

# PROVE IN SCALA DI LABORATORIO SU PALI ENERGETICI IN TERRENI PIROCLASTICI

Gabriella Marone

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
*gabriella.marone@unina.it*

Luca Di Girolamo

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
*luca.digirolamo@unina.it*

Gianpiero Russo

*Università degli Studi di Napoli Federico II*  
*pierusso@unina.it*

## Sommario

Tra i vari approcci impiegati per lo studio del comportamento termo-meccanico di pali di fondazione Energetici le prove di laboratorio in scala ridotta forniscono una soluzione ampiamente diffusa soprattutto nell'ambito della ricerca in quanto consentono di riprodurre in spazi ridotti e condizioni al contorno controllate i principali effetti dell'interazione termo-meccanica palo-terreno. A tale scopo è stata progettata e realizzata una box sperimentale all'interno della quale è stata disposta sabbia e limo (Pozzolana), attraverso il metodo della pluviazione a secco, ed un palo di prova equipaggiato con scambiatore di calore e strumentato con estensimetri elettrici. In questa nota saranno descritti: il layout di prova ed i principali risultati, in termini di spostamenti e sforzi assiali, di una prova termica ciclica e due prove termomeccaniche cicliche. Le prove sono caratterizzate dagli stessi cicli termici e da diversi livelli di carico meccanico.

## 1. Introduzione

I Pali Energetici o Geotermici sono una tecnologia innovativa nel campo delle risorse rinnovabili in quanto consentono di sfruttare l'energia geotermica superficiale attraverso elementi necessari per ragioni strutturali riducendo i costi i connessi all'installazione di sonde geotermiche verticali. I Pali Energetici funzionano come scambiatori di calore grazie all'inserimento all'interno dell'elemento di fondazione di tubazioni in polietilene, generalmente fissate alle armature, con fluido termovettore (acqua e un additivo anticorrosivo ed antigelo) in circolazione. Lo scambio termico tra l'elemento di fondazione ed il terreno circostante avviene grazie alle proprietà termiche del sottosuolo che a partire da 5-10 m di profondità è caratterizzato da una zona di omotermia e può, dunque, essere utilizzato come fonte o ricettore di calore in funzione della domanda termica della sovrastruttura. I Pali Geotermici in condizioni di esercizio sono sottoposti a carichi aggiuntivi di natura termica che determinano ulteriori sollecitazioni e spostamenti rispetto alle fondazioni classiche. Lo studio dell'interazione palo-terreno in presenza di carichi combinati risulta fondamentale in fase di progettazione ed una migliore comprensione dei meccanismi di risposta può evitare approcci estremamente cautelativi. A tale scopo possono essere utilizzati diversi mezzi di indagine, come approcci numerici o sperimentazione in scala di sito e laboratorio. Nell'ambito della sperimentazione in scala di laboratorio la nota si focalizza su modelli in scala ridotta ad 1 g. Tali modelli sono costituiti da contenitori di prova, progettati allo scopo di ridurre gli effetti bordo, all'interno dei quali sono disposti palo/i di prova, terreno (secondo diverse tecniche di deposizione) e sensori di misura. La sperimentazione in scala ridotta a 1 g è caratterizzata da uno stato tensionale significativamente basso paragonato a quello in sito, ma fornisce un mezzo di indagine che consente di eseguire prove di diversa tipologia (meccaniche, termiche e termomeccaniche) in condizioni termiche e meccaniche controllate e spazi e costi ridotti. Nell'ambito dei Pali Geotermici, Kalantidou et al. (2012) hanno eseguito prove in scala ridotta su palo in alluminio equipaggiato con

scambiatore di calore costituito da un tubo ad U metallico con acqua in circolazione immerso in Sabbia asciutta. Un layout di prova simile a quello proposto da Kalantidou et al. (2012) è stato successivamente adottato da Yavari et al. (2014) e Nguyen et al. (2017). Kalantidou et al. (2012) hanno eseguito prove termiche e termomeccaniche, a diversi livelli di carico meccanico, applicando due cicli di riscaldamento variando la temperatura del palo tra 25 °C e 50 °C, monitorando gli spostamenti della testa del palo. I risultati sperimentali hanno mostrato che l'entità degli spostamenti irreversibili misurati in testa è funzione del livello di carico meccanico. Yavari et al. (2014) riportano i risultati di una prova termica e quattro prove termomeccaniche, in termini di temperatura del palo e del terreno, pressione del terreno e spostamenti della testa e deformazioni assiali del palo. I principali risultati sperimentali riportati dagli autori hanno evidenziato che per un carico meccanico inferiore al 30% del carico limite palo-terreno l'applicazione dei cicli termici induce effetti di tipo reversibile. Nguyen et al. (2017), invece, riportano i risultati sperimentali di prove cicliche (30 cicli termici) eseguite a diversi livelli di carico meccanico incrementando la temperatura del palo di 1 °C (da 20 °C a 21 °C) per quattro ore e successivamente riducendola di 2 °C (da 21 °C a 19 °C) per 4 ore. I risultati mostrano che l'entità del cedimento irreversibile è funzione del livello di carico meccanico e che il massimo spostamento irreversibile si ottiene al termine del primo ciclo termico. Allo scopo di indagare gli effetti di cicli termici ripetuti osservati nelle sperimentazioni precedenti è stato progettato e realizzato un modello in scala di laboratorio presso il laboratorio di geotecnica del DICEA dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Il layout di prova, e i principali risultati di una prova termica ciclica e due prove termomeccaniche cicliche saranno illustrati nei paragrafi successivi. Tutte le prove, eseguite sul modello di laboratorio, sono caratterizzate dall'applicazione di carichi termici ottenuti da simulazioni energetiche dinamiche, eseguite con un software dedicato, condotte considerando la zona climatica della città di Napoli ed un edificio tipo adibito ad ufficio.

## 2. Layout di prova

L'apparecchiatura di prova è costituita da: una bilancia industriale a pavimento, contenitore di prova, telaio esterno in acciaio, terreno (Pozzolana), palo di prova, sensori di misura, sistemi per l'applicazione del carico termico e meccanico. In Fig. 1 (a) e (b) sono riportate la vista dall'alto e la vista verticale E-O dell'apparecchiatura di prova. Il contenitore di prova è costituito da pareti in Plexiglass di 20 mm di spessore e 700 mm di altezza e base in acciaio (1000 mm x 1000 mm) di 2 mm di spessore.

Le dimensioni del contenitore sono state progettate per minimizzare gli effetti di bordo, in particolare il rapporto tra il diametro del cassone e del palo (D) è maggiore di 20 (Parkin e Lunne, 1982) e la distanza tra la punta del palo e la base del contenitore è maggiore di 10 D (Le Kouby et al., 2004).

All'esterno del contenitore di prova è disposto un telaio in acciaio costituito da profilati UPN in acciaio S235. Sulle putrelle è stata saldata una piattina in acciaio su cui è stato bullonato un Cuscinetto Flangiato a Sfere per consentire al palo solo spostamenti verticali (senza attrito).

Il palo di prova è costituito da un tubolare in alluminio AW-6060 di 950 mm di lunghezza totale e 400 mm di lunghezza immersa. La geometria e le proprietà termiche e meccaniche del palo sono riportate in Tab. 1.

Tab. 1: Dimensioni e proprietà termiche e meccaniche del palo

L [mm]	L <sub>immersa</sub> [mm]	D [mm]	D <sub>INTERNO</sub> [mm]	$\lambda$ (Conducibilità termica) [W/m °C]	E [Mpa]
950	400	30	27	200	69000

Il palo è equipaggiato con estensimetri elettrici autocompensati termicamente (SG<sub>i</sub>) disposti all'estradosso del palo come illustrato in Fig. 1 che hanno consentito la valutazione delle deformazioni assiali a diverse profondità. Dopo l'installazione degli estensimetri la superficie del palo è stata ricoperta attraverso uno strato di gesso e pozzolana allo scopo di aumentare la scabrezza all'interfaccia palo-

terreno.

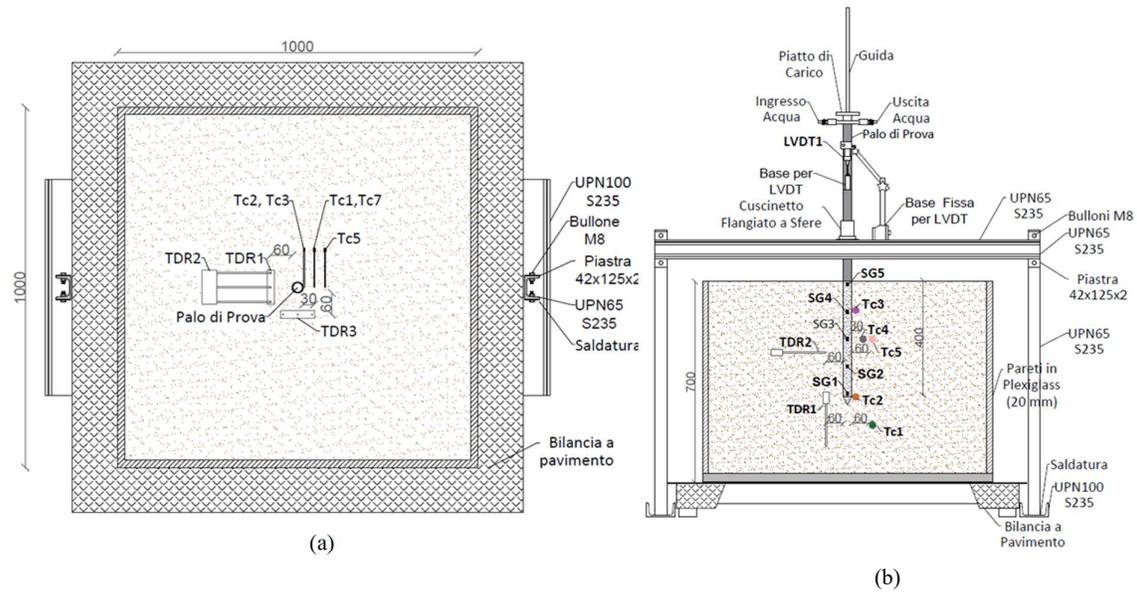


Fig 1. Layout di prova; (a) Vista dall'alto e (b) vista verticale E-O.

Il sistema di applicazione del carico meccanico è costituito da una Piatto ed una Guida di carico come illustrato in Fig. 1, che consentono l'applicazione dei carichi meccanici attraverso pesetti in ghisa. Il sistema per l'applicazione del carico termico si suddivide in un circuito interno ed uno esterno al palo. Il circuito interno consente la circolazione di acqua calda o fredda all'interno del palo ed è costituito da una Tubazione Metallica Interna ed un Ugello come riportato in Fig. 2 (a). Il meccanismo di circolazione dell'acqua è riportato in Fig. 2 (b). Il sistema esterno è costituito da tubazioni plastiche isolate termicamente e collegate al circuito interno (IN ed OUT, Fig. 2(b)) e ad un termocriostato a circolazione esterna. Questo dispositivo consente il riscaldamento e/o il raffreddamento dell'acqua messa in circolazione.

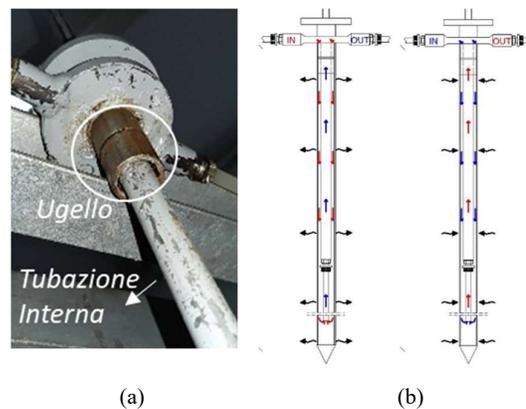


Fig 2. (a) Circuito Interno e (b) Meccanismo di circolazione dell'acqua durante il riscaldamento e raffreddamento del palo.

Il terreno utilizzato per le prove è sabbia e limo (Pozzolana) disposto per pluviage a secco da un'altezza minima di caduta allo scopo di riprodurre uno stato sciolto. Le proprietà termiche e meccaniche del terreno sono state determinate attraverso la prova dell'ago termico e prove di taglio diretto su campioni ricostituiti allo stesso stato di addensamento riprodotto nel cassone. Le proprietà fisiche, termiche e meccaniche del terreno sono riportate in Tab. 2.

Tab. 2: Proprietà fisiche, meccaniche e termiche del terreno.

$D_{max}$ [mm]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$n$ [-]	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\Theta_v$ [-]	$\phi$ [°]	$\lambda$ [W/m °C]
5	2.52	0.62	9.30	0.11	41	0.22

Il palo di prova è stato disposto secondo la tecnica proposta da Fioravante (2002) allo scopo di riprodurre la messa in opera di un palo trivellato. Una volta pluviato lo spessore di terreno sottostante la punta del palo (300 mm), è stato inserito il palo all'interno del cassone e successivamente è stato pluviato l'ultimo strato di terreno di 400 mm. La preparazione del campione è stata caratterizzata anche dall'inserimento di termocoppie (Tci), per la misura della temperatura del terreno e tre TDR per il monitoraggio del contenuto d'acqua volumetrico ( $\Theta_v$ ), disposte come mostrato in Fig 1. Due LVDT posti in posizione diametralmente opposta consentono la misura degli spostamenti verticali della testa del palo.

### 3. Prove Termiche e Termomeccaniche Cicliche di Riscaldamento

La Prova Termica (S1) e le Prove Termomeccaniche cicliche (S2 e S3) di riscaldamento sono state eseguite applicando la stessa storia termica ma diversi livelli di carico meccanico. Il carico termico di riscaldamento è stato applicato tramite la circolazione di acqua riscaldata all'interno del palo. Undici cicli termici ripetuti senza fasi di recupero termico sono stati applicati per una durata totale di circa tre giorni. Ciascun ciclo termico di 6 ore è caratterizzato da temperature che variano tra 32 °C e 44 °C (Fig. 3 (a)). Le prove termomeccaniche cicliche sono suddivise in tre fasi (meccanica, termomeccanica e di recupero termico o Recovery), la prova S1 è articolata in due fasi (termica e Recovery). La prima fase meccanica delle prove S2 e S3 consiste nell'applicazione del carico meccanico mentre vengono monitorati i cedimenti e le deformazioni assiali del palo e la temperatura indisturbata del terreno ( $T_{iniziale}$ ). Questa fase ha una durata trascurabile rispetto alle fasi successive, pertanto, si considera corrispondente all'istante di tempo  $t=0$ . Nella fase termomeccanica, al carico meccanico è combinato il carico termico e vengono acquisite le variazioni di temperatura, la temperatura dell'acqua in uscita e spostamenti e sforzi assiali del palo per una durata totale corrispondente agli 11 cicli termici. La fase di recupero termico caratterizzata dall'assenza di carichi termici consente di valutare gli effetti del riscaldamento del palo in termine di interazione e propagazione del calore. La prova S1 è caratterizzata da una fase termica di durata corrispondente agli 11 cicli termici e durante la quale si applica il carico termico al palo scarico meccanicamente. La fase di recovery corrisponde a quella descritta per le prove termomeccaniche. Per ciascuna delle tre prove si riportano in Tab. 3: la durata delle fasi, la temperatura iniziale, la massima variazione di temperatura ( $\Delta T_{MAX}$ ), l'entità del carico meccanico applicato. Il carico meccanico applicato,  $Q$ , è espresso in funzione del carico limite palo-terreno ( $Q_{ULT}=638$  N) valutato attraverso una prova di carico a rottura condotta precedentemente alle prove cicliche. I principali risultati delle prove S1, S2 e S3 sono riportati per la fase termica e termomeccanica in termini di spostamento testa palo e sforzi assiali.

Tab. 3: Prova Termica (S1) e Prove Termomeccaniche cicliche (S2 ed S3).

Prova	Fase Termomeccanica [h]	Fase Termica [h]	Fase di Recovery [h]	$Q / Q_{ULT}$ [%]	$T_{iniziale}$ [°C]	$\Delta T_{MAX}$ [°C]
S1	-	66	60	0%	17.8	26.3
S2	66	-	105	17%	16	28
S3	66	-	39	34%	14.7	29.4

Per la prova S1 si riportano in Fig. 3 (b) lo spostamento termico e le variazioni di temperatura  $\Delta T$  nel tempo. Per le prove S2 e S3 in Fig. 3 (c) e (d) sono diagrammati i  $\Delta T$  e gli spostamenti termomeccanici ( $u_T$ ) adimensionalizzati rispetto al cedimento meccanico iniziale ( $w$ ) indotto dal carico meccanico applicato nella fase meccanica precedente. La differente variazione di temperatura  $\Delta T$  tra le varie prove

è dovuta alla diversa temperatura iniziale del terreno ( $T_{iniziale}$ ) che è influenzata dall'interazione termica con l'ambiente. La convenzione adottata per gli spostamenti è che i sollevamenti sono positivi. Gli spostamenti misurati seguono l'evoluzione della storia termica applicata ed i relativi andamenti sono funzione del livello di carico meccanico applicato (Fig. 3 (b),(c) e (d)).

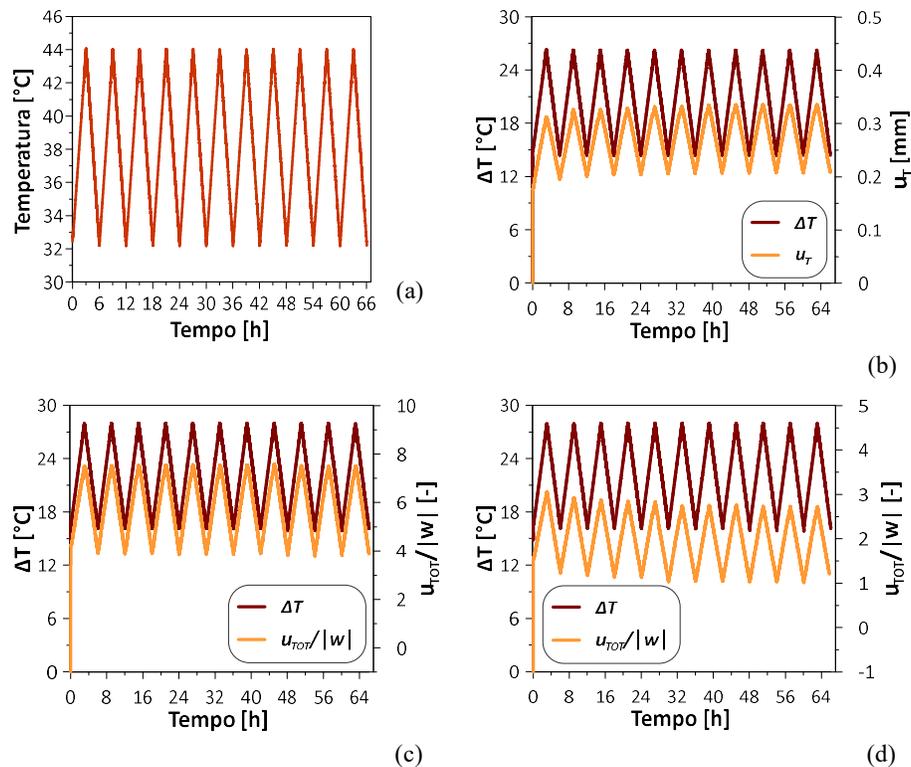


Fig 3. (a) Temperature dell'acqua in ingresso; (b) Prova S1: Variazioni di temperatura ( $\Delta T$ ) e spostamento termico ( $U_T$ ) della testa del palo; (c) Prova S2 e (d) Prova S3: Variazioni di temperatura ( $\Delta T$ ) e spostamento termomeccanico adimensionalizzato rispetto al cedimento meccanico ( $u_{TOT}/|w|$ ).

La variazione di spostamento termico all'i-esimo ciclo termico rispetto allo spostamento termico misurato durante il primo ciclo è diagrammata in funzione del numero dei cicli termici ( $nc$ ) in Fig. 4, per ciascuna prova ciclica. Sulla base delle misure sperimentali è proposta la relazione analitica (1) che fornisce la variazione di spostamento al ciclo i-esimo rispetto allo spostamento termico del primo ciclo. Il coefficiente sperimentale  $\eta$  è funzione del livello di carico e corrisponde a -0.025, -0.005 e 0.031 per 0%, 17% e 34 %  $Q_{ULT}$ , rispettivamente.

$$(1) \frac{\Delta u_T(nc > 1)}{u_T(nc = 1)} = \left(\frac{0.5}{nc}\right)^\eta - 1$$

In Fig. 5 (a), (b) e (c) sono riportati i campi di variazione degli sforzi normali al termine di ciascun ciclo termico per le prove S1, S2 e S3, rispettivamente, ottenuti attraverso le misure degli SG. Per le prove S2 e S3 lo sforzo normale termomeccanico ad ogni profondità di misura è adimensionalizzato rispetto allo sforzo normale meccanico. Per la prova S1 si riporta lo sforzo normale termico. L'applicazione del carico termico induce uno sforzo normale di compressione (S1) ed un incremento dello sforzo di compressione rispetto al caso meccanico (S2 e S3). Il punto di nullo (profondità a cui si verificano imassimi sforzi) corrisponde a circa  $0.3L_{immersa}$  per S1; Il massimo incremento di sforzo termomeccanico rispetto al caso meccanico si verifica tra circa  $0.3L_{immersa}$  e  $0.7 L_{immersa}$  in S2 e S3.

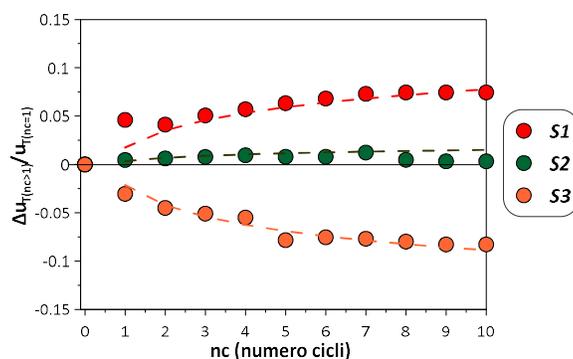


Fig 4. Variazione di spostamento termico al ciclo  $i$ -esimo rispetto allo spostamento del primo ciclo.

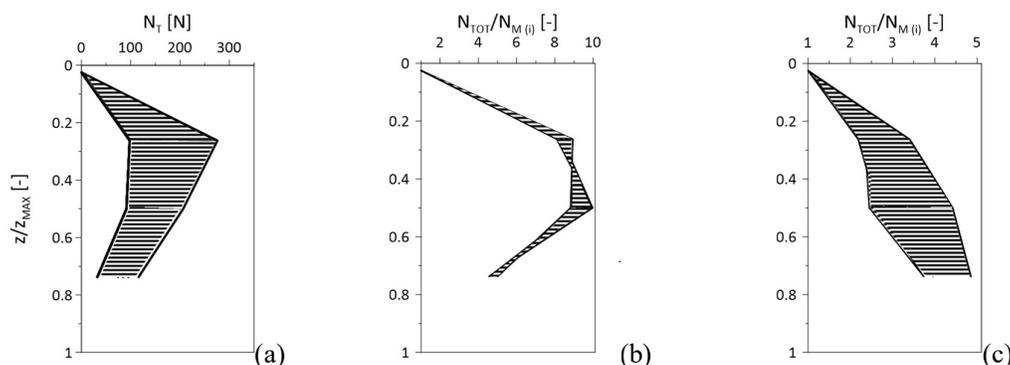


Fig 5. (a) Campo di variazione dello sforzo normale termico durante la prova S1; Campo di Variazione dello sforzo termomeccanico ( $N_{TOT}$ ) adimensionalizzato rispetto allo sforzo meccanico ( $N_M$ ) durante le prove termomeccaniche S2 (b) e S3 (c).

#### 4. Conclusioni

Il modello di laboratorio realizzato ha consentito di eseguire prove di tipo ciclico termiche e termomeccaniche. I risultati delle prove cicliche hanno mostrato che all'aumentare di  $nc$  il sollevamento termico della testa tende ad aumentare per 0%  $Q_{ULT}$  e diminuire per 34%  $Q_{ULT}$ . I profili di sforzo termico (S1) e termomeccanico (S2 e S3), ottenuti dalle misure degli SG, hanno mostrato che il riscaldamento induce sforzo di compressione nullo alla testa (palo libero) e con massimo a  $0.3L_{immersa}$ . In presenza di azioni meccaniche e termiche cicliche lo sforzo termomeccanico è maggiore anche di 10 volte lo sforzo meccanico. In S3 la distribuzione degli sforzi è caratterizzata da un incremento di sforzi di compressione concentrato nella parte inferiore del palo (in accordo con la riduzione dei sollevamenti della testa).

#### Bibliografia

- Fioravante V. (2002). "On the shaft friction modelling of non displacement piles in sand", *Soils and Foundation*, 42, 23–33.
- Kalantidou A., Tang AM., Pereira J-M., Hassen G. (2012). "Preliminary study on the mechanical behaviour of heat exchanger pile in physical model", *Géotechnique*, 62, 1047–1051.
- Le Kouby A., Canou J., Dupla JC. (2004). *Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena*. Taylor & Francis Group, London.
- Nguyen V. T., Tang A. M., Pereira J. M. (2017). "Long-term thermo-mechanical behaviour of energy pile in dry sand", *Acta Geotechnica.*, 12(4), 729-737.
- Parkin AK., Lunne T. (1982). "Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand". Proc. 2<sup>nd</sup> European symposium on penetration testing, Amsterdam, 761–768.
- Yavari N., Tang AM., Pereira J-M., Hassen G. (2014). "Experimental study on the mechanical behaviour of a heat exchanger pile using physical modelling", *Acta Geotechnica*, 9, 385–398.