

COMPORTAMENTO MECCANICO DI MICROPALI ARMATI IN RESINA ESPANDENTE

Roberto Valentino, Lorella Montrasio, Elena Romeo
*Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura
Università degli Studi di Parma
roberto.valentino@unipr.it, lorella.montrasio@unipr.it, elena.romeo@unipr.it*

Davide Stevanoni
*Novatek s.r.l.
davide.stevanoni@novatek.it*

Sommario

La nota riguarda alcuni aspetti del comportamento meccanico di una innovativa tipologia di micropali, realizzati con resina poliuretana espandente rinforzata. Tre micropali con diverse caratteristiche sono stati testati attraverso prove di carico in sito, al fine di valutarne le differenti prestazioni. Il micropalo che ha presentato la risposta migliore a carichi di compressione è stato poi scelto per un'analisi più accurata degli aspetti legati sia al comportamento meccanico globale sia alla resistenza laterale lungo il fusto. Sulla base di prove meccaniche cui sono stati sottoposti gli elementi costitutivi del micropalo, il comportamento reale in compressione è stato interpretato attraverso un modello semplificato di interazione terreno-micropalo, recentemente proposto.

Introduzione

Tra le varie tecniche di rinforzo attualmente utilizzate per incrementare la capacità portante di fondazioni superficiali esistenti e limitarne i cedimenti, i micropali continuano ad avere un'ampia applicazione, specialmente nel caso di monumenti ed edifici storici (Han e Ye, 2006a; 2006b). La necessità di poter disporre di metodi affidabili per il loro dimensionamento ha indotto diversi autori ad occuparsi del comportamento dei micropali, realizzati con diverse tecnologie, sia dal punto di vista sperimentale che teorico (Juran et al., 1999; Misra and Chen, 2004). Accanto ai micropali tradizionali in boiaccia di cemento, recentemente è stata introdotta una nuova tecnologia che utilizza resina poliuretana espandente. Il comportamento meccanico di micropali in resina armata è stato analizzato in primo luogo attraverso una serie di prove di carico, che hanno consentito la messa a punto di un metodo per il calcolo della capacità portante (Valentino e Stevanoni, 2010; 2011). L'attività descritta in questa nota ha avuto i seguenti obiettivi: 1) effettuare un'analisi comparativa delle caratteristiche dei micropali realizzati con resine a diversa densità alla luce dei risultati delle prove di carico; 2) analizzare le principali caratteristiche meccaniche della tipologia di micropalo che evidenzia il comportamento migliore sotto carichi in compressione, con particolare attenzione all'interfaccia micropalo-terreno; 3) determinare, con prove di laboratorio, i parametri richiesti dal modello di interazione meccanica micropalo-terreno proposto da Misra e Chen (2004), utile ai fini della simulazione della curva carico-cedimenti.

Modalità esecutiva dei micropali

I micropali in resina armata nascono per rispondere a diverse problematiche tecnologiche, tra cui la possibilità di utilizzare vantaggiosamente attrezzature meno onerose rispetto a quelle necessarie per altre tipologie di pali, con ridotti ingombri delle macchine operatrici e una

grande flessibilità di impiego. Al fine di comprendere le caratteristiche peculiari di un micropalo in resina armata è necessario far riferimento alla tecnica di esecuzione. Viene preventivamente eseguito un foro, di diametro variabile tra 85 e 100 mm, mediante l'utilizzo di uno strumento che permette il solo scalzamento del terreno, senza asportazione dello stesso. Nella seconda fase, il foro viene dilatato fino a raggiungere un diametro compreso tra 100 e 120 mm, mediante costipamento radiale del terreno stesso, ottenuto tramite un dilatatore idraulico (packer). Nel foro viene quindi inserita l'armatura del palo, costituita da un tubolare in acciaio, esternamente filettato ed internamente cavo, con diametro pari a 60 mm e spessore 8 mm. Infine, in corrispondenza di tre punti distinti lungo l'armatura, si procede con una tripla iniezione di resina, che va a diffondersi sia internamente al tubolare in acciaio che nell'intercapedine tra questo e il terreno (Fig. 1). La resina espandente utilizzata per l'iniezione, che va a costituire di fatto un riempimento, è una resina bi-componente, originata dalla miscelazione in dosi opportune di poliolo e diisocianato di difenilmetano. Non appena entrano in contatto, i due composti, originariamente allo stato liquido, danno origine ad una reazione chimica che fa espandere velocemente il prodotto iniettato, fino ad aumentare di 15-20 volte il proprio volume. Grazie al dosaggio di acqua nella miscela, si possono determinare le proprietà finali della resina.

I micropali così realizzati consentono di ottenere una resistenza del sistema palo-terreno sia lungo il fusto che, in minima parte, in corrispondenza della punta. In particolare, il contributo alla resistenza conferito dal terreno lungo il fusto è reso possibile grazie alla modalità esecutiva del micropalo stesso, all'azione espandente della resina ed al buon grado di rugosità in corrispondenza dell'interfaccia micropalo-terreno. La resina può essere iniettata con modalità differenti in modo da ottenere densità diverse e, di conseguenza, diverse caratteristiche meccaniche.

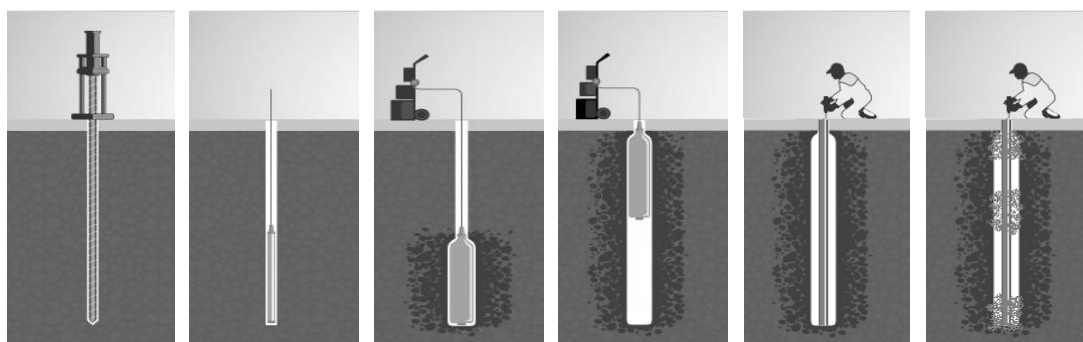


Figura 1. Fasi esecutive di un micropalo in resina armata.

Le prove di carico in sito

Per l'esecuzione delle prove di carico è stato predisposto un campo-prove nel sito di Bosco Chiesanuova (VR). Il terreno è stato caratterizzato mediante l'esecuzione di 2 prove CPT e di una prova SPT fino alla profondità di 9m dal piano campagna. I risultati ottenuti, riportati in Fig. 2, hanno rivelato la presenza di un limo argilloso con piccole lenti di sabbia. Per l'esecuzione di ogni prova di carico è stato necessario l'utilizzo di una struttura di contrasto ancorata a due pali di reazione (Fig. 3). In prossimità della testa del palo sono stati inoltre posizionati 3 comparatori di spostamento, al fine di misurare i cedimenti. Sono stati realizzati e testati 3 micropali in resina armata con caratteristiche diverse ed ognuno di essi è stato identificato con una lettera (F, S ed M). La Figura 4 mostra una sezione orizzontale dei 3 micropali testati, mentre la Tabella 1 ne riporta le principali caratteristiche. I micropali F ed S sono stati iniettati con una resina poliuretanicca ad elevata densità e minor potere espandente, mentre il micropalo M è stato realizzato con una resina a più bassa densità ma con un più

elevato potere espandente. La densità raggiunta dalla resina nel nucleo del tubolare di acciaio risulta, in tutti i casi, molto più elevata rispetto a quella della resina presente nell'intercapedine palo-terreno: ciò è dovuto principalmente al fatto che il tubolare d'acciaio impedisce qualsiasi espansione in direzione radiale alla resina che si diffonde al suo interno.

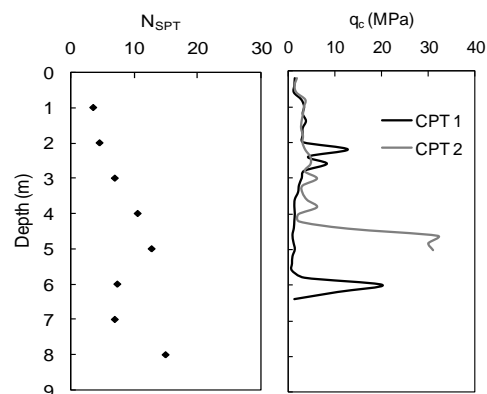


Figura 2. Risultati delle prove SPT e CPT.



Figura 3. Struttura di contrasto per le prove di carico in sito.



Figura 4. Sezione orizzontale dei tre micropali testati.

I micropali sono stati caricati in testa secondo la metodologia proposta da Mandolini (1995) ed in ottemperanza alle raccomandazioni AGI (1984). In particolare, ad ogni passo è stato applicato un incremento di carico pari a 10 kN, mentre le letture degli spostamenti sui comparatori sono state effettuate ad intervalli di tempo fissati, dopo 1, 5, 10, 15 e 20 minuti a partire dall'istante in cui ogni carico era stato incrementato. Le curve sperimentali ricavate dalle prove di carico sono riportate in Fig. 5. I risultati ottenuti sono stati elaborati al fine di individuare per ciascuna prova il valore del carico limite (P_u) (Tab. 4). A prescindere dalla lunghezza dei micropali, il comportamento sotto carichi di compressione appare legato sostanzialmente alle loro peculiarità. In particolare, il micropalo M ha un comportamento più rigido rispetto agli altri due, e ciò sembra dovuto principalmente alle caratteristiche dell'interfaccia. Una volta estratti i pali dal terreno, infatti, è stata osservata la superficie del fusto: questa è apparsa palesemente più liscia per i pali F ed S (Fig. 4), molto più scabra, invece, per il palo M (Fig. 4). Per questo motivo l'interfaccia palo-terreno del micropalo di tipologia M è stata oggetto di un'indagine più approfondita.

Tabella 1. Caratteristiche dei micropali testati.

Micropalo ID	Lungh. [m]	Diam. [mm]	Densità esterna [kg/m ³]	Densità interna [kg/m ³]	P_u [kN]
RR-F	3.65	120	400	1190	100
RR-S	2.7	120	400	698	80
RR-M	5.1	120	130	1024	140

L'interfaccia palo-terreno

Un micropalo armato in resina espandente si presenta, dunque, costituito da un nucleo rigido, rappresentato dal tubolare in acciaio, e da due parti in resina: la prima, caratterizzata da una

maggiore densità dovuta al confinamento, nella cavità interna del tubolare d'armatura; la seconda, nell'intercapedine tra tubolare e parete del foro, realizzato in precedenza nel terreno. Grazie alla sua elevata capacità espandente, durante la fase di iniezione la resina penetra nelle micro-fessure presenti nel terreno, tendendo a formare delle strutture che appaiono simili a piccole radici ("radichette") (Fig. 6a). Tali elementi, di forma stretta e allungata e di dimensioni millimetriche, permettono alla resina di aderire alle pareti del foro precedentemente realizzato. Macroscopicamente, la superficie di contatto tra micropalo e terreno si presenta, quindi, caratterizzata da una rugosità che si sviluppa in varie direzioni, sebbene la direzione prevalente rimanga quella verticale: la presenza delle stesse "radichette" ha permesso ad un sottile strato di terreno di aderire al corpo cilindrico di resina anche dopo l'estrazione del micropalo (Fig. 6a). È lecito supporre che tali microstrutture possano contribuire a fornire parte della resistenza al micropalo in esercizio. Al fine di indagare a livello microscopico il contatto tra resina e terreno, un campione prelevato in corrispondenza della zona di interfaccia è stato analizzato attraverso un microscopio a scansione elettronica (SEM) (Fig. 6b). L'osservazione dell'immagine corrispondente alla zona di interfaccia permette di distinguere chiaramente la parte del campione occupata dalla resina, che presenta una struttura alveolare disomogenea, rispetto a quella occupata dal terreno limo-argilloso, che si presenta più uniforme (Fig. 6b). Nell'immagine di Fig. 6b è possibile osservare il particolare di una "radichetta" di resina incuneata nella matrice di terreno. Una colorazione più scura in corrispondenza del bordo della parte occupata dal terreno rivela, inoltre, la presenza di un materiale "intermedio", frutto di una reazione chimica tra resina e terreno. Tale evidenza conferma l'ipotesi di una compenetrazione tra i due materiali. Si può dunque affermare che, in corrispondenza dell'interfaccia, siano presenti due principali tipi di interazione tra resina e terreno: una di natura meccanica e l'altra di natura chimica. Tali osservazioni inducono a ritenere che gran parte dell'azione resistente esplicata dai micropali sia dovuta alle particolari caratteristiche di contatto tra resina e terreno circostante.

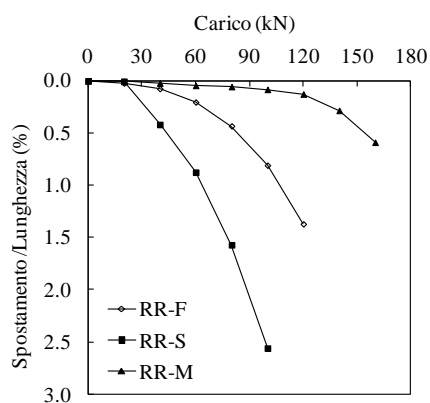


Figura 5. Risultati delle prove di carico.

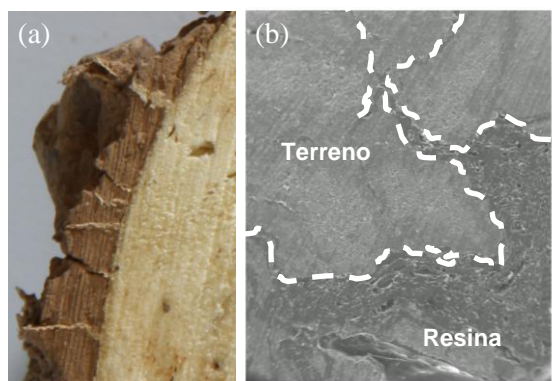


Figura 6. Interfaccia micropalo M-terreno.

Comportamento meccanico del nucleo

Il comportamento meccanico del nucleo in resina, interno al tubolare in acciaio, è stato analizzato in laboratorio attraverso l'esecuzione di prove di compressione monoassiale non confinate su provini cilindrici (altezza 100mm, diametro 45mm) prelevati dai micropali testati in sito. Le caratteristiche medie dei provini testati (3 per ogni tipologia di palo) sono riportate in Tabella 2. Le prove di carico sono state eseguite mediante l'utilizzo di una pressa MTS servo-idraulica e seguendo la norma ASTM D 695-08. Al fine di misurare anche la deformazione radiale, sulla superficie laterale di ogni provino sono stati applicati due estensimetri elettrici. I dati sperimentali acquisiti hanno consentito di descrivere il

comportamento medio di ogni tipologia di nucleo in termini di sforzo-deformazione, carico-deformazione (Fig. 7) ed energia dissipata (Tab. 2).

Tabella 2. Caratteristiche dei "nuclei" testati.

Micropalo	Carico max [kN]	Spost. cr [mm]	Sforzo max [MPa]	Def. cr [%]	Energia di frattura [MJm ⁻³]	Rigidezza [MPa]
RR-M	104	9.4	65	3.85	19.2	0.7
RR-S	35	11	22	3.96	7.5	0.5
RR-F	130	6	81	3.00	17.6	0.2

Dai risultati sperimentali risulta evidente che il nucleo del palo F ha un comportamento molto più fragile rispetto a quello dei pali S ed M. Inoltre, sebbene i nuclei dei pali M ed S mostrino un comportamento duttile simile, il nucleo S risulta più debole rispetto al nucleo M. Il provino S mostra una repentina perdita di resistenza mentre i provini F ed M mantengono una certa resistenza residua al crescere della deformazione e ciò comporta un livello di rottura maggiore per F ed una migliore risposta in termini di energia dissipata sia per F che per M. Una ulteriore grandezza utile da tenere in conto è rappresentata dall'energia di frattura, che corrisponde all'energia richiesta dal provino per fratturarsi ed è facilmente valutabile calcolando l'area sottesa dalla curva carico-deformazione (Fig. 8b). La Tabella 2 riassume i principali risultati ottenuti, che dimostrano come il comportamento meccanico del nucleo del palo M possa essere ritenuto soddisfacente per la funzione che assolve all'interno dell'elemento strutturale. I risultati ottenuti dalle prove di laboratorio hanno consentito la valutazione della rigidezza assiale dei micropali ed hanno permesso la calibrazione dei parametri richiesti per l'applicazione della soluzione analitica di Misra e Chen (2004).

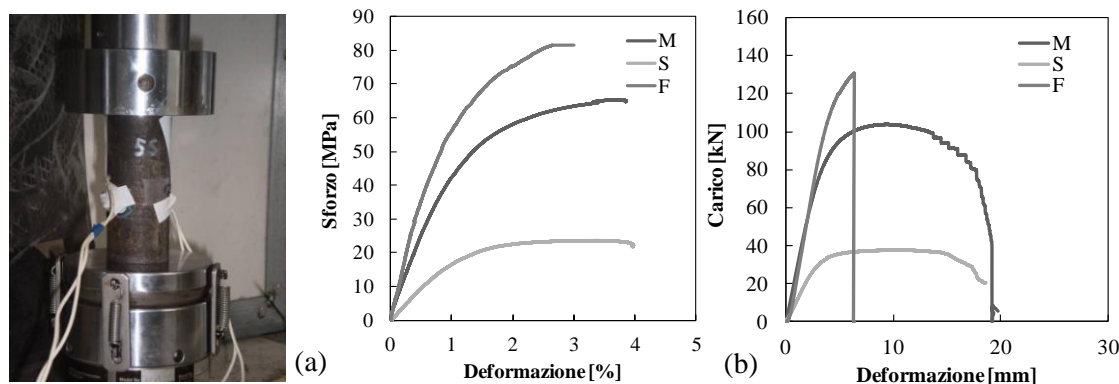


Figura 7. Test su campioni del nucleo in resina: (a) esecuzione della prova; (b) risultati sperimentali..

Modellazione analitica del comportamento dei micropali

Gli effetti meccanici di un carico agente su un micropalo sono stati descritti da Misra e Chen (2004) attraverso una modellazione analitica semplificata. Tale modello permette di simulare il meccanismo di trasferimento del carico e di stimare gli spostamenti che il micropalo subisce sotto l'azione del carico. Le ipotesi alla base del modello possono essere così sintetizzate: 1) il trasferimento del carico avviene principalmente attraverso l'interfaccia micropalo-terreno e si trascura il contributo della punta; 2) il comportamento all'interfaccia viene assimilato a quello di un materiale elasto-plastico perfetto; 3) i parametri all'interfaccia non dipendono solo dalle caratteristiche del terreno, ma anche dalle proprietà del getto, dalla pressione di iniezione e dalle tecniche di costruzione; 4) lo strato limite micropalo-terreno ha proprietà medie e costanti lungo il fusto; 5) la parte di micropalo in cui non vi è la perfetta adesione getto-terreno non offre contributo resistente. Nel caso di micropali in resina armata si ipotizza che il

volume di terreno in prossimità dell'interfaccia si plasticizza a causa dell'espansione della resina. Il terreno oltre la zona plastica rimane in campo elastico con $\Delta\sigma$ che decresce allontanandosi dal micropalo. Con l'applicazione del carico si formano, lungo il fusto, due zone: una perfettamente plastica e l'altra elastica (Fig. 8). All'aumentare del carico la zona plastica avanza a scapito della zona elastica. Lo spostamento in testa è stato valutato tramite la seguente equazione (Misra e Chen, 2004):

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \frac{q_o L_b^2}{K_m} \left(1 + \xi_o^2 \right) - \frac{L_b}{K_m} \frac{q_o L_b - P}{1 - \xi_o} + u_o + \frac{P L_d}{K_C} \quad [1]$$

dove L_b è la lunghezza del palo in cui vi è adesione (*bond length*), L_d è la lunghezza del palo in cui non vi è adesione (*debond length*), q_o è la resistenza a snervamento all'interfaccia micropalo-terreno, K_m è la rigidezza assiale del micropalo, K_c è la rigidezza assiale nella zona priva di adesione, P è il carico applicato, u_o è lo spostamento all'interfaccia in corrispondenza dello snervamento. Il parametro ξ_o , che rappresenta la quota (normalizzata) in corrispondenza della quale avviene il passaggio tra la zona plastica e quella elastica, varia al variare del carico P . I parametri assunti per la simulazione del comportamento del micropalo M sono riportati in Tabella 3 ed il confronto tra dati sperimentali e modello, che si può ritenere soddisfacente, è riportato in Figura 9.

Tabella 2. Parametri di input del modello di Misra e Chen (2004).

Micropalo	d [mm]	L_b [m]	L_d [m]	K_m [MN]	K_c [MN]	q_o [kN/m]	P_u [kN]
RR-M	120	5	0.1	300	300	28	140

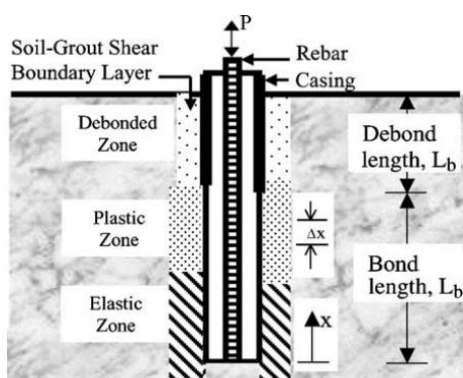


Figura 8. Schema dell'interazione micropalo-terreno (da Misra e Chen, 2004).

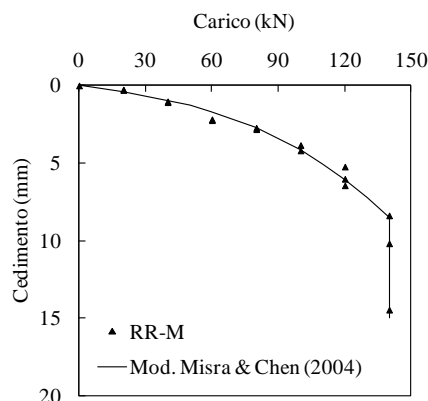


Figura 9. Confronto tra dati sperimentali e modello (micropalo M).

Bibliografia

- AGI – Associazione Geotecnica Italiana (1984). Raccomandazioni sui pali di fondazione.
- Han J., Ye S.L. (2006a). A field study on the behavior of micropiles in clay under compression or tension. *Canadian Geotechnical Journal*. 43 (1): 19-29.
- Han J., Ye S.L. (2006a). A field study on the behavior of a foundation underpinned by micropiles. *Canadian Geotechnical Journal*. 43 (1): 30-42.
- Juran I., Bruce D.A., Dimillio A., Benslimane A. (1999). Micropiles: the state of practice. Part II: design of single micropiles and groups and networks of micropiles. *Ground Improvement*. 3: 89-110.
- Mandolini A. (1995). Prove di carico su pali di fondazione. *Hevelius*.
- Misra A., Chen C.H. (2004). Analytical solution for micropile design under tension and compression. *Geotechnical and Geological Engineering*. 22: 199-225.
- Valentino R., Stevanoni D. (2010). Micropiles made of reinforced polyurethane resins: load tests and evaluation of the bearing capacity. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 15(H): 895-912.
- Valentino R., Stevanoni D. (2011). Prove di carico e valutazione della capacità portante di micropali armati in resina espandente. *Atti del XXIV Convegno AGI, Napoli, Giugno 2011*: 291-298.