

**ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA**

**Estratto da:**

**XXIII CONVEGNO NAZIONALE  
DI GEOTECNICA**

Padova – Abano Terme, 16 - 18 maggio 2007



**PREVISIONE E CONTROLLO  
DEL COMPORTAMENTO DELLE OPERE**

# COMPORTAMENTO DEI PALI SOLES<sup>®</sup> NELLA PIANURA PADANA E NELLA LAGUNA VENETA: CORRISPONDENZA DEI PARAMETRI DI INFISSIONE CON LE PROVE CPT, CORRELAZIONE CON LE PROVE DI CARICO, CONFERMA DELLE PREMESSE PROGETTUALI.

Dott. Ing. Collina V.<sup>°</sup>, Dott. Geol. Storoni Ridolfi S.<sup>°°</sup>, Dott. Ing. Zago R.\*, Dott. Ing. Zambianchi L.\*

<sup>°</sup> Gipieffe Architettura Studio Associato, Forlì

<sup>°°</sup> Compartimento ANAS, Trieste

\* Impresa SO.L.E.S., Società Lavori Edili e Serbatoi S.p.A., Forlì

## SOMMARIO

La nota riporta vari interventi nei quali sono stati utilizzati i pali SOLES<sup>®</sup>, pali a dislocazione di terreno, infissi a pressione con sistema statico e con elevata capacità portante. Tali interventi sono caratterizzati da tipologie strutturali diverse e distribuiti in aree differenti della Pianura Padana e della Laguna Veneta, da Modena a Venezia.

Vengono riportati le caratteristiche ed il processo costruttivo del palo SOLES<sup>®</sup>, ed illustrato il metodo di calcolo per la progettazione dei pali SOLES<sup>®</sup> basato sulle risultanze delle prove penetrometriche statiche.

Segue il confronto dei valori di resistenza alla base ricavati dalla misura della forza applicata durante l'infissione del palo, con quelli delle corrispondenti prove CPT. Peculiarità dei pali SOLES<sup>®</sup>, è quella di consentire, grazie a questo confronto, di variarne la lunghezza sulla base delle resistenze misurate all'infissione così da garantire, con assoluta sicurezza, le portate richieste.

Vengono infine riportati i risultati di alcune prove di carico effettuate, le quali consentono la verifica sperimentale dei parametri di progetto, e permettono di valutare correttamente le portate caratteristiche dei pali SOLES<sup>®</sup>.

Parole chiave: pali, Soles, fondazioni, Po, Venezia

## 1 IL PALO SOLES<sup>®</sup>

### 1.1 Caratteristiche del palo e materiali

Il palo SOLES<sup>®</sup> è un palo brevettato infisso a pressione e gettato in opera e rientra nella categoria dei pali infissi staticamente con dislocazione di terreno.

L'anima tubolare in acciaio, dotata di una flangia (singola o doppia) alla base, è infissa senza estrazione di terreno, mediante martinetti idraulici.

Contestualmente all'infissione, il vano anulare che si crea, è saturato con microcalcestruzzo.

Il contrasto necessario all'infissione è dato dalla struttura di collegamento dei pali e dall'eventuale sovrastruttura. I materiali impiegati sono:

- acciaio per scatola guida S275J;
- acciaio per anima tubolare S275J;
- microcalcestruzzo iniettato a pressione di 0,5-2,5 bar tra la parete del foro nel terreno e lo stelo in acciaio;
- conglomerato cementizio di riempimento dell'anima tubolare in acciaio con Rck non inferiore a 30 MPa.

I pali SOLES<sup>®</sup> hanno raggiunto lunghezze di circa 70,00 m.

Normalmente hanno diametro variabile tra 200 e 700 mm e sono armati con profili tubolari variabili tra 114,3/8 mm e 298,5/12,5 mm.

## 2 PROGETTAZIONE DEL PALO SOLES<sup>®</sup>

### 2.1 Premessa

Il comportamento del palo SOLES<sup>®</sup> durante la fase di infissione ricalca quello della punta di un penetrometro statico, a meno ovviamente di un effetto di scala dovuto al differente diametro della punta. L'esperienza ci conferma quanto riportato in letteratura, ovvero che le resistenze alla base registrate durante la fase di infissione del palo SOLES<sup>®</sup> mediano i picchi registrati dalle prove penetrometriche statiche su spessori di terreno pari a circa 10-12 volte il diametro del palo.

### 2.2 Portata limite di progetto del palo SOLES<sup>®</sup> ( $Q_{lim\ prog}$ )

La portata limite di progetto del palo SOLES<sup>®</sup> è calcolata come:

$$Q_{lim\ prog} = Q_s^* + Q_p - W \quad (1)$$

Con :

$$Q_s^* = \beta \times Q_s \quad (2)$$

$$Q_s = \sum f_{si} \times L_i \times \phi \times \pi \quad (3)$$

$$Q_p = q_c \times A_b \quad (4)$$

Dove:

$Q_{lim\ prog}$  = Portata limite di progetto del palo SOLES<sup>®</sup>

$Q_s^*$  = Portata limite laterale di progetto del palo SOLES<sup>®</sup>

$\beta$  = Coefficiente amplificativo della portata laterale (assunto pari a 1,30 in base ai risultati dalle prove di carico):

$Q_s$  = Portata laterale calcolata partendo dai valori delle resistenze specifiche laterali misurate durante l'esecuzione di prove penetrometriche CPT.

$f_{si}$  = Resistenza specifica laterale media fornita dal penetrometro all'interno dell'*i*-esimo strato di terreno omogeneo.

$L_i$  = lunghezza del tratto di palo all'interno dell'*i*-esimo strato di terreno omogeneo attraversato.

$\phi$  = diametro nominale (DN) del palo SOLES®

$Q_p$  = Portata limite di base di progetto del palo SOLES®

$q_c$  = Resistenza specifica alla base valutata come media dei valori di resistenza alla punta del penetrometro nel campo di profondità compreso tra  $(z - 8\phi) \div (z + 4\phi)$  essendo *z* la profondità della flangia di base del palo SOLES®

$A_b$  = area di base del palo

$W$  = Peso del palo SOLES®

### 3 GEOLOGIA DELLA PIANURA PADANA E DELLA LAGUNA DI VENEZIA

#### 3.1 Inquadramento geologico dell'area

La Pianura Padana, limitata a sud-ovest dai rilievi appenninici, si estende ad est fino alla Laguna Veneta, ed è il risultato degli accumuli dei sedimenti depositati dai numerosi fiumi che scendendo dall'arco alpino, sfociano nell'Alto Adriatico. A questi si sovrappongono, in epoche recenti, i depositi lagunari legati ai fenomeni eustatici ed alla subsidenza del margine adriatico.

Pur essendo caratterizzati da numerose eteropie verticali e laterali, legate al continuo cambiamento degli ambienti deposizionali, le aree su cui sono state realizzate le opere descritte nella presente memoria, presentano una successione stratigrafica caratterizzata da sedimenti sostanzialmente fini limoso-argillosi, cui si intercalano a volte livelli più sabbiosi e, soprattutto nel settore di Nord-Est, sono sormontati da sedimenti argilloso-torbosi di bassissima consistenza, depositati appunto all'interno delle lagune che da Grado a Ravenna bordano le coste adriatiche.

### 4 INTERVENTI REALIZZATI

#### 4.1 Padova – Nuovo Comando Carabinieri Regione Veneto – I lotto funzionale

- Tipo di intervento

Il progetto prevede la realizzazione di due edifici a torre, ciascuno dei quali ha otto piani fuori terra ed un piano seminterrato. Le strutture di fondazione di tali edifici sono costituite da una platea in c.a. dello spessore di 0,80 m, da n. 59 pali SOLES® DN 350 e da n. 21 pali

SOLES® DN 250. I pali SOLES® sono stati eseguiti da quota -1,00 m da p.c. ed hanno una lunghezza totale media circa di 16,00 m; i carichi di esercizio progettuali, per le due tipologie sono rispettivamente 700 kN e 400 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

Le n. 3 prove penetrometriche statiche eseguite hanno fornito valori abbastanza omogenei. I valori assunti nel dimensionamento dei pali SOLES® sono quelli risultanti dalla CPT 2, ovvero dalla prova posizionata al centro dell'area occupata dai nuovi fabbricati.

Tabella 1. Parametri geotecnici per il progetto dei pali SOLES®

CPT 2	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
da 1,00 a 3,00	0,000
da 3,00 a 6,00	0,125
da 6,00 a 10,00	0,175
da 10,00 a 15,20	0,125
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
15,20	8,0

- Portata di progetto (<sup>1</sup>) del palo SOLES®

Durante l'esecuzione degli scavi, è stato rinvenuta la presenza di terreno inquinato fino alla profondità di 3,00 m da p.c.. Pertanto si è resa necessaria la rimozione del terreno inquinato ed il successivo riempimento con materiale idoneo. Per tale motivo sono stati trascurati i contributi alla portata laterale del palo sino alla profondità di 3,00 m da p.c.

In base ai dati della CPT 2 ed alle considerazioni di cui sopra, la lunghezza totale di progetto ( $L_{tot\ prog}$ ) di ciascun tipo di palo è stata fissata in 14,90 m. La portata limite di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ) del palo SOLES® DN 350 è risultata:

Palo SOLES® (DN 350 –  $L_{tot\ prog} = 14,90$  m)

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,0 \times 1890 = 1890 \text{ kN}$$

$$Q_p = 770 \text{ kN}$$

$$W = 34 \text{ kN}$$

$$Q_{lim\ prog} = 2626 \text{ kN}$$

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

Le resistenze alla base ( $q_c$ ) ricavate dalla misura della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES® n. 29 DN 350 (sottoposto a prova di carico) corrispondono sostanzialmente ai valori di  $q_c$  misurati dalla CPT 2 normalizzati DN 350.

(<sup>1</sup>) Nella fase di progetto di questo intervento (secondo semestre del 2002), il numero di prove di carico realizzate non era ancora tale da convalidare l'utilizzo di un coefficiente amplificativo sui valori della resistenza laterale misurata dal penetrometro statico.

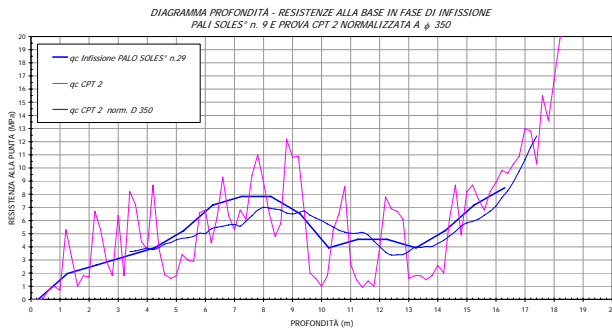


Figura 1. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la CPT 2, la resistenza alla punta normalizzata <sup>(2)</sup> a DN 350 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES<sup>®</sup>

Sulla base dei dati rilevati alla fine dell'infissione (lunghezza finale dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla punta misurata al termine dell'infissione  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) per il palo SOLES<sup>®</sup> n. 29 è risultata:

palo SOLES<sup>®</sup> n. 29 (DN 350 –  $L_{tot\ eff} = 15,80$  m):

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,0 \times 2013 = 2013 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \frac{817 \text{ kN}}{Q_{lim\ eff} = 2830 \text{ kN}}$$

- Risultati della prova di carico

La prova di carico è stata spinta fino a 1055 kN.

Il valore della portata limite totale ( $Q_{lim\ pc}$ ), determinata con il metodo dell'interpolazione iperbolica, è pari a 3752 kN.

La portata limite laterale del palo ( $Q_{s\ pc}$ ) che è determinata come differenza tra la portata limite totale risultante dalla prova di carico ( $Q_{lim\ pc}$ ) e la portata limite alla base misurata al termine dell'infissione ( $Q_{p\ eff}$ ) vale:

Palo SOLES<sup>®</sup> n. 39 (DN 350):

$$Q_{lim\ pc} = 3752 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \frac{817 \text{ kN}}{Q_{s\ pc} = 2935 \text{ kN}}$$

Il rapporto ( $\beta_{eff}$ ) tra il valore di portata limite laterale ricavato dalla prova di carico ( $Q_{s\ pc}$ ) e quello calcolato sulla base delle prove CPT ( $Q_s$ ) vale quindi:

$$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 2935 / 2013 = 1,46$$

#### 4.2 Musile di Piave (VE) – Adeguamento dell'incrocio tra le SS 14, SP 44, SP 50.

- Tipo di intervento

Nell'ambito dei lavori di adeguamento dell'incrocio tra le SS14, SP44 e SP50 in località Salmasi di Musile di Piave (VE) è stato realizzato il nuovo cavalcavia della SS 14 "Triestina". I plinti delle spalle e della pila centrale del nuovo cavalcavia sono stati fondati complessivamente su n. 90 pali SOLES<sup>®</sup> DN 350. I pali, che hanno una

<sup>(2)</sup> Con resistenza alla punta misurata dalla CPT normalizzata alla profondità  $z$  e al diametro  $\phi$  del palo, definiamo la media dei valori registrati del penetrometro statico tra le profondità  $(z - 8 \phi)$  e  $(z + 4 \phi)$ .

lunghezza totale media di circa 11,15 m, sono stati eseguiti da quota -1,80 m da p.c. Il carico di esercizio di progetto ( $N_{max}$ ) per il singolo palo è pari a 640 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

Per il dimensionamento dei pali SOLES<sup>®</sup> si è fatto riferimento ai risultati della CPT 2.

Tabella 2. Parametri geotecnici per il progetto dei pali SOLES<sup>®</sup>

CPT 2	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
da 2,80 a 4,50	0,059
da 4,50 a 6,10	0,115
da 6,10 a 7,90	0,056
da 7,90 a 10,10	0,132
da 10,10 a 12,80	0,073
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
12,80	7,0

- Portata di progetto <sup>(3)</sup> del palo SOLES<sup>®</sup>

In base ai dati sopra, la lunghezza totale di progetto ( $L_{tot\ prog}$ ) dei pali SOLES<sup>®</sup> è risultata pari a 11,00 m. Pertanto la portata limite di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ) risulta:

Palo SOLES<sup>®</sup> (DN 350 –  $L_{tot\ prog} = 11,00$  m)

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,0 \times 959 = 959 \text{ kN}$$

$$Q_p = 673 \text{ kN}$$

$$W = \frac{27 \text{ kN}}{Q_{lim\ prog} = 1605 \text{ kN}}$$

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

I valori di resistenza alla base ricavati dalla misura della forza applicata durante l'infissione dei pali SOLES<sup>®</sup> corrispondono ai valori di  $q_c$  misurati dalla CPT 2 normalizzati DN 350.

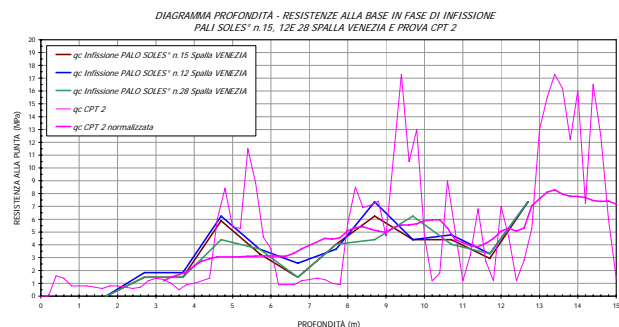


Figura 2. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la CPT 2, la resistenza alla punta normalizzata DN 350 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES<sup>®</sup>

<sup>(3)</sup> Anche nella fase di progetto di questo intervento (2002) ancora non si impiegava un coefficiente amplificativo sui valori della resistenza laterale misurata dal penetrometro statico.

Sulla base dei dati rilevati alla fine dell'infissione (lunghezza totale effettiva dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla base misurata al termine dell'infissione  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) è stata valutata mediamente pari a:

Pali SOLES® n.ro 15-12-28 della Spalla Lato Venezia (DN 350 –  $L_{tot\ eff} = 11,00$  m):

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,0 \times 959 = 959 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{707 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ eff} = 1666 \text{ kN}$$

- Risultati della prova di carico

La prova di carico è stata realizzata sul palo SOLES® n. 15 della Spalla Lato Venezia ed è stata spinta fino a 960 kN. Il valore della portata limite totale  $Q_{lim\ pc}$ , determinato con il metodo dell'interpolazione iperbolica, è risultato pari a 2071 kN.

La portata limite laterale del palo ( $Q_{s\ pc}$ ) che è determinata come differenza tra la portata limite totale risultante dalla prova di carico ( $Q_{lim\ pc}$ ) e la portata limite alla base misurata al termine dell'infissione ( $Q_{p\ eff}$ ) vale:

Palo SOLES® n.15 (DN 350 –  $L_{tot\ eff} = 11,00$  m):

$$Q_{lim\ pc} = 2071 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{707 \text{ kN}}$$

$$Q_{s\ pc} = 1364 \text{ kN}$$

Pertanto il rapporto ( $\beta_{eff}$ ) tra il valore di portata laterale limite determinato dalla prova di carico ( $Q_{s\ pc}$ ) e quello calcolato sulla base delle prove CPT ( $Q_s$ ) vale:

$$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 1364 / 959 = 1,42$$

#### 4.3 Modena – Autostrada A1: realizzazione 4° corsia – km 170+400 – Nuovo Cavalcavia SS 623 “Vignolese”

- Tipo di intervento

Nelle opere costruite nell'ambito dei lavori di ampliamento a quattro corsie dell'Autostrada A1 (tra l'allacciamento A 22 e l'uscita Bologna Borgo Panigale) è compreso anche il nuovo cavalcavia della SS 623 “Vignolese” sull'autostrada A1 in corrispondenza dello svincolo di Modena Sud.

Il problema principale di quest'opera è stata la realizzazione delle fondazioni profonde della pila, posta al centro della carreggiata, mantenendo inalterate il numero di corsie di marcia per tutta la durata dei lavori in quanto vi era l'interferenza del cantiere con la corsia di accelerazione dello svincolo. Tale problema è stato superato senza difficoltà utilizzando i pali SOLES®.

In particolare sono stati eseguiti n. 26 pali SOLES® DN 550 da quota + 1,30 m rispetto alla quota del p.c. delle prove penetrometriche ciascuno con una lunghezza totale media di 35,50 m; il carico di esercizio di progetto è di 1300 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

Le n. 2 CPT sono state eseguite in adiacenza alle scarpate della sede autostradale in corrispondenza dell'opera da realizzare.

La CPT 20 è stata effettuata sul lato in direzione Bologna, la CPT 21 sul lato in direzione Milano.

Di seguito vengono riportati i valori di resistenza alla punta e laterale impiegati nel dimensionamento dei pali.

Tabella 3. Parametri geotecnici per il progetto dei pali SOLES®

CPT 20		CPT 21	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)	Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
Da 0,0 a 1,0		Da 0,0 a 1,0	
Da 1,0 a 1,5	0,150	Da 1,0 a 2,0	0,1200
Da 1,5 a 3,0	0,030	Da 2,0 a 4,5	0,0250
Da 3,0 a 6,0	0,012	Da 4,5 a 7,5	0,0500
Da 6,0 a 9,0	0,025	Da 7,5 a 11,5	0,0300
Da 9,0 a 10,0	0,050	Da 11,5 a 13,5	0,0600
Da 10,0 a 12,0	0,037	Da 13,5 a 14,5	0,1250
Da 12,0 a 13,0	0,075	Da 14,5 a 15,5	0,0250
Da 13,0 a 14,5	0,037	Da 15,5 a 17,5	0,1250
Da 14,5 a 15,5	0,075	( <sup>4</sup> ) Da 17,5 a 35,0	0,0300
Da 15,5 a 17,5	0,175		
Da 17,5 a 19,5	0,050		
( <sup>4</sup> ) Da 19,5 a 35,0	0,030		
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)	Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
( <sup>4</sup> ) 35,00	1,5	( <sup>4</sup> ) 35,00	1,5

- Portata di progetto del palo SOLES®

In base ai dati di cui sopra la lunghezza totale di progetto ( $L_{tot\ prog}$ ) dei pali è risultata di 35,90 m e quindi, la portata di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ):

Palo SOLES® (DN 550 –  $L_{tot\ prog} = 35,90$  m)

$$\text{CPT 20: } Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 2428 = 3157 \text{ kN}$$

$$Q_p = 295 \text{ kN}$$

$$W = \underline{203 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ prog} = 3248 \text{ kN}$$

$$\text{CPT 21: } Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 2460 = 3199 \text{ kN}$$

$$Q_p = 295 \text{ kN}$$

$$W = \underline{203 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ prog} = 3291 \text{ kN}$$

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

Le resistenze alla base ( $q_c$ ) ricavate dalla misura della forza applicata durante l'infissione dei pali SOLES® n. 4, 14 e 19, sono state confrontate con quelle fornite dalle prove eseguite normalizzate DN 550. La tecnologia di infissione ha consentito di rilevare, alla profondità di circa 35,50 m da p.c., l'esistenza di un banco di terreno, con una resistenza specifica alla base del palo di circa 8 MPa sul quale è terminata l'infissione del palo. Ciò ha permesso, rispetto alle ipotesi di progetto di aumentare notevolmente il fattore di sicurezza del palo inteso come

(<sup>4</sup>) La CPT 20 e la CPT 21 sono state interrotte a circa 19,0 m di profondità da p.c., pertanto, i valori assunti di resistenza laterale ( $f_s$ ) e quelli di resistenza di punta ( $q_c$ ) oltre la quota indagata derivano da una scelta progettuale.

rapporto tra portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) ed il carico di esercizio di progetto ( $N_{max}$ ).

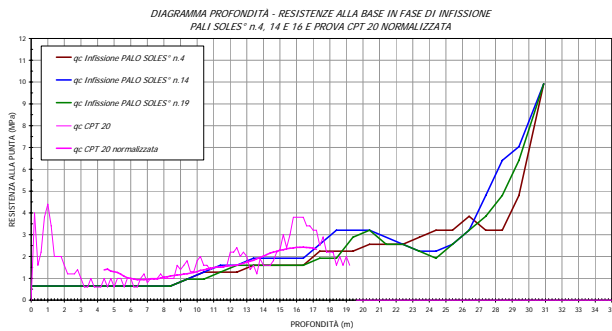


Figura 3. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la CPT 20 (interrotta a circa 19,0 m di profondità da p.c.), la resistenza alla punta normalizzata DN 550 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES®.

In base ai dati rilevati alla fine dell'infissione (lunghezza totale effettiva dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla base misurata al termine dell'infissione  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) per il palo SOLES® n. 4 sul quale è stata realizzata la prova di carico è risultata:

Palo SOLES® n.ro 4 (DN 550 –  $L_{tot\ eff} = 35,80$  m):  
 CPT 20:  $Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 2427 = 3156$  kN  
 $Q_{p\ eff} = 1948$  kN  
 $Q_{lim\ eff} = 5104$  kN

- Risultati della prova di carico

La prova di carico, che come detto, è stata realizzata sul palo n. 4, è stata spinta fino a 1947 kN. Il valore della portata limite totale ( $Q_{lim\ pc}$ ), determinato con il metodo dell'interpolazione iperbolica, è pari a  $Q_{lim\ pc} = 5357$  kN.

La portata limite laterale del palo ( $Q_{s\ pc}$ ) che è calcolata come differenza tra la portata limite risultante dalla prova di carico ( $Q_{lim\ pc}$ ) e la portata limite alla base misurata al termine dell'infissione ( $Q_{p\ eff}$ ) vale:

Palo SOLES® (DN 550 –  $L_{tot\ eff} = 35,80$  m)  
 $Q_{lim\ pc} = 5357$  kN  
 $Q_{p\ eff} = 1948$  kN  
 $Q_{s\ pc} = 3409$  kN

Pertanto il rapporto ( $\beta_{eff}$ ) tra la portata limite laterale determinata dalla prova di carico ( $Q_{s\ pc}$ ) e quella calcolata sulla base delle prove CPT ( $Q_s$ ) vale:

$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 3409 / 2427 = 1,40$

4.4 Padova – Nuovo Comando Carabinieri Regione Veneto - III Lotto funzionale.

- Tipo di intervento

Anche questo lotto, eseguito nell'anno 2006, ha previsto la realizzazione di due nuovi edifici a torre, con otto piani fuori terra ed uno interrato, divisi tra loro da un piazzale. Le fondazioni profonde di ogni edificio sono

state realizzate mediante l'infissione di n. 102 pali SOLES® DN 350 per un totale di 204. I pali SOLES®, realizzati da quota -3,00 m dal p.c., hanno una lunghezza totale media pari a circa 16,0 m e carico di esercizio di 1070 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

Per il dimensionamento dei pali SOLES® è stata impiegata la CPT 04 che dà i valori leggermente più bassi ed è posta nelle vicinanze della platea B.

Tabella 4. Parametri geotecnici per il progetto dei Pali SOLES®

CPT 04	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
da 3,00 a 4,00	0,0550
da 4,00 a 8,00	0,0775
da 8,00 a 10,00	0,1720
da 10,00 a 12,00	0,0765
da 12,00 a 14,50	0,1190
da 14,50 a 15,50	0,0410
da 15,50 a 17,50	0,1875
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
17,50	12

- Portata di progetto del palo SOLES®

In base ai dati della CPT4 la lunghezza totale di progetto ( $L_{tot\ prog}$ ) è stata fissata pari a 15,30 m. Pertanto la portata limite di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ) è risultata:

CPT 04:  $Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 1755 = 2281$  kN  
 $Q_P = 1155$  kN  
 $W = 44$  kN  
 $Q_{lim} = 3392$  kN

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

Le resistenze alla base ( $q_c$ ) ricavate dai valori della forza applicata in fase di infissione dei pali SOLES® DN 350 n. 39 della platea A e n. 29 della platea B mostrano per il palo 39 A delle resistenze unitarie minori.

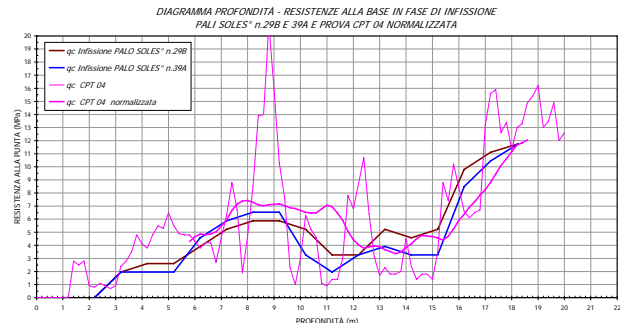


Figura 4. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la CPT 04, la resistenza alla punta normalizzata DN 350 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES®.

Sulla base dei risultati dell'infissione (lunghezza totale effettiva dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla base misurata al termine dell'infissione  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) è stata valutata per i pali SOLES® n. 39A e n. 29B pari a:

Palo SOLES® n. 39A (DN 350 –  $L_{tot\ eff} = 16,10$  m):

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 1830 = 2380 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{1153 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ eff} = 3533 \text{ kN}$$

Palo SOLES® n. 29B (DN 350 –  $L_{tot\ eff} = 16,00$  m):

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 1811 = 2354 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{1153 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ eff} = 3507 \text{ kN}$$

- Risultati della prova di carico

Le prove di carico sono state spinte entrambe fino a 1606 kN. I valori delle portate limiti totali ( $Q_{lim\ pc}$ ), determinati con il metodo dell'interpolazione iperbolica, sono pari a: 3790 kN per il palo SOLES® n. 39A ed a 4094 kN per il palo SOLES® n. 29B.

Le portate limiti laterali ( $Q_{s\ pc}$ ) di ciascuno dei due pali sottoposti a prova, sono calcolate come differenza tra la portata limite risultante dalla prova di carico ( $Q_{lim\ pc}$ ) e la portata limite alla base misurata al termine dell'infissione ( $Q_{p\ eff}$ ) e valgono:

Palo SOLES® n. 39A:

$$Q_{lim,pc} = 3790 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{1153 \text{ kN}}$$

$$Q_{s\ pc} = 2637 \text{ kN}$$

Palo SOLES® n. 29B:

$$Q_{lim,pc} = 4094 \text{ kN}$$

$$Q_{p\ eff} = \underline{1153 \text{ kN}}$$

$$Q_{s\ pc} = 2941 \text{ kN}$$

Pertanto il rapporto ( $\beta_{eff}$ ) tra i valori di portata limite laterale determinati con la prova di carico ( $Q_{s\ pc}$ ) e quelli calcolati sulla base delle prove CPT ( $Q_s$ ), valgono:

$$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 2637 / 1830 = 1,44$$

$$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 2941 / 1811 = 1,62$$

La lieve differenza rilevata nei valori di  $\beta_{eff}$  è da attribuirsi alle diverse caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, come si è riscontrato dai valori delle resistenze di base ricavate in fase di infissione dei pali.

4.5 Venezia – Nuova Cittadella Giudiziaria

- Tipo di intervento

La ristrutturazione degli edifici dell'Ex Manifattura Tabacchi, destinati a diventare la sede della Nuova Cittadella della Giustizia di Venezia, prevede la realizzazione di un garage interrato in un'area libera posta in adiacenza agli edifici esistenti. Per evitare danni ai suddetti fabbricati durante la realizzazione dei diaframmi e, soprattutto, durante i successivi lavori di scavo, il progetto prevede l'esecuzione di fondazioni profonde. All'interno dei fabbricati sono così stati realizzati n. 47 pali SOLES® DN 400 con lunghezza totale di 24,00 m lungo i muri adiacenti il futuro scavo e n. 36 pali SOLES®

DN 400, con lunghezza totale di 22,50 m nelle zone centrali degli stessi fabbricati. I pali più sollecitati sono quelli della zona centrale  $L = 22,50$  m per i quali il carico massimo di esercizio ( $N_{max}$ ) è di 545 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

I parametri di progetto sulla base della quale sono stati dimensionati la maggior parte dei pali oggetto dell'intervento sono ricavati dalla CPT P 13.

Tabella 5. Parametri geotecnici per il progetto dei pali SOLES®

P 13	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
da 0,00 a 3,30	0,000
da 3,30 a 5,70	0,010
da 5,70 a 7,70	0,185
da 7,70 a 12,70	0,040
da 12,70 a 15,20	0,070
da 15,20 a 20,70	0,085
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
20,70	1,5

- Portata di progetto del palo SOLES®

Facendo riferimento a tali valori, i pali SOLES® di lunghezza totale 22,50 m hanno la seguente portata limite di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ):

Pali SOLES® (DN 400 –  $L_{tot\ prog} = 22,50$  m)

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 170,63 = 2218 \text{ kN}$$

$$Q_p = 144 \text{ kN}$$

$$W = \underline{71 \text{ kN}}$$

$$Q_{lim\ prog} = 2291 \text{ kN}$$

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

Di seguito si riporta il confronto tra le resistenze di base ( $q_c$ ) ricavate attraverso la conoscenza della forza applicata durante l'infissione dei pali SOLES® n. 28 e 33 dell'Ed.11 ed i dati risultanti dalla prova penetrometrica statica P 13 normalizzata DN 400. L'accordo tra i valori è evidente.

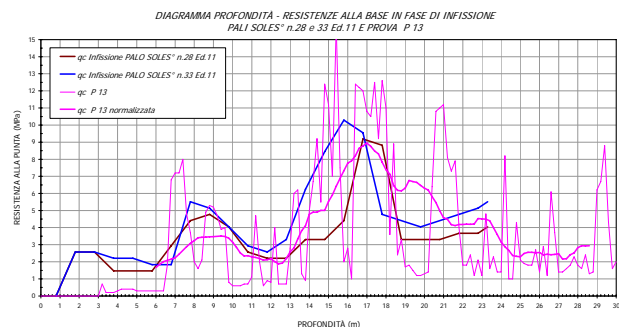


Figura 5. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la P13, la resistenza alla punta normalizzata DN 400 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES® 29 e 33

In base ai dati rilevati all'atto infissione (lunghezza totale effettiva dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla base misurata al termine della stessa  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) è stata valutata per i pali SOLES® pari a:

Pali SOLES® Ed. 11

(DN 400 –  $L_{tot\ eff} = 22,50\ m - q_{c\ eff} = 4,8\ MPa$ )

$$Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 1595 = 2074\ kN$$

$$Q_p = 460\ kN$$

$$W = 68\ kN$$

$$Q_{lim\ eff} = 2466\ kN$$

Il calcolo di  $\beta_{eff}$  per questo cantiere non è possibile poiché al momento della redazione della presente memoria il cantiere è ancora in corso.

#### 4.6 Isola di Murano – Restauro di un edificio

- Tipo di intervento

Nell'intervento di ristrutturazione di un edificio da destinare a civile abitazione, ubicato sull'Isola di Murano, sono stati realizzati n. 50 pali SOLES® DN 300. I pali hanno una lunghezza totale media di 19,80 m, ed hanno un carico di esercizio di progetto ( $N_{max}$ ) di 500 kN.

- Parametrici geotecnici di progetto – Risultati CPT

Di seguito sono riportati i parametri di progetto ricavati dalla prova CPT 2 in quanto ha valori di  $f_s$  medi rispetto a quelli di tutte le altre prove eseguite. Sulla base della suddetta prova sono stati dimensionati i pali oggetto dell'intervento. Per la presenza di terreno rimaneggiato fino alla profondità di 1,50 m nel calcolo della portata limite laterale del palo si sono trascurati i contributi dei primi 1,50 m.

Tabella 6. Parametri geotecnici per il progetto dei pali SOLES®

CPT 02	
Prof. da p.c. (m)	$f_s$ media (MPa)
da 1,5 a 3,0	0,078
da 3,0 a 12,0	0,044
da 12,0 a 14,0	0,147
da 14,0 a 17,0	0,075
-	-
Prof. da p.c. (m)	$q_c$ (MPa)
17,00	6,5

- Portata di progetto del palo SOLES®

Facendo riferimento ai parametri geotecnici della prova CPT 2 la lunghezza totale di progetto ( $L_{tot\ prog}$ ) del palo SOLES® è risultata pari a 18,00 m con la seguente portata limite di progetto ( $Q_{lim\ prog}$ ):

$$CPT\ 2: \quad Q_s^* = \beta \times Q_s = 1,3 \times 967 = 1257\ kN$$

$$Q_p = 459\ kN$$

$$W = 34\ kN$$

$$Q_{lim\ prog} = 1682\ kN$$

- Verifiche sulla base dei dati di infissione

I valori di resistenza alla base ricavati dalla misura della forza applicata durante l'infissione del palo SOLES® corrispondono ai valori di  $q_c$  ricavati dalle prove penetrometriche statiche normalizzate DN300.

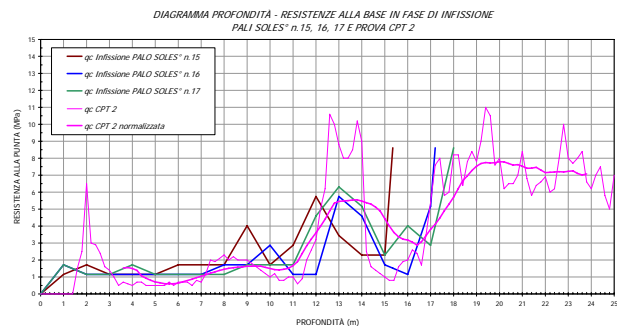


Figura 6. Confronto tra la resistenza alla punta ( $q_c$ ) misurata con la CPT2, la resistenza alla punta normalizzata DN 300 e la resistenza alla base determinata dai valori della forza applicata durante l'infissione dei pali SOLES® 15, 16 e 17.

In base ai dati rilevati all'atto infissione (lunghezza totale effettiva dei pali  $L_{tot\ eff}$  e portata limite alla base misurata al termine della stessa  $Q_{p\ eff}$ ), la portata limite effettiva ( $Q_{lim\ eff}$ ) è stata valutata per il palo SOLES® pari a:

Palo SOLES® n. 16 (DN 300 –  $L_{tot\ eff} = 17,20\ m$ ):

$$Q_s^* = 1,3 \times Q_s = 1,3 \times 911 = 1184\ kN$$

$$Q_p = 541\ kN$$

$$Q_{lim\ eff} = 1725\ kN$$

- Risultati della prova di carico

La prova di carico è stata realizzata sul palo SOLES® n. 16 ed è stata spinta fino a 750 kN. Il valore portata limite totale ( $Q_{lim\ pc}$ ), determinato con il metodo dell'interpolazione iperbolica, è pari a 1865 kN.

La portata limite laterale del palo ( $Q_{s\ pc}$ ) viene determinata come differenza tra la portata limite risultante dalla prova di carico ( $Q_{lim\ pc}$ ) e la portata limite alla base misurata al termine della fase di infissione ( $Q_{p\ eff}$ ) vale:

$$Palo\ SOLES^{\circ}\ n.16: \quad Q_{lim,pc} = 1865\ kN$$

$$Q_p = 541\ kN$$

$$Q_{s\ pc} = 1324\ kN$$

Pertanto il rapporto ( $\beta_{eff}$ ) tra il valore della portata limite laterale determinata con la prova di carico ( $Q_{s\ pc}$ ) e quello calcolato sulla base delle prove CPT ( $Q_s$ ), vale:

$$\beta_{eff} = Q_{s\ pc} / Q_s = 1324 / 911 = 1,45$$

#### 10 CONCLUSIONI

Il confronto tra i valori di resistenza alla punta rilevati dalle prove penetrometriche statiche normalizzati al diametro del palo, e quelli ricavati dalle misure delle forze

applicate durante l'infissione dei pali SOLES<sup>®</sup> mostrano, in tutti gli interventi, una buona corrispondenza.

Il rapporto ( $\beta_{\text{eff}}$ ) tra la portata laterale limite del palo ricavata dai risultati della prova di carico ( $Q_{s\text{ pc}}$ ) e la portata limite laterale calcolata utilizzando i dati di resistenza laterale forniti dalla prova penetrometrica CPT ( $Q_s$ ) negli esempi riportati nella memoria è ampiamente superiore ad all'unità ed è compreso tra 1,40 a 1,63.

Tabella 7. Riepilogo delle portate laterali dei Pali SOLES<sup>®</sup>

Cantiere	DN (mm)	$L_{\text{tot eff}}$ (m)	$Q_s$ (kN)	$Q_{s\text{ pc}}$ (kN)	$\beta_{\text{eff}} = Q_{s\text{ pc}} / Q_s$
Padova -CC-I°	350	15,80	2013	2935	1,46
Musile di Piave	350	11,00	959	1364	1,42
Modena - A1	550	35,80	2427	3409	1,40
Padova -CC-III°	350	16,10	1830	2637	1,44
Padova -CC-III°	350	16,00	1811	2941	1,62
Isola Murano	300	17,20	911	1324	1,45

Questo riscontro sperimentale conferma l'incremento delle caratteristiche meccaniche del terreno dovuto alla particolare tecnologia propria dei pali SOLES<sup>®</sup> infissi staticamente senza estrazione di terreno, e giustifica l'adozione di un coefficiente pari a 1,3 sulla portata limite laterale calcolata con i valori risultanti dalle prove CPT.

## BIBLIOGRAFIA

- ALBERTI F., CAMPOLUNGI P., CAPELLI G., COLLINA V., FABBRI C., SEBASTIANO G., STORONI RIDOLFI S., ZAMBIANCHI L. (2004) *Consolidamento delle fondazioni di un edificio in terreni con caratteristiche geotecniche scadenti nella città di Roma: esempio di utilizzo di pali Soles<sup>®</sup> ad alta capacità portante infissi con sistema statico*. Atti XXII Convegno Nazionale di Geotecnica - Palermo 2004, pp. 253-260
- CESTELLI GUIDI C. (2000) *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni*. 2 volumi, Hoepli
- COLLINA V., FABBRI C., STORONI RIDOLFI S., ZAGO R., ZAMBIANCHI L. ZATTONI G. (2002) *Una nuova metodologia di realizzazione di fondazioni profonde per il consolidamento di edifici in ambito urbano*. Atti XXI Convegno Nazionale di Geotecnica - L'Aquila 2002, pp. 371-378
- POULUS H. G., DAVIS E. H. (2005) *Analisi e progettazione di fondazioni su pali*. Dario Flaccovio
- VIGGIANI C. (1999) *Fondazioni*. Hevelius.

## ABSTRACT

SOLES<sup>™</sup> PILES PERFORMANCE INTO THE "PIANURA PADANA" (PO PLAIN) AND "LAGUNA VENETA": CORRESPONDENCE BETWEEN MONITORIZED DRIVING PARAMETERS AND PENETROMETRIC TESTS RESULTS; CORRELATION WITH BEARING LOAD TESTS AND VERIFICATION OF THE DESIGN SPECIFICATION.

Keywords: piles, Soles, foundation, Po (river), Venice.

The document shows some projects where SOLES<sup>™</sup> piles have been installed; SOLES<sup>™</sup> piles are displacement piles driven by a static system, and they are characterized by a very high bearing capacity. The interventions described have been effected in different construction projects, and in various places of "Pianura Padana" (Po plain) and "Laguna Veneta" in Italy.

The report contains the main features of the SOLES<sup>™</sup> piles construction process, and it shows the calculation method adopted for the design of the SOLES<sup>™</sup> piles, based on the result of the cone penetration test.

It also holds a comparison between the pile tip bearing capacity, recorded during the driving operation, and data resulting from the cone penetration tests. A peculiarity of this method is the possibility of variation of the pile length according to the soil resistance detected during the driving operation; the load bearing capacity is guaranteed precisely for each pile.

Some bearing load tests, carried out on the sites, are discussed; the tests represent the experimental proof of the design calculation, as well as they prove the real bearing capacity of the pile.