POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Utilizzo delle geostrutture energetiche per il retrofitting di edifici e infrastrutture

Original
Utilizzo delle geostrutture energetiche per il retrofitting di edifici e infrastrutture / Barla, M., Alvi, M.R., De Feudis, S., Insana, A., Scerbo, M., Cecinato, F., Gerola, M., Morcioni, A., Salciarini, D., Capati, G., Lupattelli, A., Rafai, M., Sterpi, D., Angelotti, A.. - ELETTRONICO. - (2025), pp. D-641-D-648. (XXVIII Convegno Nazionale di Geotecnica: Sicurezza, Manutenzione e Sviluppo delle Infrastrutture Venezia (Ita) June 11-13, 2025).

Availability:
This version is available at: 11583/3001363 since: 2025-06-29T13:18:46Z

Publisher:
Pàtron Editore

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)

18 November 2026

Utilizzo delle geostrutture energetiche per il retrofitting di edifici e infrastrutture

M. Barla, M.R. Alvi, S. De Feudis, A. Insana, M. Scerbo
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

F. Cecinato, M. Gerola, A. Morcioni
Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio", Università degli Studi di Milano

D. Salciarini, G. Capati, A. Lupattelli, M. Rafai
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia

D. Sterpi
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

A. Angelotti
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

SOMMARIO: La comunità scientifica è impegnata sull'analizzare e fornire soluzioni tecnologiche e innovative che possano rispondere in maniera positiva al cambiamento climatico, contrastandone gli effetti e contribuendo allo sviluppo delle energie rinnovabili e sostenibili. Uno dei principali contributi al riscaldamento globale è rappresentato dalle emissioni di anidride carbonica dovute ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento. Partendo dalla constatazione che l'adeguamento degli edifici e delle infrastrutture per far fronte all'invecchiamento e al deterioramento degli elementi strutturali è ormai un processo continuo soprattutto in Italia e nei paesi europei, un progetto di ricerca nazionale ha inteso sfruttare questo processo come opportunità. Infatti, le geostrutture energetiche potrebbero svolgere un ruolo rilevante nella decarbonizzazione del settore delle costruzioni se considerate insieme ad altri sistemi di retrofitting energetico. La nota si concentrerà quindi sulla possibilità di intervento su geostrutture esistenti ponendosi l'obiettivo di descrivere le principali tecnologie. Per colmare le lacune di conoscenza che rallentano un'ampia applicazione pratica in Italia, si farà anche riferimento ad alcuni campi sperimentali e saranno descritti i risultati preliminari ottenuti in termini di comportamento termo-idro-meccanico ed energetico.

1 INTRODUZIONE

Vista la crescente domanda di produzione di energia termica sostenibile e rinnovabile per raggiungere uno scenario a zero emissioni entro il 2050, l'interesse per l'utilizzo dello spazio sotterraneo come fonte di riscaldamento e raffrescamento attraverso installazioni geotermiche superficiali è aumentato significativamente negli ultimi decenni (Di Donna et al., 2017; Salciarini et al., *submitted*). In questo quadro, le geostrutture energetiche (GE) rappresentano una tecnologia innovativa che, accoppiata a pompe di calore geotermiche, può essere impiegata in numerose applicazioni per fornire riscaldamento, raffrescamento o acqua calda sanitaria, oppure può essere utilizzata "*standalone*" a fini di *de-/anti-icing* (Brandl, 2006; Laloui & Di Donna, 2013; Soga & Rui, 2016; Barla & Perino, 2014; Barla & Insana, 2023, Salciarini et al., 2024; Lupattelli & Salciarini, 2024).

Recentemente, numerosi studi, soprattutto di tipo numerico, hanno analizzato il comportamento termico e termo-meccanico di geostrutture energetiche realizzate ex novo (Barla et al., 2019a,b; Cecinato & Loveridge, 2015; Loveridge & Cecinato, 2016; Di Donna et al., 2016; Insana & Barla, 2020; Sterpi et al., 2020; Bourne-Webb et al., 2022; Lupattelli & Salciarini, 2024). Tuttavia, è particolarmente interessante sviluppare soluzioni che possano essere adattate a strutture e infrastrutture esistenti, ampliando così il range di applicazioni possibili e promuovendo la diffusione delle geostrutture energetiche nel patrimonio costruito. Ad esempio, nel caso di micropali, questi possono essere adottati per edifici esistenti provvedendo a fornire anche un *retrofitting* di tipo energetico, oltre che strutturale (Ronchi et al., 2018; Cecinato & Salciarini, 2022; Gerola et al., 2023a; Lupattelli et al., 2023; Scuderi et al., 2024). Anche le pareti interrate degli edifici

esistenti possono essere attivate termicamente (Baralis & Barla, 2021) su costruzioni già realizzate. Infine, il patrimonio di gallerie esistenti rappresenta una straordinaria opportunità, soprattutto considerando i lavori di manutenzione attualmente in corso in Italia e all'estero (De Feudis et al., 2024b). Tra i tipi di geostruttura che hanno recentemente guadagnato popolarità si annoverano le palancole a sostegno di argini di canali o porti, che possono essere riadattate per estrarre energia termica sia dal terreno che dall'acqua (Gerola et al., 2023b; Gerola et al., 2024a), nonché i diaframmi *cutter-soil-mix* (CSM) termoattivi, utilizzati sia come barriere idrauliche che con funzione portante (Gerola et al., 2024b).

Il progetto PRIN GEOREFIT "*Closing Knowledge gaps on energy geostructures for retrofitting of buildings and infrastructures*", avviato nel 2023, è proprio dedicato allo studio delle geostrutture energetiche nell'ambito dell'applicazione al patrimonio costruito. Nel seguito saranno illustrate le principali tecnologie da utilizzare nei processi di *retrofitting*, anche con riferimento ad alcuni campi sperimentali e ai risultati preliminari in termini di comportamento termo-idromeccanico ed energetico.

2 LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

2.1 Il concetto di geostruttura energetica

Per GE si intende quell'insieme di opere geotecnico-strutturali, come ad esempio una fondazione, un diaframma o il rivestimento di gallerie, capaci di coniugare in un unico elemento la duplice finalità di stabilità strutturale e di scambio di calore con il terreno circostante. Agli elementi costruttivi dell'opera geotecnica sono accoppiati sistemi chiusi, costituiti da tubature al cui interno scorre un fluido termovettore composto principalmente da acqua. Questo fluido è in grado di assorbire il calore dal terreno o dall'ammasso roccioso circostante e di trasferirlo alla pompa di calore grazie alla quale verrà successivamente utilizzato.

L'integrazione di tubi scambiatori all'interno degli elementi strutturali a contatto con il terreno costituisce uno dei principali vantaggi delle geostrutture energetiche rispetto agli impianti geotermici tradizionali, che in genere prevedono scavi di grandi dimensioni o perforazioni che raggiungono profondità elevate, talvolta difficoltose da effettuare. In questo modo, infatti, si abbattono i costi delle lavorazioni e si evitano movimenti di grandi quantitativi di terreno.

I primi utilizzi delle GE risalgono agli anni '80, con alcuni esempi di piastre di fondazione. In seguito, l'utilizzo è stato esteso ad altri elementi geostrutturali, quali pali di fondazione e paratie. Il successo di queste tipologie di opere è ampiamente documentato da casi studio reperibili in letteratura, che fanno riferimento a opere costruite in particolare in Austria, Germania, Regno Unito e Svizzera (Brandl, 2006; Adam & Markiewicz, 2009; Preene & Powrie, 2009; Barla & Di Donna, 2016; Di Donna et al., 2016; Bourne-Webb et al., 2016; Laloui & Di Donna, 2013; Soga & Rui, 2016). Solo più recentemente, l'applicazione di questa tecnologia si è estesa anche all'Italia, dove iniziano ad essere presenti diverse esperienze documentate (Sterpi et al., 2018; Barla et al., 2019a,b; Baralis & Barla, 2021; Lupattelli & Salciarini, 2024).

Una limitazione d'impiego delle GE risiede nell'applicabilità quasi esclusiva alle strutture di nuova realizzazione. Dunque, è oggetto di questa nota illustrare, nel solco di alcuni studi recenti (Ronchi et al., 2018; De Feudis et al., 2024b), le potenzialità di applicazione anche nell'ambito del retrofitting degli edifici e delle infrastrutture.

3 APPLICAZIONI AL RETROFITTING

3.1 Micropali energetici

I micropali energetici (MPE) rappresentano una soluzione innovativa e promettente per lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia mediante l'impiego di elementi di fondazione termicamente attivi, particolarmente indicati nei progetti di consolidamento strutturale. Questa tecnologia offre una nuova prospettiva nel campo delle applicazioni di ingegneria civile per le geostrutture energetiche, risultando particolarmente vantaggiosa nel recupero di edifici esistenti. In tali contesti, il miglioramento della stabilità strutturale può essere sinergicamente combinato con i benefici energetici derivanti dallo sfruttamento della geotermia a bassa entalpia.

Nonostante le similitudini con i pali energetici convenzionali, i MPE presentano caratteristiche distintive legate alle dimensioni ridotte – sia in termini di lunghezza che di diametro. Dal punto di vista meccanico, il carico assiale è sostenuto principalmente dalla resistenza laterale, mentre la capacità portante alla base è quasi nulla. Dal punto di vista termico, l'efficienza energetica può risultare inferiore a causa della minore lunghezza del circuito primario e della superficie di contatto ridotta con il terreno. Tuttavia, questa limitazione è parzialmente compensata dal fatto che i MPE vengono tipicamente installati in numero maggiore rispetto ai pali termo-attivi convenzionali.

Le specifiche tecniche e le raccomandazioni per l'impiego di MPE sono stati ampiamente descritti da Lautkankare et al. (2016) e Ronchi et al. (2018). Tra i primi, Akrouch et al. (2014) hanno condotto test termo-meccanici in situ su micro-pali di piccolo diametro installati in un'argilla molto rigida e altamente plastica. In seguito, Olgun & Bowers (2016) hanno riportato i risultati di una serie di test a scala reale che dimostrano l'efficacia dei MPE nello scongelamento di un ponte, mentre Tyszer & Tomaszewska (2018) hanno presentato uno studio sull'efficacia dei MPE di tipo TITAN 73/53 in Polonia.

Un importante avanzamento nella comprensione delle prestazioni dei MPE, in particolare riguardo alle variazioni di temperatura indotte dal funzionamento di pompe di calore a circuito geotermico, è rappresentato dagli studi di Ronchi et al. (2018). Questi autori hanno descritto l'installazione e il monitoraggio di due prototipi a scala reale presso il Polo di Ingegneria dell'Università di Perugia, progettati per una serie di test termo-meccanici (Figura 1a). I test hanno permesso di raccogliere dati fondamentali, quali la temperatura del palo, la temperatura e la pressione interstiziale nel terreno, oltre alle caratteristiche del flusso termico nel circuito primario.

Parallelamente alle attività sperimentali, sono stati sviluppati modelli numerici agli elementi finiti in 3D per analizzare i processi accoppiati di deformazione e conduzione termica che si verificano nel circuito primario, nel palo e nel terreno circostante. Questi modelli, come illustrato nei lavori di Kong et al. (2019), Ren et al. (2020), Cecinato & Salciarini (2022), Lupattelli et al. (2023) e Gerola et al. (2023a), tengono conto della complessità geometrica dei MPE, contribuendo a una miglior comprensione delle loro prestazioni in condizioni operative reali. Gli studi hanno dimostrato che i MPE sono capaci di offrire uno scambio termico paragonabile a quello dei pali termo-attivi tradizionali e che i cicli termici hanno un impatto limitato sulla risposta strutturale del sistema.

3.2 Palancole e diaframmi CSM

Le Palancole Termo-Attive (PTA) rappresentano un'innovativa tipologia di GE in grado di scambiare calore sia con il terreno che con corpi idrici, come canali, fiumi e laghi, quando queste sono installate lungo una banchina o molo (Gerola et al., 2023b, 2024a). Per attivare termicamente una palancola, gli scambiatori di calore (in acciaio) sono saldati ai profili "a zeta" della palancola sul lato a contatto col terreno. Un vantaggio delle PTA rispetto ad altre tipologie di GE è la possibilità di essere impiegate per il retrofitting energetico di edifici esistenti, poiché queste possono spesso trovarsi adiacenti agli edifici, ma non strutturalmente connesse ad essi. Un ulteriore vantaggio di queste GE è la possibilità di predisporre il retrofitting energetico su palancole preesistenti e non dotate in origine di scambiatori geotermici, tramite dei "pannelli aggiuntivi" geotermici che si assicurano al palancolato dal lato a contatto con l'acqua e scambiano calore quasi unicamente con quest'ultima (Gerola et al. 2023b, 2024a).

Il campo prova più studiato relativo a una PTA è quello a scala reale situato a Delft, nei Paesi Bassi (Gerola et al., 2024a). Questa installazione è dotata sia di serpentine in acciaio a contatto con il terreno sia di pannelli aggiuntivi ed è stata sottoposta a un intenso monitoraggio e a numerose analisi termiche numeriche. I risultati hanno evidenziato una resa termica significativamente superiore rispetto alla media delle GE planari, attribuibile alla presenza di acqua superficiale.

Il *Cutter Soil Mixing* (CSM) è una recente tecnica per la costruzione di diaframmi impermeabili e muri di contenimento, che prevede la miscelazione del terreno in situ con una boiacca a base di cemento che crea un materiale simile alla malta in cui le particelle di terreno fungono da aggregati (Arnold et al., 2011). La malta terreno-cemento prodotta con la tecnica CSM, nonostante la diversa stratificazione del terreno e le condizioni meno controllate della miscelazione in situ, è caratterizzata da proprietà termiche e meccaniche uniformi (Gerola et al., 2024b).



(a) (b)

Figura 1. Esempio di (a) micropali energetici presso l'Università di Perugia (Ronchi et al. 2018), (b) applicazione di diaframmi CSM energetici ad Amstelveen (Leclercq et al., 2023, Gerola et al., 2024b).

Per attivare termicamente i muri costruiti con la tecnologia CSM, dei tubi scambiatori di calore possono essere fissati ai profili o gabbie in acciaio incorporati nella parete CSM (Figura 1b) e collegati ad un sistema a pompa di calore. Il primo esempio di applicazione reale di diaframmi energetici CSM è stato installato ad Amstelveen (NL), svolgendo una triplice funzione (Leclercq et al., 2023, Gerola et al., 2024b): barriera idraulica durante la fase di costruzione, muro di sostegno per il piano seminterrato e fondazione portante per un edificio a due piani. I risultati mostrano che l'efficienza energetica del diaframma CSM equivale a quella dei più comuni muri energetici. I diaframmi CSM energetici, quando non sono direttamente collegati a un edificio soprastante, rappresentano un'ottima opportunità per fornire retrofitting energetico ad immobili adiacenti.

3.3 Muri

Dato il patrimonio edilizio in Italia, l'applicazione termica alle pareti interrate degli edifici è un'opportunità per l'efficientamento energetico nell'ambito delle opere di riqualificazione, contribuendo al processo di decarbonizzazione dei servizi di riscaldamento e raffrescamento. Attrezzando adeguatamente l'area dei muri di sostegno dei locali seminterrati in contatto con il terreno, si possono rendere gli edifici dei veri e propri sistemi di approvvigionamento geotermico, conferendo quindi agli elementi strutturali un'ulteriore funzione energetica.

In questo contesto, si inserisce il sistema *Geothermskin* (Baralis & Barla, 2021), ovvero un muro energetico dotato di una serie di circuiti idraulici al cui interno scorre un fluido termovettore per lo scambio di calore con il terreno. Questa tecnologia è stata concepita come modulare per garantire flessibilità e offre l'opportunità di escludere alcune parti in caso di danni locali o perdite, senza compromettere l'intero sistema. La realizzazione è facile ed avviene montando la rete di tubazioni sulla parete esterna dei muri, come una pelle all'interfaccia terreno-struttura. Questo implica che l'installazione è indipendente dalle caratteristiche strutturali della parete, a differenza dalle geostrutture energetiche tradizionali, i cui circuiti sono vincolati alla geometria delle gabbie di rinforzo ed è dunque ideale per l'adeguamento di strutture verticali esistenti.

Grazie alla sua versatilità, il sistema è in grado di adattarsi alla superficie disponibile e può esser installato sia in costruzioni esistenti (Figura 2a) sia in nuovi edifici (Figura 2b). Data l'assenza di significativi volumi di scavo, comporta dei costi di investimento più contenuti rispetto alle applicazioni geotermiche tradizionali. La rete di tubazioni, in materiale polimerico (Pe-Xa), può essere staffata mediante cavallotti metallici all'estradosso della parete in calcestruzzo, oppure fissata tramite rete elettrosaldata ed è in diretto contatto con il terreno. Il sistema è accoppiato a una pompa di calore che permette lo scambio di calore tra i due circuiti (il circuito primario, lato terreno, e il secondario, lato utente). Il processo di attivazione termica si inserisce agevolmente nel processo di costruzione e beneficia dell'accessibilità diretta delle pareti interrate per la presenza degli scavi di cantiere.

Nell'ottica di cercare di sfruttare l'intero involucro di un edificio per la produzione di energia, le pareti energetiche si integrano bene con altre fonti rinnovabili, quali ad esempio il solare termico ed il fotovoltaico. Il terreno può essere utilizzato, ad esempio, per stoccare il calore in eccesso migliorando la resa geotermica. L'efficacia di questa opzione è in corso di studio presso il Politecnico di Torino dove, nell'ambito di una installazione esistente, il circuito geotermico è

stato collegato ad un collettore solare da 15 kW per rendere possibile lo stoccaggio del calore in eccesso nel terreno a contatto col muro. Grazie all'interposizione di pannelli termicamente isolanti, il volume di terreno di fronte ai moduli geotermici è stato suddiviso in tre diversi campi prova dove verranno testati in modo comparativo, e a parità di altre condizioni esterne, la capacità di stoccaggio e il miglioramento della performance rispetto alla condizione di sfruttamento normale, anche grazie all'aggiunta nel terreno riempimento di materiali a cambiamento di fase.



(a) (b)

Figura 2. Esempio di attivazione termica di (a) una parete interrata durante retrofitting (Baralis & Barla, 2021) e (b) di una parete in fase di costruzione di un edificio nuovo (Politecnico di Torino, 2024).

3.4 Gallerie

Per quanto concerne il patrimonio delle gallerie esistenti, infine, sono state recentemente proposte alcune metodologie per permettere la loro attivazione termica durante lavori di rinnovo strutturale del rivestimento o sfruttando strategie di riqualificazione (De Feudis et al., 2023, 2024b).

Nel primo caso, qualora fosse previsto un rifacimento integrale o parziale del rivestimento esistente per mezzo di elementi prefabbricati in calcestruzzo, come conci o predalles, l'attivazione termica potrebbe avvenire fissando tubazioni geotermiche al traliccio di armatura di tali elementi. In alternativa, i tubi scambiatori di calore potrebbero essere staffati mediante cavallotti metallici in corrispondenza dell'interfaccia tra il rivestimento di nuovo getto e quello esistente o il terreno a tergo, dipendentemente dall'estensione del risanamento. Rispetto alla soluzione con elementi prefabbricati, quest'ultima necessiterebbe di lavorazioni aggiuntive da dover completare in situ.

Nel secondo caso, l'infrastruttura sotterranea potrebbe essere strumentata per lo sfruttamento geotermico tramite perforazioni radiali o tubi scambiatori di calore fissati direttamente sull'intradosso esistente ed eventualmente rivestiti da un involucro protettivo isolante o altamente conduttivo, a seconda delle necessità. Quest'ultima soluzione, tuttavia, nascondendo parzialmente o interamente il rivestimento esistente alla vista, risulta difficilmente applicabile in gallerie in servizio per cui vige la necessità di essere ispezionate periodicamente.

Nel corso del 2024, la canna destra della galleria autostradale Olimpia (Autostrada A26), nei pressi di Alessandria, è stata equipaggiata con tubi scambiatori di calore durante le lavorazioni di rinnovo strutturale del rivestimento esistente (Figura 3), configurandosi, così, come il primo caso al mondo di galleria attivata termicamente dopo la sua costruzione. Il sistema geotermico disposto in galleria è collegato ad una *Hydronic-Heated/Solar-Collecting Pavement* (HHP/SCP) in modo tale da raggiungere un ciclo di funzionamento stagionale. Nei mesi estivi, l'energia solare immagazzinata dall'SCP viene stoccata nell'ammasso roccioso asciutto a tergo della galleria. Durante il periodo invernale, invece, il calore geotermico, così come quello stoccato durante la stagione estiva, è utilizzato per evitare la formazione di ghiaccio sulla HHP e ridurre il rischio di scivolamento dei mezzi in transito.

Secondo stime conservative, il sistema geotermico appena descritto sarebbe in grado di innalzare la temperatura della pavimentazione di 3.0-4.0°C durante la stagione invernale e di catturare circa 50.0-60.0 kWh dalla pavimentazione esterna in estate (De Feudis et al., 2024a). Qualora implementati a più larga scala, sistemi geotermici simili potrebbero fornire supporto nella gestione della sicurezza e limitare la formazione di deformazioni viscose in ambito stradale e aiutare a contrastare il fenomeno delle isole di calore in ambiente urbano.



(a) (b)

Figura 3. Esempio di attivazione termica di una galleria esistente: (a) fissaggio delle tubazioni geotermiche sull'intradosso fresato e (b) posizionamento del manto impermeabilizzante a contatto con lo strato di regolarizzazione nel quale sono annegate le tubazioni (Politecnico di Torino, 2024).

4 CONCLUSIONI

L'efficacia delle geostrutture energetiche per lo sfruttamento del terreno come serbatoio con cui scambiare energia termica, utile al condizionamento di edifici e infrastrutture di nuova concezione, è provata sia da applicazioni progettuali ormai pluridecennali sia da studi e modelli che, almeno per la tipologia più diffusa del palo energetico, sono ormai ben consolidati. Tali modelli consentono di stimare preliminarmente il potenziale geotermico del terreno, di quantificare lo scambio energetico atteso nelle diverse modalità di funzionamento e di prevedere gli effetti strutturali termicamente indotti.

Grazie a questa solida base di conoscenze, l'interesse si sta ora rivolgendo alla possibilità di integrazione della tecnologia nel patrimonio edilizio e infrastrutturale esistente, tramite interventi che possono essere progettati in combinazione con un adeguamento strutturale dell'opera, oppure che possono sussistere indipendentemente da tale necessità.

L'edilizia in particolare è un settore fortemente energivoro in termini di condizionamento termico, soprattutto in un paese come l'Italia, caratterizzato da un patrimonio di grande valore storico ma in gran parte risalente a epoche in cui le tecnologie costruttive non consideravano ancora l'efficienza energetica come una priorità.

Nel campo delle infrastrutture, l'adeguamento strutturale si sta oggi presentando come una necessità per molte categorie di opere, ad esempio ponti e gallerie. Gli interventi di adeguamento strutturale possono essere progettati includendo elementi di scambio termico, che consentono il condizionamento di impalcati e sedi stradali, oppure di edifici limitrofi.

Inoltre, l'efficacia della tecnologia ha spinto verso soluzioni innovative, in cui gli elementi scambiatori di calore non sono più necessariamente annegati nel getto del tradizionale elemento strutturale in calcestruzzo armato, ma possono essere semplicemente applicati sulla superficie di elementi interrati, sfruttando quindi l'interfaccia fra elemento e terreno.

Le tecnologie descritte nella presente nota, oggetto di ricerca nell'ambito del Progetto Nazionale PRIN GEOREFIT "*Closing Knowledge gaps on energy geostructures for retrofitting of buildings and infrastructures*" (2023-2025, D.D.104-02/02/2022), si presentano come una soluzione innovativa, la cui efficienza energetica va certamente esplorata con riferimento a diverse possibili condizioni operative. Le prime applicazioni dimostrano che la soluzione è anche promettente, indirizzando così il settore verso l'obiettivo di introdurla in un processo di adeguamento sistematico delle opere esistenti.

BIBLIOGRAFIA

Adam, D. & Markiewicz, R. 2009. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Geotechnique* 59: 229-236.

Akrouch, G.A., Sánchez, M. & Briaud, J.-L. 2014. Thermo-mechanical behavior of energy piles in high plasticity clays. *Acta Geotech*. 9(3): 399-412.

Arnold, M., Beckhaus, K. & Wiedenmann U. 2011. Cut-off wall construction using cutter soil mixing: a case study. *Geotechnik* 34(1): 11-21.

Baralis, M. & Barla, M. 2021. Development and testing of a novel geothermal wall system. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 12: 689-704.

Barla, M. & Perino A. 2014. Energy from geo-structures: a topic of growing interest. *Environ. Geotech*. 2: 3-7.

Barla, M. & Di Donna, A. 2016. Editorial Themed issue on energy geostructures. *Environ. Geotech*. 3: 188-189.

Barla, M., Di Donna, A. & Insana, A. 2019a. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunneling and Underground Space Technology* 87: 1-14.

Barla, M., Baralis, M., Insana, A., Zacco, F., Aiassa, S., Antolini, F., Azzarone, F. & Marchetti, P. 2019b. Feasibility study for the thermal activation of Turin Metro Line 2. In D. Peila, G. Viggiani, T. Celestino (eds.), *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art- Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress*. CRC Press/Balkema.

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

Bourne-Webb, P., Bodas Freitas, T.M. & da Costa Gonçalves, R.A. 2016. Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers. *Energy Build*. 125: 130-141.

Bourne-Webb, P.J., Lupattelli, A., Bodas Freitas, T.M. & Salciarini, D. 2022. The influence of initial shaft resistance mobilisation in the response of seasonally, thermally-activated pile foundations in granular media. *Geomechanics for Energy and the Environment* 32, 100299.

Brandl, H. 2006. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56: 81-122.

Cecinato, F., & Loveridge, F. A. 2015. Influences on the thermal efficiency of energy piles. *Energy 82*: 1021-1033.

Cecinato, F., & Salciarini, D. 2022. Energy performance assessment of thermo-active micro-piles via numerical modeling and statistical analysis. *Geomechanics for Energy and the Environment* 29, 100268.

De Feudis, S., Insana, A. & Barla, M. 2023. An example of thermal retrofitting for the Piedicastello tunnel. In *Symposium on Energy Geotechnics, Delft, 3-5 Ottobre 2023*. TU Delft OPEN.

De Feudis, S., Insana, A. & Barla, M. 2024a. Sfruttamento geotermico di gallerie esistenti a fini di anti-icing stradale. In *XIII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici - IAGIG 2024, Torino, 7-8 Giugno 2024.* AGI.

De Feudis, S., Insana, A. & Barla, M. 2024b. Seizing the opportunity of energy retrofitting of existing tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 154, 106109.

Di Donna, A., Cecinato, F., Loveridge, F. & Barla, M. 2016. Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng*.: 1-14.

Di Donna, A., Barla, M. & Amis, T. 2017. Energy geostructures: a collection of data from real applications. In *15th IACMAG, Wuhan, 19-23 Ottobre 2017*.

Gerola, M., Lupattelli, A., Cecinato, F., Salciarini, D. & Arola, T. 2023a. Numerical Analysis of the Behaviour of Energy Micropiles Used for Heat Storage: A Case Study in Turku (Finland). In *VIII Convegno Nazionale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica, Palermo, 5-7 Luglio 2023*. Cham: Springer Nature Switzerland.

Gerola, M., Cecinato, F., Haasnoot, J. K. & Vardon, P. J. 2023b. Understanding the thermal efficiency of energy Quay Walls: a comprehensive study using field tests and finite element simulations. In *Comsol conference 2023 Monaco*.

Gerola, M., Cecinato, F., Leclercq, V. & Vardon, P.J. 2024a. Energy Quay Walls: Performance Analysis and Optimisation. *Geomechanics for Energy and the Environment* [Manuscript submitted].

Gerola, M., Lecrecq, V., Vardon, P.J. & Cecinato, F. 2024b. Energy performance of cutter soil mix energy walls: A numerical modelling study. *Tunnelling and Underground Space Technology* [Manuscript submitted].

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

Kong, G., Cao, T., Hao, Y., Zhou, Y. & Ren, L. 2019. Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay. *Underground Space* 6: 76-84.

Laloui, L. & Di Donna, A. 2013. *Energy geostructures: innovation in underground engineering*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.

Lautkankare, R., Sarola, V. & Kanerva-Lehto, H. 2014. Energy piles in underpinning projects–through holes in load transfer structures. *DFI Journal J. Deep Found Inst*. 8(1): 3-14.

Leclercq, V., Gerola, M., Jong, D., Cecinato, F. & De Kok O. 2023. Cutter soil mix-energy wall full-scale test experimental setup. In *Symposium on Energy Geotechnics, Delft, 3-5 Ottobre 2023*. TU Delft OPEN.

Loveridge, F. & Cecinato, F. 2016. Thermal performance of thermoactive continuous flight auger piles. *Environ. Geotech.* 3(4): 265-279.

Lupattelli, A., Bourne-Webb, P.J., Bodas Freitas, T.M. & Salciarini, D. 2023. A Numerical Study of the Behavior of Micropile Foundations under Cyclic Thermal Loading. *Appl. Sci.* 13, 9791.

Lupattelli, A. & Salciarini, D. 2024. 3D Thermo-mechanical analysis of a real-world thermally activated piled foundation. In *XVIII ECSMGE 2024, Lisbona, 26-31 Agosto 2024*.

Olgun, C. & Bowers, G. 2016. Experimental investigation of energy pile response for bridge deck deicing applications. *DFI Journal J. Deep Found Inst.* 10(1): 41-51.

Preene, M. & Powrie, W. 2009. Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Geotechnique* 59: 261-271.

Ren, L.-W., Xu, J., Kong, G.Q. & Liu, H.L. 2020. Field tests on thermal response characteristics of micro-steel-pipe pile under multiple temperature cycles. *Renewable Energy* 147: 1098-1106.

Ronchi, F., Salciarini, D., Cavalagli, N. & Tamagnini, C. 2018. Thermal response prediction of a prototype Energy Micro-Pile. *Geomechanics for Energy and the Environment* 16: 64-82.

Salciarini, D., Lupattelli, A. & Capati, G. 2024. Exploring the Potential of Energy Geostructures for Road and Bridge Pavement Heating and Cooling.In *4th ACPMG 2024 - 4th Asia-Pacific Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Abu Dhabi, 11-13 Dicembre 2024*.

Salciarini, D., Gerola, M., De Feudis, S., Lupattelli, A., Dalla Santa, G., Capati, G., Rafai, M., Tihana, J., Scerbo, M., Di Donna, A., Ravera, E., Nicolino, M, Insana, A., Mroueh, H. & Barla, M. Database-Driven Analysis of Global Energy Geostructures: Diffusion, Efficiency, and Environmental Performance. *Renewable Energy* [Manuscript submitted].

Scuderi, F., Cecinato, F., d'Attoli, M., Gualerzi, D., Occhi, A. & Occhi, M. 2024. Analisi numerica preliminare del comportamento termico di micropali termo-attivi. In *XIII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici - IAGIG 2024, Torino, 7-8 Giugno 2024*. AGI.

Soga, K. & Rui, Y. 2016. Energy geostructures. In: S.J. Rees (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*: 185-221. Woodhead Publishing.

Sterpi, D., Angelotti, A., Habibzadeh-Bigdarvish, O. & Jalili, D. 2018. Assessment of thermal behaviour of thermo-active diaphragm walls based on monitoring data. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10: 1145-1153.

Sterpi, D., Tomaselli, G. & Angelotti, A. 2020. Energy performance of ground heat exchangers embedded in diaphragm walls: Field observations and optimization by numerical modelling. *Renewable Energy* 147: 2748-2760.

Tyszer, M. & Tomaszewska, B. 2018. Evaluation of the possibility of use geothermal energy micropiles TITAN 73/53 to obtain low-temperature heat energy accumulated in the near-surface layers of the ground in Poland Area. In *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation:* 287-295. Springer International Publishing.

ABSTRACT

ENERGY GEOSTRUCTURES FOR BUILDINGS AND INFRASTRUCTURES RETROFIT

Keywords: energy geostructures; retrofitting; thermo-hydro-mechanical behavior

The scientific community is focused on analyzing and providing technological and innovative solutions that can respond positively to climate change, counteracting its effects and contributing to the development of renewable and sustainable energy. One of the main contributors to global warming is represented by carbon dioxide emissions from heating and cooling systems. Starting from the observation that the adaptation of buildings and infrastructures to cope with aging and deterioration is now a continuous process especially in Italy and in European countries, a national research project intends to seize it as an opportunity. In this context, energy geostructures could play a significant role if considered together with other energy retrofitting systems. The note will focus on the possibility of retrofitting existing geostructures with the objective of describing the main technologies to be used in retrofitting processes. In order to fill the knowledge gaps that hinder a wide practical application in Italy, some experimental fields will also be referred to and the preliminary results obtained in terms of thermo-hydro-mechanical and energetic behavior will be described.