



LA PROVA DI CARICO SU PALI CON MODALITA' DINAMICA METODO CASE

**Thomas Pavan
Settimo Martinello**

4 EMME Service S.p.A.

Sommario

L'evoluzione e la diffusione delle tecniche di realizzazione dei pali di fondazione richiede nello stesso tempo un miglioramento qualitativo e quantitativo delle verifiche del comportamento di queste opere in condizioni di esercizio e di stato limite ultimo.

A seguito di esperienze approfondite, in particolare presso la Case Western Reserve University, su metodi dinamici per il controllo non distruttivo delle fondazioni, si è iniziato ad affiancare alla tradizionale prova di carico statica questa metodologia di indagine dinamica denominata "Metodo Case". Metodo, definito come prova dinamica ad alta deformazione, che conformemente alle norme americane ASTM, sostituisce negli Stati Uniti l'uso della prova statica ed è oggi applicabile anche in Italia sulla base del Testo Unico 2008. Il software interpretativo, CAPWAP, che costituisce il modello palo-terreno, è standardizzato attraverso l'Eurocodice 7.

I punti di forza di questa metodologia sono, oltre la velocità e l'economicità di esecuzione, la possibilità di conoscere l'andamento delle resistenze lungo il fusto del palo e la capacità portante allo stato limite ultimo.

La presente memoria sintetizza la dimostrazione scientifica alla base della metodologia e ne indica le modalità operative di esecuzione.

1. INTRODUZIONE

Il Metodo Case si prefigge di determinare la portata statica assiale dei pali di fondazione mediante la conoscenza di forza e velocità indotte da un sistema di sollecitazione impulsivo.

La prova consiste nel sollecitare il palo con una forza assiale, generata da una massa in caduta libera, rilevando l'andamento della deformazione e dell'accelerazione indotta alla testa del palo.

Questo metodo scaturisce dall'idea di poter determinare la portata statica di pali battuti durante la loro infissione. In questa tipologia di palo, infatti, si creano alterazioni nel terreno tali da farne cambiare le caratteristiche meccaniche nelle superfici di contatto palo-terreno e di conseguenza una continua variazione della portata statica finale durante la battitura.

I primi approcci, datati 1961, non avevano portato risultati soddisfacenti a causa del ridotto numero di variabili utilizzate per la caratterizzazione dell'intero sistema. Inoltre le potenzialità dell'informatica del tempo avevano rallentato la creazione di modelli matematici sufficientemente complessi.

Negli anni successivi fu condotto un programma molto esteso dal *Michigan Highway Department* e successivamente dalla *Case Western Reserve University* in cui vennero misurate ed analizzate forza e velocità durante la battitura dei pali. Fu quindi sviluppato un programma di analisi dei parametri contenuti nelle equazioni di propagazione delle onde nel suolo chiamato *CAPWAP* "*Case Pile Wave Analysis Program*".

Il confronto e la verifica tra i risultati di portata ottenuti con questo metodo e quelli rilevati sperimentalmente hanno permesso di affermare che il *CAPWAP* è un modello di analisi matematica estremamente realistico della distribuzione della resistenza ai carichi assiali lungo il fusto del palo.

2. CENNI TEORICI AL MODELLO MATEMATICO CAPWAP

CAPWAP è un sistema di modellazione numerica che suddivide il palo in una sequenza di segmenti finiti delle medesime proprietà.

Quando un palo è sollecitato con un impulso assiale, un'onda meccanica parte dal punto di applicazione e si propaga lungo il fusto. Finché non sono registrate onde riflesse nel punto di applicazione della sollecitazione, la forza indotta nel manufatto è proporzionale alla velocità di movimento delle particelle e può essere riassunta dalla relazione:

$$v(t) = \frac{c}{EA} F(t) \quad (1)$$

Dove:

v = velocità delle particelle nella sola direzione assiale;

c = velocità di propagazione delle onde meccaniche;

F = forza di compressione nel punto in considerazione;

E = modulo elastico del materiale;

A = area della sezione del palo.

Conoscendo la densità ρ del materiale con cui è realizzato il palo, la velocità c diventa:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

Nelle onde di compressione la velocità delle particelle è nella direzione di propagazione (verso il basso) e convenzionalmente sono indicate con il segno positivo. Nelle onde di tensione la velocità delle particelle ha direzione opposta e quindi ha segno negativo. Un'onda di compressione indotta sulla testa di un palo libero, e con una trascurabile resistenza interna al materiale, presenta le stesse caratteristiche di ampiezza e forma in qualsiasi sezione del palo, inoltre si può affermare che le caratteristiche dell'onda sono solo in funzione del tempo e non della loro posizione lungo il fusto del palo.

Indicando con F_c e F_t rispettivamente la forza di compressione e la forza di trazione dovuta al passaggio dell'onda meccanica si ottiene:

$$F_c(t) = \frac{EA}{c} v_c(t) \quad \text{e} \quad F_t(t) = -\frac{EA}{c} v_t(t) \quad (3)$$

Il palo di lunghezza L , analizzato come materiale omogeneo, anisotropo e libero sul fondo, oppone una resistenza caratteristica Z , chiamata impedenza, al passaggio delle onde meccaniche, che è espressa dalla relazione:

$$Z = \frac{EA}{c}$$

da cui

$$F_c(t) = Z \cdot v_c(t) \quad \text{e} \quad F_t(t) = -Z \cdot v_t(t) \quad (4)$$

Nel caso di palo con resistenza nulla in punta, l'onda meccanica indotta sulla testa dal colpo inferto dal maglio arriva sul fondo ed è riflessa mantenendo la stessa intensità ma segno opposto. Nel caso contrario, di palo con resistenza in punta, la forza riflessa posseduta dalle particelle ha la stessa intensità e mantiene lo stesso segno. In questo modo, la sovrapposizione delle onde riflesse con quelle indotte dal maglio, porta ad avere una forza sulla testa del palo di intensità doppia.

Prendendo in considerazione un palo con lunghezza finita, conoscendo le caratteristiche del materiale e formulando alcune ipotesi sulle resistenze che entrano in gioco durante il passaggio delle onde, si può affermare che la resistenza totale alla penetrazione del palo è pari a ^[1]:

$$R(t^*) = \frac{1}{2} \left[F_m(t^*) + F_m\left(t^* + \frac{2L}{c}\right) \right] + \frac{Mc}{2L} \left[v_m(t^*) - v_m\left(t^* + \frac{2L}{c}\right) \right] \quad (5)$$

Dove:

F_m = forza verticale misurata dagli strumenti all'istante t^* ;

v_m = velocità delle particelle misurata sperimentalmente;

M = massa del palo;

c = velocità di propagazione delle onde (velocità del suono nel materiale).

Questa relazione deriva dalle ipotesi di palo con sezione costante ed uniforme realizzato con materiale perfettamente elastico ed omogeneo con presenza di un solo impulso assiale senza alcuna altra componente nelle altre direzioni dello spazio.

La resistenza totale espressa dalla formula (5) non è un modello sufficientemente rappresentativo della realtà poiché presenta significative restrizioni sulla resistenza offerta dal terreno dovuta all'attrito laterale e di conseguenza sulla reale capacità statica.

Si procede quindi alla suddivisione della resistenza totale alla penetrazione del palo nel terreno in due componenti: una componente statica (R_s) ed una componente dinamica (R_d), con la relazione:

$$R_t = R_s + R_d$$

La resistenza totale si può calcolare dalla relazione (5) e una volta determinata R_d , si potrà conoscere R_s , resistenza statica del palo.

Allo scopo si assume che la resistenza dinamica sia una funzione lineare della velocità in fondo al palo v_t :

$$R_d = J \cdot v_t$$

Tutto questo a meno di un fattore J che rappresenta la costante di smorzamento viscoso che, per il calcolo nel modello numerico, si ipotizza concentrata sul fondo del palo. Tale costante può essere espressa in funzione di Z ed attraverso una costante di smorzamento adimensionale J_c si ottiene la relazione:

$$J_c = \frac{J \cdot c}{EA} \quad \text{ovvero} \quad J_c = \frac{J}{Z}$$

Partendo dall'espressione (5) che esprime la resistenza totale alla penetrazione e sottraendo il contributo dinamico R_d calcolato utilizzando la velocità rilevata sul fondo del palo v_t e la costante J_c , si ricava l'equazione che permette di calcolare la portata statica del palo R_s , ovvero la relazione ottenuta come risultato del metodo Case.

$$R_s(t_m) = \frac{1}{2}(1 - J_c) \left[F(t_m) + \frac{Mc}{L} v_t(t_m) \right] + \frac{1}{2}(1 + J_c) \left[F\left(t_m + \frac{2L}{c}\right) - \frac{Mc}{L} v_t\left(t_m + \frac{2L}{c}\right) \right] \quad (6)$$

Nell'equazione t^* è sostituito da t_m che rappresenta l'istante temporale di massima forza misurata dagli strumenti installati sulla testa del palo.

Una considerazione importante, nella correlazione tra la portata statica e la resistenza dinamica del palo, va fatta sulle caratteristiche del suolo nel quale è immerso il palo. Nel modello matematico possiamo infatti inserire tutti i valori per il calcolo ricavandoli dalle misure eseguite in campo, tutti a meno di J_c . In letteratura sono presenti diverse tabelle che indicano possibili valori di J_c in funzione della tipologia di terreno.

A seguito si riporta una tabella con il range di valori ricavati sperimentalmente e nella colonna di destra è espresso il valore che statisticamente ha portato alla migliore approssimazione della capacità statica del palo.

Costante J_c		
Tipo di terreno	Range	Valore suggerito
Sabbia	0.05 ÷ 0.20	0.10
Sabbia - Limo	0.15 ÷ 0.30	0.20
Limo	0.20 ÷ 0.45	0.30
Limo – Argilla	0.40 ÷ 0.70	0.55
Argilla	0.70 ÷ 1.10	1.00

La possibilità di eseguire una prova di carico statica sullo stesso palo sul quale è eseguita una prova dinamica, permette di determinare con precisione il valore della costante di smorzamento J_c e quindi di fornire un valore di portata statica corrispondente a quella reale.

3. METODO CASE

Il metodo Case, conformemente alle *ASTM D4945-08* ^[2], è conosciuto come Prova Dinamica su palo ad alta deformazione ed è classificato come Monitoraggio Dinamico del Palo (*Dynamic Pile Monitoring*) o Prova di Carico Dinamica (*Dynamic Load Test*) a differenza delle prove ecometriche PIT o SIT le quali si identificano come prove dinamiche a basso contenuto di energia (*Low Strain Dynamic Test*).

La prova dinamica può essere eseguita in alternativa alla *Prova di progetto su pali pilota* che prevede un valore del carico non inferiore a 2,5 volte l'azione di progetto, come previsto nel NTU - DM 14.1.08 al punto 6.4.3.7.1 dove si specifica: “[...] Come prove di progetto possono essere eseguite prove dinamiche ad alto livello di deformazione, purché adeguatamente interpretate al fine di fornire indicazioni comparabili con quelle derivanti da una corrispondente prova di carico statica di progetto.

Mentre per quanto riguarda le *Prove di verifica in corso d'opera* che prevedono un carico assiale pari a 1,5 volte l'azione di progetto ed un numero di prove non inferiore ad 1 se il numero di pali è inferiore a 20, 2 prove per un numero di pali tra 21 e 50 al punto 6.4.3.7.2 si specifica: “[...] Il numero di prove di carico di verifica può essere ridotto se sono eseguite prove di carico dinamiche, da tarare con quelle statiche di progetto, e siano effettuati controlli non distruttivi su almeno il 50% dei pali.

Questo tipo di prova, dall'esperienza negli Stati Uniti, si esegue sollecitando la testa del palo con un carico assiale pari a 1,0 ÷ 1,5% del carico di prova da una altezza di 1 yard (91 cm). Aumentando l'altezza di caduta, ad esempio a 120 cm, si potrà diminuire proporzionalmente



l'entità della massa battente. Non è consigliato aumentare ulteriormente l'altezza di caduta in quanto la maggiore velocità di impatto rende difficile la corretta lettura dei valori di accelerazione sulla testa del palo.

La massa viene lasciata cadere sulla testa del palo da diverse altezze, a passi crescenti di 20 cm, fino al raggiungimento dell'energia necessaria a far entrare in gioco tutte le resistenze del sistema palo-terreno o, in caso di verifica, al raggiungimento di una forza di impatto pari al carico di collaudo corrispondente a 1,5 volte l'azione di progetto.

Il rilievo della deformazione e della velocità di propagazione dell'onda di compressione, avviene strumentando la testa del palo con 2 o 4 coppie di sensori costituite da un estensimetro ed un accelerometro ciascuna (il numero dei sensori varia in funzione del diametro). Gli strumenti vengono posizionati ad una distanza dalla testa di almeno 1,5 volte il diametro del palo e questo per garantire che la deformazione misurata superficialmente sia uniformemente distribuita sulla sezione di misura.

Gli estensimetri e gli accelerometri comunicano con l'unità di acquisizione, e con una prima elaborazione semplificata, in tempo reale, fornisce tutta una serie di risposte che consentono di gestire l'avanzamento della prova fino al raggiungimento del carico voluto.

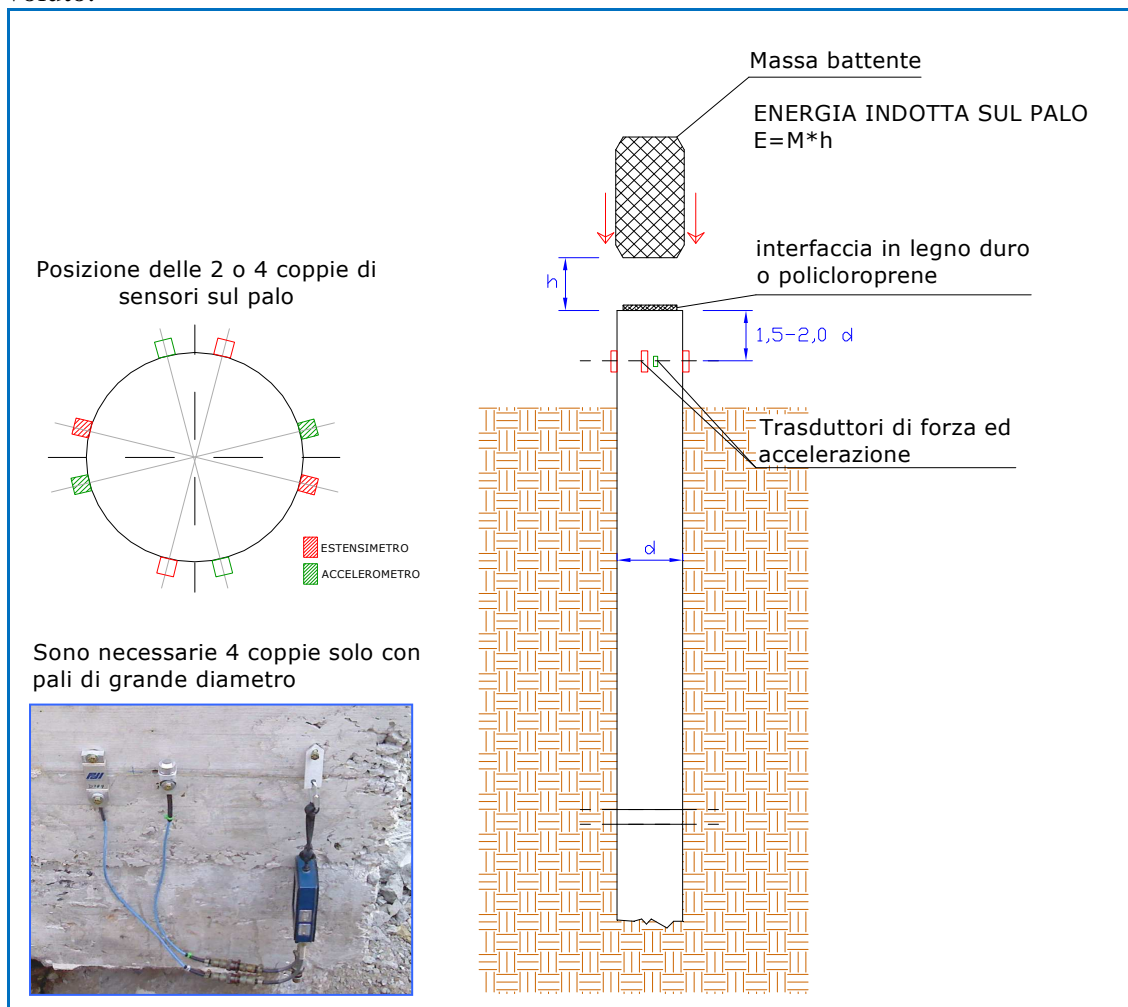


Fig. 1 Schema della prova Case

Nel caso di esecuzione di una prova che voglia provocare sperimentalmente il carico allo stato limite ultimo, è necessario che dopo l'impatto il palo presenti una penetrazione permanente. L'entità di questa penetrazione deve essere compresa tra 2 e 5 mm.

La misura di questo effetto avviene utilizzando un raggio laser che incide su una mira posta sulla testa del palo indicandone l'abbassamento. La prova pertanto consiste nell'individuare l'altezza di caduta che determina la situazione di rottura dell'aderenza palo terreno.

Una sollecitazione dinamica limitata può causare l'assorbimento dell'energia meccanica delle particelle in moto verso il fondo del palo da parte delle resistenze lungo il fusto e quindi non riuscirebbe a far lavorare completamente il palo fino in punta.

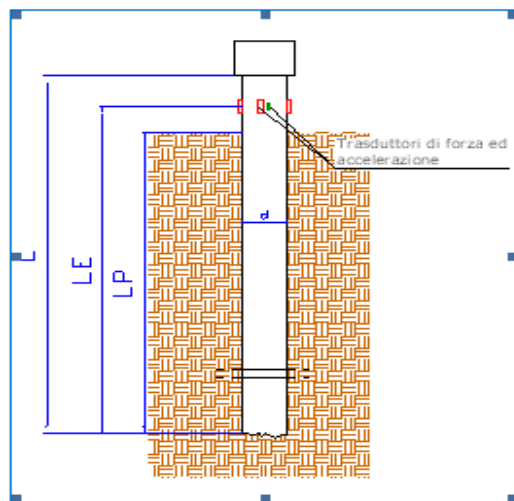
Anche un impatto irregolare della massa di sollecitazione sulla testa del palo, dovuto ad un difettoso allineamento dell'asse di caduta con l'asse del palo, rende poco interpretabili i dati acquisiti. E' pertanto indispensabile provvedere ad un metodo di applicazione dell'impulso preciso ed efficiente.

Per l'elaborazione dei segnali è necessario conoscere tutta una serie di parametri geometrici e meccanici del palo:

- A = area;
- L_E = lunghezza del palo ai sensori;
- L_p = lunghezza del palo nel terreno;
- E = modulo elastico del materiale palo;
- c = velocità di propagazione delle onde;
- J_c = costante di smorzamento;
- E_r = energia di caduta ($E_r = M_p \cdot h$).

Di questi parametri alcuni sono noti o facilmente rilevabili, altri sono da ricavare sperimentalmente.

Un parametro molto significativo è la velocità c di propagazione delle onde di compressione. La misura di questa caratteristica del materiale può essere effettuata tramite due sonde soniche, una emettitrice ed una ricevente, poste diametralmente alla testa del palo. Il tempo di passaggio del segnale, rilevato con precisione dallo strumento sonico, permette di ricavare la velocità conoscendo il diametro. Meglio ancora se la velocità viene rilevata attraverso l'uso del *SIT* (*Sonic Integrity Test*) o *PIT* (*Pile Integrity Test*), strumenti di valutazione dell'integrità del palo che sfruttano l'impulso provocato da un martello sulla testa. In questo caso si misura il tempo di attraversamento lungo l'asse e conoscendo la lunghezza si ricaverà la velocità di propagazione dell'onda. Ovviamente questo sistema, che fornisce un dato lungo lo stesso percorso che seguirà la propagazione delle onde col metodo Case, parte dal presupposto di conoscere la lunghezza del palo.



Per quanto riguarda il modulo elastico questo può essere assunto attraverso delle misure sclerometriche che forniscono una stima della resistenza meccanica a compressione R_{cm} dal cui valore si potrà calcolare E attraverso la relazione di normativa:

$$E = 22000 \cdot (R_{cm}/10)^{0,3} \text{ [MPa]} .$$

Una informazione che è possibile e necessario valutare in prima analisi dagli andamenti della deformazione e della accelerazione della testa del palo durante l'impulso provocato dall'impatto della massa, è la presenza di eventuali difetti lungo il fusto. Infatti, una volta applicata la sollecitazione assiale, le onde di compressione arrivano sul fondo del palo dove vengono riflesse e tornano in superficie facendo registrare ai sensori, posti in testa al palo, un picco di velocità.

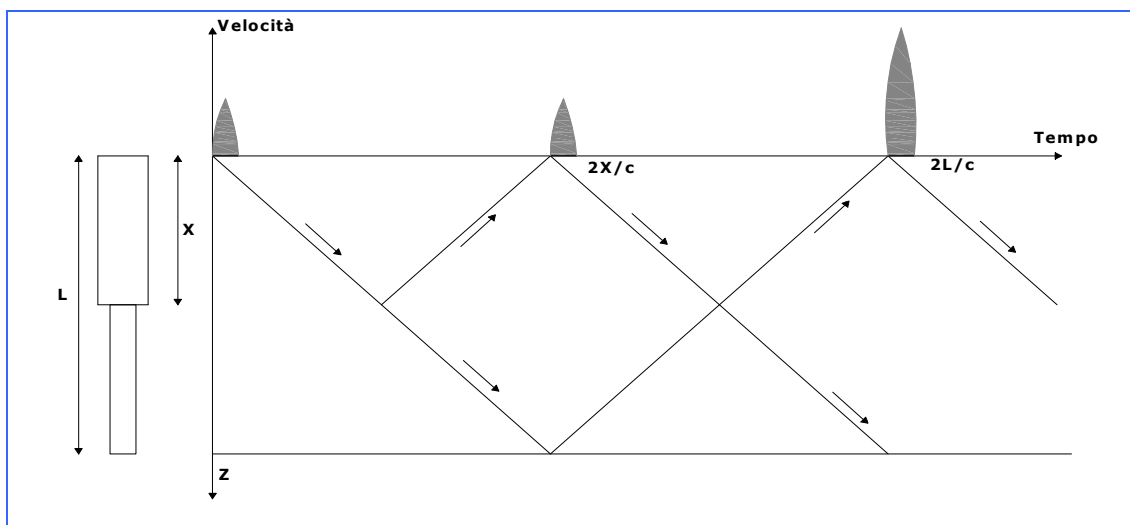


Fig. 2 Esempio di riflessione dell'onda dovuto ad un difetto

Durante i vari colpi, l'unità di acquisizione *PDA (Pile Driving Analyzer)* memorizza, con uno scansionamento di 10 kHz, l'andamento della deformazione ed accelerazione sulla testa del palo. L'elaborazione in tempo reale permette di visualizzare i diagrammi di forza (deformazione x area) e velocità (integrazione dell'accelerazione) nel dominio del tempo. In questo modo è possibile calcolare gli sforzi di compressione e tensione lungo il fusto e capire se il carico applicato è sufficiente o se è necessario incrementare l'energia di sollecitazione, aumentando l'altezza di caduta. Infatti, uno dei parametri di output che è necessario visualizzare in linea è la *quantità di energia* effettivamente trasmessa dal sistema di sollecitazione al palo e da questa il rapporto tra l'energia potenziale E_r e l'energia ricevuta dal palo, forza \times spostamento massimo, quest'ultimo ricavato da una doppia integrazione dell'andamento dell'accelerazione.

4. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati di forza e velocità derivati dalle misurazioni eseguite in sito, rappresentato nei diagrammi dalla linea continua, sono confrontati con quelli calcolati attraverso l'analisi con *CAPWAP*, rappresentati dalla linea tratteggiata. In sostanza la lunghezza del palo viene discretizzata in varie sezioni, generalmente di 1 m, e ad ognuna di queste è applicato un valore iniziale di J_c , costante di smorzamento, che il programma

provvede a variare autonomamente fino a raggiungere, attraverso continui tentativi di massima approssimazione, la migliore aderenza tra andamento teorico e andamento reale.

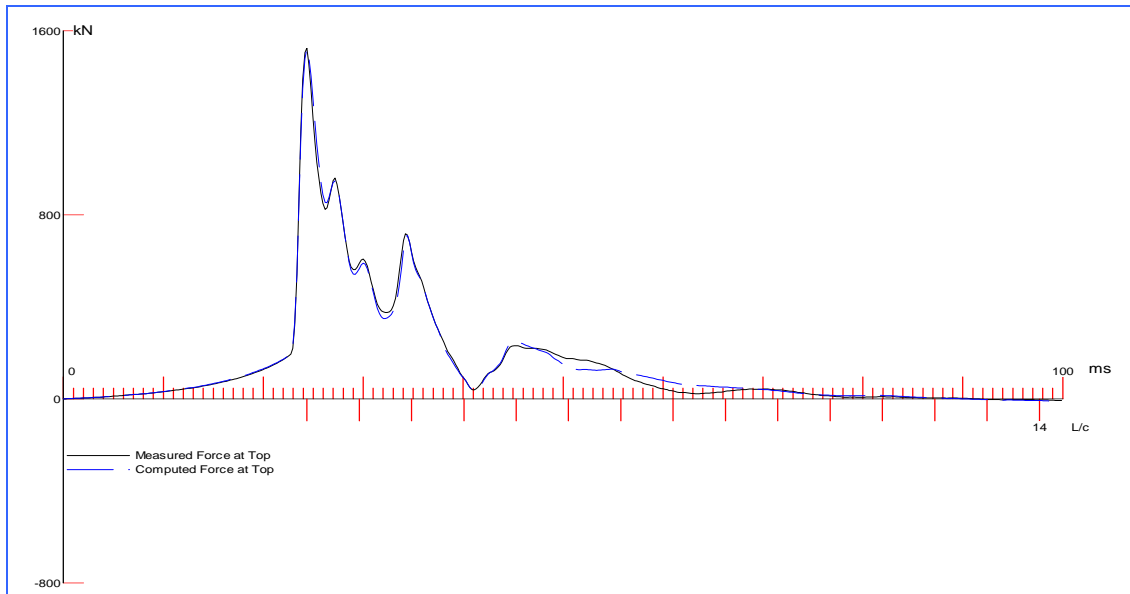


Fig. 3 Diagramma forza - tempo

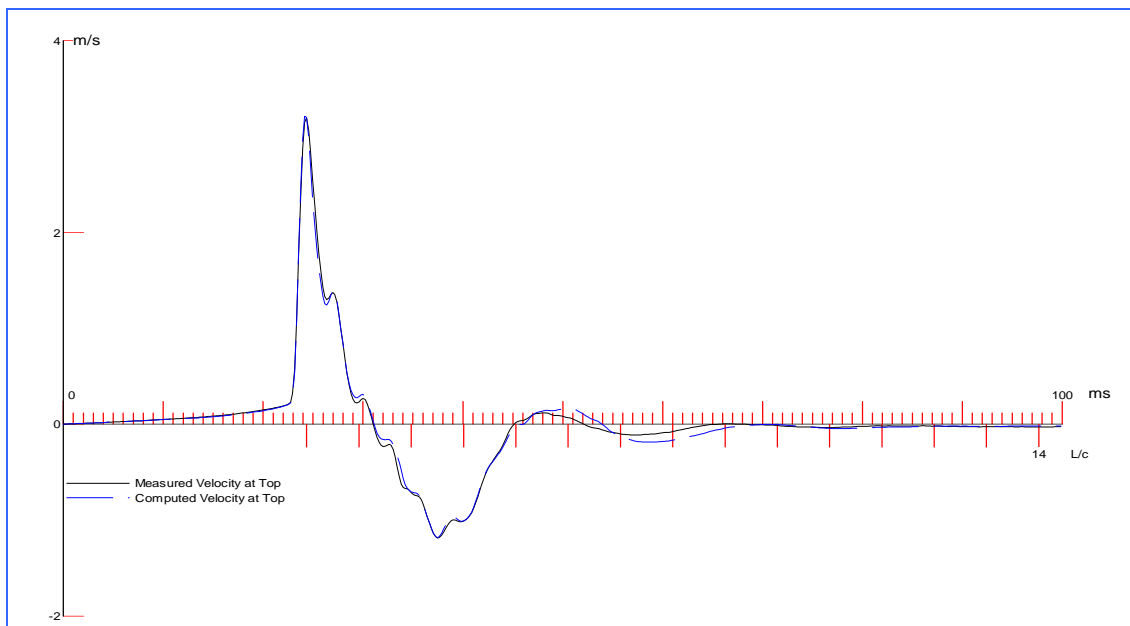


Fig. 4 Diagramma velocità - tempo

Il processo di calibrazione permette di schematizzare oltre al palo anche il terreno come un insieme di elementi finiti a contatto con il fusto. In questa schematizzazione è entrato in gioco il fattore che rende reale il sistema simulato dal modello numerico. Questa variabile tiene conto della massa di terreno in contatto con il fusto che contribuisce alla resistenza alla penetrazione nel terreno.

Tale massa è collegata direttamente all'area dell'interfaccia palo-terreno e di conseguenza al diametro del palo ^[3] .

Nel diagramma a seguito possiamo osservare la distribuzione delle resistenze lungo il fusto durante l'esecuzione della prova. Nell'esempio il palo ha 20 m di lunghezza ed è stato sollecitato con un carico di $F_{MX} = 1.600$ kN.

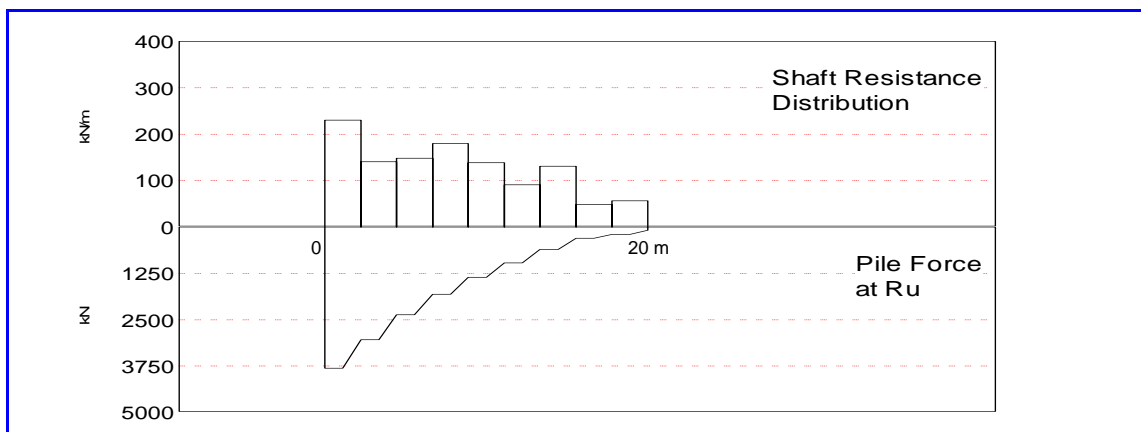


Fig. 5 Distribuzione della resistenza lungo il palo

Una volta che il modello palo-terreno è stato calibrato è possibile ottenere le estrapolazioni necessarie a calcolare le resistenze statiche ultime. I grafici a seguito ne mostrano l'andamento lungo il palo sezione per sezione.

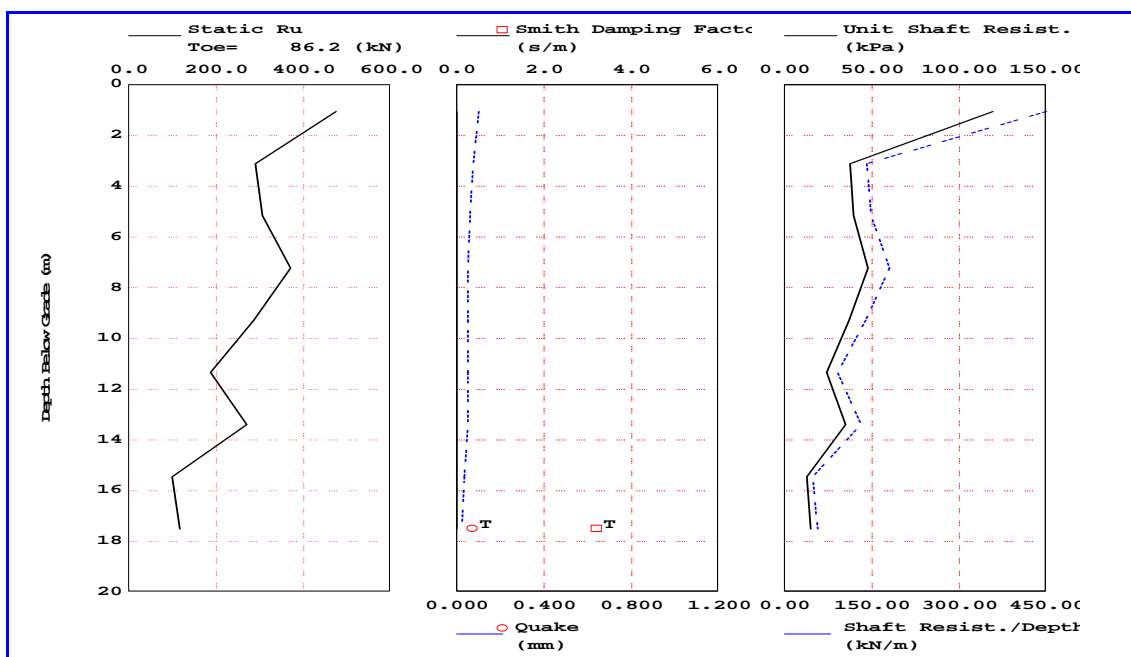


Fig. 6 Andamento della resistenza in funzione della profondità

Di seguito è presentata la curva di isteresi della resistenza portando il palo fino allo stato limite ultimo calcolato in $R_u = 3.573$ kN con una componente statica $R_s = 3.319$ kN e con un contributo in punta $R_b = 254$ kN.

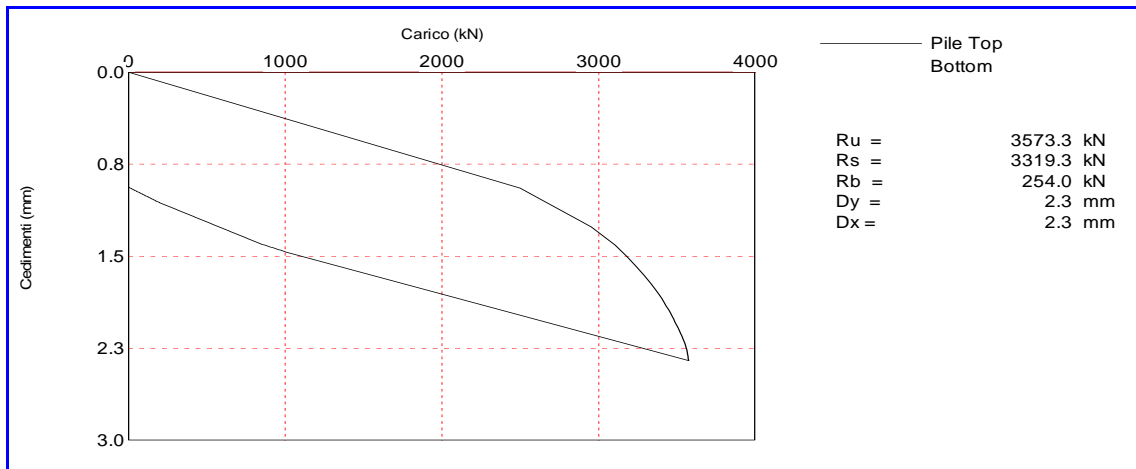


Fig. 7 Diagramma carico - cedimento

Diverse sperimentazioni sono state eseguite su pali confrontando i risultati delle prove statiche con quelle del metodo Case^{[4][5]}.

Nel grafico è confrontato il risultato ottenuto attraverso il modello matematico CAPWAP rispetto a quello ottenuto da una prova di carico statica eseguita sul medesimo palo. I valori di resistenza e spostamento calcolati, indicati dalla linea continua, sono molto aderenti al reale andamento ottenuto durante la prova statica.

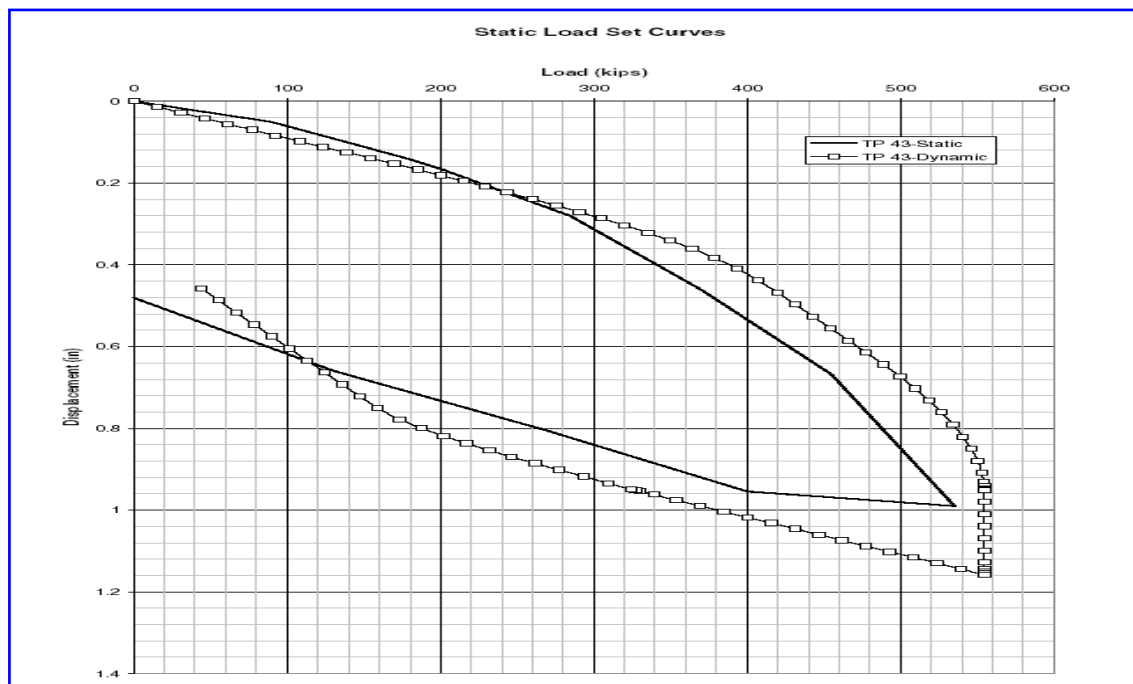


Fig. 8 Confronto dei diagrammi carico - cedimento

Il Metodo Case, attraverso il programma di elaborazione CAPWAP, fornisce, quando la forza applicata in prova è analoga al carico di esercizio, una stima della resistenza ultima con una confidenza, rispetto ai risultati di una prova statica, nell'ordine del 10%.

5. PROCESSO ESECUTIVO DELLA PROVA CASE

Si riporta a seguito una schematizzazione delle operazioni necessarie all'esecuzione della prova Case ^[6] ^[7].

- Preparazione del palo creando sulla testa una superficie piana dove poter applicare la sollecitazione attraverso la caduta della massa (consigliata la cerchiatura della prima parte di palo per evitare fessurazioni al momento dell'impatto); può essere sovrapposto un dado in cls che garantisce la distribuzione uniforme della forza applicata.
- Preparazione di due superfici spianate di dimensioni 20x20 cm, diametralmente opposte, ad una distanza dalla testa palo, o del dado, di almeno 1,5 volte il diametro.
- Stima della resistenza del calcestruzzo mediante l'uso di uno sclerometro con battute effettuate sulle superfici spianate.
- Installazione di una coppia di sensori (accelerometri ed estensimetri).
- Configurazione dell'unità di acquisizione (PDA) inserendo i parametri geometrici e meccanici del palo.
- Esecuzione di una serie di impulsi con altezza progressiva di caduta della massa, generalmente con variazioni crescenti di 20 cm, tenendo sotto controllo i parametri di energia trasmessa, di spostamento impresso e di forza applicata, fino a raggiungere il carico di prova.
- Analisi in campo dei segnali acquisiti mediante il software di PDA Curves con il quale è possibile evidenziare la presenza di anomalie o difetti sul palo.
- Creazione, attraverso il sistema di modellazione matematica CAPWAP, di un modello numerico palo-terreno facendo corrispondere i segnali registrati in sito con quelli ottenuti analiticamente.
- Elaborazione dei dati con restituzione dei risultati di resistenza dinamica e statica del palo completi di diagrammi carico-cedimenti.



6. CONCLUSIONI

Il Metodo Case rappresenta un innovativo ed efficace sistema di indagine su elementi di fondazione profonda per la verifica della capacità portante in esercizio e la valutazione (e volendo anche applicazione) della portata limite ultima. I numerosi studi fatti sia in Europa sia negli Stati Uniti, di cui c'è ampia bibliografia (www.bibliografias.cias.it), hanno dimostrato che il modello matematico alla base del CAPWAP fornisce un'ottima simulazione dell'andamento delle tensioni e resistenze lungo il palo e quindi una affidabile valutazione della capacità statica del palo.

La facile possibilità di spingere la prova fino allo stato limite permette una valutazione certa della capacità portante.

Il valore di resistenza alla penetrazione si fa tanto più reale quanto più preciso è il grado di conoscenza del terreno nel quale è immerso il palo. Una taratura del modello palo-terreno a seguito dei risultati ottenuti da almeno una prova statica e successiva prova dinamica ne garantisce un elevato livello di precisione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “*Dinamic determination of pile capacity*” - Frank Rausche ,George G. Globe, Garland E. Linkis - Journal of Geotechnical Engineering, vol. 111, No3, (March 1985).
- [2] “*Standardization and Codification of Dynamic Pile Testing*” – Rausche F., Beim J., Gravace C.J.,Klingmuller O., De-Qing L. – Seventh International Conference & Exhibition on Pile and Deep Foundations - Vienna Austria (1998).
- [3] “*Design and performance of dynamic tests of large diameter drilled shafts*” - Rausche F., Seidel J. – Second International Conference of the Application of Stress-Wave Theory on Piles – Stoccolma Svezia (1984).
- [4] “*Correlation of CAPWAP with Static Load Tests*” – Likins G. E, Rausche F. – Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of th Stresswave Theory to Piles - Petaling Jaya Malaysia (2004).
- [5] “*Dynamic Pile Analysis Using CAPWAP and Multiple Sensors*” Alvarez C., Zuckerman B., Lemke J., ASCE GEO Congress: Atlanta, Georgia (2006).
- [6] “*CAPWAP manual*”- Globe Rausche Likins and Associates Inc. – Cleveland Ohio (1995).
- [7] “*The analysis of Pile Driving – A State-of-the-Art*” – Globe G.G.,Rausche F., Likins G.E. – Proceeding of the International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles - Stoccolma Svezia (1980).