

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI DI FONDAZIONI SU PALI: IL RUOLO DELL'ACCOPIAMENTO PLATEA-PALI-TERRENO

Matteo Corigliano (matteo.corigliano@polimi.it)
Politecnico di Milano

Luca Flessati (l.flessati@tudelft.nl)
TU Delft

Claudio di Prisco (claudio.diprisco@polimi.it)
Politecnico di Milano

ABSTRACT. La prassi corrente vede la progettazione di fondazioni profonde trascurare cautelativamente il contributo della platea a contatto con il terreno sulla risposta del sistema ai carichi applicati. Al fine di introdurre approcci progettuali più razionali e che permettano una progettazione più sostenibile di nuove strutture e di eventuali interventi di miglioramento, è necessario analizzare nel dettaglio i meccanismi di interazione pali-platea-terreno. In questa nota si mostrano i risultati di un'analisi agli elementi finiti di una fondazione esistente sottoposta a carico verticale centrato. I risultati mettono in evidenza il ruolo dell'accoppiamento pali-platea-terreno sia sulla risposta globale del sistema sia sulle azioni interne nei singoli pali.

1. INTRODUZIONE

Una delle tematiche di maggior interesse dell'attuale ingegneria civile è la valutazione della risposta meccanica delle strutture esistenti ai carichi applicati. Nell'ambito del patrimonio costruito italiano, molte strutture sono state realizzate prima dell'introduzione delle attuali normative delle costruzioni (NTC2018) e pertanto la loro sicurezza strutturale andrebbe riverificata. Per intervenire consapevolmente sulle strutture che necessitano di miglioramento è necessario ricorrere ad approcci di analisi più sofisticati di quelli utilizzati nell'attuale pratica progettuale. Solo un approccio razionale infatti può portare alla definizione di soluzioni progettuali più sostenibili ed efficaci. Tale aspetto risulta particolarmente importante nell'ambito delle fondazioni su pali in quanto interventi di miglioramento risultano essere sempre molto complessi.

Nella progettazione di fondazioni su pali, il ruolo dell'accoppiamento platea-pali-terreno è spesso trascurato e raramente analizzato, sebbene abbia un ruolo non trascurabile e benefico sulla capacità portante (Sakellariadis & Anastasopoulos, 2022). La comune pratica progettuale è particolarmente conservativa, trascurando sia il contributo della platea sulla capacità portante della fondazione sia la capacità del sistema di ridistribuire i carichi dopo il raggiungimento della rottura del palo più sollecitato. Solo recentemente sono stati introdotti approcci semplificati (di Laora et al., 2019, Iovino et al., 2021, di Laora et al., 2022) in grado di superare questa seconda limitazione.

L'obiettivo della nota è mettere in evidenza come analisi ad elementi finiti possano fornire informazioni significative riguardo al comportamento di fondazioni su pali, permettendo una progettazione più consapevole sia di nuove fondazioni che di eventuali interventi di miglioramento strutturale. A tal scopo si è studiato il comportamento di una fondazione su pali (un caso studio di una fondazione esistente) sottoposta a carico verticale centrato.

2. IL MODELLO NUMERICO

È stata eseguita una analisi numerica 3D non lineare con il codice commerciale MIDAS/GTS-NX per simulare l'interazione platea-pali-terreno. La fondazione è costituita da una platea su pali (Figura 1a), schematizzata numericamente come mostrato in Figura 2 (è stato considerato solo un quarto della geometria, grazie alla simmetria del problema). La base della platea è a 3m di profondità dal piano campagna mentre i 7 pali in calcestruzzo, armati con 8 barre di diametro 30mm (Figura 1b), hanno una lunghezza di 12m e un diametro di 1.2m. Il sistema di fondazione è immerso in uno strato omogeneo di argilla satura (peso per unità di volume $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$).

Il dominio è stato discretizzato attraverso circa 46000 elementi (esaedri e pentaedri a 6 nodi). La platea e i pali (con un peso specifico di 25 kN/m^3) sono stati modellati come elastici, con un modulo di Young di 30 GPa e un coefficiente di Poisson di 0.25. I pali sono assunti incastrati alla platea. Il terreno è stato modellato come un

materiale elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura alla Tresca con legge di flusso associata. Le proprietà elastiche del terreno (resistenza a taglio in condizioni non drenate, $S_u=150\text{kPa}$, modulo elastico non drenato, $E_u=50\text{MPa}$ e coefficiente di Poisson, $\nu=0.5$) sono stati assunti costanti con la profondità, come ricavato a partire dalle prove in sito effettuate per la valutazione della risposta meccanica della fondazione in esame. All'interfaccia terreno-pali e terreno-platea sono stati utilizzati elementi di interfaccia elastici-perfettamente plastici. Questi elementi, in direzione normale sono "quasi-rigidi" (rigidezza molto maggiore di quella del terreno) a compressione e perfettamente fragili a trazione. In direzione tangenziale il comportamento è stato modellato con criterio di rottura alla Tresca con sforzo tangenziale massimo pari a S_u .

Gli spostamenti orizzontali e verticali sono impediti alla base del modello mentre sulle superfici laterali sono permessi solamente spostamenti verticali. La fondazione è assunta essere sottoposta ad un carico verticale centrato V , mentre il terreno laterale al di sopra del piano di fondazione è stato modellato come un sovraccarico uniforme p (gli sforzi mobilitati lungo le superfici laterali della platea vengono trascurati).

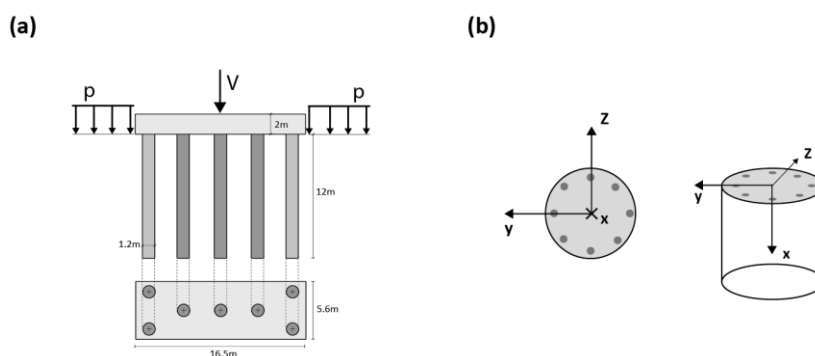


Figura 1. Il sistema di fondazione analizzato: (a) geometria e carichi, (b) dettaglio del singolo palo con il relativo sistema di riferimento

L'analisi agli elementi finiti è stata eseguita seguendo gli step elencati di seguito:

- (i) imposizione dello stato di sforzo iniziale aumentando progressivamente la gravità (in questa fase i pali hanno le proprietà meccaniche del terreno);
- (ii) costruzione dei pali: le proprietà meccaniche dei pali vengono cambiate (diventano quelle del calcestruzzo);
- (iii) costruzione della platea;
- (iv) applicazione lineare del carico V fino a raggiungere il collasso del sistema di fondazione.

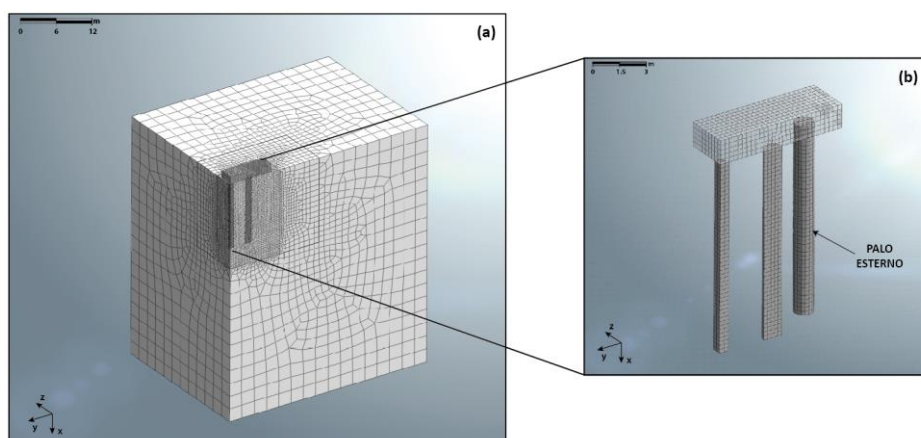


Figura 2. Il modello agli elementi finiti utilizzato per studiare la fondazione in esame

3. RISULTATI NUMERICI

I risultati delle analisi numeriche relativi alla fase (iv) sono riassunti in Figura 3 in termini di (a) curva push-over $V-v$ (dove v rappresenta lo spostamento verticale del centro della platea), (b) momenti flettenti, M_y e M_z ,

agenti lungo il palo esterno (Figura 2b) in direzione y e z, rispettivamente, (c) percorso di carico in termini di azione assiale e momento flettente nella sezione più sollecitata del palo esterno e in Figura 4 in termini di curve di livello delle deformazioni deviatoriche plastiche.

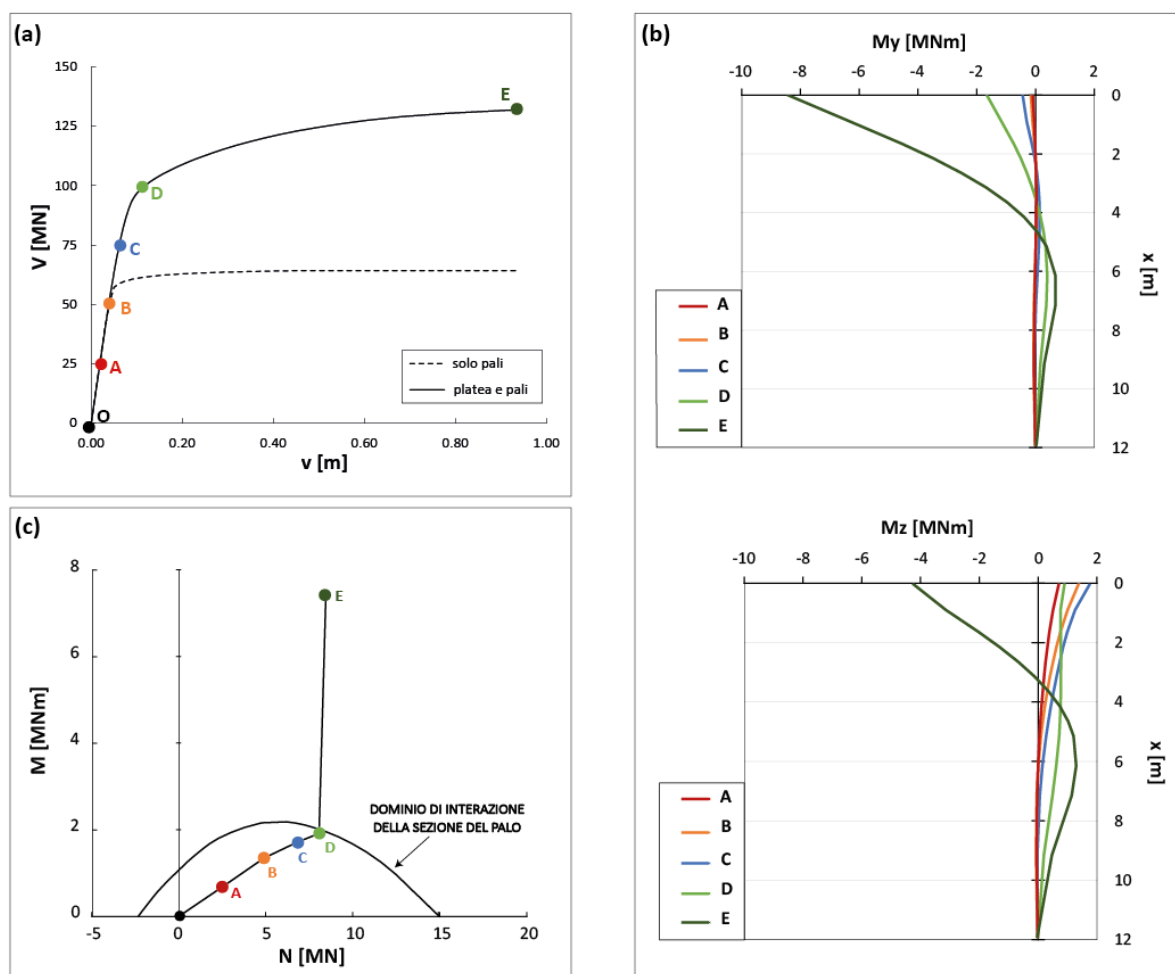


Figura 3. Risultati in termini di (a) V-v, (b) momenti flettenti nel palo esterno, (c) percorso di carico in N-M nella sezione più sollecitata del palo esterno .

Inizialmente, la risposta carico-spostamento della fondazione è lineare (O-B in Figura 3a), tuttavia, a causa del vincolo rigido presente tra platea e pali, il momento flettente nei pali non è nullo e assume valore massimo in corrispondenza della sezione di incastro, con $M_z > M_y$. All'aumentare del carico verticale, aumentano sia l'azione assiale (N) che il momento flettente risultante ($M = (M_z^2 + M_y^2)^{0.5}$) lungo il palo come mostrato in Figura 3c (da O a B). Il percorso di carico nel piano M-N è lineare. Durante questa fase, non si accumulano deformazioni plastiche, pertanto le relative deformazioni non sono rappresentate in Figura 4.

Aumentando il carico (punto C in Figura 3a), si sviluppano deformazioni irreversibili alla base dei pali (Figura 4C). Tuttavia, esse non inducono significative non linearità nella risposta né nel piano V-v (Figura 3a) né nel piano M-N (Figura 3c). Anche in questo caso il massimo momento si osserva in corrispondenza della sezione di incastro del palo (Figura 3b).

In corrispondenza del punto D in Figura 3a, la risposta carico-spostamento è non lineare (ma non ancora a rottura), le deformazioni plastiche si estendono sotto la platea, intorno ai pali e sotto la punta dei pali (Figura 4D). Il valore massimo (in modulo) di M_y risulta essere in corrispondenza della testa del palo, ma, di segno opposto rispetto a quanto osservato per valori di carico V inferiori e maggiore di M_z . Inoltre, il percorso degli sforzi nel piano M-N raggiunge il dominio di interazione della sezione del palo (Figura 3c), calcolato assumendo le resistenze caratteristiche da progetto esecutivo, $f_{ck} = 11.7 \text{ MPa}$ per il calcestruzzo e $f_{yk} = 326 \text{ MPa}$ per l'acciaio.

Aumentando ulteriormente il carico V si giunge all'asintoto orizzontale della curva carico-spostamento che rappresenta la rottura lato geotecnico del sistema. Il valore del carico limite risulta essere circa doppio del valore

che si otterrebbe trascurando il contributo della platea (linea tratteggiata in Figura 3a). A rottura le deformazioni irreversibili si estendono anche nel terreno presente tra i pali (Figura 4E) mettendo in luce un meccanismo di rottura complesso, che si estende anche al di sotto della platea (non si verifica una rottura “a blocco”). Lo sviluppo delle deformazioni irreversibili in prossimità del palo esterno è associato a un notevole incremento di momenti flettenti ad azione assiale praticamente costante (Figura 3 b e c). Questo mette in evidenza che fra i punti D ed E di Figura 3a il sistema tende a caricare i pali centrali anziché il palo più esterno. Pertanto, si può concludere che, sebbene il carico applicato alla fondazione sia puramente verticale, la distribuzione dei carichi nei singoli pali non è uniforme, come invece si otterrebbe seguendo gli approcci tradizionali basati sull’analisi limite e che trascurano la presenza della platea.

L’assunzione di considerare un palo elastico, trascurando lo sviluppo di fratture nella sezione di calcestruzzo durante l’analisi a elementi finiti (Comodromos et al., 2009), è a favore di sicurezza poiché trascurando la riduzione di rigidità del palo associata alla formazione di fratture, si sovrastimano le azioni interne nel palo più sollecitato. Dal punto D al punto E, il percorso di sforzo rappresentato in Figura 3c non è più rappresentativo del reale comportamento della fondazione poiché il modello a elementi finiti non è in grado di riprodurre la risposta dei pali post-rottura. Tuttavia, da un punto di vista progettuale, si può assumere che la rottura del sistema platea+pali avvenga in corrispondenza del punto D.

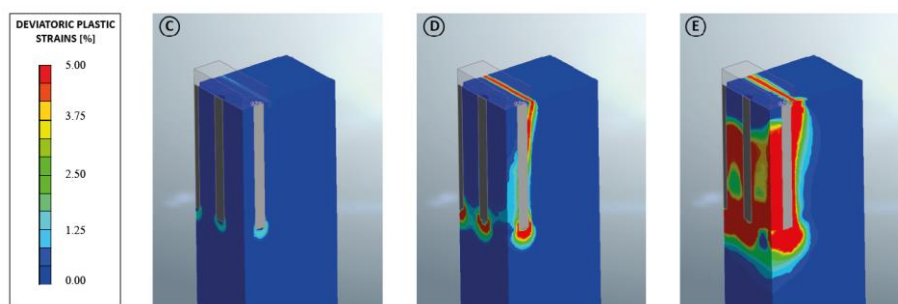


Figura 4. Curve di livello delle deformazioni deviatoriche plastiche in corrispondenza dei punti C, D, E di Figura 3a.

4. CONCLUSIONI

In questa nota si mostra come l’utilizzo di analisi ad elementi finiti possa fornire informazioni significative sul comportamento delle fondazioni su pali sottoposte a carico verticale centrato, in particolare tenendo in considerazione il ruolo dell’accoppiamento platea-pali-terreno. I risultati mostrano che trascurare il contributo della platea può portare ad una significativa sottostima della capacità portante. Inoltre, assumendo i pali incastrati alla platea, questi risultano essere presso-inflessi, nonostante il sistema sia soggetto ad un carico verticale centrato. I valori di momento flettente ottenuti non sono trascurabili e potrebbero potenzialmente portare alla rottura lato struttura del sistema. Nel caso di palificate soggette a carichi verticali centrati, tale aspetto, importante nella progettazione delle armature, non può essere colto seguendo gli approcci tradizionali secondo i quali il contatto fra platea e palo è schematizzato come una cerniera.

5. BIBLIOGRAFIA

Comodromos EM, Papadopoulou, MC and Rentzeperis, IK (2009) "The effect of cracking on the response of pile test under horizontal loading", J Geotech Geoenviron Engrg, ASCE, Vol. 135, No. 9, pp 1275-1284.

Di Laora, R., de Sanctis, L., & Aversa, S. (2019). Bearing capacity of pile groups under vertical eccentric load. Acta Geotechnica, 14(1), 193-205.

Di Laora, R., Iodice, C., & Mandolini, A. (2022). A closed-form solution for the failure interaction diagrams of pile groups subjected to inclined eccentric load. Acta Geotechnica, 1-14.

Iovino, M., Maiorano, R. M. S., De Sanctis, L., & Aversa, S. (2021). Failure envelopes of pile groups under inclined and eccentric load. Géotechnique Letters, 11(4), 247-253.

Sakellariadis, L. & Anastasopoulos, I. (2022). On the mechanisms governing the response of pile groups under combined VHM loading. Géotechnique, in press.