

ANALISI DI FONDAZIONI SU PALI CON MODELLI NON LINEARI E RISCONTRI SPERIMENTALI

Elena Bandiera (elena.bandiera@teleios-ing.it)
Teleios Srl – Società di Ingegneria

Marco Franceschini (marco.franceschini@teleios-ing.it)
Teleios Srl – Società di Ingegneria

Federico Fiorelli (federico.fiorelli@teleios-ing.it)
Teleios Srl – Società di Ingegneria

ABSTRACT. Nel presente articolo vengono discussi gli aspetti geotecnici connessi alla progettazione delle fondazioni del nuovo Padiglione 37 della fiera di Bologna. Al fine di far convergere gli obiettivi di economicità e buone prestazioni geotecniche è stato previsto l'impiego di fondazioni profonde con pali prefabbricati tronco-conici. Descritta la soluzione fondale, vengono poi approfonditi gli aspetti relativi alla determinazione della capacità portante dei pali, all'analisi numerica della fondazione, al comportamento del singolo palo, in termini di curva carico-cedimento, e del gruppo di pali. Come previsto da progetto e confermato dalle prove di collaudo.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della riqualificazione del quartiere fieristico di Bologna, è stato realizzato il nuovo Padiglione 37. Di dimensioni planimetriche pari a 80 x 184 m, il corpo centrale monopiano è caratterizzato da una struttura con campate trasversali a luce libera, a copertura del quale è posta una copertura metallica la cui parte centrale presenta un sistema mobile parzialmente apribile. Il padiglione è affiancato da altri due corpi di fabbrica, il Mall e il corpo Est, che lo completano dal punto di vista architettonico e funzionale.

La struttura metallica della copertura appoggia su n° 8 torrini in cemento armato a pianta quadrata di lato 4.80 m, le cui fondazioni si prefigurano come l'opera geotecnica fondale più complessa della struttura. Per tali elementi, così come per i corpi di fabbrica adiacenti, è stato scelto l'impiego di fondazioni profonde.

La progettazione geotecnica ha avuto per oggetto principale, oltre alla determinazione della capacità portante assiale dei pali, lo studio del comportamento del singolo palo e l'analisi numerica della palificata, al fine della determinazione delle sollecitazioni agenti sui pali e della previsione della risposta delle fondazioni.

2. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE E DELLA LITOLOGIA

La campagna di indagine geognostica del sottosuolo è consistita in una combinazione di a) n. 4 prove penetrometriche con piezocono CPTu spinte a rifiuto a profondità di 15-17 m da p.c., b) n. 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo fino alla profondità di 30 m con b1) n. 15 prove SPT in foro, b2) prelievo di n°5 campioni sottoposti a prove di laboratorio (analisi granulometriche), c) indagini sismiche costituite da 1 profilo sismico MASW/Re.Mi. e 4 letture HVSR. Le indagini CPTu, supportate dal sondaggio geognostico, evidenziano un'alternanza di orizzonti incoerenti con strati di depositi coesivi.

2. DESCRIZIONE DELLA SOLUZIONE FONDALE

La scelta del tipo di fondazione è dovuta essenzialmente agli elevati carichi trasmessi dalle strutture e dalle caratteristiche del terreno in sito, accennate al paragrafo precedente. La scelta di impiego di pali prefabbricati tronco-conici (TC a seguire) è dovuta a diversi aspetti, sia di tipo geotecnico che di carattere costruttivo:

- i pali battuti presentano in generale delle buone prestazioni geotecniche e, nel caso di pali troncoconici, si ha un ulteriore beneficio rispetto alle azioni di compressione dovuto alla conicità, come mostrato a seguito di campagne sperimentali (Gambini 2018), sia in terreni coesivi ma soprattutto incoerenti. Per via del processo di installazione, che comporta uno spostamento laterale del terreno, nei terreni incoerenti si ha un addensamento ed un miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno lungo il fusto del palo;

- il processo di installazione è rapido e non sono previsti materiali di risulta e di scavo, il che garantisce un cantiere pulito e di più facile organizzazione e gestione;
- più in generale si tratta di una scelta tecnologica che fornisce un buon rapporto costo/prestazioni.

Sono stati impiegati pali monolitici di diametro 53/26 cm (testa/punta) di lunghezza pari a 18 m e una rastremazione pari a 1,5 cm/m, realizzati ed installati dalla società Geofondazioni (Figura 1). Per la battitura è stato usato un battipalo idraulico con un peso di 6 e 7 tonnellate. L'energia di battitura impiegata è pari a 36 kNm e i cedimenti registrati durante la battitura sono risultati variabili nel range tra 5 e 7 mm/colpo.

Per i torrioni del padiglione sono state impiegate n° 4 tipologie di plinti: quello tipico è rappresentato da una platea quadrata di lato 8.10 m e spessore 1.60 m, posta su 28 pali TC (Figura 2, a sinistra).

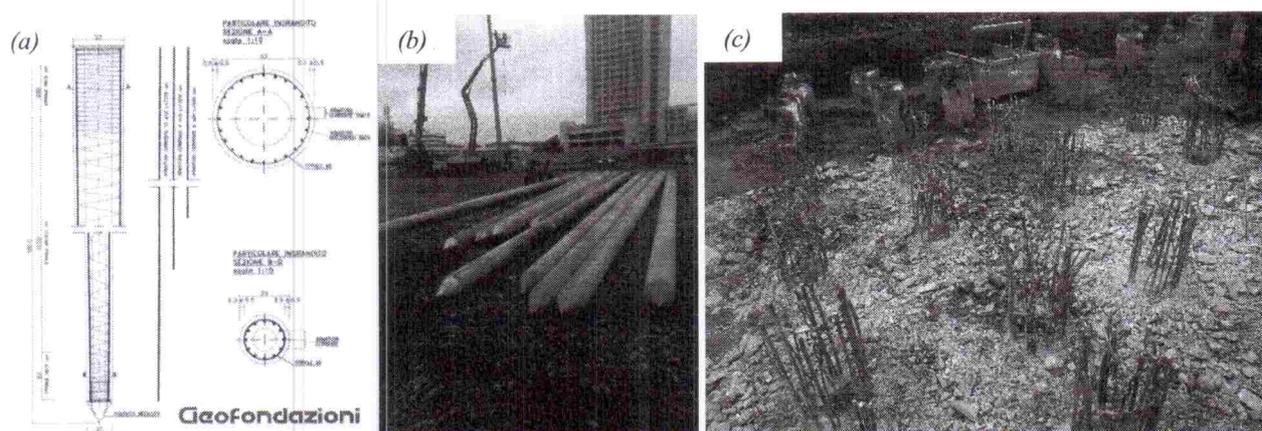


Figura 1. Pilo infisso prefabricato troncoconico: (a) caratteristiche geometriche (sezione verticale e armature), (b) vista dei pali nell'area di cantiere, (c) armature di ancoraggio a seguito della battitura e scapitozzatura dei pali.

3. PROGETTO DELLA FONDAZIONE

3.1 Capacità portante dei pali

In fase di progetto la capacità portante dei pali TC è stata valutata analiticamente facendo riferimento direttamente alle prove CPTu, in particolare ricorrendo al metodo di Eslami e Fellenius (1997) e al metodo di Togliani (2008). I risultati sono riepilogati in Tabella 1. Nel primo caso, il beneficio nella capacità portante laterale dovuto all'effetto della conicità è stato considerato applicando un coefficiente moltiplicativo compreso tra 1.5 e 2 in ragione della litologia attraversata (Horvath 2002). Il secondo metodo è invece stato specificamente sviluppato per i pali troncoconici (Togliani 2008) e valuta in maniera diretta, per mezzo di formulazioni specifiche, sia la portata laterale che il contributo della conicità.

Tabella 1. Previsione capacità portante ultima dei pali da prove CPTu.

| Verticale | Portata laterale (kN) | | | | Portata alla punta (kN) | |
|-----------|-----------------------|----------|----------|----------|-------------------------|----------|
| | Eslami e Fellenius | | Togliani | | E& F | Togliani |
| | Laterale | Conicità | Laterale | Conicità | | |
| CPTu 1 | 1322 | 794 | 1306 | 843 | 340 | 385 |
| CPTu 2 | 1593 | 956 | 1536 | 1180 | 367 | 416 |
| CPTu 3 | 1502 | 1201 | 1527 | 1354 | 394 | 441 |
| CPTu 4 | 1364 | 1228 | 1556 | 1480 | 344 | 378 |

3.2 Metodo di analisi e modellazione numerica

Data la complessità della fondazione, le sue dimensioni considerevoli e l'importanza dell'opera, si è proceduto ad una analisi geotecnica avanzata mediante l'impiego di un codice di calcolo specificatamente sviluppato per l'analisi di pali in gruppo: il software di calcolo Repute (Basile 2015, Bond e Basile 2017).

Repute effettua delle analisi numeriche complete tridimensionali ricorrendo ad una formulazione agli elementi di contorno BEM (Boundary Element Method). È quindi possibile effettuare delle analisi di interazione terreno-struttura calcolando la risposta di un palo singolo o di un gruppo di pali, soggetti a condizioni di carico generiche, considerando la reciproca influenza di tutti i pali del gruppo.

Il comportamento non lineare del terreno è stato modellato facendo riferimento ad un legame costitutivo iperbolico, che si basa sul modulo di Young in valore Tangente iniziale E_0 (Eq. 1, Bond & Basile 2021):

$$E_{tan} = E_0 \left(1 - \frac{R_f t}{t_s} \right)^2 \quad (1)$$

dove R_f è la costante di forma dell'espressione iperbolica, t è la tensione tangenziale all'interfaccia palo-terreno mentre t_s è il valore limite di tensione assunto all'interfaccia. Valori differenti della costante di forma R_f devono essere usati per descrivere al meglio la risposta dell'interfaccia lungo il fusto (R_{fs}) e alla base (R_{fb}).

Il valore di E_0 è stato derivato per correlazione dalla velocità delle onde di taglio V_s misurate con le indagini sismiche, che mostrano una buona corrispondenza anche con i valori derivati per correlazione dalle prove penetrometriche statiche CPTu.

Tabella 2. Modello geotecnico impiegato nell'analisi BEM con Repute.

| Strato | Prof. da – a (m) | s_u (kPa) | φ' (°) | c' (kPa) | E_0 (MPa) | Modello Costitutivo |
|-----------------------|------------------|-------------|----------------|------------|-------------|--|
| Limo sabbioso | 0 – 8.0 | - | 30 | 0 | 200 | Non lineare Iperbolico $R_{fs}=0.50$ (shaft) $R_{fb}=0.99$ (base) |
| Argilla | 8.0 – 15.0 | 60 | 27 | 5 | 170 | |
| Ghiaia | 15.0 – 20.0 | - | 35 | 0 | 500 | |
| Limo argillo-sabbioso | 20.0 – 35.0 | 64 | 27 | 5 | 350 | |

Le analisi numeriche condotte quali parte della progettazione geotecnica dell'opera sono consistite sia nello studio del comportamento del singolo palo (curva carico-cedimento) che del gruppo di pali.

L'analisi della palificata di fondazione è stata svolta facendo riferimento alle forze ed ai momenti risultanti agenti all'estradosso della fondazione, ovvero alla base dei torrini in c.a., a cui viene aggiunto il peso proprio della stessa. Le principali combinazioni delle azioni impiegate nelle analisi sono riportati nella Tabella 3.

I risultati delle analisi BEM delle palificate sono forniti sia in termini di distribuzione delle sollecitazioni assiali (riportati a titolo di esempio in Figura 2, a destra), flessionali e taglianti agenti su ogni palo, lungo il fusto degli stessi, che in termini delle relative componenti di cedimento (spostamenti e rotazioni).

Tabella 3. Principali combinazioni di carico impiegate nell'analisi della palificata.

| Load Case | Fx (kN) | Fy (kN) | Fz (kN) | Mx (kNm) | My (kNm) | Mz (kNm) |
|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| SLU | 2249 | 272 | 8990 | 6619 | 22224 | 3987 |
| SLV | 1534 | 204 | 6712 | 4791 | 15107 | 2719 |

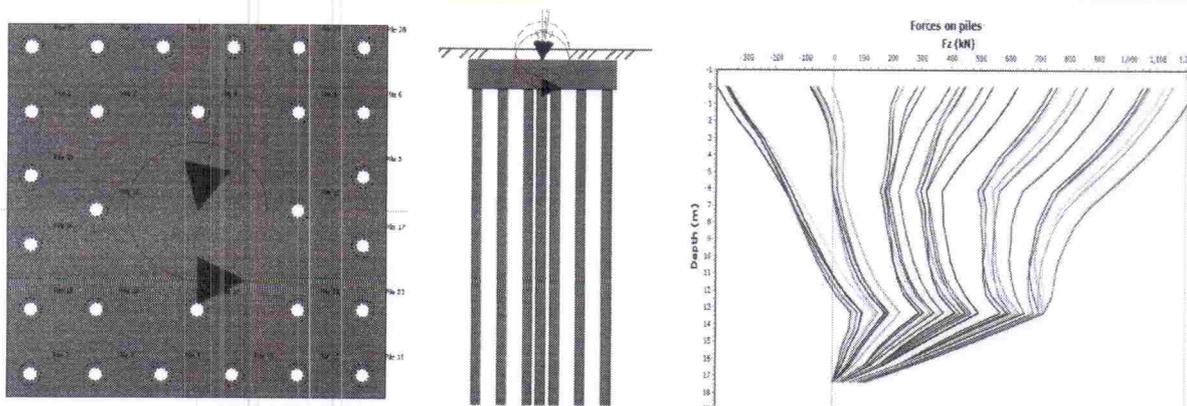


Figura 2. A sinistra, modello Repute: pianta e sezione fondazione torrino. A destra, profilo di distribuzione degli sforzi assiali sui singoli pali della fondazione: le discontinuità vengono rilevate in corrispondenza dei cambi litologici.

4. PROVE DI CARICO SU PALI E RISCOントRO PREVISIONALE

Durante l'esecuzione dei lavori sono state condotte da Geofondazioni le prove di carico sui pali. Le stesse, eseguite per i plinti più significativi e strumentando il palo per la misurazione degli spostamenti sommitali, hanno permesso la taratura e la validazione delle ipotesi progettuali, oggetto di approfondito vaglio e studio.

È stato quindi eseguito un confronto tra i dati sperimentali ottenuti dalle prove di carico e il comportamento del palo previsto, descritto tramite la curva carico-cedimento, come valutato in fase di progetto (Figura 3, a sinistra). Tale aspetto, implicitamente contenuto nella modellazione della palificata, è evidenziato dall'analisi BEM di un singolo palo soggetto a carico assiale. L'ottimo fitting della curva previsionale con quelle sperimentali è riprova della buona modellazione adottata, sia geotecnica che numerica, soprattutto con riferimento ai modelli costitutivi avanzati di tipo non lineare.

Alla luce del buon riscontro ottenuto circa il comportamento del singolo palo, a completamento delle valutazioni sono stati confrontati i cedimenti dei singoli pali posti in gruppo, come desunti dall'analisi BEM della palificata, con il cedimento atteso del gruppo di pali, facendo riferimento alla formulazione proposta da Mandolini et. al (2005). Esprimendo il confronto in termini di fattore di spostamento medio R_s , che lega il cedimento del palo singolo w_s al cedimento del gruppo di pali w_g ($w_g = R_s \cdot w_s$), analiticamente risulta $R_{s,medio,analitico} \approx 4$ mentre dalle analisi numeriche si ottiene $R_{s,medio,BEM} \approx 3$. Anche in questo caso il confronto è consono e concordante (Figura 3, a destra).

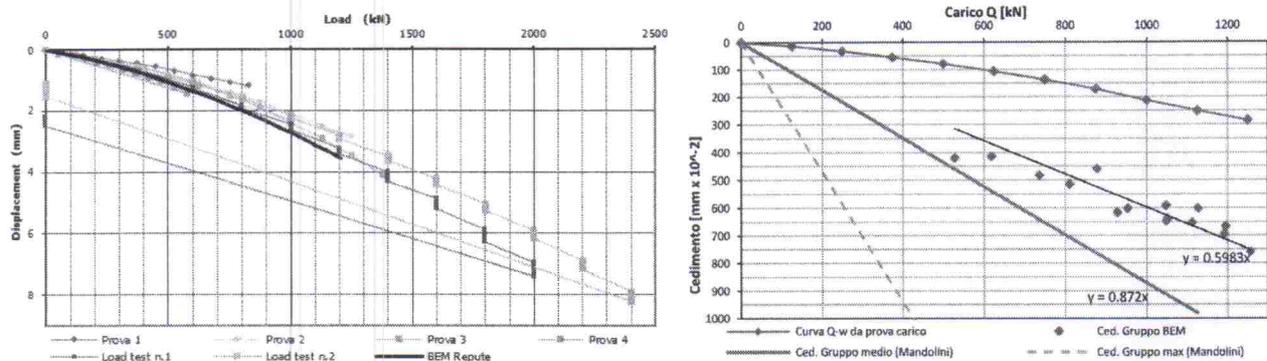


Figura 3. A sinistra, curva carico-cedimento: confronto tra modello BEM previsionale e prove di carico. A destra cedimento del gruppo di pali: confronto risultati BEM e valutazione analitica a partire dai risultati di una delle prove di carico.

5. CONCLUSIONI

L'articolo ha illustrato i principali passaggi progettuali svolti nel progetto delle fondazioni del Padiglione 37 della fiera di Bologna, per il quale sono stati impiegati pali battuti troncoconici della società Geofondazioni.

Il nucleo centrale della progettazione è stato l'adozione di una modellazione avanzata del comportamento del palo, sia isolato che all'interno della palificata. Questo è stato possibile affiancando l'alta specializzazione e cultura geotecnica ad analisi effettuate con l'impiego di modelli costitutivi non lineari: analisi BEM condotte con software Repute. Ciò ha condotto ad un progetto ottimizzato dei pali e delle fondazioni, evitando sovra o sottodimensionamenti, così come una gestione ottimale dei cedimenti del particolare sistema di copertura.

6. BIBLIOGRAFIA

- Basile F. (2015). Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts. *Computers and Geotechnics*, 63: 73–82.
- Bond A.J., Basile F. (2021). Repute 2.5, Software for pile design and analysis. Reference Manual. *Geocentrix Ltd, UK*.
- Eslami A., Fellenius B.H. (1997). Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories. *Can. Geotech. J.* 34(6) 886–904.
- Gambini F. (2018). Manuale dei piloti. Pali prefabbricati per fondazioni. *Edizione Geofondazioni*.
- Horvath J.S. (2002). Static Analysis of Axial Capacity of Driven Piles in Coarse-Grain Soil. *Integrated Site Characterization and Foundation Analysis Research Project. Report No. CGT-2002-1*.
- Mandolini A., Russo G., Viggiani C. (2005). Pile foundations: experimental investigations, analysis and design. *XVI Int. Conf. Soil Mech. Geot. Eng.*, 1, 177-213.
- Togliani G. (2008). Pile Capacity Prediction for in Situ Tests. *Proceedings ISC-3. Taiwan, April 1-4, 2008. 1187-1192*.