

ANALISI E PROGETTAZIONE DI PALI ENERGETICI

Chiara Iodice

Università degli Studi della Campania 'Luigi Vanvitelli'
chiara.iodice@unicampania.it

Raffaele Di Laora

Università degli Studi della Campania 'Luigi Vanvitelli'
raffaele.dilaora@unicampania.it

Alessandro Mandolini

Università degli Studi della Campania 'Luigi Vanvitelli'
alessandro.mandolini@unicampania.it

Sommario

Il presente lavoro propone una procedura per valutare lo sforzo assiale che si genera in un palo per effetto di un carico termico mediante un approccio analitico. A tale scopo, il comportamento di un palo singolo soggetto alla contemporanea applicazione di un carico verticale statico e di una variazione di temperatura, è stato investigato tramite analisi agli elementi finiti utilizzando il codice ABAQUS. Il palo, considerato sia vincolato che libero alla testa, è immerso in un'argilla normalmente consolidata il cui comportamento è descritto impiegando diversi modelli costitutivi, uno dei quali è in grado di prevedere il collasso termico per effetto di un incremento di temperatura. Il massimo sforzo assiale nell'ambito di un ciclo termico derivato dalle analisi numeriche è stato confrontato con quello ottenuto utilizzando formule analitiche proposte dagli autori. Per l'utilizzo di tali formule è stata messa a punto una procedura che consente di ricavare il profilo di rigidità da impiegare per il terreno in funzione del livello di carico e di valutare il grado di vincolo alla testa del palo in funzione del numero di pali inattivi eventualmente presenti in un problema al finito. La procedura proposta richiede il solo utilizzo della curva carico-cedimento del palo singolo che, in fase progettuale, è sempre possibile determinare o mediante approccio analitico e numerico oppure sperimentalmente. Infine, tale procedura è stata applicata a dei casi sperimentali disponibili in letteratura relativi a gruppi di pali.

1. Introduzione

Un palo energetico è un elemento di fondazione che, oltre a trasferire i carichi strutturali, può scambiare calore con il terreno circostante grazie al fatto di essere equipaggiato con dei tubi all'interno dei quali scorre un fluido termovettore (Brandl, 2006). L'interazione termica con il terreno comporta la variazione di temperatura del palo che, pertanto, è soggetto a sollecitazioni e spostamenti che si aggiungono a quelli dovuti ai carichi statici (Laloui et al. 2006, Bourne-Webb et al. 2009, Di Donna e Laloui 2014, Ng et al. 2014a e b, Suryatriyastuti et al. 2014, Mimouni e Laloui 2015, Di Donna et al. 2016, Chen e McCartney 2017, Nguyen et al. 2017 and 2019, Wu et al. 2018).

Ad oggi la valutazione degli spostamenti aggiuntivi, necessaria per garantire il soddisfacimento delle verifiche richieste da normativa allo Stato Limite di Esercizio (SLE), va effettuata impiegando analisi numeriche. Per quanto concerne le verifiche allo Stato Limite Ultimo (SLU), è possibile, invece, valutare lo sforzo assiale impiegando le soluzioni analitiche proposte di recente da Iodice et al. (2020). Nello specifico, l'incremento o la riduzione dello sforzo assiale può avere un'influenza non trascurabile sulla capacità portante del palo, in particolar modo quando questo è combinato a momenti flettenti e ad azioni orizzontali. In tal caso, potrebbero risulterne compromesse sia le verifiche geotecniche che quelle strutturali.

Le soluzioni analitiche disponibili consentono di derivare lo sforzo assiale indotto dalla variazione di temperatura prima che avvenga lo scambio di calore tra palo e terreno, ovvero, restituiscono il valore

di tale sforzo nelle condizioni di breve termine; richiedono, inoltre, l'impiego di un profilo di rigidezza operativa da utilizzare per il terreno, nonché la valutazione del grado di vincolo alla testa del palo dovuto alla presenza di eventuali pali tradizionali (non attivi termicamente).

Allo scopo di consentire un utilizzo immediato di tali soluzioni analitiche, dopo aver verificato tramite analisi numeriche accoppiate termo-idro-meccaniche che, nell'ambito del singolo ciclo termico, lo sforzo assiale è massimo nelle condizioni di breve termine, il presente lavoro propone delle semplici regole per la stima della rigidezza del terreno e del grado di vincolo alla testa del palo.

2. Analisi numeriche: modellazione e risultati

Le analisi accoppiate termo-idro-meccaniche sono state condotte con il codice ABAQUS. Il palo energetico modellato ha lunghezza pari a 25 m e diametro di 0.5 m ed è immerso in un'argilla normalmente consolidata. L'assialsimmetria del problema consente di considerare un modello 2D avente dimensioni di 50x50 m (Figura 1). Il palo è modellato come un mezzo non-poroso elastico tramite elementi a 4 nodi del tipo CAX4T. Per il terreno, invece, sono stati utilizzati elementi del tipo CAX4PT aventi anche la pressione interstiziale come grado di libertà ai nodi oltre agli spostamenti ed alla temperatura presenti anche per il palo. La falda è al piano campagna.

Per considerare gli effetti del collasso termico sullo stato di stress del palo, il terreno è modellato come un'argilla normalmente consolidata che, se riscaldata, esibisce contrazione volumetrica (Campanella e Mitchell 1968, Cekerevac e Laloui 2004, Di Donna e Laloui 2015). I modelli costitutivi considerati nell'analisi sono il Mohr-Coulomb (MC), il Cam-Clay Modificato (MCC) ed il modello Ipoplastico impiegato con e senza la formulazione termica (Hypo-T e Hypo, rispettivamente) in grado di tener conto del comportamento volumetrico delle argille NC quando soggette ad incremento di temperatura. I parametri utilizzati per ciascun modello sono riportati in tabella 1.

Il palo è soggetto a due livelli di carico verticale statico corrispondenti a condizioni di esercizio (30% della capacità portante, R_t) o prossime alla rottura (60% o 80% R_t). La variazione di temperatura è applicata dopo la fase di carico meccanico e comprende una fase di riscaldamento di 1 giorno (h), seguita da 5 mesi in cui la temperatura è mantenuta costante (hf) e da una fase di 1 mese in cui nessuna temperatura è imposta al palo, eccetto che alla testa (hr) per simulare un periodo di riposo (Figura 1). I successivi sei mesi sono caratterizzati da raffreddamento (c) mantenuto costante per 5 mesi (cf) seguito dalla fase di riposo (cr).

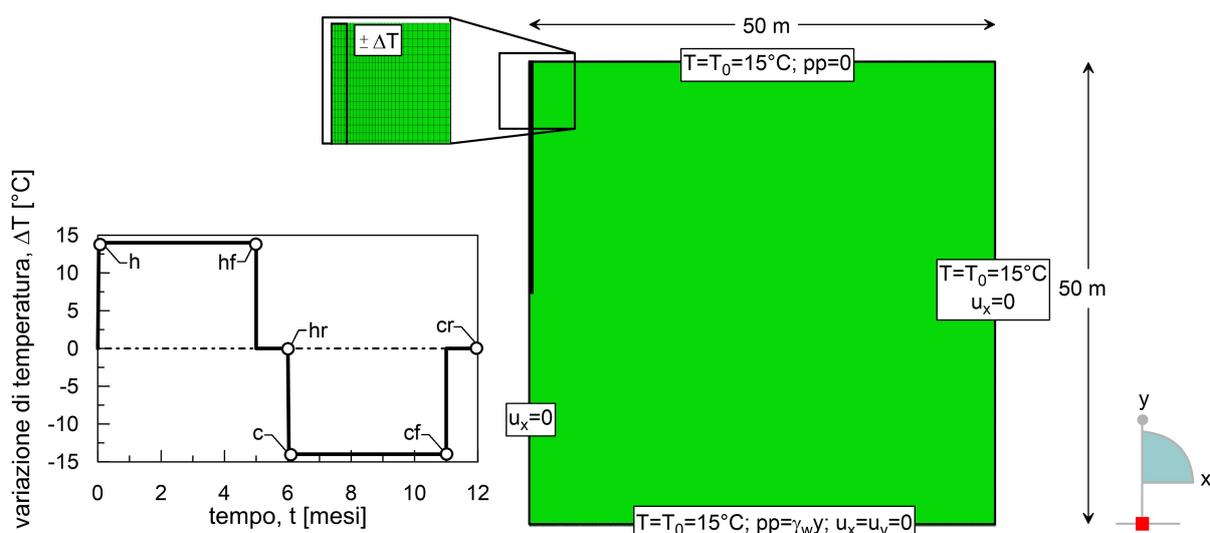


Fig 1. Variazione di temperatura alla testa del palo (ciclo di un anno) e modello utilizzato nelle analisi numeriche (T_0 è la temperatura iniziale; pp è la pressione interstiziale; u_x , u_y sono gli spostamenti in direzione x , y , rispettivamente)

I risultati delle analisi numeriche sono riportati in figura 2 con riferimento al solo sforzo assiale massimo e minimo derivato nel singolo ciclo termico. Per palo libero tali valori si verificano nelle fasi di riscaldamento (h) e raffreddamento (c), rispettivamente; per palo vincolato l'incremento dello sforzo assiale dovuto diffusione del calore nel terreno circostante (hf) che si verifica post fase di riscaldamento, è limitato dal raggiungimento della resistenza a taglio nel terreno. Ne segue che, nelle pratiche applicazioni è possibile far riferimento alle condizioni di breve termine, ovvero al riscaldamento ed al raffreddamento, trascurando l'effetto dello scambio termico. Analogamente, poiché il comportamento ottenuto utilizzando il modello Hypo-T restituisce risultati paragonabili all'Hypo, è possibile trascurare l'effetto del collasso volumetrico. Infatti, siccome la durata di applicazione del carico termico è inferiore rispetto al tempo di consolidazione, il collasso volumetrico è impedito dall'impossibilità dell'acqua di drenare. Ne deriva che, per il calcolo dello sforzo assiale massimo, è possibile utilizzare le soluzioni analitiche sviluppate da Iodice et al. (2020).

Parametri	Intergranular strain			Parte termica		Proprietà del terreno		Proprietà del palo			
	Hypo	MCC	MC	Hypo/Hypo-T	Hypo-T						
φ [°]:	21.9	21.9	21.9	R [-]:	$5 \cdot 10^{-5}$	n_T [-]:	-0.01	γ_{sat} [KN/m ³):	20	E [GPa]:	30
ν [-]:	0.23	0.23	0.23	A_g [-]:	400	l_T [-]:	0	k_w [m/s):	10^{-10}	ν [-]:	0.2
λ^*/λ [-]:	0.1	0.286	-	n_g [-]:	0.76	k_T [-]:	0.04	α_s [°C ⁻¹):	$1.5 \cdot 10^{-5}$	γ_c [KN/m ³):	25
κ^*/κ [-]:	0.02	0.048	-	β_r [-]:	0.08	c_T [-]:	0.4	α_w [°C ⁻¹):	$5 \cdot 10^{-5}$	α_c [°C ⁻¹):	$8.5 \cdot 10^{-6}$
N^*/N [-]:	1.26	3.52	-	χ [-]:	0.9	γ_T [-]:	0.1	λ_{th} [W/mK):	1.5	$\lambda_{th,c}$ [W/m°C):	2
ψ [°]:	-	-	0	m_{rat} [-]:	0.5			c_p [J/kgK):	1000	$c_{p,c}$ [J/kg°C):	1200
				ϑ [-]:	10						

Tabella 1. Parametri e proprietà termiche.

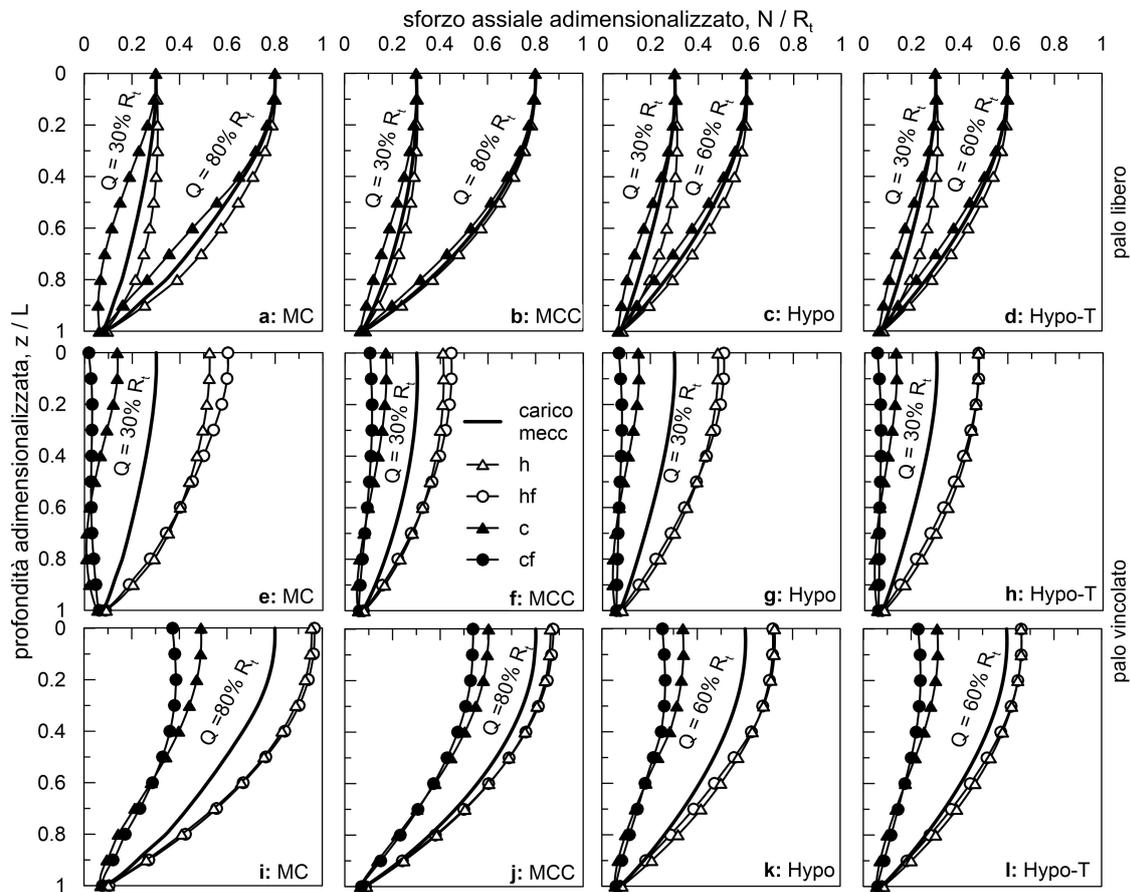


Fig 2. Distribuzione di sforzo assiale per i vari modelli costitutivi e le varie condizioni di vincolo

3. Scelta del profilo di rigidezza operativa

La maggiore difficoltà che si incontra nell'impiego delle soluzioni analitiche risiede nella scelta del profilo di rigidezza da utilizzare per il terreno. È ragionevole assumere che l'interazione tra palo e terreno sia regolata dal modulo di rigidezza a taglio secante mobilitato ad ogni profondità. Tale modulo è, però, funzione della distanza radiale dall'asse del palo e deve essere valutato impiegando analisi numeriche. Un'alternativa consiste nel riferirsi alla curva carico-cedimento del palo che, nel caso dei carichi verticali statici, può essere sicuramente considerata come un indicatore di risposta globale in grado di mediare tutte le peculiarità che si incontrano alla scala locale. In quest'ottica, si può utilizzare il modulo di rigidezza a taglio a basse deformazioni, G_0 , scalato tramite un fattore di correzione letto dalla curva carico-cedimento. In particolare, il rapporto tra la rigidezza assiale in corrispondenza di un dato livello di carico verticale applicato, K , e la rigidezza assiale iniziale, K_{in} , può essere usato come fattore di correzione, R_G , del profilo di G_0 . La figura 3 riporta i valori di R_G considerando anche i risultati di analisi numeriche aggiuntive nel caso di utilizzo del modello Hypo.

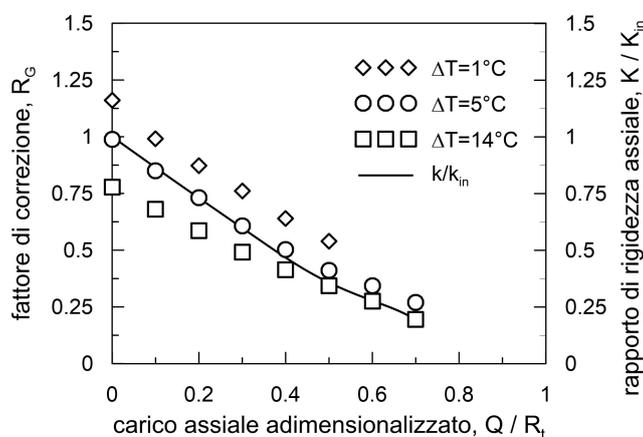


Fig 3. Confronto tra R_G e K/K_{in}

4. Valutazione del grado di vincolo alla testa del palo

La compresenza di pali energetici e tradizionali, ovvero non attivi termicamente, collegati mediante una platea, determina un grado di vincolo alla testa dei pali attivi che si colloca nel mezzo tra i due scenari ideali di testa libera e testa vincolata, esaminati nel presente studio. In particolare, la condizione di testa libera potrebbe essere riferita a quei casi in cui tutti i pali sono attivi, mentre, quella di testa vincolata a quei casi in cui un solo palo attivo è circondato da pali tradizionali. In quest'ottica, è possibile ricavare il grado di vincolo in funzione del rapporto tra la rigidezza assiale del sottogruppo di pali attivi, k_{attivi} , ed inattivi, $K_{inattivi}$.

Con riferimento ad un gruppo di pali modellati come molle concentrate di rigidezza assiale uguale a quella del palo singolo (Randolph e Wroth, 1978) e collegati mediante una platea rigida, è possibile valutare $K_{inattivi}$ sostituendo i pali attivi con un carico unitario applicato nel loro centro di rigidezza e risolvendo il sistema di equazioni di equilibrio e congruenza che ne deriva tenendo conto dell'interazione meccanica palo-palo tramite le espressioni di Randolph e Wroth; k_{attivi} è ricavata in modo analogo. In figura 4 lo sforzo assiale indotto dalla variazione di temperatura in corrispondenza della testa di un palo circondato da pali inattivi, N_{testa} , rispetto a quello di un palo energetico con testa bloccata, $N_{vincolato}$, è riportato in funzione del rapporto $k_{inattivi}/k_{attivi}$. Si può notare che, il grado di vincolo, espresso proprio dal rapporto $N_{testa}/N_{vincolato}$, può essere valutato nella pratica progettuale come segue:

$$\frac{N_{testa}}{N_{vincolato}} = \frac{K_{inattivi} / K_{attivi}}{0.7 + K_{inattivi} / K_{attivi}} \quad (1)$$

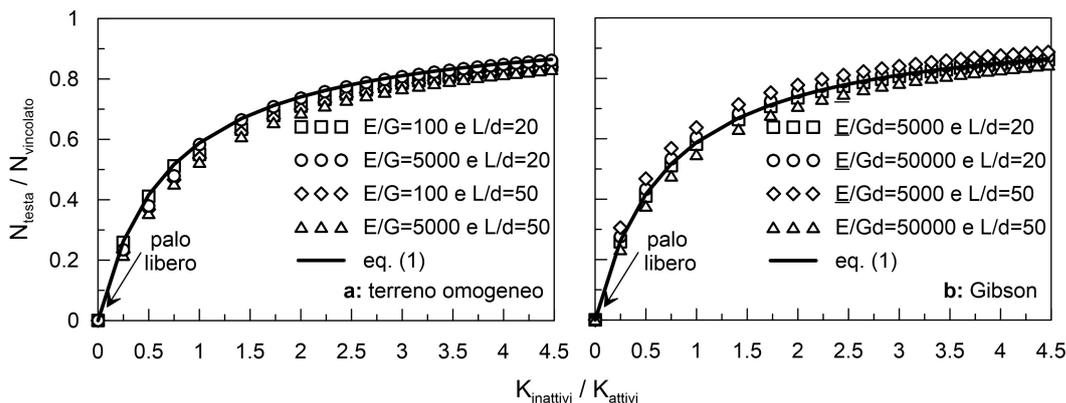


Fig 4. Variazione del carico assiale alla testa del palo in funzione della rigidezza dei pali attivi ed inattivi

5. Confronto con dati sperimentali

Dopo aver determinato R_G dalla curva carico-cedimento, le soluzioni analitiche possono essere utilizzate valutando il carico assiale in corrispondenza della testa del palo nell'ipotesi di palo vincolato correggendo tale valore tramite l'espressione (1) a seconda del numero di pali inattivi presenti nella palificata. In alternativa, è possibile determinare la rigidezza k_t (rigidezza della molla alla testa del palo da usare nelle soluzioni di Iodice et al., 2020) considerando una platea rigida connessa a molle aventi rigidezza pari a quella assiale del palo singolo. Le molle che rappresentano i pali attivi sono soggette ad uno spostamento noto e pari a quello che la testa del palo energetico avrebbe in condizioni di palo libero. In questo modo, risolvendo il sistema di equazioni di equilibrio e congruenza, si ottengono il carico N_t e lo spostamento w_t in corrispondenza della testa del palo attivo e, quindi, k_t . Noto k_t , l'utilizzo delle soluzioni analitiche consente di ottenere l'intero profilo dello sforzo assiale.

La procedura proposta è stata applicata al caso sperimentale relativo ad un gruppo di 4 pali energetici riportato da Mimouni e Laloui (2015), Di Donna et al. (2016) e Rotta Loria e Laloui (2018). Tale gruppo di pali è parte di una palificata composta anche da 16 pali tradizionali. I pali energetici sono lunghi 28 m ed hanno un diametro di 0.9 m; il terreno è costituito da 4 strati poggianti su un bedrock. La curva carico-cedimento è stata ricavata usando una relazione iperbolica con rigidezza iniziale pari a $K_{in}=1650$ MN/m calcolata trascurando il tratto in cui i pali sono infissi nel bedrock ($G_{0bedrock}=1155$ MPa) e mediando la rigidezza degli strati superiori ($G_0=50$ MPa). Per i 4 pali è risultato R_G 1, 0.91, 0.75, 0.76. In figura 5 è riportato il soddisfacente confronto tra i dati sperimentali e la procedura analitica proposta.

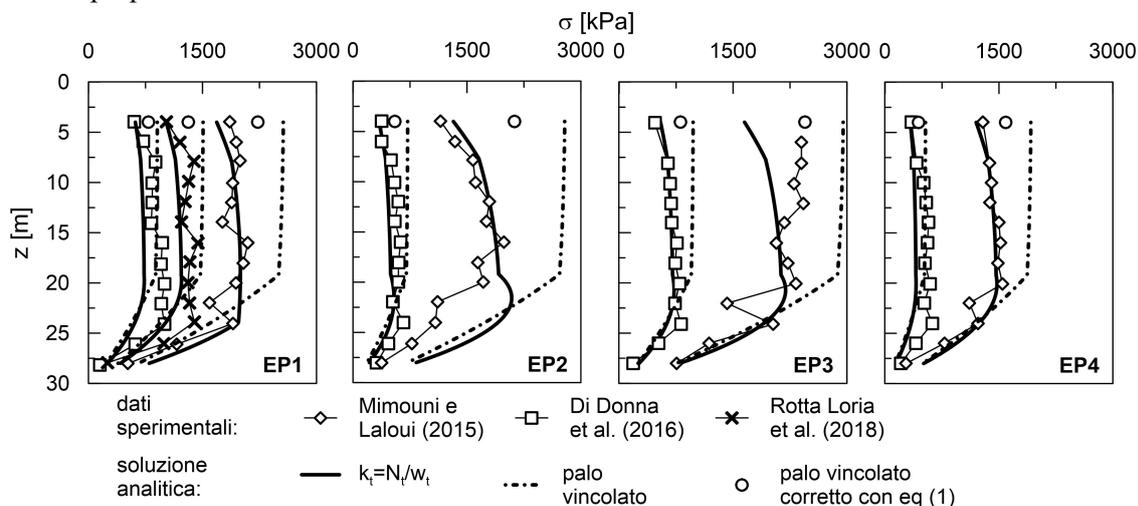


Fig 5. Confronto con i casi sperimentali

6. Conclusioni

Il presente lavoro propone una procedura per la valutazione dello sforzo assiale indotto da variazioni di temperatura nei pali energetici. Tale sollecitazione può essere determinata, in condizioni di breve termine, utilizzando soluzioni analitiche disponibili in letteratura che, tuttavia, presentano alcune difficoltà di utilizzo nella pratica progettuale in quanto necessitano della scelta del profilo di rigidità da adoperare per il terreno e, inoltre, si riferiscono a condizioni ideali di vincolo alla testa dei pali (ovvero, palo libero o vincolato). Pertanto, dopo aver verificato, tramite analisi numeriche condotte con il codice ABAQUS, che le sollecitazioni massime si ottengono proprio nelle condizioni di breve termine, due semplici regole sono proposte per (i) scegliere il profilo di rigidità operativa da impiegare per il terreno tramite l'utilizzo della curva carico-cedimento del palo singolo e (ii) valutare il grado di vincolo alla testa del palo dovuto alla presenza di pali inattivi.

Bibliografia

Abaqus 6.14 Online Documentation

Bourne-Webb P. J., Amatya B., Soga K. Amis, T. Davidson C. e Payne P. (2009). "Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles", *Géotechnique*, 59, No. 3, 237–248.

Brandl H. (2006). "Energy foundation and other thermo-active ground structures", *Géotechnique*, 56, No. 2, 81–122.

Campanella R. G. e Mitchell J. K. (1968). "Influence of temperature variations on soil behavior", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 94, No. 3, 709–734.

Cekerevac C. e Laloui L. (2004). "Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay", *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28, No. 3, 209–228.

Chen D. e McCartney J. S. (2017). "Parameters for load transfer analysis of energy piles in uniform nonplastic soils", *International Journal of Geomechanics*, ASCE 17, No 7, 04016159.

Di Donna A. e Laloui L. (2014). "Numerical analysis of the geotechnical behaviour of energy piles", *International Journal for Numerical and Analytical Methods Geomechanics*, 39, No. 8, 861–888.

Di Donna A. e Laloui L. (2015). "Response of soil subjected to thermal cyclic loading: experimental and constitutive study", *Engineering Geology*, 190, 65–76.

Di Donna A., Rotta Loria A. F. e Laloui L. (2016). "Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads", *Computers and Geotechnics*, 72, 126–142.

Iodice C., Di Laora R. e Mandolini A. (2020). "Analytical solutions for Ultimate Limit State design of thermal piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 146, No. 5, 04020016.

Laloui L., Nuth M. e Vulliet L. (2006). "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30, No. 8, 763–781.

Mimouni T. e Laloui L. (2015). "Behaviour of a group of energy piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 52, No. 12, 1913–1929.

Ng C. W. W., Shi C., Gunawan A. e Laloui L. (2014a). "Centrifuge modelling of energy piles subjected to heating and cooling cycles in clay", *Geotechnique letters* 4, No. 4, 310–316.

Ng C. W. W., Shi C., Gunawan A., Laloui L. e Liu H. L. (2014b). "Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 52, No. 8, 1045–1057.

Nguyen V. T., Tang A. M. e Pereira J. M. (2017). "Long-term thermo-mechanical behaviour of energy pile in dry sand", *Acta Geotechnica*, 12, No. 4, 729–737.

Nguyen V. T., Wu N., Gan Y., Pereira J. M. e Tang, A. M. (2019). "Long-term thermo-mechanical behaviour of energy piles in clay", *Environmental Geotechnics*, 1–12.

Randolph M.F. e Wroth C.P. (1978). "Analysis of vertical deformation of vertically loaded piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 104, No. 12, 1465–1488.

Rotta Loria A. F. e Laloui L. (2018). "Group action effects caused by various operating energy piles", *Géotechnique*, 68, No. 9, 834–841.

Suryatriyastuti M. E., Mroueh H. e Burlon S. (2014). "A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles", *Computers and Geotechnics*, 55, 378–391.

Wu D., Liu H. L., Kong G. Q., Ng C. W. W. e Cheng X. H. (2018). "Displacement response of an energy pile in saturated clay", *Proc. of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 171, No. 4, 285–294.