità all'interno della quale è generalmente situata la galleria) nelle tratte *onshore*, è stata assunta pari alla temperatura media giornaliera dell'aria esterna. Nelle tratte ove la galleria si trova ad una profondità superiore ai 40 m, si è anche tenuto conto di un leggero incremento legato al gradiente geotermico (3°C ogni 100 m). Il range di temperatura è quindi compreso tra 18.3 e 20°C circa. Per il tratto di sottoattraversamento del mare, si è invece assunta quale temperatura quella derivante dalla media dei dati monitorati alla profondità di 50 m, pari a circa 15°C.

Per quanto riguarda la presenza di flusso idraulico a livello della galleria, in assenza di informazioni di dettaglio si è assunta per semplicità una condizione statica.



a) b)

Figura 2. a) Posizione delle stazioni di monitoraggio considerate e b) media dei profili verticali di temperatura del mare misurati in corrispondenza delle stazioni mostrate in a) nell'anno 2023 (dati ARPA Liguria).

3. DETERMINAZIONE DEL POTENZIALE GEOTERMICO DELLA GALLERIA

La galleria subportuale sarà realizzata mediante scavo meccanizzato con installazione di rivestimenti in conci prefabbricati. Tale condizione offre la possibilità di utilizzare conci energetici del tipo Enertun per consentire lo scambio di calore con il terreno circostante. In pratica, si tratta di inserire le tubazioni scambiatrici in materiale plastico durante le operazioni di realizzazione dei conci in stabilimento. Le tubazioni saranno posizionate ad estradosso, in modo da facilitare lo scambio termico con il terreno, e fissate alla gabbia di armatura. Una volta montati i conci in galleria, sarà necessario procedere al collegamento tra gli stessi e alla realizzazione di un circuito idraulico di mandata e ritorno per il collegamento con gli imbocchi delle gallerie. In questo modo sarà possibile distribuire in superficie il calore estratto dal sottosuolo. Le tubazioni potranno essere alloggiate sotto la piattaforma stradale o fissate a parete per consentire una più agevole manutenzione.

Al fine di determinare la capacità di scambio termico della galleria subportuale si è fatto riferimento a due modalità di calcolo. Una stima della potenza termica è stata ottenuta utilizzando il metodo e i nomogrammi proposti da Insana & Barla (2020). In tal modo è stato possibile stimare la produzione termica lungo tutta la progressiva della galleria. Successivamente, a titolo di confronto e verifica, si è utilizzato un approccio numerico, realizzando dei modelli agli elementi finiti e svolgendo un calcolo termo idraulico accoppiato per determinare la potenza termica scambiata in corrispondenza di una sezione trasversale specifica. Nel seguito si riportano i risultati di entrambe le modalità di calcolo.

Stima tramite nomogrammi di progetto

Per valutare in via preliminare il potenziale geotermico del rivestimento della galleria, il tracciato è stato suddiviso in sezioni omogenee secondo la procedura descritta da Baralis et al. (2018) e Barla & Insana (2023) e applicata rispettivamente alla metropolitana di Varsavia e alla Linea 2 di Torino. La suddivisione in zone omogenee avviene sulla base delle caratteristiche specifiche che si riscontrano lungo il tracciato per ciò che concerne la geologia e i parametri di conducibilità termica/idraulica dei terreni attraversati, la temperatura del sottosuolo, le caratteristiche costruttive e le caratteristiche del flusso di falda. Sono assimilate in una sezione omogenea tutte le tratte che presentano caratteristiche analoghe.

Sulla base dei dati raccolti, i parametri che influenzano la classificazione sono risultati la temperatura e le caratteristiche geologiche (Tabella 2). I metodi costruttivi e le caratteristiche del flusso di falda sono infatti costanti lungo tutta la tratta considerata.

Secondo la metodologia di lavoro le due canne sono state trattate in maniera indipendente (ipotizzando che non interferiscano tra di loro) e per ciascuna si è definita la suddivisione in tratte omogenee. Sulla base delle informazioni per ciascuna tratta omogenea è stata calcolata la potenza termica estraibile al metro quadro di rivestimento mediante l'applicazione dei nomogrammi di

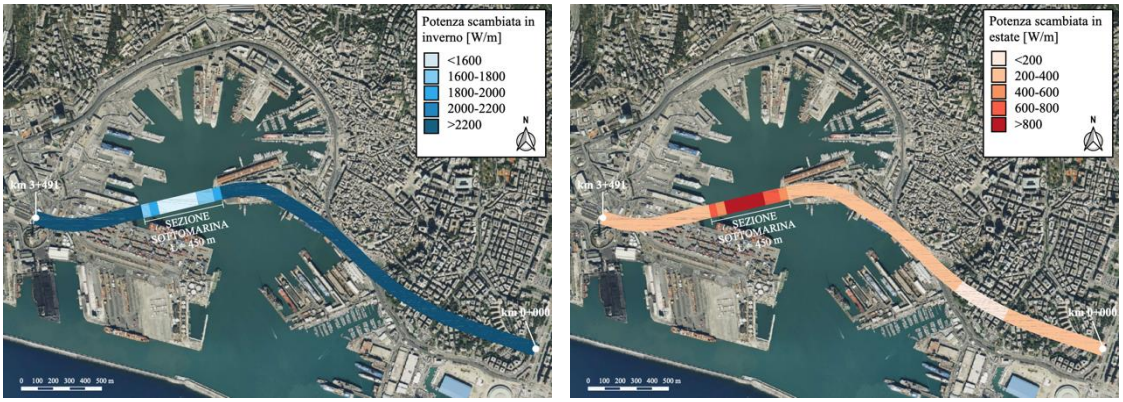
Insana & Barla (2020). La conoscenza della geometria della sezione e della lunghezza delle singole tratte omogenee ha poi consentito di integrare il dato e ottenere la potenza estraibile da ciascuna tratta e, infine, dall'intera galleria. Il calcolo è stato effettuato sia per le condizioni estive che per quelle invernali ipotizzando che la galleria possa fornire raffrescamento in estate e riscaldamento in inverno.

La Figura 3 mostra il risultato del calcolo in termini di potenziale geotermico al metro lineare di galleria in una vista planimetrica del tracciato. Nella figura è rappresentato complessivamente il risultato ottenuto da entrambe le canne. Sulla base dei risultati ottenuti, si nota un differente comportamento tra le sezioni *onshore* e quelle *offshore*. Mentre la galleria realizzata nella terraferma è maggiormente produttiva nella stagione invernale, la sezione sottomarina risulta maggiormente produttiva in estate. La ragione di questo comportamento è strettamente legata alla presenza del mare e alla sua influenza sulla temperatura del sottosuolo nella tratta sottomarina. Complessivamente si avrebbe una migliore *performance* nella stagione invernale.

Tabella 2. Dettaglio delle classi assunte per la temperatura e le condizioni geologiche.

Classe	T [°C]
1	14-15
2	15-16
3	16-17
4	17-18
5	18-19
6	19-20

Classe	Geologia e parametri geotermici
1	calcare compatto con occasionali livelli di argillite calcarea $k_h = 5.5 \cdot 10^{-7}$ m/s; $k_h = 5.5 \cdot 10^{-8}$ m/s; $\lambda = 2.81$ W/(m·K); $c_p = 0.85$ MJ/(m^3·K); $n = 0.05$
2	marne argillose con presenza di strati di limo argilloso-sabbioso compatto e sovraconsolidato $k_h = 5.05 \cdot 10^{-7}$ m/s; $k_v = 5.05 \cdot 10^{-8}$ m/s; $\lambda = 2.34$ W/(m·K); $c_p = 0.92$ MJ/(m^3·K); $n = 0.18$
3	sabbie limose debolmente addensate, sabbie argillose e argille sabbiose $k_h = 5.05 \cdot 10^{-4}$ m/s; $k_v = 5.05 \cdot 10^{-5}$ m/s; $\lambda = 0.89$ W/(m·K); $c_p = 0.83$ MJ/(m^3·K); $n = 0.53$



a) b)

Figura 3. Potenziale geotermico stimato in inverno a) e in estate b).

Stima mediante modellazione numerica agli elementi finiti 3D

Per validare il risultato ottenuto nella tratta sottomarina, è stato effettuato uno studio più approfondito mediante modellazione numerica ad elementi finiti termo-idraulica accoppiata. In particolare, si è selezionata la tratta corrispondente alla progressiva 2+550 km dove il battente d'acqua al di sopra dei sedimenti marini raggiunge il valore massimo di 19 m lungo il tracciato della galleria (Figura 1). La scelta di procedere ad uno studio di dettaglio è anche giustificata dalla differenza sostanziale di diametro tra la galleria subportuale di Genova e quella della Linea 1 della Metropolitana di Torino, alla base della costruzione dei nomogrammi.

Il modello numerico ha dimensione 152.3 x 323.40 x 10.0 m (5 anelli, ciascuno con lunghezza 2 m), come mostrato nella Figura 4a. Per evitare l'influenza dei bordi laterali, questi sono stati posizionati ad una distanza pari a 10 volte il diametro della galleria. Le serpentine geotermiche, con diametro esterno 20 mm e spessore 2 mm, sono state collocate a 6 cm dall'estradosso della galleria, con spaziatura 40 cm tra una spira e l'altra. In ciascun anello sono state posizionate 5

spire. Lo spessore del rivestimento in conci è pari a 55 cm, come specificato al capitolo 2. Il dominio è stato discretizzato con un reticolo di elementi a prismi a base triangolare, infittita attorno alla galleria e in corrispondenza del bordo superiore.

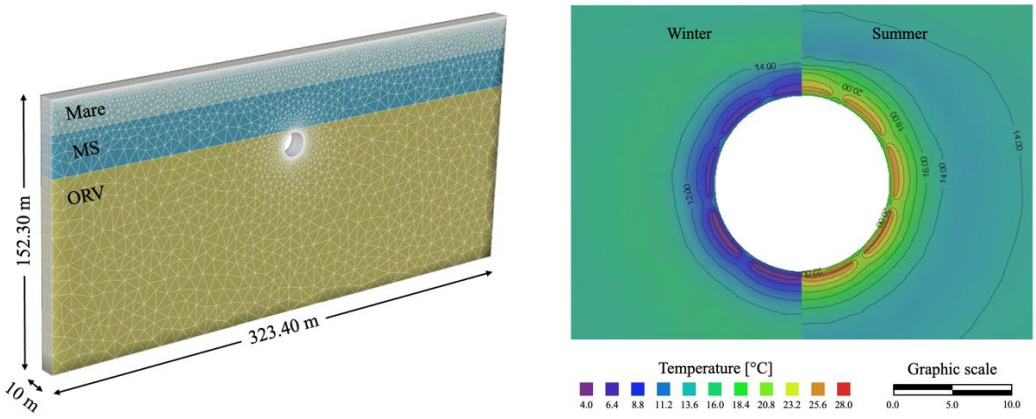


Figura 4. a) Geometria del modello numerico e b) distribuzione di temperatura dopo 30 giorni (caso B).

La sezione considerata coinvolge due unità geologiche (argille di Ortovero e sedimenti marini) le cui proprietà sono state assegnate come indicato nella Tabella 2. Le proprietà termo-idrauliche del calcestruzzo e della malta di riempimento sono le stesse riportate da Insana & Barla (2020).

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, al fine di inizializzare termicamente il dominio, al bordo superiore è stata applicata una condizione di Dirichlet con temperatura imposta pari alla temperatura dell'aria misurata dal 2019 al 2023 nella città di Genova, poi mantenuta pari a quella dell'anno 2023 nel corso della fase di attivazione termica. Al contorno inferiore la temperatura è stata fissata pari alla temperatura media misurata dalle stazioni marine di monitoraggio (15°C). Infine, sul contorno della galleria sono state ipotizzate due diverse condizioni termiche di Cauchy, in entrambi i casi con coefficiente di trasferimento termico pari a 5.3 W/(m^{2}K) (Insana & Barla, 2020): nel caso A la temperatura dell'aria è stata ipotizzata come nei nomogrammi (13.1°C in inverno e 26.7°C in estate con una transizione lineare tra le stagioni), mentre nel caso B è stata assunta pari a quella indisturbata del terreno (15°C). In entrambi i casi si è svolta un'analisi stagionale. Ai bordi laterali è stata assegnata una condizione di carico idraulico costante in modo da rappresentare un battente d'acqua statico.

Il modello è stato dapprima inizializzato termicamente per una durata complessiva di 5 anni in assenza di attivazione termica. Al termine della fase di inizializzazione, si è proceduto all'attivazione termica imponendo temperatura e velocità in ingresso/uscita alle serpentine, costanti, con l'obiettivo di calcolare la temperatura in uscita nel tempo, funzione del processo di scambio termico riprodotto numericamente. Note la differenza di temperatura tra ingresso e uscita $T_{out} - T_{in}$ (in °C) nel circuito, la portata massica m (pari a 0.183 kg/s) e la capacità termica del fluido termovettore c (pari a 4.07 kJ/(kg·°C)), è possibile calcolare la potenza termica scambiata Q (in W) come indicato nell'equazione 1:

$$Q = mc|(T_{out} - T_{in})| \quad (1)$$

L'attivazione termica è stata simulata nelle stagioni invernale (dal 1° novembre al 15 aprile) ed estiva (dal 1° giugno al 31 agosto) per 3 anni consecutivi. Il valore di temperatura in ingresso selezionato è pari a 4°C in inverno e 28°C in estate, mentre la velocità del fluido termovettore è stata imposta pari a 0.9 m/s.

I risultati ottenuti al terzo anno di attivazione dopo 30 giorni di attivazione termica in continuo (ipotesi alla base dei nomogrammi) in inverno e in estate sono illustrati nella Tabella 3, insieme al confronto con la previsione dei nomogrammi, e in Figura 4b per il caso B.

Il caso A mostra valori di potenza proporzionali a quelli ottenuti dai nomogrammi, ma inferiori e pari a circa il 60-70% di questi ultimi. Considerando che le condizioni al contorno termiche sono paragonabili a quelle alla base della costruzione dei nomogrammi, la differenza è probabilmente dovuta alla maggiore superficie di scambio termico, non compensata da un egual incremento del gradiente di temperatura lungo il circuito geotermico. Tale evidenza indica la necessità

di applicare un fattore correttivo al risultato ottenuto dai nomogrammi nel caso in cui il diametro della galleria sia sostanzialmente differente da quello adottato per costruire i nomogrammi stessi. Si nota anche che, sebbene il risultato ottenuto dai nomogrammi in termini di potenza per unità di superficie (in W/m^2) risulti superiore, considerando invece la potenza (in W) sul tratto sottomarino di 450 m, calcolata con le dimensioni del caso alla base dei nomogrammi, si ottengono valori più confrontabili e pari a circa 3/4-4/5 di quelli ottenuti con le analisi numeriche (338 kW in inverno e 190 kW in estate contro i 485 kW in inverno e i 233 kW in estate del calcolo). La performance termica, ad ogni modo, risulta migliore in inverno rispetto all'estate ragionevolmente a causa della svantaggiosa condizione aerotermica nella stagione estiva che riduce la possibilità di stoccare calore. D'altra parte, il caso B, probabilmente più realistico, inverte la stagione di maggior vantaggio termico, dal momento che si considerano 15°C costanti. Si ottiene quindi una potenza termica pari a 23.9 W/m^2 in inverno e 29.1 W/m^2 in estate, in entrambi i casi superiore al caso A, in particolare in estate. Sarà interessante monitorare la temperatura interna dell'aria una volta realizzata la galleria per valutare se sia più credibile il caso B.

Tabella 3. Risultati in termini di differenza di temperatura e potenza al trentesimo giorno di attivazione termica e confronto con i nomogrammi.

Caso	Analisi numeriche						Nomogrammi	
	ΔT (°C)		Q (kW)		q (W/m^2)		q (W/m^2)	
	Inverno	Estate	Inverno	Estate	Inverno	Estate	Inverno	Estate
A	2.90	1.39	2.15	1.03	22.3	10.7	32 (14-15°C)	18 (14-15°C)
B	3.11	3.78	2.31	2.81	23.9	29.1		

4. CONCLUSIONI

La nota ha voluto indagare la possibilità di attivazione termica di una galleria sottomarina la cui costruzione è prevista nei prossimi anni nell'area del porto della città di Genova. Lo studio è stato motivato dall'interesse di meglio comprendere l'applicabilità della soluzione di attivazione termica alle gallerie sottomarine. Il caso di studio offre inoltre caratteristiche specifiche di particolare interesse perché prevede gallerie realizzate con macchina e rivestimenti in conci prefabbricati, ovvero la condizione tecnologica che presenta un ottimo rapporto costi benefici per l'attivazione termica, e imbocchi in aree densamente popolate, che garantiscono la presenza di utilizzatori finali del calore. La tecnologia di attivazione termica ipotizzata è quella che fa riferimento ai conci energetici prefabbricati del tipo Enertun.

La metodologia adottata si è avvalsa di valutazioni preliminari basate su nomogrammi di progetto e di analisi numeriche termo idrauliche accoppiate, finalizzate a verificare le risultanze. Le differenze emerse dal calcolo tra la stima ottenuta dai nomogrammi e quella fornita dalla modellazione numerica conferma che i nomogrammi consentono una stima preliminare in fase di studio di fattibilità, tuttavia, per le fasi progettuali di maggiore dettaglio è opportuno riferirsi alle condizioni specifiche del sito e procedere ad una valutazione numerica.

Tenendo conto delle considerazioni esposte in merito alle differenze tra il calcolo numerico e l'uso dei nomogrammi, nonché le condizioni specifiche della galleria sottomarina, in definitiva sembrerebbe possibile scambiare con il terreno una energia termica compresa tra i 3 e i 5 MW. È interessante osservare che il tratto di 450 m sotto il mare è particolarmente favorevole durante l'estate (caso B) in virtù della presenza dei sedimenti marini e delle argille di Ortovero saturi e della temperatura dell'acqua di mare che si mantiene pressoché costante durante l'anno alla profondità del fondale. La presenza di aree urbane densamente popolate ad entrambi gli imbocchi della galleria offrirebbe la possibilità di dirottare il calore recuperato verso edifici di civile abitazione in superficie. In particolare, è da osservare che nei pressi dell'imbocco verso levante si trova l'Ospedale Galliera, un vasto edificio pubblico che potrebbe essere un ideale ricettore dell'energia termica. Assumendo anche solo la possibilità di poter sfruttare una parte dell'energia termica disponibile e considerando un utilizzo invernale, è prevedibile ottenere un risparmio dell'ordine dei 0.5 M€/anno rispetto all'utilizzo di altre tecnologie e una riduzione di 200 t di CO_2 equivalente grazie all'utilizzo di una fonte rinnovabile locale.

BIBLIOGRAFIA

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

Alvi et al. 2022. Thermal performance assessment of an energy lining for the Lyon-Turin base tunnel. *Soils and Rocks* 45(1): 1-12.

Autostrade per l'Italia 2021. Tunnel subportuale urbano di attraversamento della citta' Genova. Lotto 1- Tunnel Subportuale. Progetto definitivo "Tunnel - Galleria principale". Ministero delle infrastrutture e dei trasporti.

Baralis, M., Barla, M., Bogusz, W., Di Donna, A., Ryzynski, G. & Zerun, M. 2018. Geothermal potential of the NE extension Warsaw (Poland) metro tunnels. *Environmental Geotechnics* 7(4): 282-294.

Baralis, M. et al. 2020. Energy Tunnels for Deicing of a Bridge Deck in Alpine Region. *Challenges and innovation in Geomechanics, Proc. of the 16th International Conference of IACMAG 2020*: 1061-1068.

Barla, M. et al. 2019. Feasibility study for the thermal activation of Turin Metro Line 2. *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art*: 231-240.

Barla, M. & Insana, A. 2023. Energy tunnels as an opportunity for sustainable development of urban areas. *Tunneling and Underground Space Technology* 132, 104902.

Bidarmaghz, A. et al. 2021. An efficient and sustainable approach for cooling underground substations. *Tunnelling and Underground Space Technology* 113, 103986.

Dalla Santa, G. et al. 2020. An updated ground thermal properties database for GSHP applications. *Geothermics* 85, 101758.

Di Donna, A. & Barla, M. 2016. The role of ground conditions on energy tunnels' heat exchange. *Environmental Geotechnics* 3(4): 214-224.

De Feudis, S., Insana, A., Barla, M., Baccolini, L., Zilli, L. & Mazzola M. 2024. Anti-icing using the heat recovered in the Lagoscuro tunnel. *Procedia Structural Integrity* 62: 1105-1011.

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

Frodl, S. et al. 2010. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach. *Tunnel Engineering* 3(5): 658-668.

Goto, S. & Matsubayashi, O. 2009. Relations between the thermal properties and porosity of sediments in the eastern flank of the Juan de Fuca Ridge. *Earth Planets and Space* 61: 863-870.

Kumar, A. 2007. Temperature inside the landfill: effects of liquid injection and ambient temperature. Orlando, Florida: College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida.

Insana, A., Barla, M., 2020. Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. *Renewable Energy* 152: 781-792.

LaRowe, D. et al. 2017. Temperature and volume of global marine sediments. *Geology* 45(3): 275-278.

Moormann, C. & Schneider, M. 2010. GeoTU6 - a Geothermal Research Project for Tunnels. *Tunnel* 2: 14-21.

Nicholson, D. et al. 2015. The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. *Engineering Sustainability* 167(3): 118-134.

Robertson, E. C. 1988. Thermal properties of rocks. U.S. Department of the Interior Geological Survey.

Zhang, G. et al. 2014. Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers. *Energy and Buildings* 77: 149-157.

ABSTRACT

THERMAL ENERGY FROM SUBMARINE TUNNELS: THE CASE OF THE SUBPORT TUNNEL IN GENOA

Keywords: energy tunnel, submarine tunnel, thermal performance

To address climate change and thermal energy demand, an innovative solution is represented by energy geostructures, i.e. structures capable of combining structural functionality with ground heat exchange. In the last two decades the concept of energy tunnel has spread with numerous studies, mainly numerical. Nonetheless, the Authors are not aware of any studies referring to the exploration of submarine tunnels geothermal potential. This research intends to describe the procedure adopted to evaluate the feasibility of the thermal activation of submarine tunnels, with reference to the Genoa subport tunnel. Design tools existing in the literature will be adopted and the evaluations will be compared with those obtained by means of advanced numerical finite element models with thermo-hydraulic coupling.