

EXPO 2015 A MILANO – COSTRUZIONE DELLA “PIASTRA” PROVE CASE E PROVE DI CARICO SU PALI DA FONDAZIONE



1. PREMESSA

Di seguito vengono illustrate le prove di carico dinamiche e statiche eseguite sui pali da fondazione realizzati per la costruzione della “Piastra” afferente al sito per l’esposizione universale del 2015 a Milano.

I pali in esame sono del tipo CCFA (a elica continua rivestita) e presentano le seguenti caratteristiche:

- diametro 500mm e 880 mm;
- lunghezza variabile tra 12 m (per i pali da 500) e 15 - 16 m (per i pali da 880);
- carico limite 850 kN (per i pali da 500) e 3075-3300 kN (per i pali da 880).

2. PROVE DINAMICHE METODO “CASE”

2.1. DESCRIZIONE DEL METODO

La prova CASE consiste nel sollecitare la testa del palo tramite l'utilizzo di un maglio di peso adeguato in caduta libera da varie altezze e, nel rilevare la forza immessa (mediante accelerometri) e le deformazioni assiali (mediante estensimetri resistivi) indotte nella testa del palo. Nella figura 1 è riportato lo schema d’esecuzione della prova.

Nel metodo CASE il terreno è schematizzato come un mezzo visco-plastico in grado di generare una resistenza dinamica totale “ R_{tot} ” che può essere intesa come somma di una resistenza totale statica “ R_{stat} ” e di una viscosa “ R_d ”.

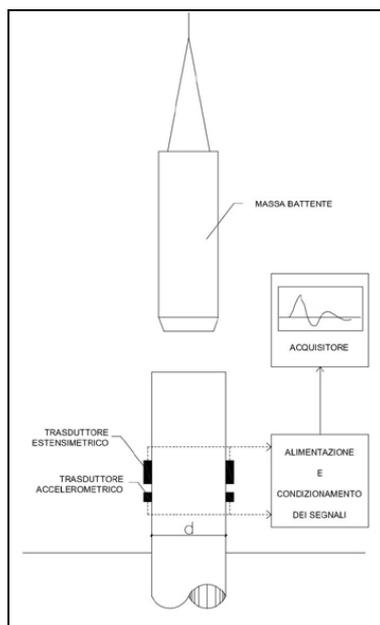


Figura 1: schema operativo di esecuzione della prova.

La componente viscosa ha questa espressione:

$$R_d(t) = J_c \cdot Z_p \cdot v_p(t)$$

dove:

- J_c = costante di smorzamento viscoso del metodo "Case" che dipende dal tipo di terreno;
- Z_p = impedenza del palo;
- $v_p(t)$ = velocità al piede del palo.

La fonte di maggiore incertezza nel metodo riguarda la definizione del coefficiente di smorzamento J_c che richiede una approfondita correlazione sperimentale ricavata da prove di carico statiche effettuate successivamente all'esecuzione della prova dinamica.

La resistenza dinamica totale ha questa forma:

$$R_{tot}(t) = \frac{1}{2} \left[F(t) + F\left(t + \frac{2L}{c}\right) \right] + \frac{1}{2} Z_p \left[v(t) - v\left(t + \frac{2L}{c}\right) \right]$$

dove:

- t = tempo al quale la resistenza del sistema è massima;
- L = lunghezza del palo;
- $F(t)$ = forza trasmessa;
- $v(t)$ = velocità particellare all'interno del palo;
- c = velocità di trasmissione delle onde meccaniche;
- $Z_p = EA/c$.

La resistenza statica si ottiene quindi sottraendo la resistenza viscosa alla resistenza totale dinamica:

$$R_{stat}(t) = R_{tot}(t) - R_d(t)$$

Esprimendo la velocità al piede del palo " $v_p(t)$ " in funzione della velocità misurata alla testa del palo " $v(t)$ ", la resistenza statica può essere espressa nella forma seguente:

$$R_{statica}(t) = (1 - J_c) \cdot \frac{F(t) + Z_p \cdot v(t)}{2} + (1 + J_c) \cdot \frac{F\left(t + \frac{2L}{c}\right) - Z_p \cdot v\left(t + \frac{2L}{c}\right)}{2}$$

2.2. STRUMENTAZIONE

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione della prova comprende:

- n°2 sensori accelerometrici piezoresistivi ad elevata frequenza di risonanza (per potersi adattare agli elevati livelli di accelerazione indotti nel palo).
- n°2 sensori estensimetrici;
- n°2 unità radio di trasmissione;
- n°1 unità di acquisizione dati tipo Pile Driving Analyzer, modello PAX.

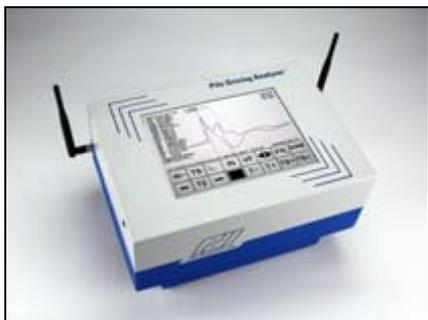


Figura 2: unità di acquisizione.

2.3. MODALITÀ OPERATIVE

Per l'esecuzione della prova CASE viene usualmente richiesto all'impresa, la realizzazione di un dado in calcestruzzo armato gettato in opera sopra la testa del palo delle dimensioni che variano a seconda del diametro del palo. Le sue funzioni sono molteplici e vengono di seguito elencate:

- creare una superficie di appoggio per il maglio;
- evitare di danneggiare la testa del palo;
- evitare di dover scavare eccessivamente intorno al palo per raggiungere la profondità necessaria per l'installazione dei sensori (pali di grande diametro, presenza di falda).

Per permettere infatti all'onda di forza di distribuirsi uniformemente su tutta la sezione del palo, i sensori devono distare normalmente circa 1÷1,5 volte il diametro del palo dal punto di battuta.

Dopo aver pulito accuratamente e reso piana la zona del palo interessata dal posizionamento degli strumenti, in modo da esporre una superficie del calcestruzzo sufficientemente liscia, si applicano sulla testa del palo due gruppi estensimetrici a strain-gauge in due zone diametralmente opposte per compensare

eventuali fenomeni di flessione del fusto del palo e atti a rilevare la forza incidente della massa battente e quella reagente del sistema palo – terreno e due trasduttori accelerometrici per la misura della velocità di spostamento della testa del palo sottoposta all'impulso.



Figura 3: dado realizzato sulla testa del palo sopra il quale viene poggiato e successivamente fissato il maglio.

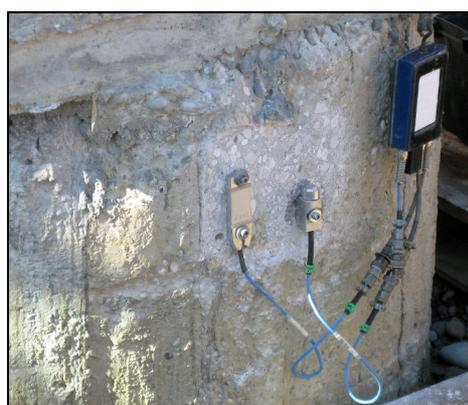


Figura 4: estensimetro (a sinistra), accelerometro (al centro) e dispositivo per la trasmissione radio (a destra). I sensori sono fissati alla testa del palo dopo aver accuratamente pulito e reso piana la superficie del palo.

La massa battente, destinata a trasmettere l'impulso alla testa del palo, è costituita da un grave di peso sufficiente a trasmettere un'energia in grado di mobilitare la capacità portante ricercata.

Per sollecitare i pali è stato utilizzato un maglio del peso di circa 5 tonnellate.

Tale massa viene rilasciata più volte in caduta libera sulla testa del palo da diverse altezze e, ad ogni impulso, vengono acquisiti i dati rilevati dai sensori. Gli accelerometri e gli estensimetri consentono di determinare l'evoluzione della velocità e della forza nel tempo in corrispondenza della testa del palo.

Nella figura 5 sono riportati due diagrammi caratteristici della prova dinamica utilizzati per la sua interpretazione, i quali rappresentano l'andamento delle forze nel tempo misurate con i due sensori e l'andamento delle stesse suddivise in funzione del verso (discendente o ascendente).

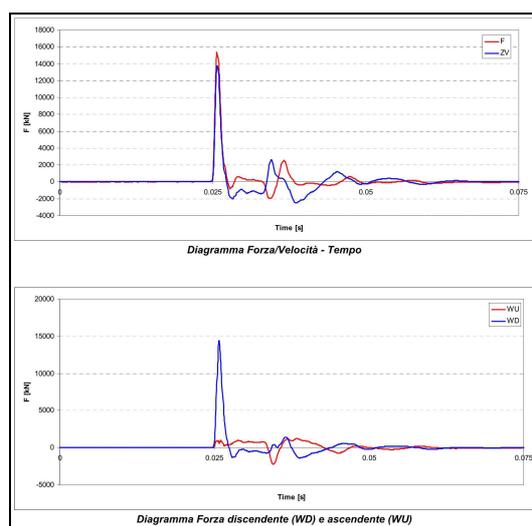


Figura 5: i diagrammi caratteristici della prova dinamica con l'andamento delle forze nel tempo e il loro andamento in funzione del verso.

2.4. COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO

In assenza di un riscontro diretto, i valori del coefficiente di smorzamento possono essere ricavati dalla letteratura in funzione del tipo di terreno.

Di seguito è presentata una tabella che riassume i valori attribuibili secondo le diverse categorie di terreno.

Tipologia di terreno	J_c
Sabbia	0÷0.15
Sabbia limosa	0.15÷0.25
Limo argilloso	0.30÷0.70
Argilla	0.90÷1.20

2.5. IL METODO CAPWAP

Per ovviare all'indeterminazione del coefficiente di smorzamento è stato sviluppato un modello matematico che descrive il sistema palo-terreno con il quale è possibile effettuare una simulazione consentendo di ottenere: la ripartizione della resistenza del terreno nelle sue componenti di capacità portante per attrito laterale e di punta, il parametro di smorzamento dell'insieme palo-terreno (componente viscosa) e la simulazione della curva carico-cedimento in condizioni statiche. Tale metodo è denominato CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program).

CAPWAP esegue i calcoli discretizzando il palo in una serie di segmenti omogenei; un palo che sia caratterizzato da materiali differenti o che abbia un'area trasversale variabile è quindi rappresentato da segmenti aventi valori di impedenza e di lunghezza del segmento differenti.

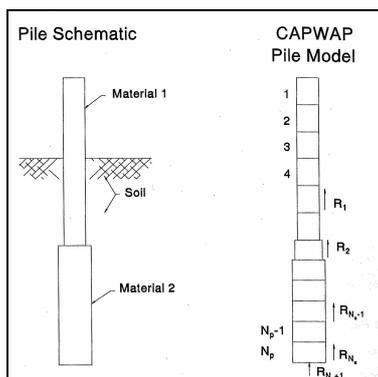


Figura 6: il modello del palo

Per quanto riguarda il terreno viene adottato un modello elasto-plastico viscoso (rappresentato idealmente da una molla elasto-plastica ed uno smorzatore lineare) caratterizzato da tre parametri agenti sull'elemento i -esimo del palo:

- Resistenza ultima R_{u_i} ;
- Deformazione elastica massima q_i ;
- Fattore di smorzamento viscoso J_i .

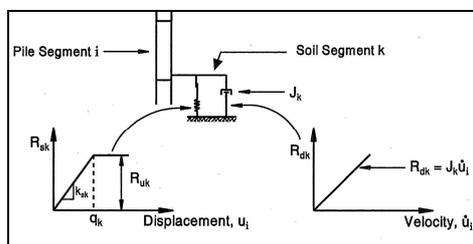


Figura 7: il modello di terreno adottato.

3. PROVE STATICHE

Nello stesso cantiere sono state eseguite anche delle prove di carico statiche sui alcuni dei pali sui quali erano state eseguite precedentemente le prove dinamiche, consentendo una verifica dei risultati ottenuti.

I carichi sono stati applicati per mezzo di cilindri idraulici interposti tra la testa del palo ed un sistema di contrasto (figura 8) realizzato con blocchi di cemento (figura 9). Le misure degli

abbassamenti del palo sono state effettuate per mezzo di tre comparatori elettronici centesimali disposti a 120° in modo da permettere il controllo di eventuali rotazioni della testa del palo.



Figura 8: particolare dei cilindri idraulici e dei comparatori elettronici impiegati per la misura degli abbassamenti.



Figura 9: struttura di contrasto realizzata in blocchi di cemento utilizzata per l'esecuzione della prova di carico statica.

4. CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI

A titolo di esempio si riportano i risultati delle prove eseguite su uno dei pali avente diametro di 880 mm e lunghezza del fusto pari a 16 m.

La prova di carico statica è stata condotta secondo due cicli di carico-scarico raggiungendo dapprima il carico di esercizio di 220 t e successivamente il carico di collaudo di 330 t (pari a 1,5 volte quello di esercizio), il tutto attraverso un numero adeguato di step. Il

cedimento misurato in corrispondenza del carico di collaudo è risultato pari a 2,26 mm con un cedimento residuo allo scarico di 0,70 mm (il grafico della prova è rappresentato dalla curva blu di figura 10).

La prova CASE effettuata sullo stesso palo ha fornito, mediante elaborazione con CAPWAP, un valore del carico limite in regime elastico di 7143 kN. Nella figura 11 è riportato il report risultante dell'elaborazione con CAPWAP nel quale vengono riassunti i seguenti grafici: confronto tra la forza misurata nel tempo e quella calcolata, l'andamento nel tempo della forza e della velocità misurata, quindi la curva carico-cedimenti simulata e infine il grafico con la distribuzione della resistenza laterale suddivisa per ogni elemento di palo, dal quale è possibile evincere la resistenza totale in funzione della profondità.

Al fine di comparare i risultati delle due tipologie di prova, nel grafico di figura 10, oltre

alla curva carichi-cedimenti della prova di carico statica (blu), è riportata quella dinamica (rossa) ottenuta per simulazione utilizzando il metodo CAPWAP. Da tale confronto si può notare come le due prove forniscano risultati concordanti validando così l'impiego della prova CASE con elaborazione CAPWAP per la verifica della portata dei pali da fondazione.

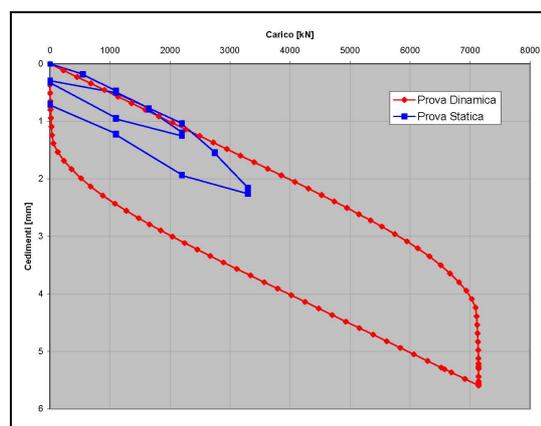


Figura 10: sovrapposizione del grafico della prova statica con quello ottenuto dalla prova dinamica.

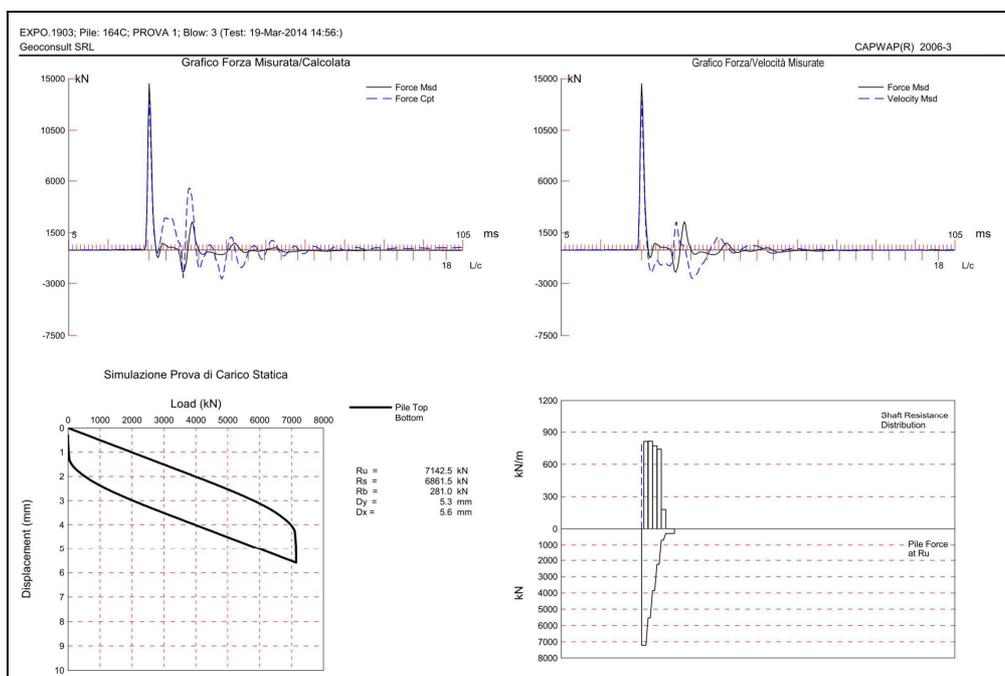


Figura 11: esempio di report di analisi tramite l'utilizzo del software CAPWAP.