

CENNI SUL COMPORTAMENTO DEI PALI NODOSI

Leonardo Maria Lalicata
Università degli Studi di Genova
leonardo.lalicata@unige.it

Andrew McNamara
City, University of London
A.McNamara@city.ac.uk

Sarah Elizabeth Stallebrass
City, University of London
s.e.stallebrass@city.ac.uk

Jignasha Panchal
Keltbray Piling
asha.panchal@keltbray.com

Sommario

Lo sviluppo urbano nelle grandi metropoli richiede un attento uso della superficie disponibile portando alla costruzione di strutture sempre più alte. Questi edifici vengono tipicamente fondati su pali le cui dimensioni e numero crescono progressivamente per portare carichi sempre maggiori. Di conseguenza, aumentano sia i costi che l'impronta ecologica delle fondazioni profonde. In alternativa, è possibile migliorare la resistenza laterale dei pali, che è il fattore che maggiormente ne influenza la capacità portante. Per argille consistenti, l'attrito palo-terreno può essere incrementato creando delle sporgenze, o nodi, sul mantello di pali trivellati gettati in opera. Risultati di prove in vera grandezza e in centrifuga, nonché di simulazioni numeriche, mostrano che queste sporgenze aumentano la resistenza fino al 40%. In alternativa, è possibile usare pali nodosi di lunghezza ridotta in grado di portare lo stesso carico. Questa nota analizza gli aspetti tipici della risposta dei pali nodosi con particolare attenzione alla mobilitazione della resistenza in condizioni ultime.

1. Introduzione

L'ottimizzazione della poca superficie disponibile per costruire nuovi edifici in aree intensamente antropizzate, come ad esempio la città di Londra, porta alla realizzazione di strutture sempre più alte e quindi a opere di fondazione, tipicamente pali, sempre più grandi e profonde. L'aumento progressivo delle dimensioni delle fondazioni ha un impatto diretto sull'aumento dei costi e sull'impronta ecologica di queste opere. Oltre ad aumentare esponenzialmente il volume di calcestruzzo necessario, gli altri aspetti negativi comprendono, ma non sono limitati a, l'utilizzo di fanghi per sostenere il foro, l'incremento dei volumi di scarto prodotti dallo scavo, il rumore e l'uso di macchinari più grandi.

Tutto questo è in netto contrasto con l'obiettivo di diventare neutrali dal punto di vista delle emissioni di anidride carbonica equivalente, sintetizzato negli accordi di Parigi del 2015 nonché nel più recente Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Ad oggi, il settore delle costruzioni produce il 39% delle emissioni globali, ed è dunque uno dei comparti produttivi che più impatta sull'ambiente. Per

cercare di affrontare il problema delle emissioni è necessario un radicale cambio del paradigma della progettazione, costruzione e gestione delle opere civili.

Negli ultimi anni l'evoluzione tecnologica delle fondazioni su pali di medio/grande diametro ha puntato ad ottimizzare il comportamento del palo per ridurre l'enorme divario tra la capacità geotecnica disponibile e l'effettiva capacità strutturale del palo stesso. Ad esempio, i pali cavi (*hollow*) (McNamara *et al.*, 2014) possono ridurre lo spreco di calcestruzzo del 70% mantenendo invariata la prestazione geotecnica. I pali costolati (*ribbed*) o filettati (*threaded*) (Gorasia & McNamara, 2016; Hard & Carvalho, 2018) aumentano la capacità laterale del palo andando ad interessare il terreno indisturbato lontano dal mantello del palo.

Per cercare di rispondere alla crescente domanda di maggiore sostenibilità, un nuovo tipo di palo è stato sviluppato da Keltbray Piling in collaborazione con il Research Centre for Multi-scale Geotechnical Engineering della City, University of London: il palo *HIPER*. *HIPER* è l'acronimo di Hollow, Impression, Precast, Energy and Reusable pile. Alcune di queste caratteristiche sono interdipendenti, come il modulo di palo cavo e prefabbricato, o cavo ed energetico; altri moduli invece, come il modulo di palo nodoso, sono indipendenti e possono essere usati anche sui classici pali gettati in opera.

Il palo *HIPER* è stato recentemente impiegato come fondazione dei nuovi uffici della stazione di Euston a Londra (UK) nell'ambito della realizzazione della linea ferroviaria ad alta velocità inglese, HS2, (Smith, 2022). L'aspetto più interessante di questi pali, dal punto di vista geotecnico, è la presenza dei nodi lungo la superficie laterale. Questa nota riporta una sintesi degli aspetti salienti dei pali nodosi dalle evidenze sperimentali ad un modello interpretativo della risposta.

2. Il Palo Nodoso

Il palo nodoso, in Figura 1, nasce come un miglioramento dei pali trivellati e gettati in opera in terreni a grana fine. La resistenza per attrito laterale del palo viene incrementata grazie alla presenza di queste sporgenze, o nodi, che forzano le tensioni tangenziali a concentrarsi nella zona di terreno relativamente lontana dalla superficie di contatto tra palo e terreno e quindi sostanzialmente indisturbata.

Rispetto a tecnologie simili quali i pali costolati (Gorasia & McNamara, 2016) o filettati (Hard & Carvalho, 2018), i pali nodosi hanno il notevole vantaggio di non generare scarti durante la realizzazione dei nodi, il fondo foro rimane pulito e non è necessario pensare ulteriori operazioni di pulizia del foro oltre a quelle eseguite normalmente.

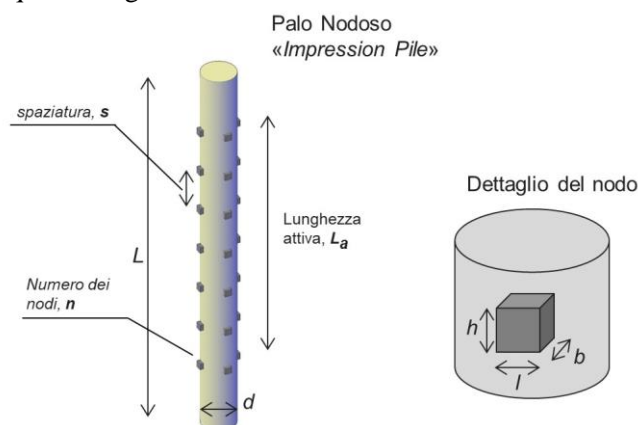


Fig 1. Palo Nodoso.

2.1. Tecnologia Esecutiva

Il palo nodoso è stato progettato per funzionare in terreni a grana fine abbastanza consistenti da non

richiedere l'uso di fanghi bentonici per sostenere il foro. La superficie dentata del palo viene creata con uno strumento brevettato, detto "*impression tool*", Figura 2a, formato da due scudi opposti sui quali sono saldati i nodi ad una distanza variabile tra i 300 e i 700mm a seconda dello scudo usato. Lo strumento, manovrato con la gru, viene calato nel foro alla profondità desiderata, quindi gli scudi vengono spinti, grazie ad un pistone idraulico, contro le pareti del foro dove i nodi creano le rientranze, Figura 3. Gli scudi vengono ritratti e girati di 90° e l'operazione viene ripetuta. Lo strumento viene quindi spostato in una nuova posizione e le operazioni vengono ripetute fino a creare i nodi nella lunghezza di interesse del palo. A questo punto lo strumento viene estratto dal foro e si può procedere con la messa in opera della gabbia di armatura e il getto del calcestruzzo.

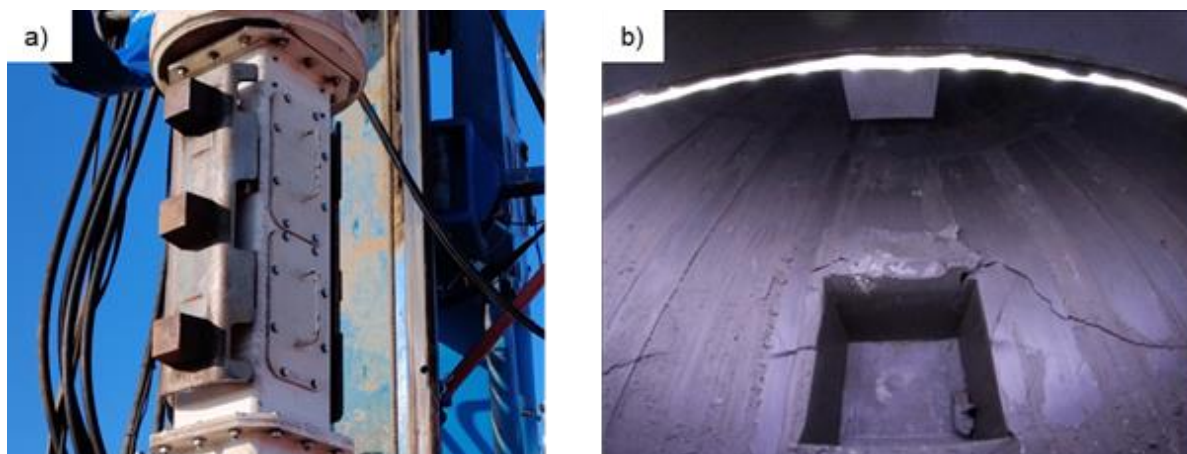


Fig 2. Dettagli costruttivi del palo nodoso: a) "*Impression tool*"; b) immagine del nodo appena creato nell'argilla di Londra.

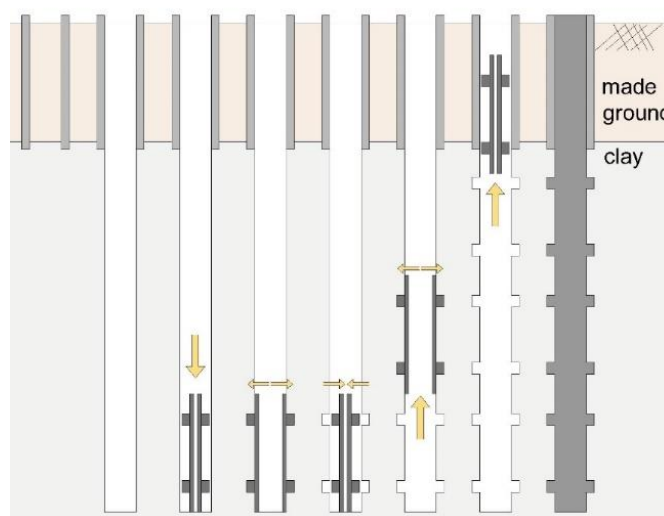


Fig 3. Costruzione del palo nodoso.

Nella configurazione più semplice, il palo nodoso ha due coppie di nodi ortogonali tra loro rispetto all'asse del palo e i nodi sono allineati lungo la direzione verticale, Figura 1. Prove preliminari condotte a Londra hanno dimostrato che la realizzazione dei nodi non rallenta il programma dei lavori (Lalicata *et al.*, 2022) perché l'*impression tool* può essere montato su una gru e quindi non occupa la trivella che nel frattempo può scavare gli altri fori. In sito, la qualità delle sporgenze viene monitorata da una telecamera installata sullo strumento, Figura 2b.

3. La sperimentazione in centrifuga

La risposta dei pali nodosi sotto carichi assiali è stata investigata attraverso numerose prove in

centrifuga geotecnica (Lalicata *et al.*, 2021) nelle quali la tecnologia esecutiva descritta in precedenza è stata opportunamente miniaturizzata per adattarsi alle esigenze della modellazione in piccola scala. Nello studio è stata indagata l'influenza della spaziatura verticale dei nodi, del numero dei nodi nella sezione trasversale del palo, della lunghezza attiva (ovvero la porzione della lunghezza del palo dove sono realizzati i nodi) e infine l'influenza della posizione della lunghezza attiva rispetto al piano campagna. Le prove sono state condotte a 50g (*g* rappresenta l'accelerazione di gravità) in un campione di argilla Speswhite sovraconsolidato. Durante la prova la superficie libera è stata mantenuta prossima al piano campagna. In ogni esperimento, 2 o 3 pali nodosi sono stati portati a rottura insieme ad un palo tradizionale, avente le stesse dimensioni, per avere un confronto diretto dell'efficacia dei pali nodosi.

I pali sono stati realizzati in resina a 1g prima di mettere il modello nella centrifuga. Inizialmente viene scavato un foro con un tubo di acciaio a parete sottile e successivamente vengono realizzati i nodi. Infine, rimosso lo strumento, viene versata la resina a presa rapida. La testa del palo, in alluminio, è stata dotata di un giunto sferico per trasmettere solo carichi assiali e di una spalla dove è stata appoggiata la piastra per la misura degli spostamenti della testa del palo. Fig 4 mostra alcuni dei pali modello a fine prova.



Fig 4. Alcuni dei pali modello estratti al termine della prova.

I pali usati nella sperimentazione avevano un diametro 16mm e lunghezza 180mm riproducendo, alla scala del prototipo, un palo di 800mm di diametro lungo 9 metri. Il rapporto di snellezza ($180/16 = 11.25$) è relativamente basso se confrontato con i tipici valori di sito, ma rappresenta un compromesso ragionevole tra la necessità di minimizzare gli effetti di bordo sotto la punta del palo e limitare lo spessore del banco di argilla per ridurre i tempi di consolidazione in volo. I nodi, a base quadrata di 3mm per lato, sporgevano dal mantello del palo di 1.5mm. Alla scala del prototipo, queste dimensioni corrispondevano rispettivamente a 150 e 75mm.

I campioni di terreno sono stati ricostituiti a partire dal fango il cui contenuto d'acqua è pari al doppio del limite liquido (Bilotta & Taylor, 2005). L'impasto è stato quindi versato nel contenitore e consolidato in pressa fino ad una tensione verticale di 500kPa. Per favorire le operazioni di scavo, la tensione è stata ridotta a 250kPa il giorno prima della prova. Una volta rimosso dalla pressa, il terreno in eccesso è stato attentamente rimosso fino a raggiungere un'altezza di 290mm e la superficie impermeabilizzata con una plastica spray. A questo punto è possibile procedere alla realizzazione dei pali. A fine prova, diversi campioni di terreno sono stati prelevati per misurare il contenuto d'acqua dal quale, dato che il terreno è saturo, è possibile determinare univocamente la resistenza non drenata del terreno s_u .

4. La capacità dei pali nodosi

I risultati sperimentali mostrano che il carico limite del palo cresce all'aumentare della lunghezza attiva e del numero dei nodi nella sezione trasversale. Nel caso standard di 4 nodi nella sezione trasversale, se la lunghezza attiva è circa l'85% della lunghezza totale del palo il palo nodoso presenta un incremento del carico limite del 40%, Fig 5a. La migliore risposta del palo nodoso si ha quando la spaziatura è inferiore ad un valore soglia, Fig 5b. In questo caso, la spaziatura verticale tra i nodi ha una modesta influenza sulla capacità del palo nodoso e la superficie di rottura collega i nodi in direzione verticale creando un blocco di nodi e terreno che si muove in modo omogeneo. Quando invece la spaziatura verticale supera il valore soglia, i nodi si comportano come fondazioni indipendenti e il terreno gli scorre attorno. I dati a disposizione mostrano che, per valori di spaziatura inferiori al valore soglia, l'efficacia dei nodi cresce linearmente con il numero dei nodi nella sezione trasversale del palo, almeno nel campo di variazione sperimentato.

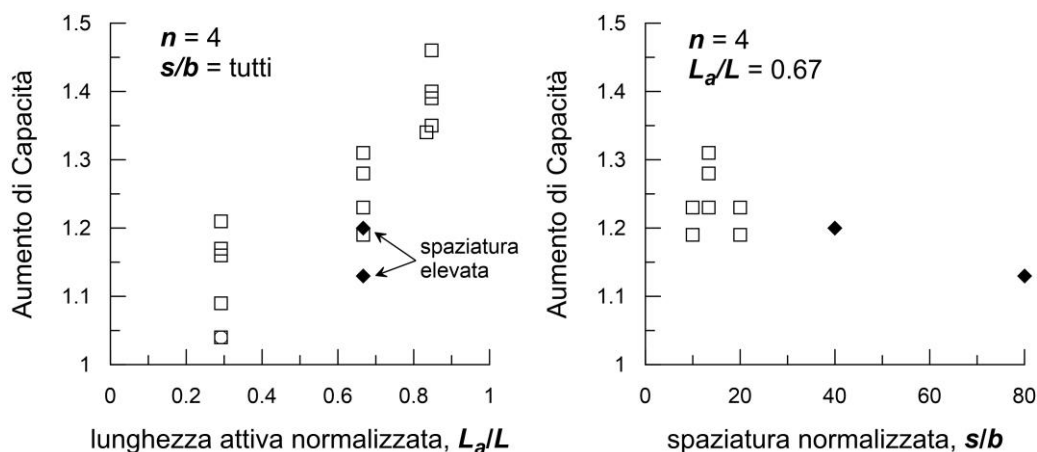


Fig 5. Sintesi delle prove sperimentali: incremento di capacità portante in funzione della lunghezza attiva e della spaziatura tra i nodi.

Seguendo un approccio alle tensioni totali, $t_f = s_u$, nel caso di rottura a blocco, la capacità portante del palo nodoso può essere calcolata secondo lo schema in Fig 6. Alla capacità laterale e alla resistenza alla punta del palo tradizionale bisogna aggiungere la risultante degli sforzi tangenziali lungo le costole verticali di terreno create dai nodi e la resistenza alla base dell'ultimo nodo del blocco. Si noti che il maggior contributo non del blocco non è dato dall'aumento (modesto) della superficie laterale, ma dal fatto che la rottura avviene nel terreno e non all'interfaccia palo-terreno; quindi il blocco riesce a mobilitare l'intera resistenza disponibile ($\alpha = 1$). La capacità portante del singolo nodo è stata ricavata da una soluzione di estremo superiore, vedi Fig 6, date le ridotte dimensioni dei nodi, il contributo del singolo nodo sulla capacità totale del palo è modesto ($\sim 3\%$) e in fase di progettazione può essere trascurato.

Lo schema di calcolo del proposto può essere impiegato per valutare la spaziatura critica s_{cr} che determina il passaggio dal meccanismo di scorrimento del terreno attorno al singolo nodo al meccanismo a blocco. s_{cr} è stata calcolata confrontando la capacità laterale calcolata nel meccanismo a blocco tra due nodi con il carico risultante da due nodi indipendenti e dalle tensioni tangenziali agenti lungo il fusto del palo tra i nodi stessi. Come mostrato in Fig 6, s_{cr} dipende molto dal coefficiente di adesione α e poco dalla dimensione dei nodi (h/b), i risultati fanno riferimento ad un rapporto tra la base del nodo e il diametro del palo, b/d , di 0.094 che corrisponde ai valori sia delle prove in centrifuga che di sito. Per valori tipici di h/b (centrifuga = 2, sito = 0.7) e per valori ragionevoli di α (0.4 - 0.6) s_{cr}/b varia tra 18 e 28. Tale intervallo corrisponde a 1.3 e 2.1m alla scala del prototipo (dove $b = 75\text{mm}$). Data la attuale tecnologia disponibile, la spaziatura critica è sempre rispettata e il palo nodoso sviluppa la capacità portante con il meccanismo di rottura a blocco.

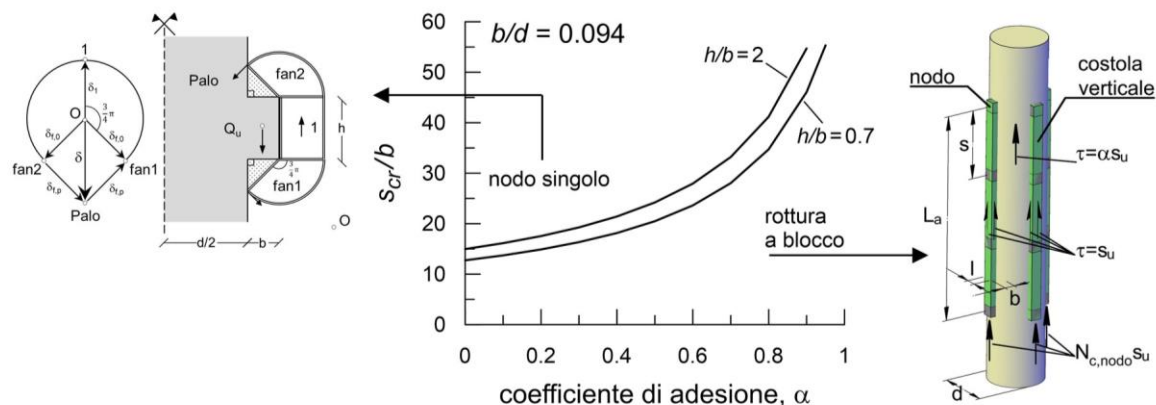


Fig 6. Valori soglia della spaziatura tra i nodi che determinano il meccanismo di rottura del palo nodoso.

5. Conclusioni

Il palo nodoso migliora il comportamento geotecnico dei pali di fondazione perché coinvolge il volume di terreno lontano dalla superficie del palo ovvero dalla zona disturbata. I risultati sperimentali indicano un incremento del carico limite del 40% del palo nodoso rispetto ad un palo tradizionale di identiche dimensioni. La miglior risposta del palo nodoso si ottiene quando la spaziatura verticale tra i nodi è minore di un valore critico, che dipende principalmente dal coefficiente di adesione α e in minor misura dalle dimensioni del nodo e del palo. Le analisi mostrano che, per valori tipici di α di geometria dei nodi, la rottura dei pali nodosi è definita sempre dal meccanismo a blocco.

Aumentare la capacità geotecnica significa poter ridurre, a parità di carico, la lunghezza del palo con effetti benefici sulla qualità costruttiva del palo e sulla velocità di produzione. Ridurre la lunghezza, e quindi la quantità di calcestruzzo utilizzata, consente di ridurre l'impronta ecologica delle fondazioni, portando anche il settore delle costruzioni verso soluzioni innovative, più ambientalmente sostenibili, ma pur sempre competitive.

Bibliografia

- Bilotta E., Taylor, N. (2005). Modellazione geotecnica in centrifuga. Hevelius Edizioni.
- Gorasia R.J., McNamara A.M. (2016). High-capacity ribbed pile foundations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 169 (3): 264–275.
- Hard D.A., Carvalho, A.T. (2018). Threaded rotary bored piles at Paddington new yard. *Proceeding of the 2018 DFI-EFFC International Conference on Deep Foundations and Ground Improvement*, Rome, Italy.
- Lalicata L.M., Stallebrass S.E., McNamara A.M. (2021). An experimental study into the ultimate capacity of an “impression” pile in clay. *Géotechnique*. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00168>
- Lalicata L.M., Stallebrass S.E., McNamara A.M., Panchal, J.P. (2022). Design method for the “impression pile”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering* 175(1), 75-85 <https://doi.org/10.1680/jgeen.21.00033>.
- McNamara A.M., Suckling T.P., McKinley B., Stallebrass S.E. (2014). A field trial of a reusable hollow cast-in-situ pile. *Proceeding of Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering* 167 (4): 390–401, <http://dx.doi.org/10.1680/geng.12.00102>.
- Skempton A.W. (1959). Cast-in-situ bored piles in London clay. *Géotechnique*, 9 (4): 153-173.
- Smith C. (2022). HS2 offices supported by Keltbray's increased capacity pile which also heats building in world's first use. *New Civil Engineering*. <https://www.newcivilengineer.com/innovative-thinking/hs2-offices-supported-by-keltbrays-increased-friction-pile-which-also-heats-building-in-worlds-first-use-28-01-2022/>