

Un metodo di calcolo della capacità portante di micropali realizzati con resina espandente in terreni superficiali

Roberto Valentino e Davide Stevanoni

Introduzione

La ditta Novatek ha recentemente intrapreso un'attività finalizzata allo studio del comportamento meccanico di micropali realizzati con resina espandente in terreni superficiali per la determinazione di una metodologia di calcolo della loro capacità portante.

Nello specifico, l'attività ha come obiettivo quello di rispondere alla necessità della ditta Novatek di individuare e definire il campo di applicabilità di pali che sfruttano una tecnologia innovativa, recentemente coperta da brevetto.

Volendo soddisfare un'esigenza commerciale e progettuale della ditta, l'attività è volta principalmente ad individuare un metodo per il calcolo del carico limite corrispondente ad ogni tipologia di palo esaminata.

Novatek ha scelto di verificare il comportamento dei propri prodotti attraverso l'esecuzione di una serie di prove in sito. Le curve carico-cedimento ed il carico limite reale dei pali è stato determinato attraverso l'esecuzione di prove di carico su pali realizzati in siti diversi, caratterizzati dalla presenza di differenti tipologie di terreno (Valentino e Stevanoni, 2009).

Attraverso un'analisi dei risultati sperimentali è stato infine definito un metodo preliminare per il calcolo della capacità portante sulla base di un modello di riferimento tradizionale.

- Roberto Valentino - Professore a contratto in Geotecnica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pavia negli A.A. dal 2004-2005 al 2009-2010 e presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Parma negli A.A. dal 2006-2007 al 2009-2010.

- Davide Stevanoni - Ingegnere – Novatek s.r.l.

Le prove di carico

In una fase preliminare è stato realizzato un campo-prove in cui, una volta caratterizzato il terreno, sono stati appositamente realizzati 6 pali di prova in resina con barra in acciaio, utilizzati per l'esecuzione di prove di carico, in assenza di fondazione superficiale in testa (Stevanoni, 2009).

Successivamente si è scelto di eseguire le prove su pali realizzati come opere di sottofondazione, in presenza di fondazioni superficiali in testa, in siti oggetto di intervento da parte di Novatek. In questo modo sono stati testati i pali nelle medesime condizioni in cui essi sono effettivamente realizzati per i clienti. I pali di prova, infatti, sono stati realizzati dai medesimi operatori, con i medesimi strumenti e metodologie con cui vengono eseguite le opere di sottofondazione da parte di Novatek.

La campagna di prove di carico e di raccolta dati è tutt'ora in pieno svolgimento. I risultati ottenuti al momento su 21 pali in 6 siti diversi sembrano confermare non solo l'ottimo comportamento dei pali in resina armata, ma anche la possibilità di utilizzare i dati raccolti per elaborare un metodo di supporto al dimensionamento del brevetto Novatek (Valentino e Stevanoni, 2009).

In letteratura si possono trovare diversi metodi per il dimensionamento dei pali di fondazione e dei micropali. Tra gli altri, in questo studio si è fatto riferimento al metodo che Bustamante e Doix (1985) hanno proposto per la previsione del carico limite di micropali iniettati in pressione. Tale metodo costituisce, tra l'altro, la base delle norme vigenti in Francia ed è adottato anche in altri Paesi europei (Viggiani, 1999).

Il metodo di Bustamante e Doix (1985)

Il metodo proposto da Bustamante e Doix (1985) è stato elaborato a partire da una serie di dati sperimentali raccolti in siti distribuiti sul territorio Francese ed è relativo a micropali in calcestruzzo iniettati in pressione. Tale tipologia di palo consiste in un'armatura metallica

introdotta in una perforazione di piccolo diametro e sigillata al terreno tramite iniezioni di malta o di miscela cementizia legante, eseguite sotto pressione più o meno elevata. Le iniezioni dei micropali descritti da Bustamante e Doix avvengono per mezzo di un tubo flessibile aperto verso il basso, oppure con un tubo metallico rigido munito di una successione di valvole di non ritorno, chiamato tubo “a manchettes”.

Il metodo d’oltralpe è applicato a due diversi tipi di micropali iniettati di calcestruzzo armato: IRS e IGU.

La sigla IRS è applicata a micropali la cui metodologia di realizzazione consente l’iniezione ripetitiva e selettiva del calcestruzzo a diverse profondità. Con la sigla IGU vengono identificati i sistemi che consentono un’iniezione dei micropali in un’unica soluzione.

In seguito all’analisi dei primi risultati della campagna di prove predisposta da Novatek è stata evidenziata una sostanziale analogia di comportamento tra i micropali in resina armata ed i micropali in calcestruzzo iniettato descritti da Bustamante e Doix.

Di seguito sono riportati alcuni passi del metodo proposto da Bustamante e Doix per il dimensionamento dei micropali iniettati in pressione. Tale metodo è stato adottato, in via preliminare, anche per il dimensionamento dei pali Novatek.

Per la determinazione del carico limite, Bustamante e Doix fanno riferimento alla nota espressione:

$$Q_{lim} = P + S$$

dove con P viene indicata la resistenza totale alla punta, mentre con S quella laterale. La resistenza laterale S , a sua volta, è data da:

$$S = \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s$$

dove d_s è il diametro-equivalente del palo, L_s la lunghezza della zona iniettata, s la resistenza tangenziale unitaria all'interfaccia fra zona iniettata e terreno.

Nel caso il micropalo attraversi strati di terreno dalle caratteristiche diverse, la relazione per la determinazione di S sarà:

$$S_i = \sum_i (\pi \cdot d_{si} \cdot L_{si} \cdot s_i)$$

Si assume $d_s = \alpha \cdot d$, dove d è il diametro della perforazione e α un coefficiente maggiorativo, il cui valore può essere determinato attraverso l'uso della Tabella 1 (Viggiani, 1999). Come è possibile notare (Tabella 1), Bustamante e Doix forniscono indicazioni ulteriori riguardanti la quantità minima di miscela iniettata.

I valori della resistenza tangenziale unitaria s all'interfaccia fra tratto iniettato e terreno dipendono sia dalla natura e dalle caratteristiche del terreno sia dalla tecnologia, e sono forniti dai diagrammi contenuti nelle Figure 1, 2, 3 e 4, alle quali è associata la Tabella 2.

Terreno	Valori di α		Quantità minima di miscela consigliata
	IRS	IGU	
Ghiaia	1,8	1,3 - 1,4	1,5 Vs
Ghiaia sabbiosa	1,6 - 1,8	1,2 - 1,4	1,5 Vs
Sabbia ghiaiosa	1,5 - 1,6	1,2 - 1,3	1,5 Vs
Sabbia grossa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 Vs
Sabbia media	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 Vs
Sabbia fine	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	1,5 Vs
Sabbia limosa	1,4 - 1,5	1,1 - 1,2	IRS: (1,5 - 2)Vs; IGU: 1,5Vs
Limo	1,4 - 1,6	1,1 - 1,2	IRS: 2Vs; IGU: 1,5Vs
Argilla	1,8 - 2,0	1,2	IRS: (2,5 - 3)Vs; IGU: (1,5 - 2)Vs
Marne	1,8	1,1 - 1,2	(1,5 - 2)Vs per strati compatti
Calcarei marnosi	1,8	1,1 - 1,2	(2 - 6)Vs o più per strati fratturati
Calcarei alterati o fratturati	1,8	1,1 - 1,2	
Roccia alterata e/o fratturata	1,2	1,1	(1,1 - 1,5)Vs per strati poco fratturati 2Vs o più per strati fratturati

Tabella 1. Valori del coefficiente α (da Viggiani, 1999)

Terreno	Tipo di iniezione	
	IRS	IGU
Da ghiaia a sabbia limosa	SG 1	SG 2
Limo e argilla	AL 1	AL 2
Marna, calcare marnoso, calcare tenero fratturato	MC 1	MC 2
Roccia alterata e/o fratturata	$\geq R 1$	$\geq R 2$

Tabella 2. Indicazioni per la scelta del valore di s (da Viggiani, 1999)

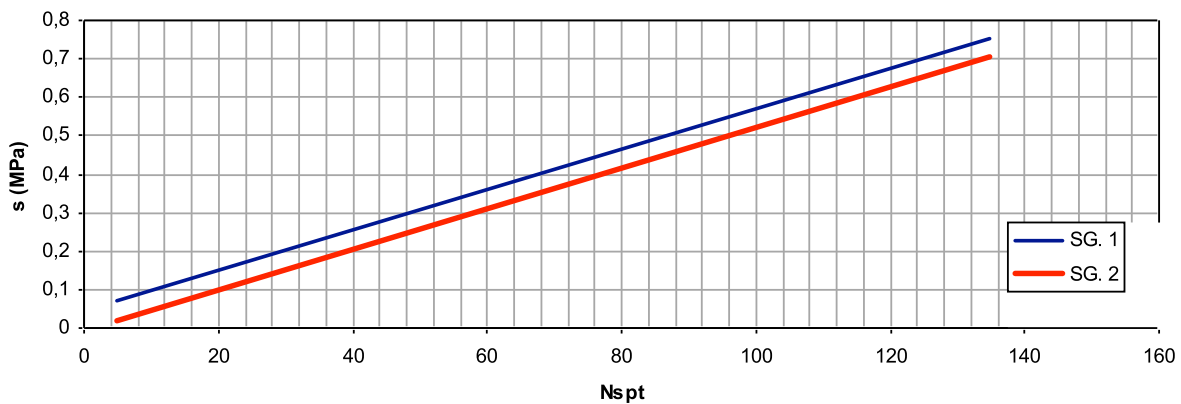


Figura 1. Abaco per la determinazione di s per Sabbie e Ghiaie
(modificato rispetto a Viggiani, 1999)

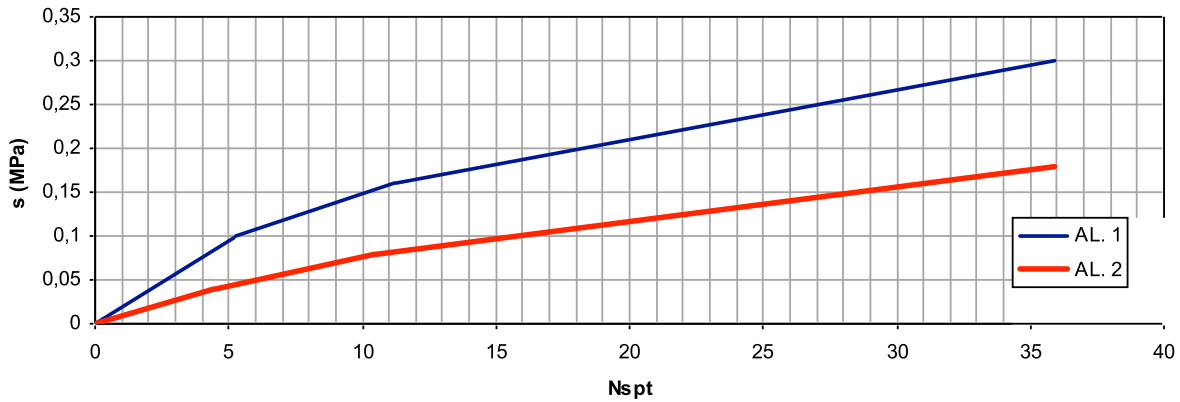


Figura 2. Abaco per la determinazione di s per Argille e Limi
(modificato rispetto a Viggiani, 1999)

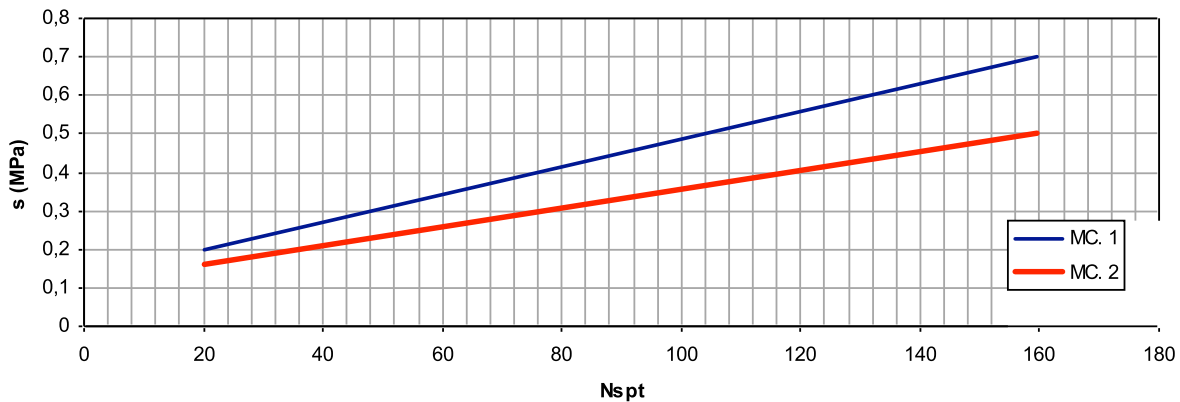


Figura 3. Abaco per la determinazione di s per Gessi, Marne e Marne Calcareae
(modificato rispetto a Viggiani, 1999)

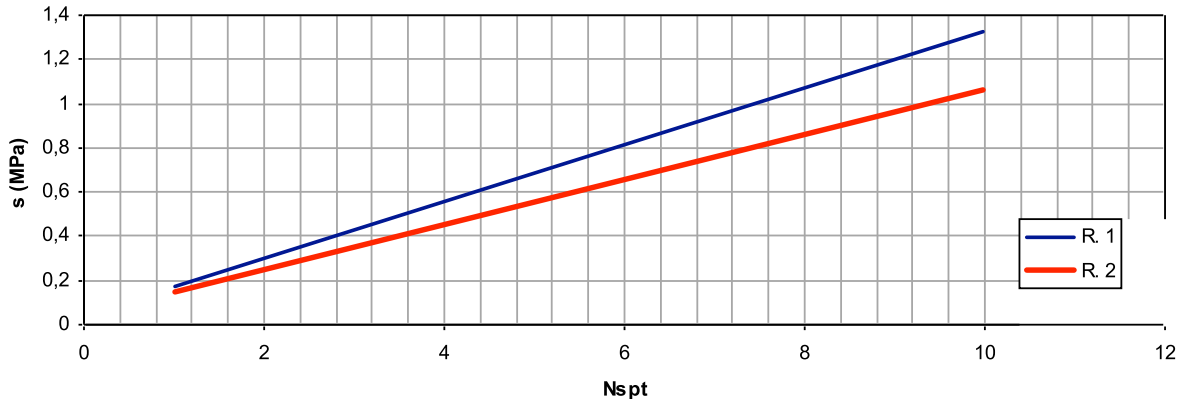


Figura 4. Abaco per la determinazione di s per Rocce alterate e fratturate
(modificato rispetto a Viggiani, 1999)

La resistenza di punta P viene assunta pari al 15% della resistenza laterale S (Viggiani, 1999), perciò si ha:

$$P = 0.15 S$$

Bustamante e Doix propongono, inoltre, per il calcolo di P un'espressione alternativa che utilizza la pressione limite del terreno determinata con il pressiometro Ménard (Viggiani, 1999).

Il metodo adottato per i pali PR Novatek®

In seguito all'analisi dei risultati di numerose prove di carico (Valentino e Stevanoni, 2009), è stato osservato che il comportamento dei micropali Novatek può essere considerato

intermedio tra il comportamento dei micropali iniettati della tipologia IRS e quello dei pali di tipologia IGU, descritti da Bustamante e Doix.

In Figura 5 si riportano i risultati sperimentali delle prove in sito in termini di resistenza laterale unitaria in funzione di N_{spt} , confrontati con le curve di riferimento proposte da Bustamante e Doix per i terreni limo-argillosi, per le due tipologie di pali.

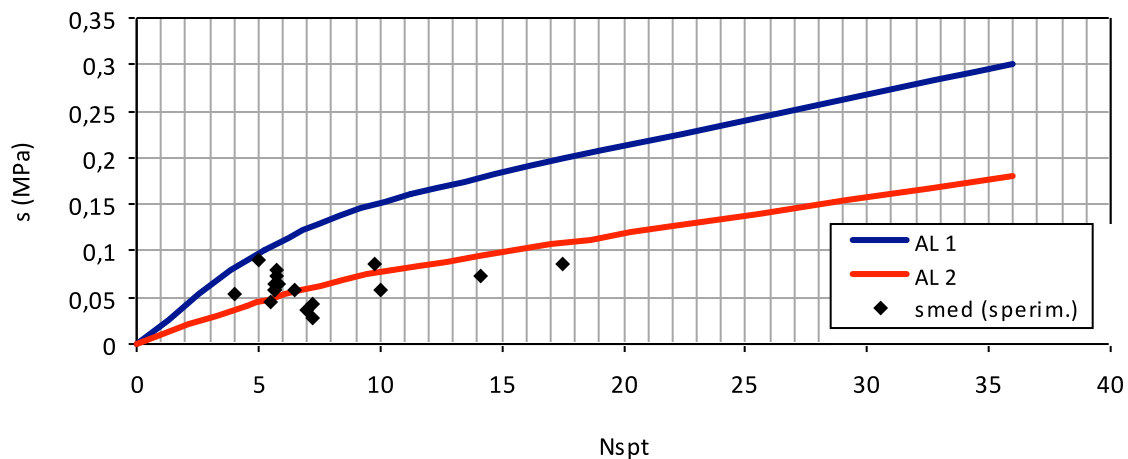


Figura 5. Confronto fra risultati sperimentali delle prove di carico (indicatori neri) e curve proposte da Bustamante e Doix per i terreni limo-argillosi.

Pertanto, in analogia con il metodo di Bustamante e Doix, per i pali Novatek si propone la seguente metodologia di calcolo della capacità portante, valida per micropali realizzati in terreni limo-argillosi:

$$Q_{lim} = P + S$$

con

$$S = \pi \cdot d_s \cdot L_s \cdot s$$

dove d_s è il diametro-equivalente del palo, L_s la lunghezza del palo iniettato, s la resistenza tangenziale unitaria all'interfaccia fra superficie laterale del palo e terreno.

Si assume $d_s = \alpha \cdot d$, dove d è il diametro del foro dilatato, che per i micropali PR è assunto pari a 0.085m, mentre $\alpha = 1.5$. Tale valore di α , che è stato scelto in base ai risultati sperimentali acquisiti, permette di ottenere valori di capacità portante che risultano cautelativi rispetto al reale comportamento in condizioni ultime del sistema palo-terreno.

La resistenza di punta P viene assunta pari al 15% della resistenza laterale S (Viggiani, 1999), perciò si ha:

$$P = 0.15 S$$

La capacità portante totale di un palo singolo può dunque essere determinata tramite la seguente espressione:

$$Q_{lim} = 1.15 \cdot s \cdot L_s \cdot \pi \cdot \alpha \cdot d$$

Per la determinazione di s si fa riferimento alla curva proposta da Bustamante e Doix (1985) relativa ai terreni limo-argillosi e alla tipologia IGU (Figura 2). In particolare, il metodo messo a punto, tramite il relativo foglio di calcolo Excel, permette una correlazione diretta tra i risultati di una prova CPT, in termini di resistenza alla punta, ed i risultati di una prova SPT, in modo da tener conto in maniera esplicita della curva di riferimento riportata in Figura 2.

Giova sottolineare il fatto che, dovendo realizzare i micropali in terreni superficiali, soggetti notoriamente ad una elevata variabilità spaziale, sia opportuno far riferimento ad indagini effettuate in prossimità della localizzazione dei pali stessi per una più adeguata valutazione della loro capacità portante.



Conclusioni

Il metodo di calcolo proposto da Bustamante e Doix (1985), che deriva da un insieme di dati ottenuti tramite prove in scala reale su tiranti e micropali in calcestruzzo iniettati, si è dimostrato essere il naturale riferimento per la determinazione della capacità portante di pali in resina iniettata Novatek®.

Numerose prove di carico effettuate su micropali Novatek hanno dimostrato come anche per tale tipologia di micropali possa essere adeguatamente adottata un'analogia metodologia per il calcolo della capacità portante. Il metodo proposto, messo a punto sulla base di prove di carico su micropali iniettati in terreni limo-argillosi, è stato implementato in un foglio di calcolo Excel per un rapido utilizzo ed una immediata applicazione.

Relativamente ai micropali armati in resina espandente, il metodo proposto permette di ottenere valori di capacità portante che risultano cautelativi rispetto ad un comportamento in condizioni ultime del sistema palo-terreno.

In prospettiva, la ditta Novatek è già impegnata ad ottenere ulteriori risultati da prove sperimentali in differenti siti-campione. Inoltre, è attualmente in fase di sviluppo un metodo *ad hoc* per la valutazione della capacità portante dei pali iniettati Novatek per le tipologie di terreno non ancora analizzate.

Bibliografia

Bustamante M., Doix B. (1985), *Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés*, Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, Paris, n. 140, nov-déc. 1985 – Ref. 3047, pp. 75-92.

Stevanoni D. (2009), *Analisi del comportamento meccanico di micropali in resina espandente in terreni superficiali*, Tesi di Laurea Specialistica, Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia.

Valentino R., Stevanoni D. (2009), *Determinazione di una metodologia di calcolo della capacità portante di micropali realizzati con resina espandente in terreni superficiali*, Relazione finale del progetto di ricerca affidato da Novatek s.r.l. a Parma Tecnnova s.r.l. (contratto n. 10/2009).

Viggiani C. (1999), *Fondazioni*, Hevelius Edizioni.