

ANALISI TERMO-MECCANICHE DI DIAFRAMMI ENERGETICAMENTE ATTIVI

Luca Mauri

In precedenza: Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano
luca1.mauri@mail.polimi.it

Donatella Sterpi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano
donatella.sterpi@polimi.it

Sommario

I diaframmi energeticamente attivi sono un particolare tipo di opera di sostegno all'interno dei quali è installato uno scambiatore di calore che sfrutta l'energia geotermica del terreno. Scopo di questo lavoro è stato individuare le condizioni termiche estive più gravose per un diaframma durante l'esercizio dell'impianto geotermico e, mediante analisi numeriche termo-meccaniche, studiare l'influenza dello scambio termico sul comportamento dell'opera di sostegno in termini di spostamenti, deformazioni e sforzi indotti nel diaframma.

1. Introduzione: le strutture energeticamente attive

L'energia geotermica è rappresentata dall'energia contenuta sotto forma di calore all'interno della Terra. Dal nucleo del pianeta il calore si propaga fino in superficie consentendo al terreno di mantenersi ad una temperatura di circa 15°C, pressoché costanti, nei 100m più superficiali, ad eccezione dei primi 10-15m al di sotto del piano campagna in cui la temperatura del sottosuolo è influenzata dalle condizioni climatiche esterne.

Anche a basse profondità il terreno può quindi essere sfruttato come un serbatoio naturale in cui disperdere calore in estate ed estrarre calore in inverno, ad esempio per il condizionamento termico di strutture e infrastrutture, realizzando impianti geotermici di superficie.

Gli impianti tradizionali consistono in scambiatori di calore costituiti da serpentine di tubi in polietilene ad alta densità inseriti nel terreno, all'interno dei quali scorre un fluido termovettore che scambia calore col terreno e lo trasferisce all'impianto che serve la struttura.

Un modo alternativo per sfruttare la risorsa geotermica superficiale, avviato in Austria a partire dagli anni Ottanta, è rappresentato dall'impiego di strutture energeticamente attive (Laloui e Di Donna, 2013). In questo caso gli scambiatori di calore sono installati all'interno di elementi strutturali a diretto contatto col terreno, come solette di fondazione, diaframmi di sostegno e pali, in genere fissando i tubi in polietilene alle gabbie d'armatura prima del getto di calcestruzzo (Brandl, 2006; Adam e Markiewicz, 2009).

Il loro vantaggio, rispetto ai classici scambiatori geotermici, risiede principalmente nei minori costi di realizzazione dell'impianto, dal momento che vengono utilizzate opere già previste per scopi strutturali. Inoltre, annegando gli scambiatori nel calcestruzzo, si sfruttano le ottime proprietà termiche di questo materiale, caratterizzato da una conducibilità termica maggiore di quella del terreno. Il principale limite risiede nell'applicabilità quasi esclusiva alle strutture di nuova realizzazione.

Il primo tipo di fondazione ad essere impiegato per scopi geotermici è stato il palo, elemento strutturale in grado di raggiungere profondità di parecchie decine di metri, e contestualmente si è reso necessario lo studio delle conseguenze delle variazioni di temperatura sulla risposta geotecnica e

strutturale. Considerando un palo soggetto ad un aumento di temperatura, è chiaro come la resistenza del terreno, laterale e alla punta, si opponga all'allungamento del palo: una parte delle deformazioni assiali è quindi impedita e a questo è associata la nascita di sforzi di compressione assiale equivalenti ad una sollecitazione di origine termica, che va ad aggiungersi a quella di origine statica già presente (Amatya et al., 2012). La ciclicità della sollecitazione termica, legata al funzionamento stagionale dell'impianto, può indurre un progressivo deterioramento della proprietà di resistenza laterale all'interfaccia palo-terreno.

Gli studi riguardanti l'influenza del calore sul comportamento delle strutture energeticamente attive si sono finora concentrati soprattutto sui pali, molto meno invece è stato detto a proposito dei diaframmi a sostegno di scavi, che rappresenta l'oggetto del presente lavoro.

2. L'influenza del calore sui terreni e sul calcestruzzo

Le variazioni di temperatura indotte dallo scambio termico influenzano notevolmente il comportamento dei terreni fini e più marginalmente quello dei terreni grossolani.

Il calore provoca l'espansione termica sia dell'acqua che della fase solida secondo coefficienti di espansione diversi ($\alpha_w > \alpha_s$). Nei terreni fini, in seguito ad un riscaldamento anche lento, data l'impossibilità per l'acqua libera di fluire facilmente attraverso i pori di piccole dimensioni si verifica un aumento delle pressioni interstiziali, seguito dalla dissipazione della parte in eccesso in un processo denominato "consolidazione termica". Sul lungo termine le argille che hanno subito una sollecitazione termica manifestano una contrazione se normal-consolidate o un'espansione se fortemente sovra-consolidate. Inoltre, la temperatura influenza le proprietà elastiche delle argille (E, v), mentre l'angolo d'attrito interno rimane costante (Cekerevac e Laloui, 2004). Per quanto riguarda i terreni grossolani, essi si trovano in condizioni drenate, l'acqua in espansione è libera di fluire verso zone più fredde e quindi non contribuisce in maniera sostanziale al comportamento volumetrico del materiale.

Infine, l'influenza del calore sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo armato è del tutto trascurabile per le temperature massime in gioco nel campo delle strutture energeticamente attive, in genere non superiori ai 50°C circa.

Si può quindi affermare che le proprietà dei terreni grossolani e del calcestruzzo armato possono essere considerate indipendenti dalla temperatura.

3. Comportamento di un diaframma energeticamente attivo

3.1 Descrizione del problema

Per studiare il comportamento di un diaframma con scambiatore di calore integrato, si è preso in considerazione un diaframma reale, facente parte delle opere di fondazione di un edificio residenziale multipiano in provincia di Varese. Ogni pannello del diaframma ospita due scambiatori, ha lunghezza di 2.4 m e un piano di simmetria centrale. Sfruttando 3 piani di simmetria si è individuato un dominio tridimensionale comprensivo dell'opera di sostegno e del terreno (Fig.1), su cui sono state svolte simulazioni ad Elementi Finiti con il codice Abaqus (Dassault Systèmes).

Una prima serie di analisi termiche è stata condotta allo scopo di valutare il processo di scambio termico e la sua influenza sul campo di temperatura nel terreno nel breve e lungo termine (Sterpi et al., 2014). I risultati mostrano che: (i) la disposizione ideale della serpentina, che ottimizza lo scambio termico, è quella che evita la vicinanza di tratti di tubo che creano elevati gradienti di temperatura, e (ii) per ogni disposizione della serpentina esiste una velocità ottimale del fluido termovettore. Inoltre si è dimostrato che l'utilizzo "duale" del sistema geotermico, ovvero nella doppia modalità di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo, attraverso il ricarico periodico di energia termica nel terreno consente di evitare la deriva termica che si osserverebbe nel caso di utilizzo in modalità "singola". La deriva termica, ovvero la graduale variazione irreversibile del campo di temperatura nel

terreno, comporta una perdita di efficienza dell'impianto e conseguenze negative di natura ambientale. Successivamente una seconda serie di analisi termo-mecaniche ha avuto l'obiettivo di valutare gli effetti geotecnici e strutturali sul sistema diaframma/terreno (Mauri, 2015).

Il processo di diffusione dell'energia termica avviene per convezione all'interno dello scambiatore e per conduzione all'interno del diaframma e del terreno, in quanto l'irraggiamento è trascurabile e il meccanismo di convezione è assente nel caso analizzato di regime idrostatico.

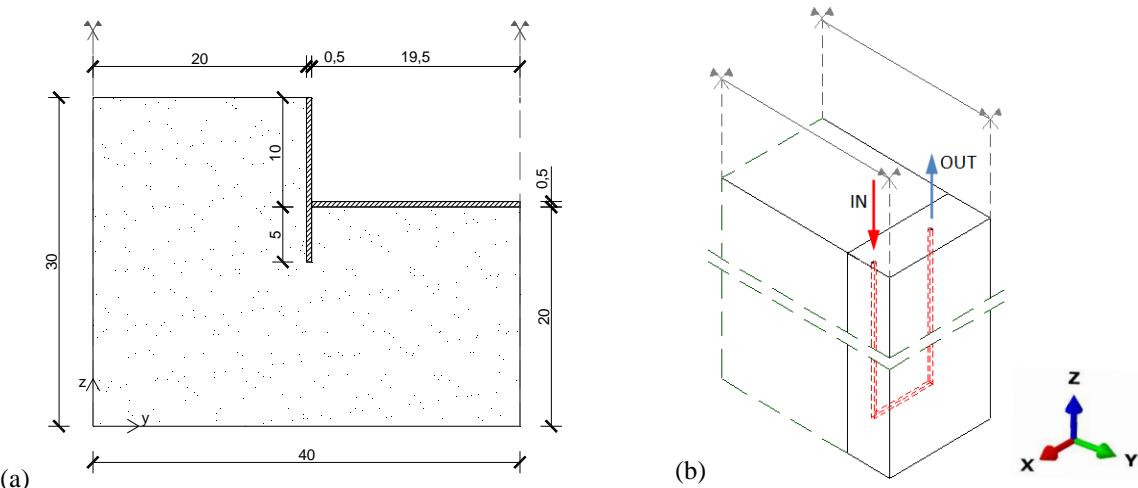


Fig 1. Sezione y-z del dominio (a) e porzione tridimensionale del diaframma (b), di spessore 1.2 m in direzione x (dimensioni in m).

3.2 Materiali impiegati nel modello

Il terreno è considerato ben graduato, mediamente addensato, suddivisibile in 3 strati di rigidezza crescente, saturo e in assenza di filtrazione. Pur avendo una percentuale di fine tale da garantire una discreta coesione l'influenza della temperatura si manifesta solo in termini di espansione termica. Dal punto di vista meccanico, il comportamento è isotropo, elastico-perfettamente plastico, con criterio di rottura di Mohr-Coulomb e legge di scorrimento plastico non associata. Gli elementi strutturali in calcestruzzo armato (diaframma, soletta di fondo scavo ed eventuale solaio di copertura) sono invece modellati con un materiale omogeneo a comportamento elastico lineare isotropo.

Le proprietà termo-mecaniche dei materiali presenti nel modello sono riassunte in Tab.1. Le proprietà termiche sono stimate come medie pesate a partire dai valori dei singoli materiali componenti. Fra terreno e diaframma è stato modellato uno strato sottile di terreno avente resistenza ridotta.

Tab 1. Proprietà termo-mecaniche dei materiali presenti nel modello.

Materiale	ρ [Kg/m ³]	E [MPa]	v	ϕ [°]	c [kPa]	Ψ [°]	α [°C ⁻¹]	K [W/m K]	c [J/Kg K]
Terreno 1	1930	80	0,3	32	10	15	1E-05	2,2	1642
Terreno 2		100							
Terreno 3		120							
Interfaccia muro - terreno 1	1930	80	0,3	22,6	1	5	1E-05	2,6	880
Interfaccia muro - terreno 2		100							
Calcestruzzo armato	2500	30000	0,2	-	-	-	1E-05	2,6	880
Fluido termovettore	1000	-	-	-	-	-	-	0,57	4186

* ρ = densità, E = modulo elastico, v = coefficiente di Poisson, ϕ = angolo d'attrito, c = coesione, Ψ = dilatanza, α = coefficiente di espansione termica, K = conducibilità termica, c = calore specifico.

3.3 Procedura sequenziale di analisi

Avvalendosi di dati di prove condotte su pali energeticamente attivi in scala reale e simulazioni numeriche presentati in letteratura (Laloui et al., 2006), si sono svolte delle analisi preliminari allo scopo di validare la procedura di calcolo e la scelta dei materiali e delle loro proprietà. Si è raggiunta una buona corrispondenza tra i risultati ottenuti e i dati sperimentali disponibili, confermando anche le previsioni teoriche sul comportamento del palo.

La procedura adottata di analisi termo-mecanica sequenziale consiste, al primo passo, nel definire attraverso un'analisi meccanica lo stato tenso-deformativo iniziale $\underline{\sigma}_0(x)$, $\underline{\varepsilon}_0(x)$ dovuto alla realizzazione dell'opera di sostegno (Fig. 2); sono quindi richieste le proprietà meccaniche di terreno e calcestruzzo armato. I risultati presentati nel seguito sono relativi all'analisi in cui si trascura la presenza di una sovrastruttura.

Come secondo passo, mediante un'analisi termica viene determinata la distribuzione iniziale di temperatura $T_0(x, t)$ a impianto geotermico spento, dovuta alle condizioni al contorno e alle fluttuazioni stagionali della temperatura esterna (Fig. 3). Vanno perciò definite solo le proprietà termiche dei materiali (conducibilità termica e calore specifico). Nelle analisi si risolve il regime transitorio, fino a raggiungere un regime stazionario in cui si ha sola ciclicità annuale.

Al terzo passo viene simulato il funzionamento dell'impianto geotermico in modalità stagionale alternata (raffrescamento estivo e riscaldamento invernale dell'edificio), attraverso analisi di trasmissione del calore. Sono richieste due proprietà del fluido termovettore: la velocità con la quale scorre nei tubi (pari a 5 cm/s) e la temperatura di ingresso nello scambiatore (Fig. 3b). Anche in questo caso si risolve il regime transitorio fino ad ottenere la soluzione stazionaria, con ciclicità solo annuale.

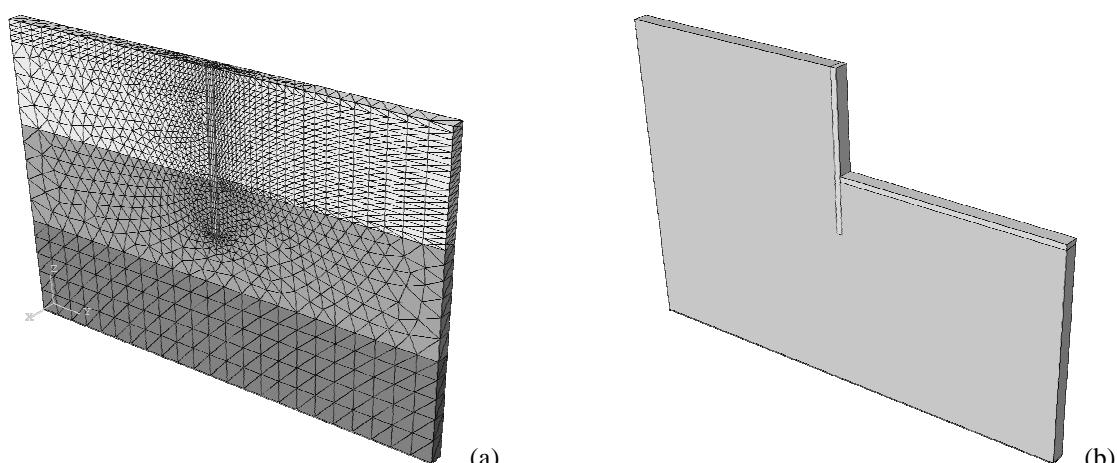


Fig 2. Modello 3D iniziale a elementi finiti (a) e configurazione finale a opera ultimata (b).

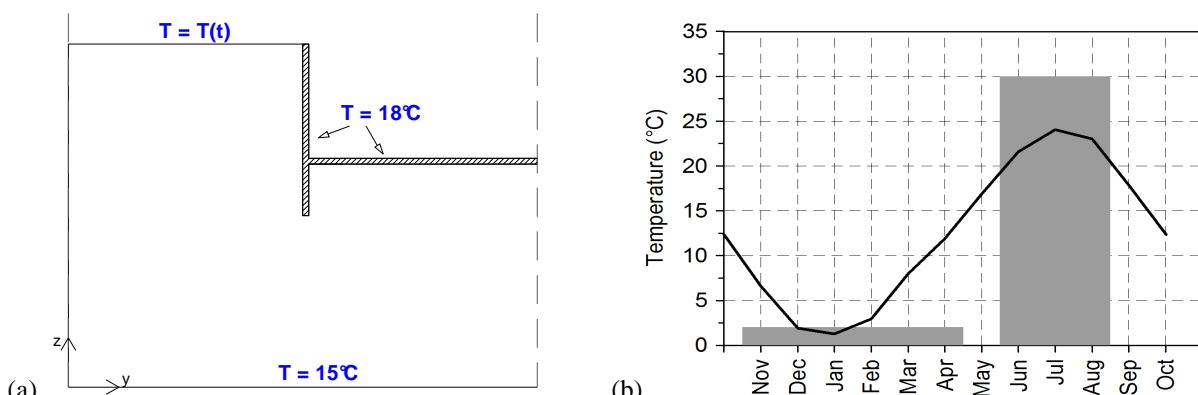


Fig 3. Condizioni al contorno di temperatura (a) e variazione stagionale delle temperature esterne (b). Il diagramma in grigio indica la temperatura di ingresso del fluido nello scambiatore di calore.

E' stata quindi analizzata la variazione del campo di temperatura $\Delta T(x, t)$ nell'arco dell'anno, in condizioni di esercizio dell'impianto, individuando le condizioni termiche di lavoro estive più gravose per l'opera, ovvero quelle che comportano i maggiori incrementi di temperatura, raggiunte il 30 agosto (Fig.4). La differenza nella distribuzione $\Delta T(x)$ fra le due sezioni $x = 1.2 \text{ m}$ e $x = 0. \text{ m}$ dimostra la tridimensionalità del problema.

Al quarto e ultimo passo, il campo di temperatura più gravoso così ottenuto viene applicato al sistema in un'analisi meccanica in cui lo stato tenso-deformativo iniziale è quello unicamente dovuto alla realizzazione dell'opera di sostegno e il campo di temperatura iniziale è quello calcolato nel secondo passo. Questa sollecitazione termica dà così luogo all'espansione dei materiali, ognuno secondo il proprio coefficiente di espansione termica, e ad un nuovo stato tenso-deformativo $\underline{\sigma}_1(x), \underline{\varepsilon}_1(x)$.

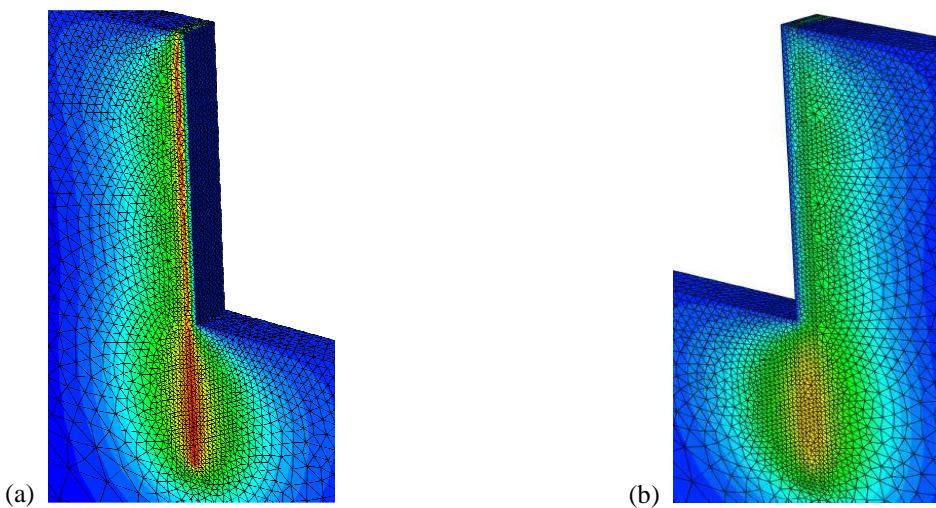


Fig 4. Campo di incremento di temperatura $\Delta T(x)$ nei pressi del diaframma, nella condizione più gravosa, sui piani: (a) $x = 1.2 \text{ m}$, e (b) $x = 0. \text{ m}$ ($\Delta T \text{ min} \div \text{max} = 0 \div 11.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.4 Risultati

Nel caso qui presentato in cui si trascura la presenza di una sovrastruttura (ad esempio un solaio superiore di copertura allo scavo), si è osservato un aumento dell'inflessione del diaframma verso lo scavo, con un'accentuazione dei campi di spostamento e delle spinte del terreno sull'opera. Gli incrementi massimi tuttavia non superano il 10% dei valori previsti con la sola operazione di scavo. Ad esempio, lo spostamento orizzontale in testa al diaframma risulta aumentare da 9.22 a 9.93 cm, mentre la variazione di spostamento verticale è trascurabile.

In merito alle azioni interne al diaframma (Fig.5), mentre per il momento flettente si registrano variazioni trascurabili rispetto alla situazione precedente l'azione termica, la sollecitazione assiale subisce una considerevole variazione, per effetto della resistenza del terreno al libero allungamento.

La non uniformità della risposta lungo il piano del diaframma (direzione x), conseguente alla non uniformità della sollecitazione termica $\Delta T(x)$, trova evidenza nel confronto tra gli andamenti delle azioni interne nelle due sezioni $x = 1.2 \text{ m}$ (valori massimi di ΔT) e $x = 0 \text{ m}$ (valori minimi), che possono essere considerati i limiti dell'intervallo all'interno del quale ricadono le azioni interne della generica sezione trasversale del diaframma (Fig.5). Si può notare come questo intervallo sia piuttosto limitato per il momento flettente, mentre è più ampio per l'azione assiale, per la quale si osserva l'insorgere di azioni di trazione nella sezione soggetta a minor riscaldamento, che esercita un'azione di confinamento all'allungamento termico del diaframma nella sezione più riscaldata.

La risposta è quindi simile a quella osservata nei pali, ma mentre in questi si può mantenere uno schema assalsimmetrico, nei diaframmi si deve abbandonare il consueto schema di calcolo e progetto in regime di deformazione piana per analizzare effetti indotti di tipo tridimensionale che, sulla struttura, comportano l'insorgere di azioni inattese di trazione e di torsione.

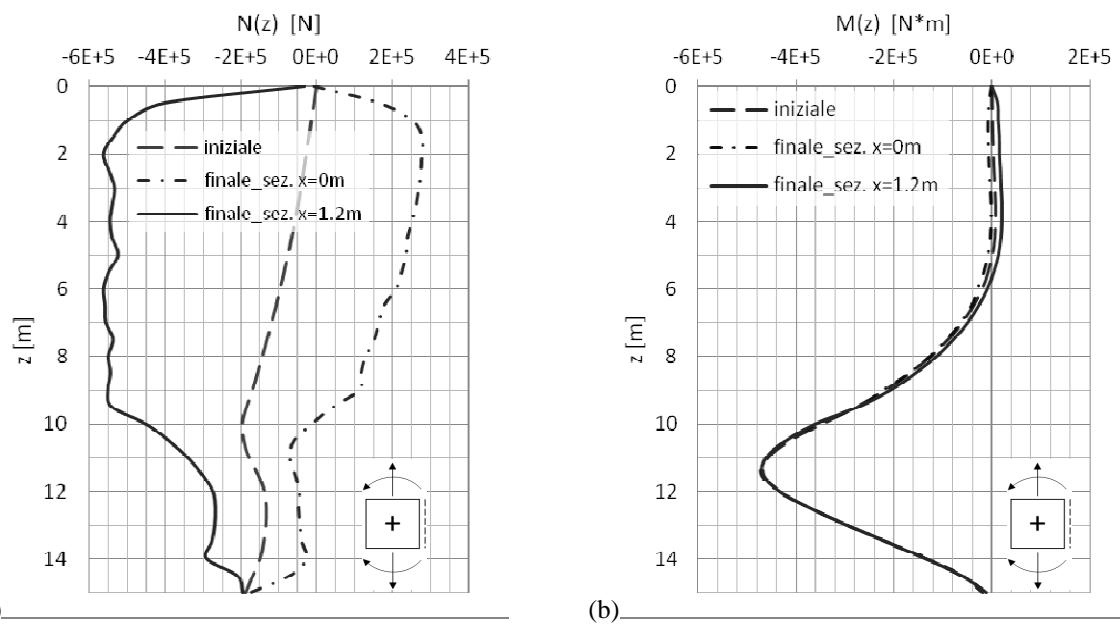


Fig 5. Diagrammi di azione assiale (a) e momento flettente (b) del diaframma, nei piani $x = 1.2$ m e $x = 0$ m.

4. Conclusioni

Gli effetti delle sollecitazioni termiche indotte dalla presenza dell’impianto sono risultati tollerabili per l’opera di sostegno studiata, dal punto di vista della stabilità globale e della sicurezza strutturale. Tuttavia nascono azioni interne non previste per i comuni diaframmi, che richiedono un’analisi specifica. Gradi di vincolo diversi, applicati fra il diaframma e gli altri elementi strutturali (tiranti, puntoni, elementi della sovrastruttura), possono ulteriormente modificare la risposta dell’opera alle sollecitazioni termiche. Rimane quindi raccomandabile, in generale, l’utilizzo di strumenti di simulazione numerica in fase di progettazione per una previsione accurata della risposta del diaframma e delle strutture connesse. L’analisi delle condizioni termiche nel periodo invernale e della ciclicità del processo di scambio termico rappresentano gli sviluppi dello studio in corso.

Bibliografia

- Adam D., Markiewicz R. (2009). “Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers”, *Géotechnique* 59(3), 229-236.
- Amatyka B.L., Soga K., Bourne-Webb P.J., Amis T., Laloui L. (2012). “Thermo-mechanical behaviour of energy piles”. *Géotechnique* 62(6): 503-519.
- Brandl H. (2006). “Energy foundations and other thermo-active ground structures”. *Géotechnique* 56(2), 81-122.
- Cekerevac C., Laloui L., (2004). “Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay”. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 28: 209-228.
- Laloui L., Di Donna A. (2013). Energy geostructures – Innovation in Underground Engineering. ISTE Ltd and John Wiley & Sons.
- Laloui L., Nuth M., Vulliet L. (2006). “Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile”. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 30(8): 763-781.
- Mauri L. (2015). Studio del comportamento di diaframmi energeticamente attivi mediante analisi numeriche termo-meccaniche. Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano.
- Sterpi D., Angelotti A., Corti D., Ramus M. (2014). “Numerical analysis of heat transfer in thermo-active diaphragm walls”. Proc. 8th NUMGE Conf., (eds. M.Hicks, R.Brinkgreve, A.Rohe), London: Taylor & Francis Group, Vol.2: 1043-1048.