

INFLUENZA DELLA STORIA DI CARICO ORIZZONTALE SULLA RESISTENZA A SFILAMENTO DI PALI IN SABBIA

Redaelli Irene

Politecnico di Milano - DICA

irene.redaelli@polimi.it

Galli Andrea

Politecnico di Milano - DICA

andrea.galli@polimi.it

Della Vecchia Gabriele

Politecnico di Milano - DICA

gabriele.dellavecchia@polimi.it

Claudio di Prisco

Politecnico di Milano - DICA

claudio.diprisco@polimi.it

Sommario

Nella nota è discusso il comportamento meccanico di pali di fondazione in sabbia, valutandone in particolare la resistenza allo sfilamento a seguito di cicli di carico orizzontale, sia simmetrici che asimmetrici. Sono inizialmente presentati i risultati di alcune prove sperimentali condotte in piccola scala su pali modello, volte a studiare l'effetto della storia di carico ciclico (numero di cicli, tipo di sollecitazione, entità delle forze applicate) sul valore della resistenza a sfilamento. Sono quindi mostrati i risultati di alcune analisi numeriche agli elementi distinti, finalizzate a indagare il problema da un punto di vista micromeccanico.

1. Introduzione

Lo studio del comportamento di fondazioni profonde è argomento classico in Geotecnica ed è stato oggetto di numerosi studi teorici, sperimentali e numerici fin dalla metà del secolo scorso. Particolare attenzione è stata tradizionalmente posta alla definizione della risposta di tali sistemi (spesso associati a platee di fondazione) a percorsi di carico anche complessi, che includono azioni verticali, orizzontali e momenti. Tuttavia questi percorsi sono generalmente caratterizzati da una componente dominante di carico verticale di compressione, rispetto alla quale i pali sono essenzialmente progettati come riduttori di cedimenti. Meno frequenti sono invece gli studi volti ad esplorare il comportamento di tali sistemi rispetto a sollecitazioni di trazione, quando cioè i pali sono impiegati come ancoraggi, ed in particolare l'influenza che la storia di carico pregressa ha sulla resistenza allo sfilamento (si vedano ad esempio i lavori di Meyerhof, 1973, e Hanna & Afram, 1986). Tipici campi di applicazione per tali studi sono il dimensionamento di fondazioni per strutture leggere, soggette a combinazioni di carichi di natura ciclica orizzontale e di sollevamento, quali ad esempio i picchetti di ancoraggio per tensostrutture, le fondazioni di piattaforme flottanti, i monopali per turbine eoliche. La nota presenta alcuni risultati preliminari di una campagna sperimentale, condotta su pali modello in scala ridotta, volta a valutare la dipendenza della resistenza a sfilamento da variabili quali la storia di carico orizzontale pregressa (l'ampiezza, la tipologia e il numero di cicli orizzontale) e lo stato di addensamento del materiale. Allo scopo di migliorare la comprensione del comportamento meccanico del sistema da un punto di vista micromeccanico, il problema è stato anche studiato numericamente mediante un approccio agli elementi distinti.

2. Apparecchiatura sperimentale e percorsi di carico

Le prove sono state svolte su di un palo modello (diametro $D = 60$ mm; lunghezza $L = 250$ mm) posizionato entro uno strato di sabbia del Ticino (la cui curva granulometrica è riportata in Figura 1°, mentre per una caratterizzazione più completa si rimanda a Fioravante, 2000). La sabbia è stata depositata per pluviazione controllata, in modo da ottenere due differenti densità relative ($D_R = 50\%$ e $D_R = 85\%$) che saranno indicate nel seguito rispettivamente come sabbia sciolta o densa. Il palo è rigidamente connesso a due attuatori che ne consentono spostamenti verticali e orizzontali, a rotazioni impedito. In Figura 1b è mostrata una vista dell'apparato sperimentale ad inizio prova e sono definite le convenzioni di misura per le componenti di carico orizzontale H e verticale V , nonché per le associate componenti di spostamento u e v . Ulteriori informazioni sono reperibili in una precedente nota IARG (Galli et al., 2014) e in Galli et al. (2015).

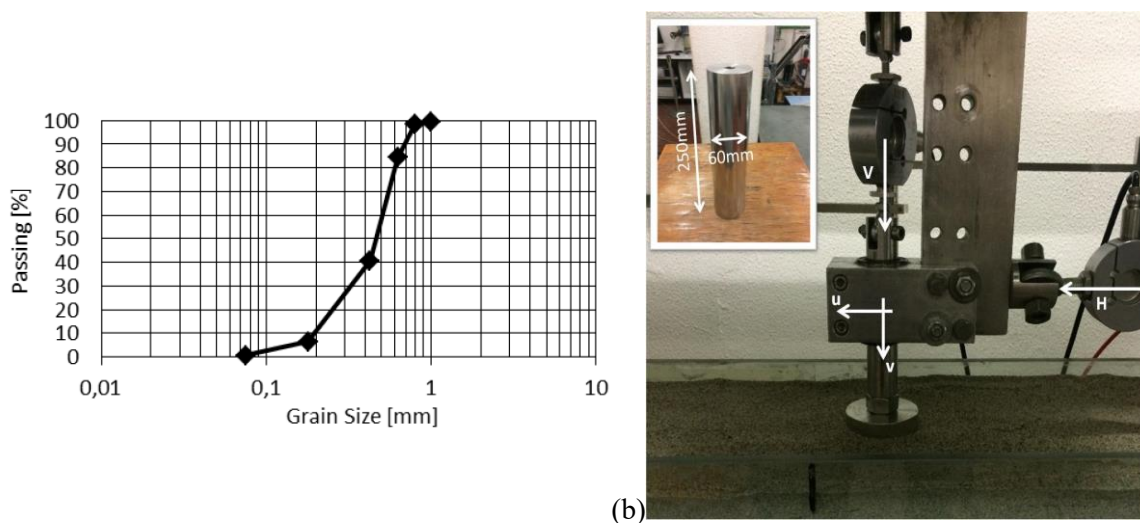


Fig 1. (a) curva granulometrica della sabbia impiegata; (b) vista d'insieme dell'apparato sperimentale a inizio prova.

Il programma di prove ha previsto inizialmente l'esecuzione di percorsi di carico monotoni per determinare i valori di rottura a sfilamento ($V < 0$) a carico orizzontale costante. Successivamente sono state condotte prove di sfilamento a carico orizzontale nullo, precedute da percorsi di carico orizzontale ciclico differenti per numero, tipologia e ampiezza. Sono stati effettuati sia cicli di carico simmetrici (indicati nel seguito con la sigla HS), sia asimmetrici (sigla HA), fino ad un carico massimo di orizzontale 500 N e fino a 12 cicli.

3. Risultati sperimentali

Durante l'esecuzione dei carichi ciclici orizzontali, prima della fase di sfilamento, si sono evidenziate significative non linearità geometriche, come ad esempio la variazione di geometria del sistema visibile in Figura 2a come subsidenza locale (Figura 2a). Tale fenomeno, dovuto al detensionamento del materiale immediatamente alle spalle del palo, non comporta evidenti effetti sulla risposta del sistema nel caso di cicli di carico asimmetrici (Figura 2b), per i quali si assiste ad un processo di stabilizzazione ciclica, senza significative perdite di rigidità. Esso risulta invece responsabile di una notevole perdita di rigidità del sistema nel caso di cicli di carico simmetrici (Figura 2c), che si verifica in seguito all'inversione del segno del carico orizzontale. In questo caso infatti il palo entra in contatto con una zona di terreno molto più sciolto rispetto alla condizione iniziale, con conseguente riduzione di rigidità. Tale effetto, idealmente assimilabile al "gap" che si crea tra palo e terreno nel caso di terreni coesivi, è caratterizzato da un'estensione crescente al crescere dell'ampiezza del ciclo.

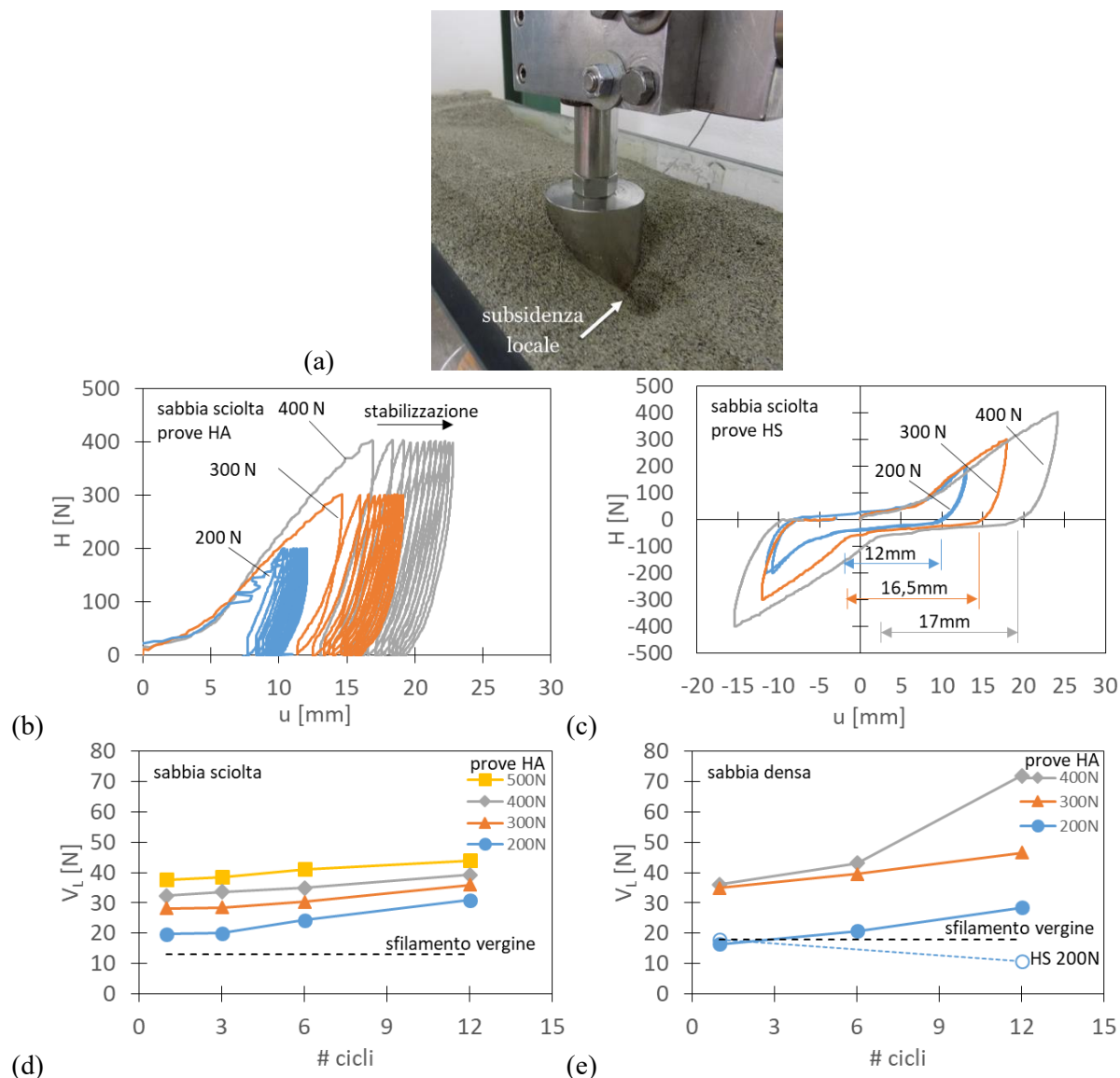


Fig 2. (a) fenomeno di subsidenza locale alle spalle del palo; (b-c) prove cicliche asimmetriche (HA) e simmetriche (HS) su sabbia sciolta a differenti ampiezze di carico orizzontale; (d-e) evoluzione dei valori di carico di sfilamento V_L in funzione del numero di cicli.

Al termine della fase di carico ciclico si è eseguita la fase di sfilamento, applicando al palo una sollecitazione verticale di trazione a carico orizzontale nullo. I valori massimi registrati in ciascuna prova sono presentati in Figura 2d (prove su sabbia sciolta) e 2e (prove su sabbia densa), avendo indicato con V_L il valore assoluto della resistenza a sfilamento del palo. Cicli asimmetrici (prove HA) inducono sempre un sensibile aumento di V_L rispetto al valore registrato in condizione vergine (cioè senza che vengano eseguiti cicli di carico orizzontali); rispettivamente pari a 13 e 18 N per sabbia sciolta e sabbia densa). Tale aumento è legato da una parte all'addensamento del materiale di fronte al palo e dall'altro all'effetto delle coazioni orizzontali residue, agenti perpendicolarmente alla direzione di carico, che, pur avendo risultante complessivamente nulla (le prove di sfilamento sono infatti condotte a $H=0$), garantiscono un maggior confinamento del palo. Tale effetto è più significativo sia al crescere del numero di cicli, sia della loro ampiezza; inoltre risulta essere molto più marcato nel caso di sabbie dense. Per queste ultime, però, si osserva un'evidente cambio di tendenza nel caso lo sfilamento sia preceduto da cicli di carico simmetrico (prove HS), come mostrato in Figura 2e. In questo caso, infatti, per 12 cicli di ampiezza pari a 200N, si osserva una sensibile diminuzione della resistenza V_L , rispetto al valore registrato in condizioni vergini. Per tale prova, la combinazione dell'effetto "gap" e del comportamento

dilatante del materiale produce, al contrario di quanto avviene per prove HA, un globale detensionamento, con conseguente diminuzione del confinamento agente sul palo.

4. Modellazione numerica ad elementi distinti

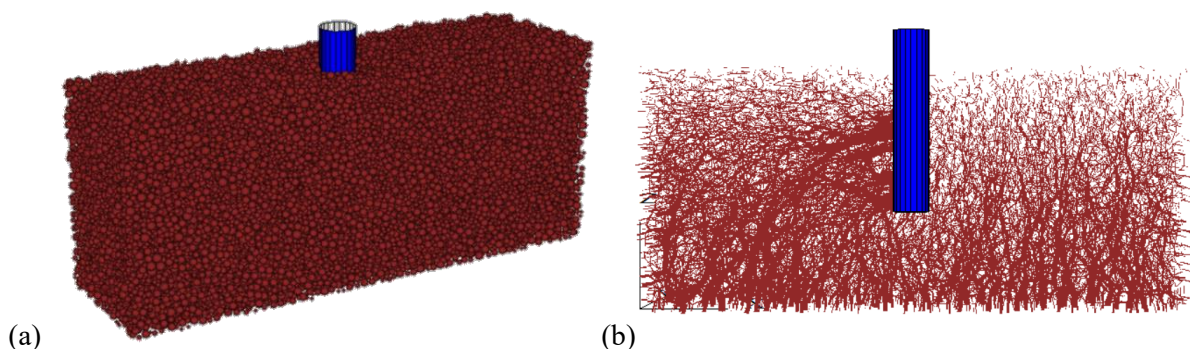
Le prove sperimentali brevemente illustrate al paragrafo precedente sono state oggetto di simulazioni numeriche svolte secondo un approccio ad elementi distinti utilizzando il codice PFC3D 4.0 (Itasca 2011).

La massa di terreno è riprodotta mediante 52516 particelle sferiche contenute entro un dominio (delimitato da 5 muri rigidi privi di attrito) di dimensioni coincidenti con quelle dell'apparato sperimentale. Grazie ad un'analisi parametrica è stato dimostrato che tale dimensione è tale da non influenzare i risultati numerici. La sabbia del Ticino è stata modellata secondo quanto proposto da Calvetti (2008). Le particelle sono ipotizzate sferiche, con densità $\rho_p=2650 \text{ kg/m}^3$. La curva granulometrica è riprodotta assumendo una distribuzione uniforme dei diametri dei grani, compresi tra il valore minimo $D_{\min} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$ e quello massimo $D_{\max} = 18 \times 10^{-3} \text{ m}$, con valor medio $D = 12 \times 10^{-3} \text{ m}$. Tali dimensioni sono 20 volte maggiori rispetto alla dimensione reale dei grani, e sono state scelte in modo da non influenzare i risultati numerici in condizioni di carico monotone. Il contatto tra i grani è modellato in direzione normale mediante una legge monolatera elastica lineare, con rigidezza $k_n = 4.2 \times 10^5 \text{ kN/m}$; mentre in direzione tangenziale mediante una relazione elastica lineare-attritiva, con rigidezza $k_t = 0.25k_n$ e coefficiente di attrito interparticellare $\mu_p = 0.3$. Al fine di tenere qualitativamente in conto l'effetto della non sfericità dei grani reali, le rotazioni delle particelle nelle simulazioni numeriche sono impedito (Calvetti, 2008). Le prove sono effettuate in condizioni di carico quasi-statiche, ed è stato per questo introdotto uno smorzamento (damping) locale del 5%, al fine di ridurre gli effetti dinamici.

Il palo è modellato come un muro cilindrico rigido a base circolare privo di peso e con coefficiente di attrito tra grani e muro pari a 0.3 (in Figura 3a è mostrato a titolo di esempio il modello numerico ad inizio prova). La procedura di simulazione è articolata nelle fasi seguenti:

- generazione casuale delle particelle all'interno del contenitore, con un diametro notevolmente ridotto rispetto a quello finale;
- espansione graduale delle particelle, fino al raggiungimento della dimensione finale corrispondente alla porosità desiderata ($n = 0.45$, corrispondente a $Dr = 50\%$);
- eliminazione delle particelle in corrispondenza del palo e generazione di quest'ultimo;
- applicazione dell'accelerazione di gravità, e assestamento sotto peso proprio fino al raggiungimento dell'equilibrio geostatico;
- assegnazione al palo di una velocità in direzione orizzontale a spostamento verticale e rotazioni impedito, sufficientemente piccola da evitare l'insorgere di fenomeni dinamici, sia in condizioni di carico monotone che cicliche.

In Figura 3b si mostra la distribuzione delle catene di forze durante una prova di carico orizzontale, che evidenzia l'aumento di confinamento del palo.



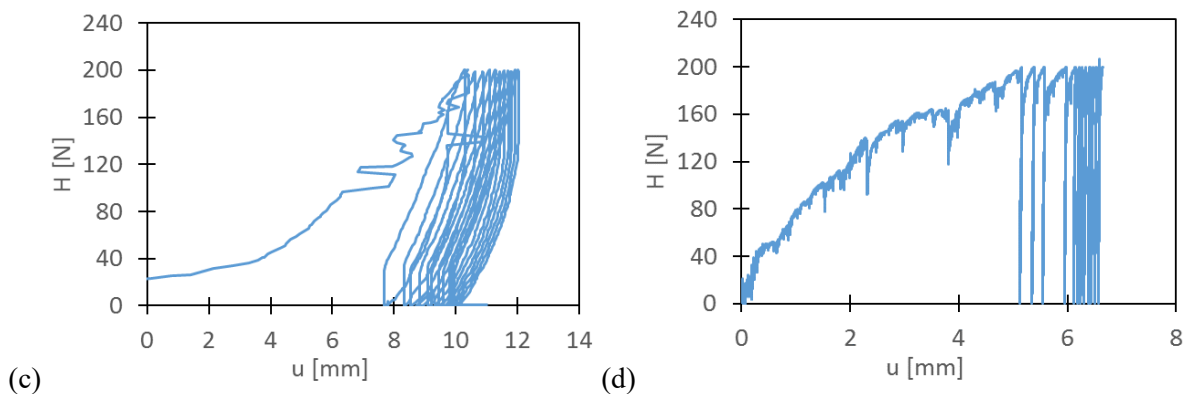


Fig 3. (a) vista d'insieme del modello ad elementi distinti; (b) distribuzione delle catene di forze al termine della fase ciclica; (c-d) confronto tra una prova sperimentale.

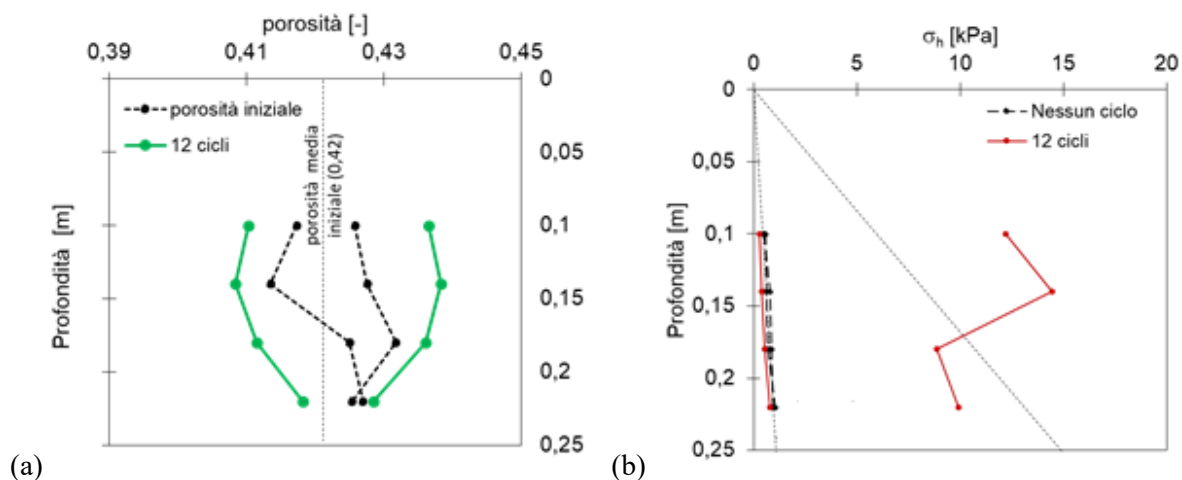


Fig 4. (a) evoluzione della porosità di fronte e dietro al palo; (b) evoluzione degli sforzi orizzontali di fronte e dietro al palo.

Le Figure 3c-d mostrano il confronto tra la prova sperimentale di tipo HA condotta eseguendo 12 cicli di ampiezza 200N, e il risultato della modellazione numerica. Dal confronto si evince che la fase monotona è correttamente riprodotta, ad eccezione di un iniziale fenomeno di “locking” osservato sperimentalmente per spostamenti inferiori a 3 mm. La fase ciclica coglie in maniera qualitativamente soddisfacente il fenomeno della stabilizzazione ciclica e il ratcheting, ma appare eccessivamente rigida e non in grado di riprodurre l'isteresi osservata in ciascun ciclo di scarico-ricarico. Tale limitazione appare legata al valore scelto per il fattore di scala tra il diametro delle particelle e il diametro reale dei grani: il valore di 20 impiegato nelle analisi è stato calibrato su prove monotone, ma risulta evidentemente inadatto per modellare percorsi non monotoni.

Nonostante queste limitazioni, il modello ad elementi distinti riesce a fornire un andamento convincente delle variazioni di porosità nel dominio lungo la profondità, sia a di fronte sia alle spalle del palo. La Figura 4a mostra infatti l'evoluzione della porosità, misurata per mezzo di opportuni cerchi di misura all'inizio della prova e dopo 12 cicli di carico. Si nota come, rispetto al valore globale teorico di 0,45, il modello raggiunga un valore effettivo medio iniziale pari a circa 0,42. Successivamente alla fase di carico ciclico si osserva un aumento di porosità dietro al palo e una diminuzione nell'intera zona di terreno di fronte ad esso. Parallelamente, si ha anche una significativa variazione degli sforzi orizzontali agenti sul palo nella direzione di carico (Figura4b): mentre di fronte al palo si osserva un aumento dello stato tensionale, alle spalle del palo i valori di sforzo orizzontale si riducono.

5. Conclusioni

Nella nota sono riportati i risultati di una campagna sperimentale in piccola scala volta ad indagare il comportamento a sfilamento di pali in sabbia a seguito dell'applicazione di storie di carico ciclico orizzontale. Sono investigati diversi fattori quali: la densità relativa della sabbia, l'ampiezza, la tipologia e il numero di cicli orizzontali. Il modello è stato anche riprodotto numericamente mediante un approccio agli elementi distinti. Le prove mostrano che la resistenza a sfilamento è influenzata sia dal comportamento meccanico del materiale, sia all'evoluzione della geometria del sistema (ad esempio, subsidenza locale ed effetto gap). Fattore chiave per comprenderne il comportamento è una corretta descrizione della risposta volumetrica del materiale. A seguito del carico ciclico, infatti, si osserva un complessivo addensamento nell'intorno del palo al crescere del numero di cicli. Questo addensamento è responsabile di un progressivo aumento del confinamento del palo, con conseguente incremento della sua resistenza a sfilamento.

Bibliografia

- Calvetti F. (2008). "Discrete modelling of granular materials and geotechnical problems". *Eur J Environ Civ Eng* 12, 951-65.
- Fioravante V. (2000). "Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing". *Soils and Foundations*, 40(4), 129-142.
- Hanna A.M., Afram A. (1986). "Pull-out capacity of single batter piles in sand". *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 387-392.
- Meyerhof G.G. (1975). "Uplift resistance of inclined anchors and piles" Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engng., Moscow, 167-172.
- Galli A., Farshchi I., Caruso, M (2014). Influenza del percorso di carico sulla risposta di fondazioni superficiali e profonde sotto carichi ciclici. IARG 2014, Chieti e Pescara, 14-16 luglio.
- Galli A., Farshchi I., Caruso, M (2015). Influence of loading path on cyclic mechanical response of small-scale shallow strip footing on loose sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 52(9), pp. 1228-1240.
- Itasca. PFC3D, Theory and background 2011.