

TERMINAL CROCIERE: PROGETTAZIONE DELLE FONDAZIONI PROFONDE. INTERAZIONE LATO MARE E LATO TERRA

Irene Sarao Mannelli (irene.saraomannelli@ceas.it)
CEAS s.r.l. Milano

Veronica Minardi (veronica.minardi@ceas.it)
CEAS s.r.l. Milano

Giovanni Canetta (giovanni.canetta@ceas.it)
CEAS s.r.l. Milano

ABSTRACT Negli ultimi anni il settore delle crociere ha riscontrato una repentina crescita, associata ad un aumento della domanda di nuovi terminal in grado di ospitare le grandi navi e di accogliere passeggeri ed equipaggi. Ciò si traduce nella progettazione di strutture di grandi dimensioni, caratterizzate da un sistema fondazionale, di tipo profondo, in parte in acqua ed in parte in terra. Nel presente articolo, si riassumono gli aspetti più rilevanti di un progetto di un terminal crociere fondato su un solettone unico in calcestruzzo armato poggiante su pali circondati per l'intera lunghezza dal terreno, nel tratto di banchina, e su pali immersi parzialmente in acqua, nel tratto di mare. L'obiettivo progettuale è stato quello di studiare diverse alternative geometriche e tecnologiche (come l'utilizzo di una sleeve in acciaio) finalizzate a garantire l'uniformità del comportamento deformativo in condizioni statiche e dinamiche (SLD e SLV) tra i due tratti – quello su pali in terra e quello su pali in acqua - del solettone, in modo tale da evitare problematiche strutturali all'edificio soprastante.

1. INTRODUZIONE

La progettazione di edifici caratterizzati dalla presenza di fondazioni parzialmente in acqua richiede una particolare attenzione. Infatti, date le esigenze architettoniche e funzionali di avere ampi spazi, le pilastrate trasferiscono in fondazione carichi elevati, che nella maggior parte dei casi scaricano le azioni su pali o gruppi di pali di grande diametro, all'incirca coassiali ai pilastri. Inoltre, ogniqualvolta la struttura in elevazione, come nel caso in esame, poggia su un unico solettone in parte sospeso su pali in acqua ed in parte gravante sul terrapieno della banchina, senza la presenza di giunti strutturali, diventa determinante assicurare la compatibilità dinamica e statica delle fondazioni delle due zone. Infatti, la risposta dei due materiali, il terreno e l'acqua, in condizioni di sollecitazione sismica è molto differente: il primo garantisce un confinamento ed una resistenza tangenziale sui pali, mentre il secondo fornisce solamente un confinamento.

L'aspetto più critico è sicuramente quello deformativo.

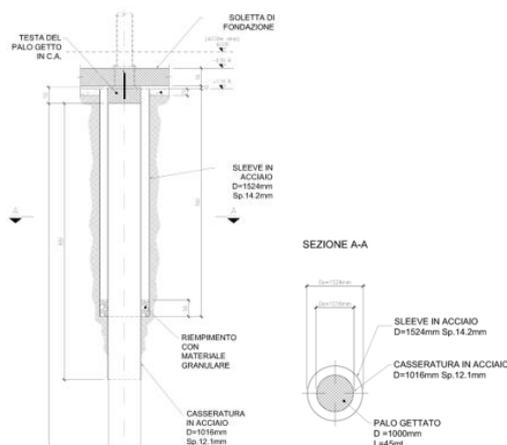


Figura 1. Carpenteria palo di fondazione lato terra con sleeve.

Nel presente articolo viene illustrata la procedura seguita per il dimensionamento delle fondazioni “lato terra”, avendo già fissate – in una fase precedente del progetto - quelle “lato mare”, in termini di rigidzze e spostamenti. A tal proposito, nel progetto delle fondazioni a terra, al fine di raggiungere gli obiettivi progettuali prefissati, si

sono considerate due soluzioni tecnologiche di base, ottimizzando per ciascuna le geometrie e le caratteristiche dei pali:

1. l'adozione di una sleeve in acciaio, ovvero un profilo metallico circolare cavo a contatto con il terreno, coassiale, ma di diametro sufficientemente maggiore di quello del palo, in modo tale da permettere lo spostamento dello stesso in condizioni sismiche, e approfondito fino a una quota da definire;
2. l'adozione di un diametro inferiore dei pali lato terra rispetto a quelli impiegati lato mare.

2. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Al fine di determinare la stratigrafia del sito in oggetto e le conseguenti proprietà meccaniche dei materiali è stata portata avanti una campagna geognostica basata su prove in sito e prove in laboratorio.

I sondaggi hanno interessato prevalentemente depositi di sabbie fini limose, limi sabbiosi e limi argillosi in banchi più o meno continui spazialmente fino ai 36 m di profondità circa. A circa 36 m di profondità le perforazioni hanno intercettato il cappellaccio di alterazione sotto forma di breccia e sabbia media grossolana; alla base dello strato si ritrova il substrato litoide molto fratturato di calcescisti e arenaria.

Il progetto dei pali prevede l'immorsamento di almeno tre diametri nel substrato.

Tabella 1. Descrizione dei livelli stratigrafici e sintesi dei parametri meccanici di progetto.

Unità geotecnica	Profondità da p.c.	c' [kPa]	ϕ' [°]	E [MPa]	Descrizione stratigrafica
R	0 – 6 m	0	27	15÷25	Riporto antropico, prevalentemente incoerente. Sabbie e ghiaie con presenza di laterizi.
A	6 – 16 m	15	28	3	Limo argilloso e argille limose sabbiose poco consistenti.
B	16 – 20 m	0	34	40÷60	Sabbia fine debolmente limosa e sabbia grossolana con ghiaia.
C	20 – 36 m	15	36	120÷180	Sabbia limosa e limo con sabbia argilloso, consistenza crescente con la profondità.
Substrato	> 36 m	-	-	-	Calcescisto molto fratturato ed alterato sovrapposto ad una compagine rocciosa di arenaria grigia fratturata

3. DIMENSIONAMENTO DELLE PALIFICATE

Analisi deformativa delle fondazioni del molo nel tratto lato mare

Le fondazioni del molo, nel tratto a mare, consistono in pali di fondazione in c.a. disposti con maglia circa 10*10m, lunghezza complessiva di 50m, di cui 14 m in acqua, e diametro 1.6 m. Il calcolo degli spostamenti orizzontali della testa dei suddetti pali non fa parte dell'oggetto del presente documento, ma ne viene riportato il risultato in quanto fornisce l'informazione di input che permette di dimensionare correttamente le fondazioni nel tratto a terra.

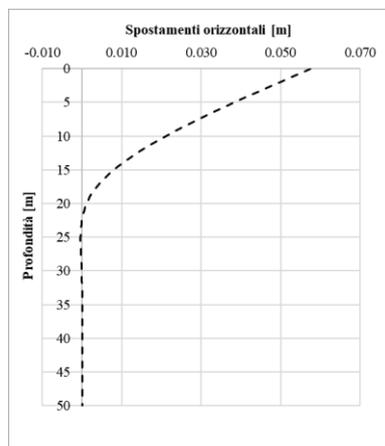


Figura 2. Spostamenti laterali e lungo il fusto del palo – lato mare.

Tali pali, quando soggetti a forze orizzontali dovute all'azione sismica (Stato Limite di Danno, pari a 110 kN), mostrano il profilo di spostamenti nel terreno lungo il fusto rappresentato in Figura 2.

L'analisi svolta con il software LPile, che implementa le curve carico – spostamento del terreno, restituisce uno spostamento massimo in testa di 0.058 m. Tale spostamento in testa fornisce il valore target per il dimensionamento dei pali del lato terra.

Analisi deformativa delle fondazioni del molo nel tratto lato terra

Grazie alla presenza di un solettone di fondazione, la definizione del layout dei pali può prescindere dalla maglia dei pilastri della sovrastruttura. Pertanto, il procedimento che conduce al dimensionamento della palificata “lato terra” muove dalla valutazione delle possibili geometrie dei pali di fondazione (diametro dei pali, interasse e lunghezza della sleeve in acciaio), garantendo allo stesso tempo il soddisfacimento della verifica di capacità portante della palificata.

Al fine di definire la geometria dei pali, sono state eseguite diverse analisi numeriche con il software GROUP, facendo variare il diametro dei pali e la lunghezza della sleeve. Le curve carico - spostamento impiegate sono quelle proposte da Matlock (1970) per le argille (Unità A e C) e da Reese et al. (1974) per i materiali incoerenti. L'interasse scelto, maggiore di 5 diametri, è tale da non richiedere l'analisi di mutua interazione tra i pali del gruppo.

Il modello GROUP (Figura 3a) considera due pali ad un interasse di 5.25 m, di lunghezza 45 m con discretizzazione pari a 0.5 m. La sleeve in acciaio è simulata nel modello con l'assenza di contatto tra palo e terreno. La sua lunghezza viene determinata mediante una procedura iterativa mirata all'ottenimento degli spostamenti in testa al palo di entità pari agli spostamenti individuati durante le analisi delle fondazioni in mare (0.058m). Da queste analisi, definite da una sollecitazione orizzontale pari a 110 kN allo SLD, sono state ottenute le seguenti configurazioni:

- $D=1.2\text{m}$ $L_{\text{sleeve}} = 9\text{ m}$;
- $D=1.0\text{m}$ $L_{\text{sleeve}} = 7\text{ m}$;
- $D=0.8\text{m}$ $L_{\text{sleeve}} = 2.5\text{ m}$.

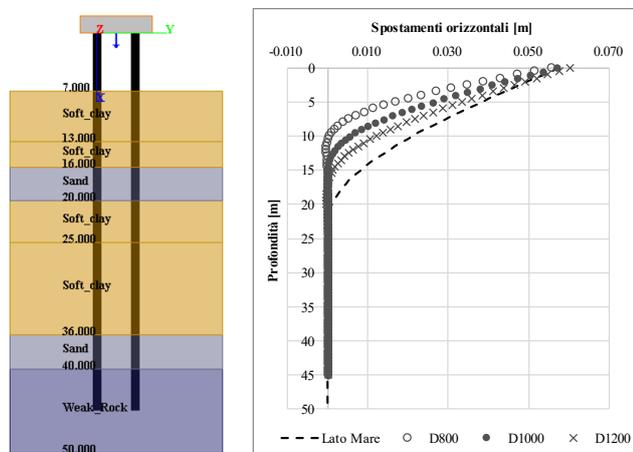


Figura 3. a. Modello GROUP associato a $D=1.0\text{m}$; b. Spostamenti laterali lungo il fusto del palo – lato terra.

In fase progettuale è stata poi scelta la configurazione che ottimizzava i costi della fondazione, definita da $D = 1.0\text{m}$ e $L_{\text{sleeve}} = 7\text{m}$. In termini di capacità portante, infatti, la suddetta configurazione minimizza i volumi di calcestruzzo perché permette di mantenere la maglia dei pali pari a quella dei pilastri dell'edificio soprastante e mantiene un rapporto L/D inferiore a 50 diametri. In questo articolo si omettono il procedimento di verifica della capacità portante verticale e orizzontale della fondazione profonda e la verifica di congruenza dei cedimenti verticali in condizioni statiche, riportando invece il calcolo di dimensionamento della sleeve.

Dimensionamento della sleeve metallica

La “sleeve”, ovvero un elemento di tubo cilindrico coassiale al palo, inserito nel terreno fino ad una certa profondità, ha lo scopo di impedire il contatto palo – terreno nel primo tratto dell'elemento fondazionale.

Il dimensionamento di tale profilo è avvenuto in due step:

- a) Analisi in condizioni di Stato Limite di Danno per uniformare lo spostamento in testa dei pali a terra e in mare. Da tale analisi discende la lunghezza minima della sleeve per assicurare il comportamento richiesto;
- b) Analisi in condizioni di Stato Limite di Salvaguardia della Vita, utile a calcolare il gap minimo necessario affinché la testa del palo non tocchi la lamiera della sleeve con effetto “martellamento”.

Entrambe le analisi sono state eseguite con il software GROUP; i risultati della prima sono riportati al Paragrafo precedente, mentre qui di seguito si riportano i risultati della seconda analisi.

Il modello è il medesimo descritto in precedenza; la massima sollecitazione orizzontale SLV in testa ai pali è pari a 200 kN:

- Spostamento in testa al palo (sommità sleeve): 0.165 m
- Spostamento base sleeve: 0.053 m
- Spostamento differenziale: 0.112 m

In accordo con i dettami dell’NTC2018, par. 7.3.3.3, tale spostamento va amplificato moltiplicando per il fattore di duttilità in spostamento μ_d . Pertanto, il gap minimo radiale è di:

$$d_E = \pm \mu_d * d_{Ee} = 1.5 * 0.112m = 0.168m \quad (1)$$

Nel tratto interessato dalla sleeve, sotto l’effetto del sisma, anche il terreno subisce uno spostamento che, alla quota basale della sleeve, è lo stesso del palo, mentre alla superficie è differente.

Se si considerano le frequenze di interesse per gli spostamenti, quindi inferiori a 1 Hz, e la velocità dell’onda di taglio nel terreno, che è di 180 m/s, si deduce che la lunghezza d’onda minima di interesse è 180 m. Nello sviluppo dei 7m di sleeve, quindi lo spostamento relativo massimo è pari a

$$d_r = d_g \operatorname{sen} \left(\frac{7}{180} 2\pi \right) = d_g * 0.24 \quad (2)$$

essendo d_g il massimo spostamento del terreno, calcolato secondo par. 3.2.3.3 dell’NTC2018:

$$d_g = 0.025 * a_g * S * T_c * T_D = 0.0523 \quad (3)$$

Assumendo $d_g = 0.052 m$ calcolato sopra, alla base della sleeve, lo spostamento massimo della sommità della sleeve rispetto alla base risulta $d_r = 0.052 * 0.24 = 0.013m$.

Di conseguenza, l’interspazio fra palo e sleeve, per evitare il martellamento, dovrebbe essere non minore di $d_E + d_r = 0.168m + 0.013m = 0.181m$.

4. CONCLUSIONI

Lo studio presentato riporta la metodologia di progettazione di un fabbricato avente fondazioni a contatto con materiali differenti (acqua e terreno) che ne influenzano la risposta deformativa e meccanica, come nel caso di fondazioni profonde in zone portuali. In particolare, analizza la compatibilità delle suddette fondazioni in condizioni dinamiche e propone una soluzione progettuale consistente nell’uso di pali di diametro differente aventi una sleeve in acciaio opportunamente dimensionata in diametro, spessore e lunghezza. Attraverso l’utilizzo del software GROUP, che implementa curve p-y per i diversi strati di terreno, vengono stimate e confrontate le deformazioni orizzontali delle palificate del molo e della banchina.

5. BIBLIOGRAFIA

Matlock, H. (1970). Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay. *Proceedings of the 2nd Offshore Technology Conference, Houston, 22-24 April 1970.*

Reese, Lymon C., Cox, William R., and Francis D. Koop (1974). Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand. Paper presented at the *Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1974.*

GROUP, ENSOFT INC, Version 2016. *A program for the Analysis of a Group of Piles Subjected to Vertical and Lateral Loading.*

LPile, ENSOFT INC, Version 2016. *A program to Analyze Deep Foundations Under Lateral Loading.*