

## **SPERIMENTAZIONE IN VERA GRANDEZZA PER LO STUDIO DELL'INTERAZIONE DINAMICA PALO-TERRENO-PALO: PORTO TURISTICO MIRABELLO, LA SPEZIA**

Francesca Dezi  
*Università di Modena e Reggio Emilia*  
*Francesca.dezi@tin.it*

Fabrizio Gara, Davide Roia  
*Università Politecnica delle Marche*

Fabio Dall'Aglio, Luca Piacentini  
*Piacentini Ingegneri S.r.l.*

### **Sommario**

In questo lavoro si presenta una vasta campagna di prove su pali in vera grandezza realizzata nell'ambito del progetto del porto turistico Mirabello a La Spezia. I pali sono tubi in acciaio, non vincolati in testa, vibro-infissi in terreni limo-sabbiosi saturi. Il campo prova è formato da un gruppo di tre pali disposti in pianta secondo uno schema ad "L" e strumentati con estensimetri, accelerometri e trasduttori di pressione. Si sono eseguite tre tipologie di prove dinamiche con forzante orizzontale in testa al palo, caratterizzate da diversi sistemi di eccitazione: prove a segnale impulsivo, a segnale armonico a frequenza costante e armonico a frequenza variabile. Durante le diverse prove si sono acquisite le storie delle deformazioni lungo un palo e delle accelerazioni in testa a tutti i pali. La metodologia di monitoraggio dei pali e la tecnica di messa in opera degli strumenti si sono dimostrate efficaci nonostante l'aggressività dell'ambiente marino e la criticità della fase di vibro-infissione. L'obiettivo è studiare il complesso fenomeno dell'interazione dinamica palo-terreno-palo, sia nel caso di pali singoli che di pali in gruppo. I risultati sperimentali verranno poi confrontati con i risultati di analisi numeriche avanzate e di metodi semplificati.

### **Introduzione**

L'interazione influenza significativamente la risposta dinamica del sistema terreno-fondazione-struttura alterandone sia le caratteristiche di rigidità che quelle dissipative. I metodi di analisi presenti in letteratura sono riconducibili sostanzialmente a due approcci: il metodo diretto, che valuta simultaneamente la risposta dell'intero sistema terreno-fondazione-struttura mediante un modello dinamico completo, ed il metodo delle sottostrutture (Wolf J. P., 1987), che, sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti, esegue prima l'analisi di interazione cinematica e poi l'analisi di interazione inerziale della struttura a base flessibile. Nell'ambito dell'interazione cinematica, nel caso di fondazioni su pali, esistono sia metodi avanzati in grado di tener conto della configurazione in pianta della palificata e del comportamento non lineare del sistema terreno-fondazione, sia metodi semplificati che permettono di determinare direttamente le sollecitazioni flettenti massime lungo il palo al passaggio delle onde sismiche nel terreno (Dobry R. e O'Rourke M.J. 1983, Nikolau A.S. et al. 2001, Maiorano R.M.S. et al. 2009, Dezi F. et al. 2009a). Nonostante l'elevato numero di

studi e di metodi di analisi presenti in letteratura, in merito all'interazione terreno-fondazione-struttura, pochi sono gli studi sperimentali fin ora eseguiti. Nel 1980 Matlock H. et al. hanno presentato i risultati di prove in sito, sia statiche che dinamiche, su pali in acciaio in argille soffici; qualche anno più tardi, nel 1975, Reese L. et al. hanno presentato i risultati di prove analoghe condotte in argille fessurate sovraconsolidate. L'effetto gruppo è stato invece indagato sperimentalmente da Brown D. et al. (1987, 1988) per mezzo di prove a carico ciclico su un gruppo di pali 3x3. Rimane dunque fondamentale l'esecuzione di campagne sperimentali soprattutto in vera grandezza al fine di validare sperimentalmente le diverse procedure e di testare l'affidabilità dei vari metodi.

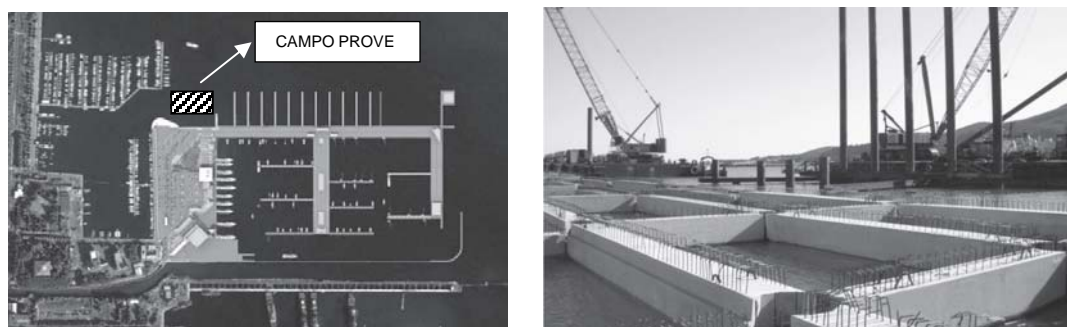
In questo lavoro si presenta uno studio sperimentale in vera grandezza su un gruppo di 3 pali in acciaio (tubi di 60÷70 cm di diametro, circa 1 cm di spessore e 15 m di lunghezza) non vincolati in testa e vibroinfissi in terreni limo-sabbiosi saturi. Dapprima si mostra la metodologia di monitoraggio dei pali e la tecnica di messa in opera degli strumenti (estensimetri, accelerometri e trasduttori di pressione), poi si descrivono le prove dinamiche a forzante orizzontale eseguite utilizzando diversi sistemi di eccitazione applicati in testa al palo. L'obiettivo è indagare il complesso fenomeno dell'interazione dinamica palo-terreno-palo, sia nel caso di pali singoli che di pali in gruppo e di ottenere dati sperimentali da confrontare con i risultati di analisi numeriche o di metodi semplificati per valutarne la capacità previsionale.

### **Inquadramento del sito e pali prova**

Il campo prove è collocato all'interno del porto turistico Mirabello a La Spezia (Figura 1.a), dove è in corso di realizzazione un'importante struttura a mare, fondata su pali metallici vibro-infissi, che si articola in 1 molo principale di lunghezza 450.30 m, 2 moli secondari di lunghezza 204 m e 8 moli di attracco di lunghezze variabili fra 91 m e 110 m. La sovrastruttura dei moli è caratterizzata da un grigliato di travi in c.a.p. prefabbricate a sostegno di un solaio in c.c.a. realizzato in opera con lastre tralicciate tipo predalles (Figura 1.b). Il molo principale è fondato su 215 pali di diametro 914 mm, spessore 12 mm e lunghezza di 42 m; i moli secondari su 147 pali di diametro 914 mm, spessore 12 mm e lunghezza di 42 m mentre i moli di attracco su 138 pali di diametro 762 mm, spessore 11 mm e lunghezza 30 m.

La stratigrafia dei terreni nell'area in oggetto è stata dedotta da 4 campagne di indagine geognostiche ed è caratterizzata dalla presenza di materiali di ambiente marino, in genere limi, sabbie fini e argille, nei primi metri, e da depositi a maggior componente terrigena, costituiti da argille consolidate, limi e sabbie, più in profondità. In Figura 2 è riportata una sezione stratigrafica e una sintesi dei parametri geotecnici caratteristici.

Il campo prove è stato realizzato nell'area indicata in Figura 1.a ed è costituito da 3 pali metallici vibro-infissi: P1, P2 e P3, di caratteristiche geometriche indicate in Figura 3.



*Figura 1. a) Vista planimetrica del porto turistico Mirabello a La Spezia: campo prove. b) Particolare costruttivo della struttura dei moli.*

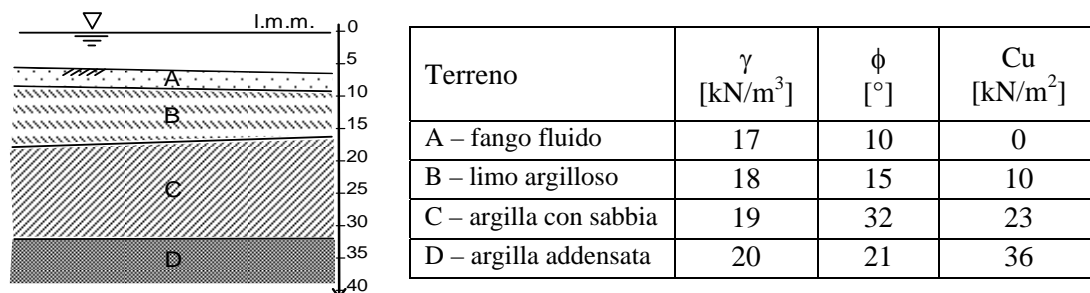


Figura 2. Sezione stratigrafica e tabella di sintesi dei parametri geotecnici caratteristici

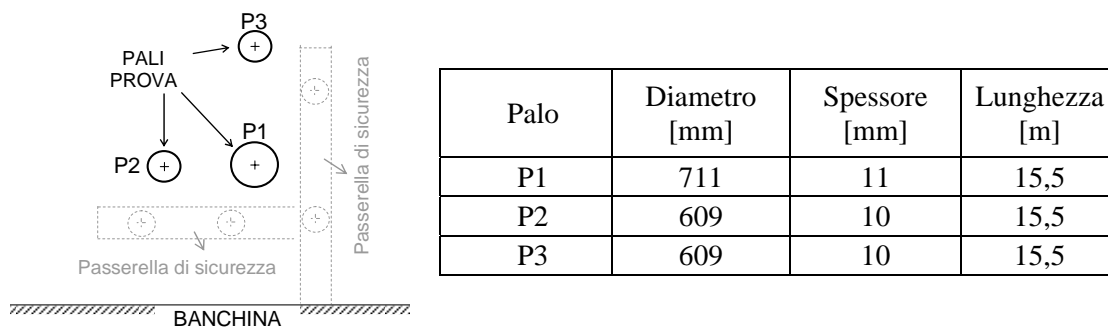


Figura 3. Configurazione in pianta dei pali di prova e tabella di sintesi delle caratteristiche geometriche dei pali

L'approfondimento dei pali nel terreno è di circa 10,5 m mentre l'elevazione della testa del palo è di circa 1,5 m dal livello medio del mare. I pali non sono vincolati in testa e sono disposti in pianta secondo, uno schema, ad "L", in cui l'interasse tra il palo P1 e il palo P2 è di 1,8 m (circa 3 diametri) mentre tra il palo P1 e il palo P3 è di 3,2 m (circa 5 diametri). La disposizione ad "L" permette di rilevare contemporaneamente la risposta di un palo sollecitato in testa, palo sorgente, e di due pali riceventi, uno disposto lungo la direzione di applicazione della forzante e l'altro perpendicolarmente. Il differente interasse tra i pali, invece, consente di valutare il complesso fenomeno della propagazione ondosa al variare della distanza dalla sorgente.

### Strumentazione e tipologia di prova

Allo scopo di studiare il fenomeno dell'interazione dinamica palo-terreno nel caso di palo singolo e di pali in gruppo, sono state eseguite tre tipologie di prove dinamiche con forzante orizzontale in testa al palo, caratterizzate da un diverso sistema di eccitazione: prove a segnale impulsivo, a segnale armonico a frequenza costante e armonico a frequenza variabile (sweep). Due sono le tipologie di strumenti utilizzate per il monitoraggio dei pali: estensimetri (Figura 4.a) ed accelerometri, mentre per il rilievo delle pressioni interstiziali nel terreno vicino al palo si sono adoperati dei trasduttori di pressione (Figura 4.b). Il palo P1 è stato strumentato con (Figura 4.c):

- 11 estensimetri, lungo una generatrice principale, con passo di 1 m nel tratto finale e un passo più raffittito, di 0,5 m, nel tratto iniziale;
- 8 estensimetri, lungo 2 generatrici secondarie poste a 120° rispetto alla generatrice principale, con passo di 1 m;
- 2 celle di pressione collocate a 9 m sotto il livello medio del mare lungo le generatrici secondarie;
- 1 accelerometro in testa posizionato opportunamente, a seconda della prova in atto, lungo la direzione X o lungo la direzione Y.

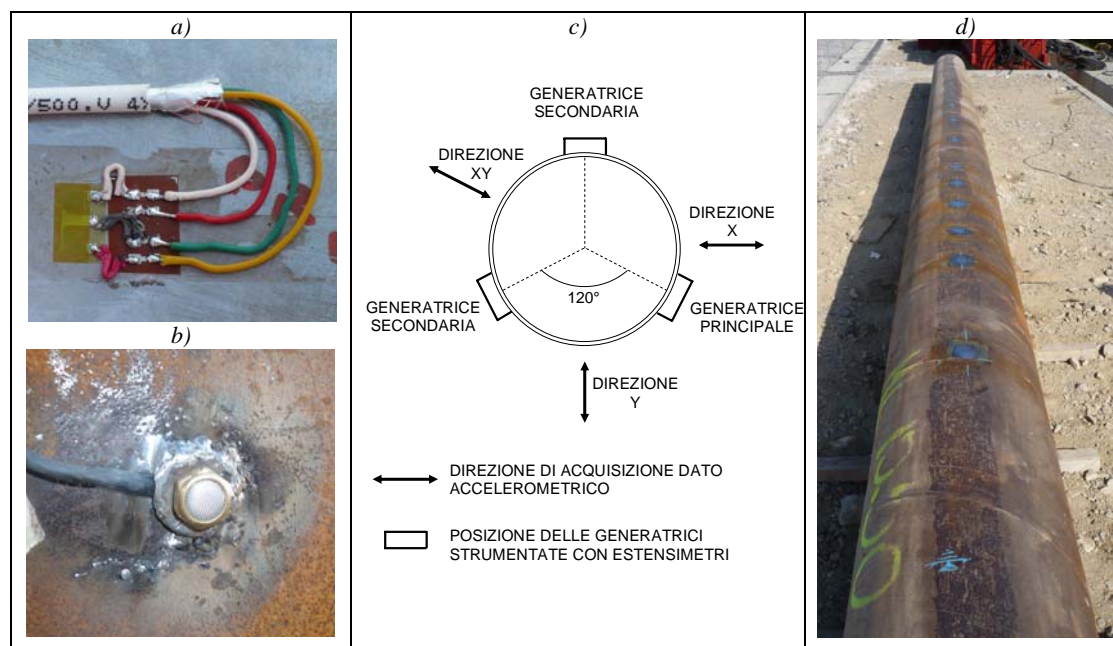


Figura 4. a) Estensimetro. b) Trasduttore di pressione. c) Schema in pianta delle generatrici strumentate con estensimetri e delle direzioni di acquisizione delle storie di accelerazione. d) Posizione degli estensimetri lungo la generatrice principale.

La posizione degli estensimetri lungo il palo (Figura 4.d) è stata suggerita dai risultati di analisi numeriche preventive, eseguite sia con modelli agli elementi finiti 3D che secondo la metodologia presentata in Dezi et al. (2009b), che hanno evidenziato l'andamento degli spostamenti attesi, istante per istante, lungo il palo.

Sia i cavi che gli estensimetri installati sono stati dapprima impermeabilizzati e riparati dall'aggressività dell'ambiente marino e poi adeguatamente protetti per evitarne il danneggiamento durante la fase di messa in opera.

I pali P2 e P3 sono stati invece strumentati con un accelerometro in testa opportunamente posizionato prima di ogni prova, lungo la direzione X o lungo la direzione Y.

Per imprimere la forzante di tipo impulsivo si è utilizzato un martello strumentato, dotato di un set di 4 punte di diversa durezza, mentre per la forzante di tipo armonico si è utilizzato un vibratore idraulico.

Si sono valutate diverse configurazioni di prova a seconda che l'eccitazione fosse assegnata in testa al palo P1, P2 o P3 e che fosse lungo la direzione X o lungo la direzione Y.

In tutte le configurazioni la catena di misura è stata poi completata da un PC per l'acquisizione dei segnali estensimetrici, da amplificatori e/o condizionatori di segnale e da un analizzatore di spettro per l'elaborazione e la memorizzazione dei segnali accelerometrici. Sia la metodologia di monitoraggio dei pali che la tecnica non standard di messa in opera degli strumenti si sono dimostrate efficaci nonostante l'aggressività dell'ambiente marino e la criticità della fase di vibro-infissione.

### Prove a segnale impulsivo

Questa tipologia di prova è piuttosto comune nella sperimentazione dinamica sia perché è facile da eseguire sia perché dà la possibilità di indagare un'ampia fascia di frequenze con poche battute di martello e brevi acquisizioni (di qualche secondo).

Si sono considerate 6 diverse configurazioni di prova al variare della direzione in cui si dà il colpo di martello in testa al palo P1 e della direzione in cui sono posizionati gli accelerometri nei pali P1, P2 e P3 (Figura 5). Per ogni configurazione si è impartito un set di 10 colpi,

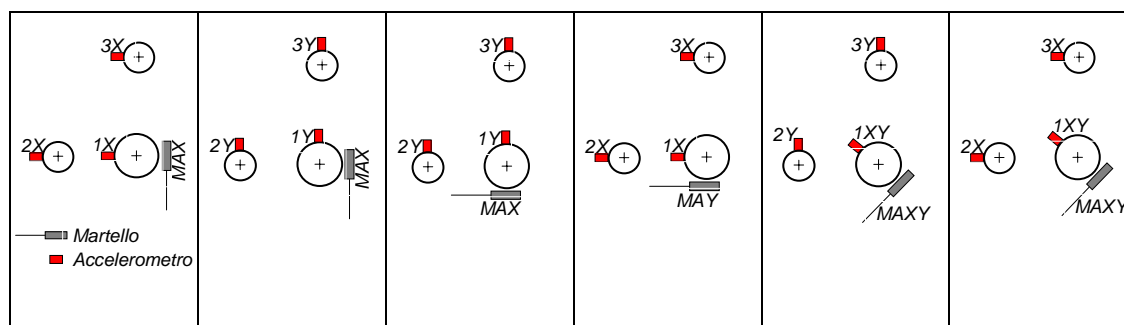


Figura 5 Configurazioni di prova a segnale impulsivo: MAX/MAY/MAXY è la direzione della forzante; X/Y è la direzione di registrazione degli accelerometri

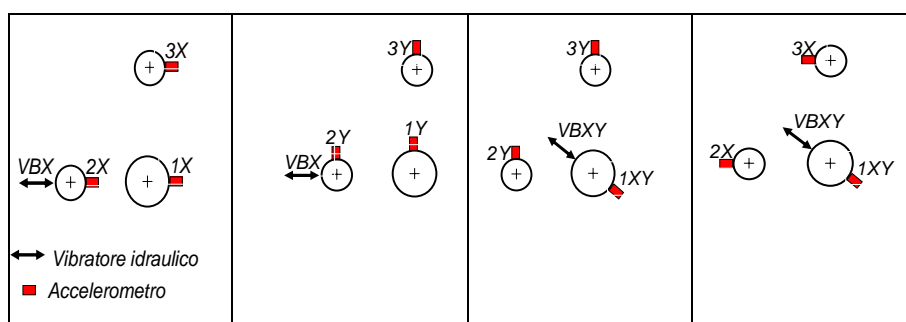


Figura 6 Configurazioni di prova a segnale armonico: VB2X/VB1XY è la direzione della forzante; X/Y/XY è la direzione di registrazione degli accelerometri

perpendicolari alla generatrice del palo, e per ogni colpo si sono registrate rispettivamente la storia temporale della forzante, dell'accelerazione in testa ai pali e delle deformazioni lungo il palo P1. Le 6 configurazioni sono state ripetute utilizzando punte di diverse durezza per il martello così da generare diversi impatti in termini di contenuto in frequenza e ampiezza. Per questa tipologia di prova si è utilizzato un martello con massa di 5.5 kg in grado di produrre una forza impulsiva massima di circa 5 kN ed uno spettro costante nel range di frequenze da 0 a 200 Hz. L'obiettivo è l'individuazione delle frequenze proprie e dello smorzamento del sistema palo-terreno in campo lineare e la ricostruzione delle forme modali del palo P1.

#### Prove a segnale armonico costante

Le prove con eccitazione sinusoidale a frequenza costante sono state eseguite considerando 4 configurazioni di prova al variare della posizione dell'eccitazione in testa ai pali e della direzione in cui sono posizionati gli accelerometri nei pali P1, P2 e P3 (Figura 6).

Per ogni configurazione si è impartito un segnale armonico costante di frequenza pari a circa 7 Hz che, secondo le analisi numeriche preventive e alcune prove preliminari, risulta essere la frequenza propria del sistema. Si sono registrate rispettivamente le storie temporali della forzante, dell'accelerazione in testa ai pali e delle deformazioni lungo il palo P1.

Le 4 configurazioni sono state utilizzate per eseguire:

- 1 acquisizione di durata 20 sec e frequenza di campionamento di 10000 Hz,
- 10 acquisizioni di durata 2 sec e frequenza di campionamento di 10000 Hz.

#### Prove a segnale armonico a frequenza variabile

Le prove con eccitazione sinusoidale a frequenza variabile sono state eseguite considerando le stesse configurazioni di prova utilizzate per le prove a segnale armonico costante (Figura 6).

Per ogni configurazione si è impartito un segnale armonico la cui frequenza varia linearmente con il tempo, con una prefissata velocità, tra circa 3 Hz e 16 Hz.

Uno degli obiettivi di questa prova è l'individuazione della presenza di eventuali non linearità che può avvenire grazie al confronto dei risultati con quelli ottenuti dalle prove a segnale impulsivo.

### **Conclusioni e sviluppo della ricerca**

Una campagna di prove in vera grandezza è stata realizzata all'interno del porto turistico Mirabello di La Spezia.

Dapprima è stata validata una modalità per strumentare i pali vibroinfissi in ambiente marino che ha dato risultati soddisfacenti.

Poi si è valutata la risposta di un sistema costituito da 3 pali vibroinfissi, in termini di accelerazione e deformazioni lungo il palo, impartendo diverse tipologie di forzante orizzontale in testa al palo. La ricerca proseguirà dunque con la rielaborazione dei dati sperimentali, al fine di caratterizzare dinamicamente il sistema e di creare una banca dati completa.

I dati sperimentali verranno poi confrontati con i risultati di analisi numeriche e analisi semplificate. L'obiettivo sarà un avanzamento nelle conoscenze dei fenomeni dell'interazione dinamica palo-terreno per il palo singolo e i pali in gruppo e un tentativo di validare metodi di progetto semplici e al tempo stesso affidabili.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano l'Impresa Piacentini Costruzioni di Modena che ha finanziato e reso possibile l'intera sperimentazione. Ringraziano inoltre l'ing. Santolini Claudio per aver collaborato attivamente alla sperimentazione.

### **Bibliografia**

- Brown, D., Morrison, C., and Reese, L. (1988). "Lateral Load Behavior of a Pile Group in Sand," *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 114(11), 1261-1276.
- Brown, D., Reese, L., and O'Neill, M. (1987). "Cyclic Lateral Loading of a Large Scale Pile Group," *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 113(11), 1326-1343.
- Dezi F., Carbonari S., Leoni G. (2009a). "Kinematic bending moments in pile foundations". Subjected to: *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*.
- Dezi F, Carbonari S, Leoni G. (2009b) "A model for the 3D kinematic interaction analysis of pile groups in layered soils". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38 (11), 1281-1305.
- Dobry R, O'Rourke MJ. (1983). Discussion on "Seismic response of end-bearing piles" by Flores Berrones R. and Whitman R.V. *Journ. Geotech. Engng. Div. ASCE*; 109(5), 778-781.
- Maiorano, R.M.S., De Sanctis L., Aversa S., and Mandolini A. (2009). "Kinematic response analysis of piled foundation under seismic excitation". *Canadian Geotechnical Journal*, 46(5), 571-584
- Matlock, H., Ingram, W., Kelley, A., and Bogard, D. (1980). "Field Tests of the Lateral Load Behavior of Pile Groups in Soft Clay," *Proc. 12th Offshore Technology Conf.*, OTC 3871, Houston, Vol. 4, 163-174.
- Nikolaou AS, Mylonakis G, Gazetas G, Tazoh T. (2001). "Kinematic pile bending during earthquakes analysis and field measurements". *Géotechnique*; 51(5), 425-440.
- Reese, L., Cox, W., and Koop, F. (1975). "Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay," *Proc. 7th Offshore Technology Conf.*, OTC 2312, Houston, Vol. 2, 671-690.
- Wolf, J. P., (1987). "Dynamic Soil-structure Interaction". *Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ*.