

## 2. Prova di carico dinamica – Metodo Case

### 2.1 Premessa

I primi studi documentati sulla propagazione delle onde di compressione all'interno del calcestruzzo nelle opere di fondazione risalgono alla metà del 1900. I test hanno dimostrato come la velocità sia funzione della densità, del modulo elastico, della qualità e dell'integrità del profilo di fondazione. Gli studi successivi hanno portato, nel 1964, alla creazione del "Case-Globe Method" (nome derivato dall'università "Case Western Reserve University"). Su queste basi è stato sviluppato un modello numerico di analisi CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) che utilizza i valori derivati da prove dinamiche ad alta deformazione per determinare la capacità portante del palo. Nel 1972 il prof. George Globe e i suoi collaboratori hanno sviluppato ulteriormente il modello di analisi CAPWAP, sviluppando un'unità d'acquisizione denominata "PDA" (Pile Driving Analyzer) che consente di elaborare in tempo reale i dati dei sensori posti a misura della deformazione e della velocità di compressione.

Inizialmente il metodo è stato sviluppato per testare pali battuti così da poter avere, già in fase d'infissione, una valutazione della portata finale del manufatto di fondazione. In seguito il metodo di prova è stato esteso anche alle altre tipologie di palo permettendo di individuare non solo la capacità portante ma anche la presenza di eventuali difetti del materiale e anomalie del profilo del palo.

### 2.2 Strumentazione

Il metodo Case permette di ricavare la capacità portante di un palo utilizzando i valori di deformazione e di accelerazione (trasformata in velocità) forniti da trasduttori installati sul palo durante l'applicazione di un carico impulsivo.

Allo scopo vengono installati una coppia di accelerometri ed una coppia di estensimetri (nel caso di pali di grande diametro e/o diaframmi vengono installati 4 sensori per tipo) direttamente sul fusto del palo ad una quota di circa 1,5 diametri dalla testa.

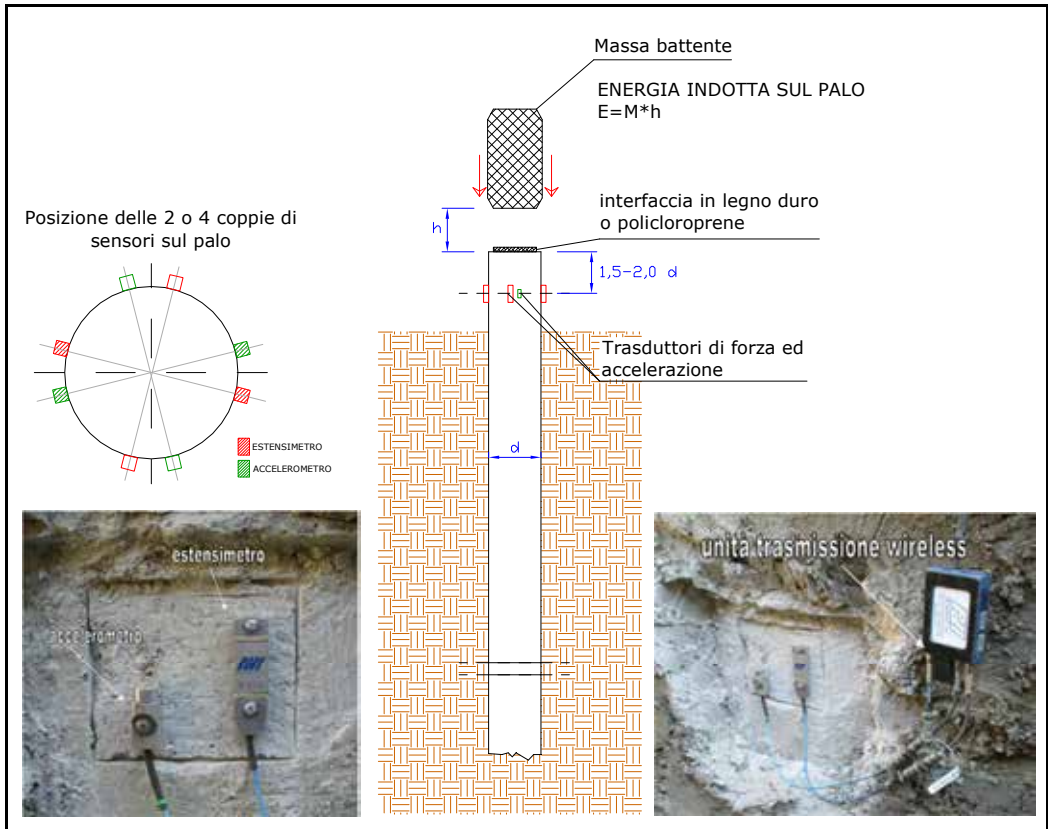
Per ottenere dei valori rappresentativi della risposta del palo al carico, è necessario che questi trasduttori vengano installati su una parte integra del palo e non sull'eventuale dado sovrapposto alla testa, che sarà utilizzato solamente per una migliore distribuzione del carico.



		<p><b>Trasduttore accelerometrico</b> <b>Sensore piezoelettrico</b> <b>Range di misura 1 ÷ 5.000 g</b></p> <p><b>Trasduttore estensimetrico</b> <b>Sensore resistivo composto da</b> <b>8 estensimetri a ½ ponte in serie</b></p>
Accelerometro	Estensimetro	

I trasduttori comunicano i dati, in modo wireless, all'unità di acquisizione PDA che consente di elaborare, in tempo reale, i valori di forza ed accelerazione (velocità) in funzione del tempo.

Lo schema a seguito riporta in sintesi la descrizione degli strumenti di prova, costituiti da un maglio elettromeccanico con massa battente ad altezze variabili, dagli strumenti di misura della forza applicata e della velocità di accorciamento del palo nel frangente dell'impatto.



È fondamentale utilizzare un maglio che consenta di:

- esercitare degli impulsi perfettamente in asse al palo e senza fenomeni di oscillazione della massa in fase di caduta;
- rilasciare la massa da altezze progressive, fino ad un massimo di 100 cm;
- utilizzare una massa che raggiunga almeno l'1% del carico di prova;
- interporre, tra la massa battente e il palo, un materiale con E di circa 10.000 MPa che consenta un'equa distribuzione del carico sulla superficie di impatto;
- effettuare tutte le operazioni di sollevamento e rilascio attraverso sistemi telecomandati, senza la necessità di operatori nelle vicinanze, in condizioni di massima sicurezza.

Gli estensimetri hanno la funzione di misurare la deformazione relativa della testa del palo. Da questa misura, attraverso il Modulo Elastico del materiale e la sezione del palo, si risale alla forza d'impatto. La deformazione incrementa fino a un valore massimo che si raggiunge quando tutta l'energia di caduta della massa è assorbita integralmente dal palo attraverso gli attriti palo - terreno e, eventualmente, anche di punta.

Gli accelerometri, attraverso l'integrazione del loro segnale, forniscono la velocità di accorciamento della testa del palo. L'accorciamento raggiunge il suo valore massimo quando l'energia d'impatto è completamente assorbita dal palo. Per farsi un'idea fisica si pensi che un palo di diametro 1.000 cm e lunghezza 20 m, sottoposto ad un impulso di 800 t, può raggiungere un accorciamento di 6 mm.

L'andamento dell'accorciamento del palo nel tempo è rappresentativo del modo in cui l'energia d'impatto è assorbita dal palo mano a mano che l'onda di compressione lo percorre dalla testa alla punta. In sostanza il suo andamento ripercorre proprio le variazioni di attrito palo-terreno nella sua lunghezza.

Da queste considerazioni si comprende come la prova Case possa fornire delle informazioni superiori a una prova di carico statica, in quanto, oltre al carico limite di portanza, fornisce anche l'andamento degli attriti lungo il palo permettendo una comprensione precisa del suo comportamento. Inoltre, delle variazioni repentine di accorciamento, sono indicative di difetti del palo nelle sue profondità, fatto che è immediatamente evidenziato dal sistema di elaborazione.

Durante la prova, oltre alle misure previste dalla metodologia, è monitorato anche il cedimento verticale del palo attraverso un livello ottico, o con raggio laser, e un riferimento fisso installato sul fusto del palo alla quota di posizionamento dei sensori.

Questo permette di avere la certezza, senza le elaborazioni matematiche prodotte dal sistema di acquisizione, di aver prodotto un abbassamento del palo tale da permettere di ricavare il limite ultimo di portata.

Sono a seguito riportati alcuni magli utilizzati per l'applicazione del carico.

M70	M200	M800	M1600
			
Carico max. prova 700 kN	Carico max. prova 2.000 kN	Carico max. prova 8.000 kN	Carico max. prova 16.000 kN

## 2.3 Metodologia di prova

Il metodo Case, conformemente alle ASTM D4945-08, 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). [1]

La prova consiste nel sollecitare il palo con una forza assiale generata da una massa, pari a circa 1,0 % del carico di prova, in caduta libera, rilevando l'andamento della deformazione e della velocità (ottenuta dall'integrazione del segnale accelerometrico) di compressione della testa del palo attraverso i trasduttori installati sul fusto del palo poco sotto al punto di impatto.

L'altezza di rilascio della massa è via via aumentata fino a raggiungere il carico desiderato. L'altezza massima è valutata in 1 m.

Va notato che aumentando l'altezza di caduta oltre 1 m, per ridurre l'entità della massa, si sviluppa una velocità d'impatto troppo elevata che induce sul palo delle forti vibrazioni tali da rendere inutilizzabili i valori registrati dai sensori. Tale aumento può inoltre danneggiare la testa del palo nel punto d'impatto creando microfessurazioni che fungerebbero da cuscinetto per le battute successive assorbendo, nella deformazione plastica, parte del carico.

L'operazione di rilascio della massa da altezze crescenti ha il fine di raggiungere gradualmente una sollecitazione sul palo pari all'equivalente del carico di prova voluto.

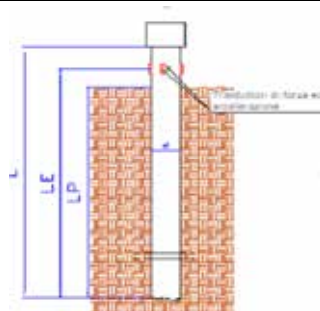
La prova si ritiene ben eseguita quando si raggiunge lo stato ultimo di resistenza che è indicato da un abbassamento permanente di circa 2-3 mm. Questo garantisce la sollecitazione di tutta la lunghezza del palo attraverso la rottura della coesione laterale dovuta all'attrito; condizione che si dovrebbe raggiungere per carichi oltre a 2,5 volte il carico di esercizio.

Se invece s'intende raggiungere solo una quota parte del carico ultimo, ad esempio il consueto 1,5 volte il carico di esercizio, sarà il sistema di elaborazione del modello palo-terreno, CAPWAP, che ricostruirà, per estrapolazione, lo stato ultimo, ma con una precisione teorica e non sperimentale.

Il carico massimo che si raggiunge durante una prova è legato alla necessità di mobilitare le interconnessioni laterali palo-terreno fino a mobilitare, se possibile, la resistenza di punta. Solo in questo modo i parametri registrati dai sensori consentono, durante il post processing, di ottenere attraverso CAPWAP, un modello ben rappresentativo e conseguentemente dei risultati molto attendibili.

Per l'elaborazione dei segnali derivanti dai trasduttori è necessario conoscere una serie di parametri geometrici e meccanici del palo che sono a seguito riportati.

- A** = area del palo alla quota dei sensori
- Le** = lunghezza del palo fino ai sensori
- Lp** = lunghezza della parte di palo nel terreno
- c** = velocità di propagazione delle onde
- E** = modulo elastico del materiale del palo
- Jc** = costante di smorzamento del terreno
- Er** = energia di caduta



Dei parametri menzionati **A**, **Le**, **Lp**, sono noti, **E** e **c** sono da ricavare sperimentalmente, **Jc** e **Er** vengono calcolati dal sistema di acquisizione in base all'andamento stesso della prova. Particolare cura va data alla determinazione della velocità di propagazione delle onde nel materiale e nella valutazione del Modulo Elastico.

Per la determinazione della Velocità di propagazione delle onde si possono intraprendere due strade:

- Misura del tempo di volo di un impulso prodotto da una apparecchiatura ultrasonica posizionando le sonde, in posizione diametralmente opposta, sulla testa del palo ed eseguendo una serie di misurazioni fino ad ottenere un valore medio rappresentativo del manufatto. La velocità è calcolata in funzione del diametro del palo.
- Misura della velocità mediante prova sonica SIT (Sonic Integrity Test), ovvero mediante una prova dinamica a bassa energia (Low Strain Dynamic Test), nella quale viene sfruttato l'impulso generato sulla testa del palo da un apposito martello e registrato da un accelerometro posto a contatto del palo che misura il tempo totale di rifrazione del segnale (vedasi Cap. 5).

Per quanto riguarda il Modulo Elastico si possono utilizzare delle misurazioni di Resistenza del materiale ottenute da battute sclerometriche, oppure utilizzare i valori di velocità ottenuti dall'indagine ultrasonica che consentono, attraverso delle correlazioni sperimentali, una stima attendibile.

In ogni caso, sia per le misure con sclerometro che con sonde ultrasoniche, è importante che sia scorticata la parte superficiale del palo, mediamente 3-5 cm, per garantirsi di raggiungere il cuore del materiale costituente il palo, che spesso, in superficie, presenta del materiale meno resistente.

La corretta determinazione sperimentale del Modulo Elastico consente di valutare il carico durante la prova. La relazione utilizzata per ricavare la forza istantanea è la seguente:

$$F_{mx} = E \cdot A \cdot \varepsilon$$

Dove:

- E = modulo elastico del materiale
- A = area del palo alla quota di installazione dei sensori
- $\varepsilon$  = deformazione ( $\Delta L/L$ ) misurata dai sensori estensimetrici

Va infine rilevato che se la forza applicata dall'impulso raggiunge la portata limite, producendo la rottura della coesione palo-terreno, gli eventuali impulsi successivi alla stessa altezza di caduta producono una reazione del palo, trasformata in forza misurata dagli estensimetri, che è inferiore al valore precedente. Sarà pertanto necessario interrompere la prova prendendo il valore massimo come carico limite ultimo.

### 2.4 Procedura di prova

Sono a seguito riassunte le principali fasi operative della prova.

- Preparazione della testa del palo creando una superficie perfettamente piana dove poter applicare la sollecitazione con la caduta della massa (per le prove a carico ultimo è consigliata la cerchiatura della prima parte di palo per evitare fessurazioni al momento dell'impatto); può essere sovrapposto un dado in calcestruzzo che



garantisca la distribuzione uniforme della forza applicata. È di fondamentale importanza la scapitozzatura della testa del palo fino alla rimozione del materiale di risalita del getto e/o del calcestruzzo con caratteristiche meccaniche decisamente inferiori al resto del manufatto. La mancata o parziale scapitozzatura della testa del palo produce, già dopo le prime battute, la probabile micro fessurazione nell'area del contatto che tende a falsare negativamente i risultati.

- Predisposizione delle superfici spianate, diametralmente opposte, a una distanza, rispetto alla testa del palo, di almeno 1,5 volte il diametro; le superfici devono avere dimensioni di circa 20x20 cm; la spianatura deve essere portata a una profondità di almeno 3-5 cm fino a garantire un contatto diretto con la sezione integra in calcestruzzo del palo.
- Installazione dei trasduttori accelerometrici ed estensimetrici sulle superfici spianate.
- Determinazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo mediante la misura della velocità di propagazione delle onde ultrasoniche attraverso il posizionamento delle sonde ultrasoniche in posizione diametralmente opposta, o, meglio ancora, attraverso una prova SIT (o PIT) che garantisce una misura che coinvolge l'intera lunghezza del palo.
- Posizionamento del maglio con opportuna massa, almeno 1% del carico di esercizio. L'operazione richiede particolare attenzione nella centratura e nella verticalità dell'asse d'impatto rispetto al fusto del palo.
- Configurazione dell'unità di acquisizione, PDA, inserendo i parametri geometrici e meccanici del palo.
- Esecuzione di una serie di battute con altezza progressiva di caduta della massa, tenendo sotto controllo i parametri di energia trasmessa, di accorciamento e di forza applicata, fino a raggiungere una sollecitazione sufficiente a garantire una corretta identificazione del modello palo-terreno. Preferibilmente almeno 2,5 volte il carico di esercizio o, minimamente, 1,5 volte il carico di esercizio.
- Analisi in campo dei segnali acquisiti mediante il software di acquisizione e visualizzazione PDA con il quale è possibile individuare la presenza di anomalie e/o eventuali difetti sul palo.
- Successivamente si procederà ad una elaborazione dei segnali acquisiti che consente quanto a seguito descritto.
- Creazione, la modellazione CAPWAP, di un modello numerico palo-terreno facendo corrispondere i segnali registrati in sito con quelli ottenuti analiticamente.
- Elaborazione dei dati con restituzione di resistenza dinamica e statica del palo completi di diagrammi carico cedimenti.



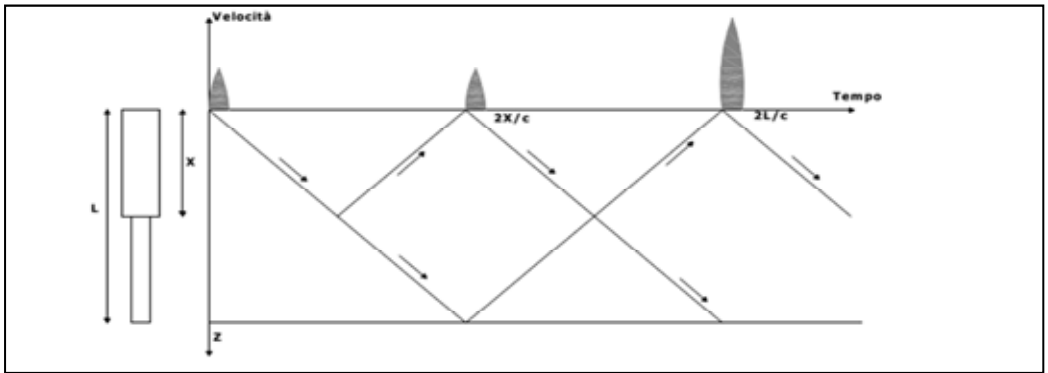
A seguito si riportano le principali informazioni sulle caratteristiche del palo che si ottengono, dall'esecuzione della prova, direttamente in cantiere.

### Presenza di difetti sul profilo del palo

A ogni singola battuta il programma memorizza, con frequenza di scansionamento di 10 KHz, l'andamento della deformazione e della velocità di accorciamento della testa del palo. L'elaborazione permette di visualizzare i diagrammi di forza e velocità nel dominio del tempo.

L'analisi di questi diagrammi consente di individuare la presenza di riflessioni anomale nelle onde che, dopo l'impatto, percorrono il palo fino al fondo e ritornano in superficie. Si possono quindi ottenere informazioni su eventuali riduzioni/aumenti di sezione, presenza di interruzioni o inclusioni nel getto, e anche le variazioni di impedenza (reciproco della resistenza) dovute alle variazioni nella stratigrafia del sito.

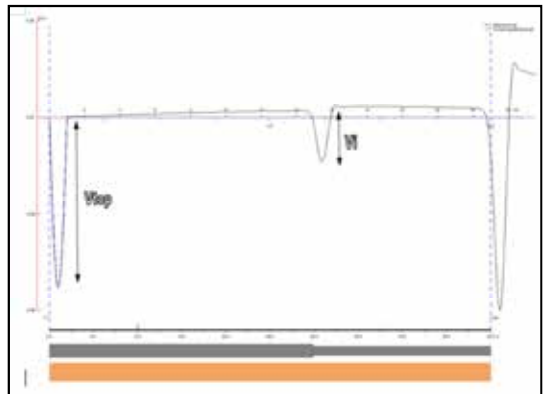
Si riporta lo schema di riflessione nel caso di una riduzione del diametro alla profondità  $X$ .



Al termine di ogni singola battuta si esegue l'analisi visiva dei diagrammi e si valuta la risposta del palo all'impulso applicato decidendo l'incremento di altezza di rilascio della massa sulla base del carico da raggiungere.

L'analisi dei risultati di ogni singola battuta porta ad evidenziare le eventuali anomalie nelle onde di risalita attraverso il parametro adimensionale  $\beta$ , Fattore di Integrità.

Tale valore rappresenta numericamente la riduzione percentuale di Impedenza ad una data profondità. Per spiegare meglio il parametro Beta, prendiamo un palo di lunghezza  $L$  che presenta una riduzione di diametro a circa  $L/2$ . Il difetto comporta una riduzione locale di Impedenza e conseguentemente una variazione di velocità delle onde che passano attraverso quella sezione. [2]



Ipotizzando una velocità dell'impulso iniziale ( $V_{top}$ ) pari a 100 ed una velocità delle onde riflesse dalla riduzione di sezione ( $V_i$ ) pari a 50 il Fattore di Integrità può essere calcolato come segue:

$$\alpha = \frac{V_i}{2V_{top}} = \frac{50}{200} = 0,25 \quad \beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)} = \frac{0,75}{1,25} = 0,6$$

Ovvero in quella sezione c'è una riduzione di Impedenza pari al 40 %.

La strumentazione PDA esegue il calcolo del parametro Beta al termine di ciascuna battuta e riporta in diretta l'eventuale valore di riduzione percentuale di Impedenza.

Dalle prove sperimentali sono stati individuati dei parametri d'interpretazione della variazione di Impedenza:

- riduzione da 0 a 20% : palo accettabile;
- riduzione da 20 % a 40% : difetto di lieve entità, palo da verificare;
- riduzione oltre il 40 % : variazione significativa di impedenza, possibile difetto grave.

### **Carico applicato e proporzionalità nella risposta del palo alla sollecitazione:**

A ogni singola battuta il software calcola l'entità dell'impulso sul palo attraverso la relazione  $F_{mx} = E \cdot A \cdot \epsilon$ .

Ad esclusione della prima battuta, eseguita da una quota di pochi centimetri ed utilizzata solamente per la verifica, nelle successive si valuta l'andamento degli incrementi di carico in funzione degli incrementi di altezza. All'aumentare del carico deve corrispondere un aumento proporzionale della risposta del palo.

Una mancata linearità di pochi punti percentuali è da ritenersi fisiologica tenuto conto che non siamo in un regime strettamente elastico. Una consistente mancata linearità tra il carico applicato e risposta del palo può invece indicare diversi fenomeni:

- rottura dell'interfaccia tra il dado ed il palo con parziale disgregazione del calcestruzzo e conseguente assenza di materiale integro per la trasmissione dell'impulso al fusto del palo; condizione locale che non compromette l'integrità del palo;
- rottura delle interazioni laterali palo-terreno ed inizio della risposta di punta; condizione che si sviluppa solitamente in pali che lavorano prevalentemente per carico di punta;
- rottura del palo; la rottura è visibile se si è verificata nella porzione iniziale del palo liberata dal terreno, se invece è in profondità viene confermata dall'analisi del segnale con onde di riflessione anomale e basso valore del Fattore di Integrità  $\beta$ ;
- cedimento verticale del palo per completa rottura degli attriti palo-terreno o per cedimento della punta; condizione che si verifica analizzando i cedimenti verticali permanenti con il livello ottico ed il riferimento posto sul palo; in queste condizioni si è raggiunto il carico limite ultimo, da questo momento in avanti, anche aumentando l'altezza di caduta, non ci sarà incremento di carico, anzi. L'integrità della coesione palo-terreno si riformerà nel tempo, indicato nelle norme in circa 28 gg.



**2.5 Cenni teorici al modello matematico CAPWAP**

CAPWAP è un sistema di modellazione numerica che suddivide il palo in una sequenza di segmenti finiti dalle 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:

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

Dove:

- v = velocità delle particelle verso il fondo del palo;
- F = forza (di compressione) nel punto in considerazione;
- c = velocità di propagazione delle onde meccaniche;
- E = modulo elastico del materiale;
- A = area della sezione del palo.

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

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

Nelle onde di compressione la velocità delle particelle si sviluppa 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 stesso. Inoltre si può affermare che le caratteristiche dell'onda sono esclusivamente 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:

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

Il palo, analizzato come materiale omogeneo, anisotropo e libero sul fondo, oppone una resistenza caratteristica, l'impedenza, al passaggio delle onde meccaniche che può essere espressa dalle seguenti relazioni [3]:

Formulazioni calcolo impedenza Z	
$Z = \frac{EA}{c}$ dove $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$Z = A(E\rho)^{\frac{1}{2}}$ dove $E = c^2\rho$
$Z = Ac\rho$ dove $M_p = LA\rho$	$Z = \frac{M_p c}{L}$ dove $M_p = LA\rho$

da cui:

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

Nel caso di un 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 [4]:

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

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.

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

La resistenza totale espressa dalla formula 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  $R_s$ , la resistenza statica del palo.

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

$$R_d = J v_f$$

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  $Z$  e, attraverso una costante di smorzamento adimensionale  $J_c$ , si ottiene la relazione:

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

Partendo dall'espressione utilizzata per ricavare 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 ultima ottenuta come risultato del metodo Case[5]:

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

Nella precedente equazione,  $t_m$  sostituisce  $t^*$  dell'equazione (5) e rappresenta l'istante temporale di massima forza misurata dagli strumenti installati sul palo.

Va fatta un'importante considerazione, nella correlazione tra portata statica e resistenza dinamica del palo, sulle caratteristiche del suolo nel quale è immerso: nel modello matematico possiamo inserire tutti i valori per il calcolo ricavandoli dalle misure eseguite sul 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.

Valori da attribuire alla costante $J_c$		
Tipo di terreno	Range	Valore suggerito
Sabbia	0.05 ÷ 0.20	0.05
Sabbia - Limo	0.15 ÷ 0.30	0.15
Limo	0.20 ÷ 0.45	0.30
Limo - Argilla	0.40 ÷ 0.70	0.55
Argilla	0.60 ÷ 1.10	1.10

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 fornire un valore di portata statica corrispondente a quella reale. [6]

2.6 Analisi dei risultati

Gli andamenti nel dominio del tempo di forza e velocità derivati dalle misurazioni eseguite in sito, rappresentati nei diagrammi dalla linea continua, sono confrontati con quelli calcolati attraverso l'analisi con CAPWAP, rappresentati dalla linea tratteggiata.

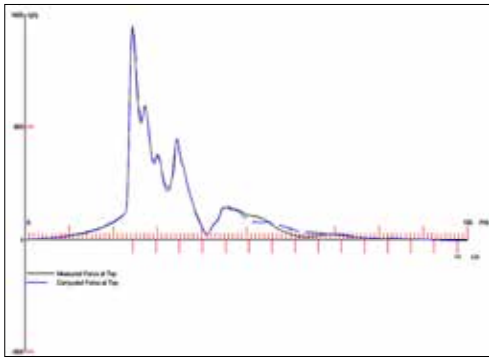


Diagramma forza-tempo

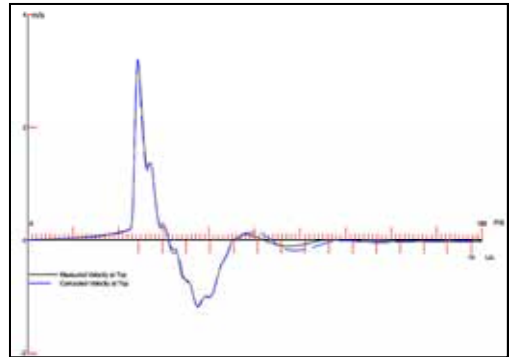
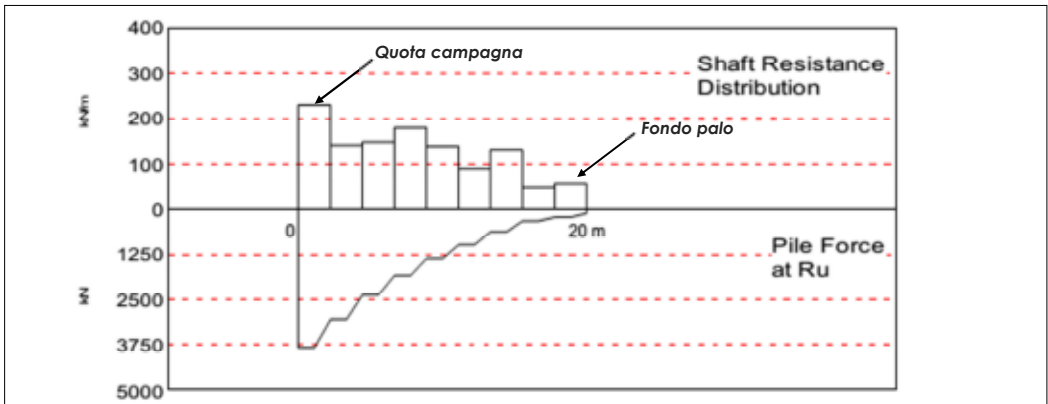


Diagramma velocità-tempo

La lunghezza del palo viene discretizzata in varie sezioni, generalmente di un metro, e ad ognuna di queste è applicato un valore iniziale di  $J_c$ , costante di smorzamento, che il programma provvede autonomamente a variare fino a raggiungere, attraverso continui tentativi, la migliore approssimazione. In altre parole la migliore aderenza tra andamento teorico e andamento reale.

Il processo di calibrazione permette di schematizzare oltre al palo anche il terreno come insieme di elementi finiti a contatto con il fusto. In questa schematizzazione entra 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.

Nel diagramma a seguito si evidenzia la distribuzione delle resistenze lungo il fusto. Nello specifico il palo ha una lunghezza di 20 m ed è stato sollecitato a carico di  $F_{mx}=1.600$  kN.

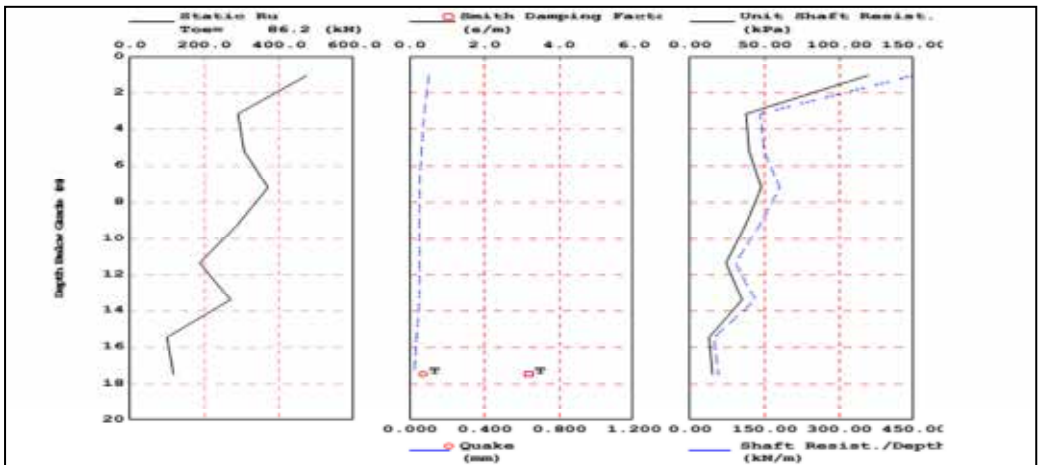


Distribuzione della resistenza lungo il palo

Nella parte superiore del grafico sono rappresentati i 9 elementi che rappresentano la resistenza per attrito laterale di ciascun segmento in cui è stato suddiviso il palo nella modellazione. Il palo di 20 metri è stato liberato dal terreno per circa 2 metri. I rimanenti 18 metri, inseriti nel terreno, sono stati suddivisi in elementi finiti di circa 2 metri ciascuno.

Nella parte inferiore è rappresentato l'andamento della resistenza laterale in funzione della profondità. Il valore di resistenza a quota 0 è dato dalla somma di tutti i segmenti rappresentati nella parte superiore più il carico di punta stimato (in questo caso poco rilevante). Se si scendesse in profondità e si tagliasse ipoteticamente il palo riducendo la lunghezza a 10 metri, la portata sarebbe pari alla somma dei primi 5 segmenti partendo da destra, più il carico di punta.

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



Andamento della resistenza in funzione della profondità

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

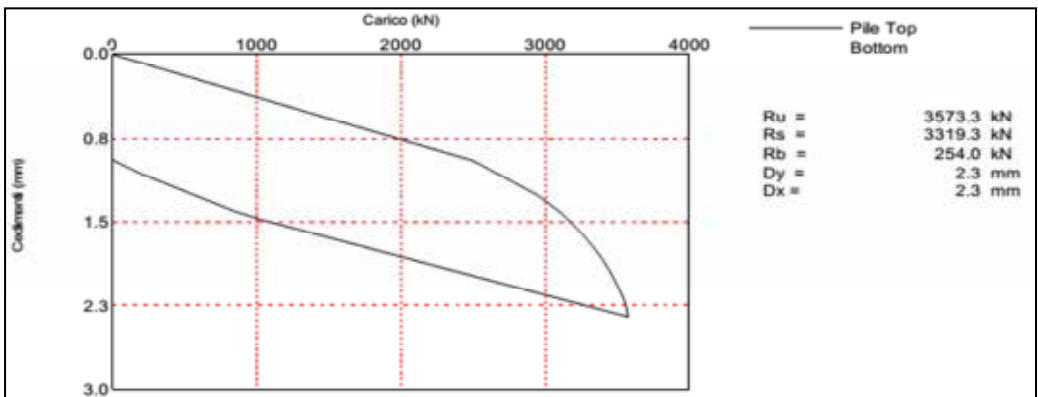


Diagramma carico-cedimenti

### 2.7 Normativa di riferimento

La prova dinamica può essere eseguita in alternativa alla Prova di progetto su pali pilota, (dove si prevede un valore del carico non inferiore a 2,5 volte l'azione di progetto), come previsto nel TU - DM 14.1.08 al punto 6.4.3.7.1 che 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*".

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*".

### 2.8 Confronto tra prova di carico dinamica e prova di carico statica

Sono state eseguite diverse prove su pali confrontando i risultati delle prove statiche con quelle dinamiche eseguite con il Metodo Case.

A seguito vengono riportati due esempi significativi relativi al raffronto tra i dati ottenuti dalla prova statica e da quella dinamica eseguite sullo stesso palo accompagnati da una serie di considerazioni sui risultati ottenuti.

Anche in bibliografia è possibile individuare diversi articoli al riguardo. Tutti arrivano alla considerazione finale sull'ottima corrispondenza tra i risultati delle due tipologie di prova.

Si è già indicato, ma è bene riaffermarlo, che l'esecuzione delle due prove sullo stesso palo richiede che trascorra un opportuno lasso di tempo tra i test, indicato in almeno 28 gg, in quanto è necessario dare tempo al palo di riformare le interconnessioni palo-terreno. [7]

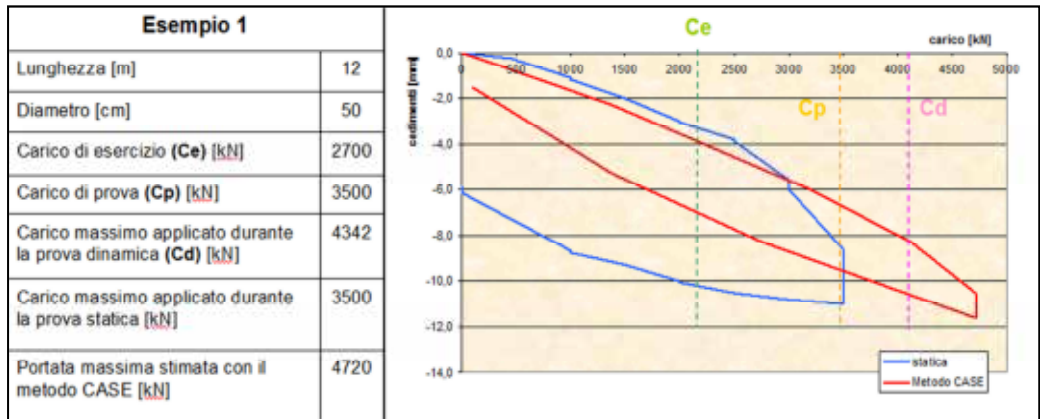
## 2.9 Esempi di prova

### Esempio 1

Questo esempio si riferisce a un palo nel quale è stata eseguita la prova statica e in seguito la prova dinamica. Il carico massimo raggiunto nella prova statica,  $C_p$ , è di 3.500 kN, mentre il carico massimo raggiunto durante la prova dinamica,  $C_d$ , è di 4.342 kN.

Come si può notare nel diagramma carico-cedimenti, a seguito riportato, il modello numerico CAPWAP è riuscito a creare una curva d'isteresi (in rosso) che fino al 70% del carico di prova è in sostanza sovrapponibile a quella creata con i cedimenti registrati durante la statica. Il discorso si fa diverso con carichi maggiori in cui il modello non restituisce una buona approssimazione della realtà. Questo accade perché durante la prova dinamica non è stato possibile raggiungere un carico tale da mobilitare tutta la massa del palo e indagare gli attriti laterali e il carico di punta.

Ciò nonostante i risultati ottenuti dalla prova dinamica hanno garantito una precisa valutazione del comportamento del palo al carico d'esercizio.




Prova statica a contrasto




Prova dinamica con maglio M800

Si riporta la scheda dei risultati della prova.



**PROVA DI CARICO DINAMICA SU PALO**



**Prova:** xxxx/MO  
**Cantiere:** XXXXX  
**Località:** XXXXX  
**Data:** xx/xx/xxxx  
**Referente:** \_\_\_\_\_

**Strumento:** PDA Model Pax-8  
**Calibrazione:** 15/11/2010  
**Prova N.:** MO xxxx  
**Tecnico prova:** dott. Riccardo Collorafi  
**Sviluppo dati:** ing. Thomas Pavan

**Caratteristiche del palo**  
 Palo N.: Palo pilota 1  
 Tipo: trivellato  
 Materiale: calcestruzzo  
 $C_p = 400$  kN  
 $L = 12,0$  m  
 $D = 50$  cm  
 $E = 11,4$  m  
 $L_p = 11,0$  m

**Sensori utilizzati**  
 N. Estensimetri: 2  
 N. Accelerometri: 2  
 Posizione: diametrale  
 Collegamento: wireless

**Maglio utilizzato**  
 Modello: M500  
 Massa: 34.000 N  
 $h$  massima: 120 cm  
 $D$  impronta: 60 cm  
 $D$  ingombro: 110 cm  
 Comandi: radio

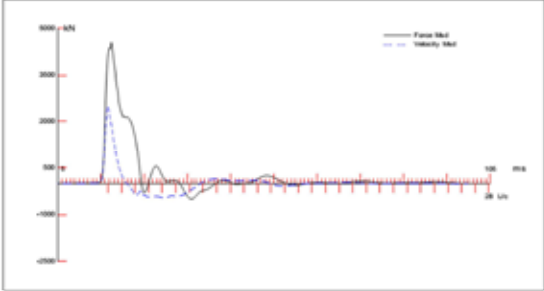
**Misure**  
 Tempo transito: \_\_\_\_\_  $\mu$ s  
 Velocità suono: \_\_\_\_\_ m/s  
 $R_{mc} = 42,5$  MPa  
 $E = 33.957$  MPa

**Prova dinamica**

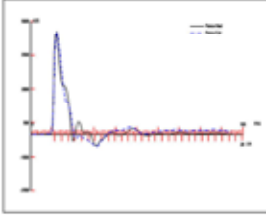
Fase	h [cm]	$\Delta$ [mm]	$F_{MX}$ [kN]
2	10	1,361	1.743
4	20	1,638	2.449
7	40	2,762	3.903
8	50	3,196	4.342

**Risultati**

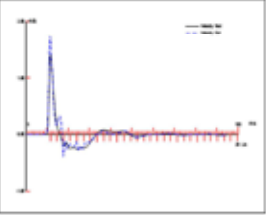
$F_{MX} = 4.342$ kN
$R_u = 4.718$ kN



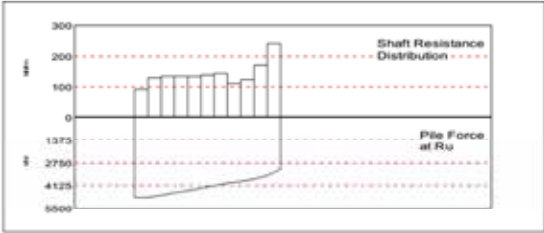
*Forza – Velocità/Tempo*



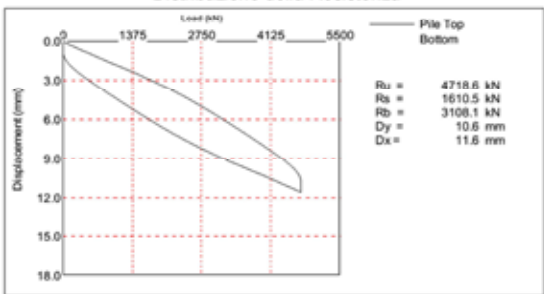
*Calibrazione Forza*



*Calibrazione Velocità*



*Distribuzione della Resistenza*



*Diagramma Carico – Cedimenti*

— Pile Top  
— Bottom

$R_u = 4718,6$  kN  
 $R_s = 1610,5$  kN  
 $R_b = 3108,1$  kN  
 $D_y = 10,6$  mm  
 $D_x = 11,6$  mm

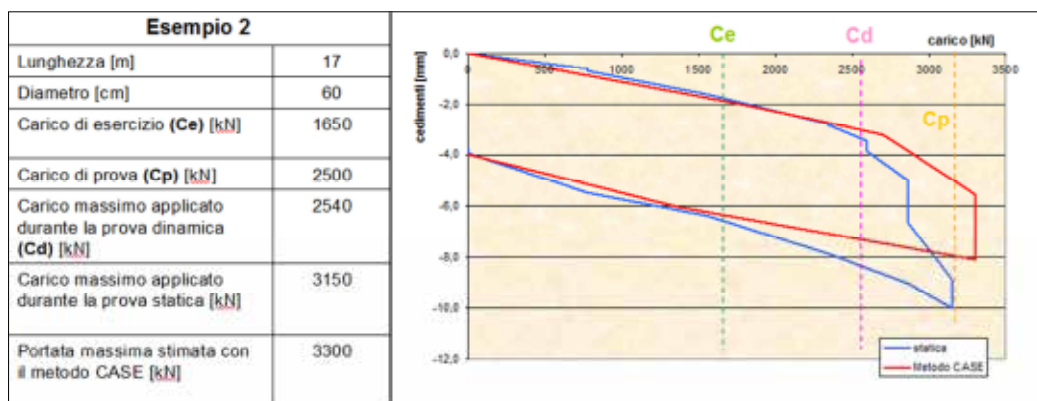


## Esempio 2

A differenza del precedente questo esempio rappresenta una prova in cui il carico applicato durante la prova dinamica era sufficiente a mobilitare tutte le resistenze in gioco con  $C_d$  circa il 75 % della portata ultima. Tale carico è stato raggiunto monitorando i cedimenti verticali e ottenendo un'infissione durante le battute di 2,0 mm; ovvero quanto necessario a vincere, almeno parzialmente, le connessioni laterali palo-terreno ed arrivare ad indagare sul contributo della punta.

La linea blu riporta l'andamento del ciclo d'isteresi durante la prova statica, mentre quella rossa individua quella dinamica.

La corrispondenza degli andamenti è molto significativa nella sua sovrapposizione molto aderente, in particolare il valore del residuo risulta perfettamente corrispondente.



Questa corrispondenza di risultati, ripetuti positivamente in altri numerosi casi, dimostra la validità della prova dinamica con metodo Case.

Considerati i vantaggi economici e di tempo che tale prova comporta se ne giustifica ampiamente la sostituzione alla prova statica.

Va inoltre apprezzata la massa di informazioni aggiuntive che la prova di carico dinamica fornisce, in particolare l'andamento del carico di attrito lungo il palo che potrà essere confrontato con i risultati delle prove geotecniche effettuate nel sito.

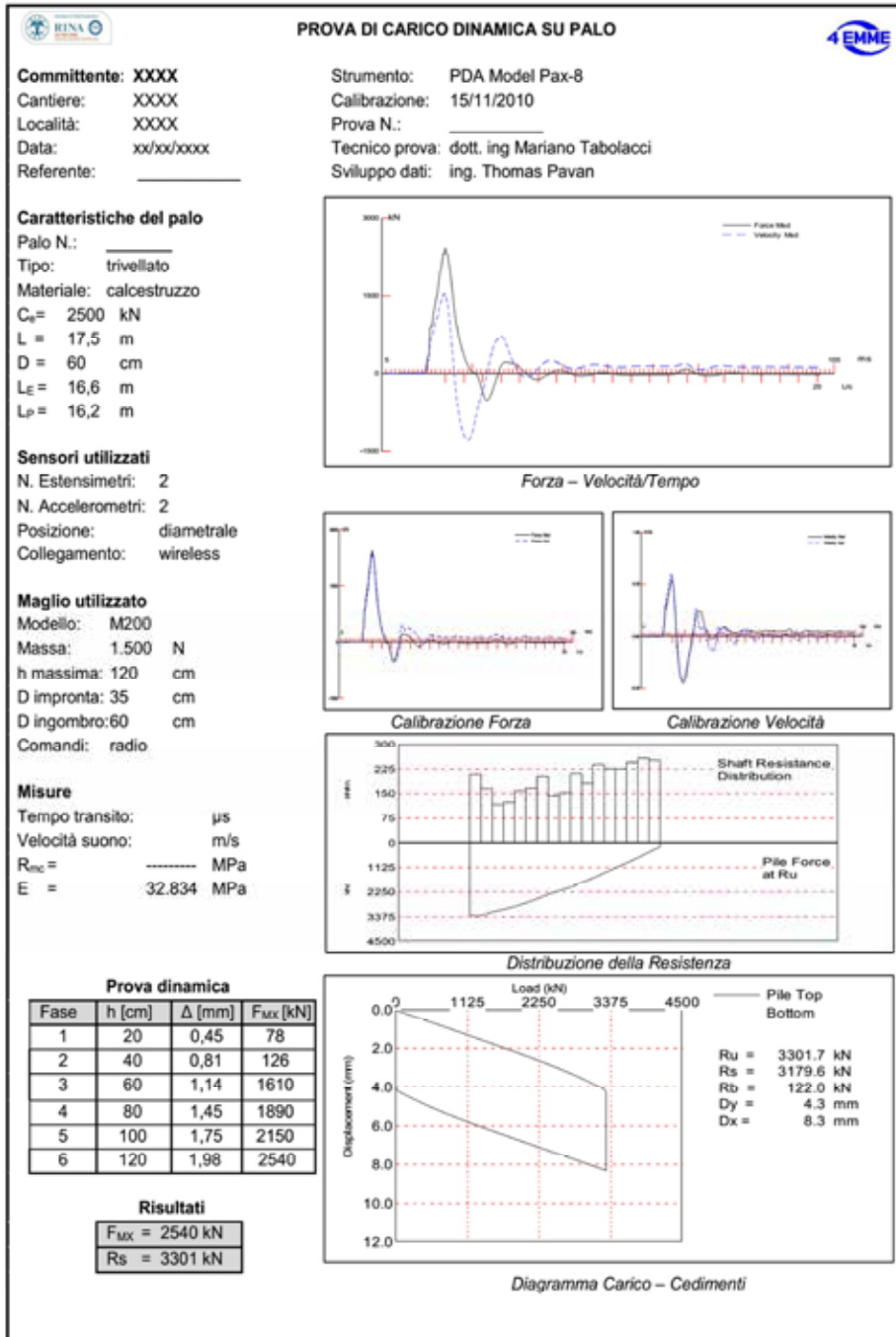


Prova statica a contrasto



Prova dinamica con maglio M200

Si riporta la scheda dei risultati della prova.



Di seguito si riportano le schede tecniche dei magli.



[www.4emme.it](http://www.4emme.it)

**4 EMME Service Spa**

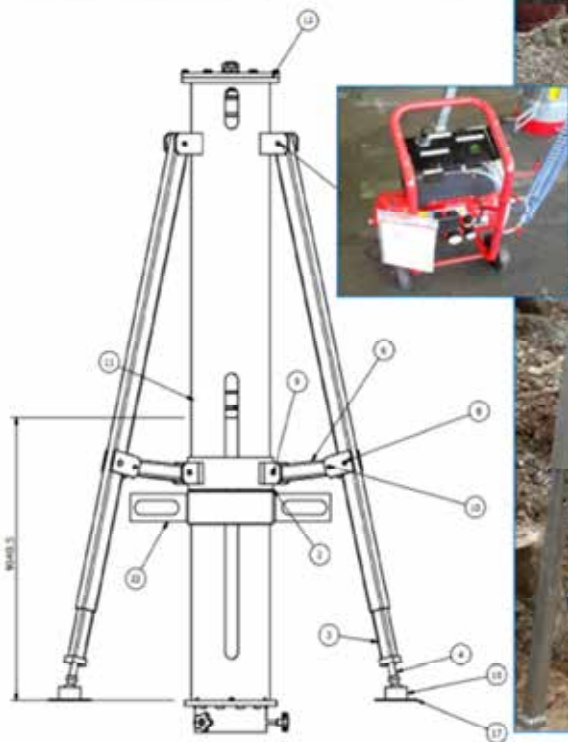
Via L. Zuegg 20  
39100 BOLZANO – Italy  
Tel. +39 0471 543111  
Fax + 39 0471 543110  
info@4emme.it

**SCHEMA TECNICA**

**MAGLIO M70**

**PROVA DINAMICA SU PALI - METODO "CASE"**

Caratteristica	
Peso totale	7,6 kN
Peso massa battente	4,2 kN
Carico max prova	700 kN
∅ massa	28 cm
∅ base maglio	30 cm
h caduta max	120 cm
H maglio chiuso	240 cm
H maglio aperto	240 cm
Alimentazione	220 V
Potenza max	3 kW
Funzionamento	Aria compressa
Comando salita massa	Leva aria compressa
Comando caduta massa	Tasto aria compressa
Micropalo inclinato fino a	15°





**4 EMME Service Spa**  
 Via L. Zuëgg 20  
 39100 BOLZANO – Italy  
 Tel. +39 0471 543111  
 Fax + 39 0471 543110  
 info@4emme.it

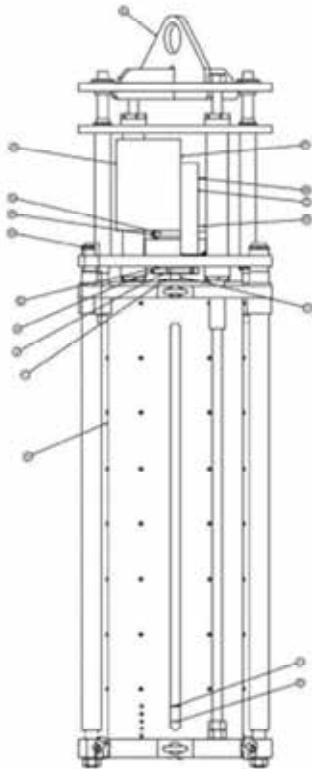
www.4emme.it

**SCHEDA TECNICA**

**MAGLIO M200**

**PROVA DINAMICA SU PALI - METODO "CASE"**

Caratteristica	
Peso totale	21,0 kN
Peso massa battente	14,2 kN
Carico max prova	2.000 kN
Ø massa	38 cm
Ø base maglio	60 cm
h caduta max	120 cm
H maglio chiuso	240 cm
H maglio aperto	370 cm
Alimentazione	220 V
Potenza max	3 kW
Funzionamento	Oleodinamico
Presenza massa	Oleodinamico
Comando salita massa	Telecomandato
Comando caduta massa	Telecomandato





www.4emme.it

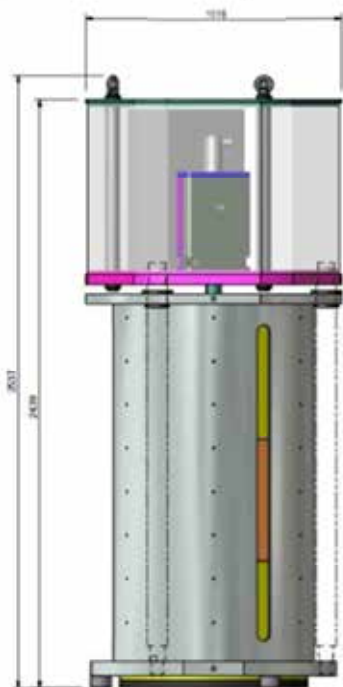
4 EMME Service Spa  
Via L. Zuegg 20  
39100 BOLZANO – Italy  
Tel. +39 0471 543111  
Fax + 39 0471 543110  
info@4emme.it

SCHEDA TECNICA

MAGLIO M800

PROVA DINAMICA SU PALI - METODO "CASE"

Caratteristica	
Peso totale	63,0 kN
Peso massa battente	50,7 kN
Carico max prova	8.000 kN
N. masse	3
Peso singole masse	17,3–16,7– 16,7 kN
Ø massa	75 cm
Ø base maglio	98 cm
h caduta max	120 cm
H maglio chiuso	254 cm
H maglio aperto	385 cm
Alimentazione	220 V
Potenza max	3 kW
Funzionamento	Oleodinamico
Presa massa	Oleodinamico
Comando salita massa	Telecomandato
Comando caduta massa	Telecomandato





www.4emme.it

4 EMME Service Spa

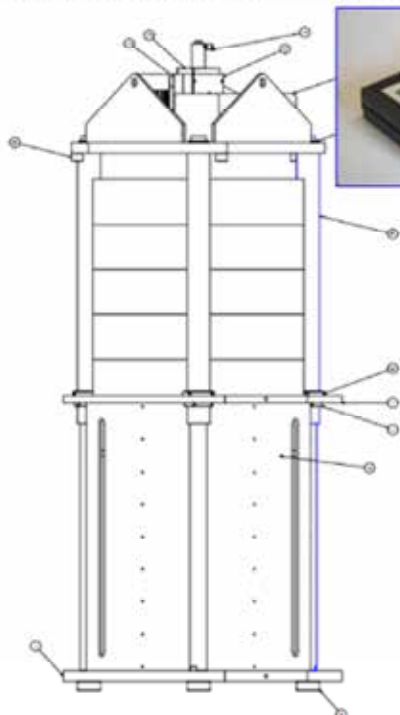
Via L. Zuëgg 20  
39100 BOLZANO – Italy  
Tel. +39 0471 543111  
Fax +39 0471 543110  
info@4emme.it

**SCHEDA TECNICA**

**MAGLIO M1600**

PROVA DINAMICA SU PALI - METODO "CASE"

Caratteristica	
Peso totale	140,0 kN
Peso massa battente	110,1 kN
Carico max prova	16.000 kN
N. masse	6
Peso singole masse	21,6 – 17,7 – 17,7 kN
	17,7 – 17,7 – 17,7 kN
Ø massa	110 cm
Ø base maglio	140 cm
h caduta max	120 cm
H maglio chiuso	245 cm
H maglio aperto	375 cm
Alimentazione	220 V
Potenza max	3 kW
Funzionamento	Oleodinamico
Preso massa	Oleodinamico
Comando salita massa	Telecomandato
Comando caduta massa	Telecomandato



### 2.10 Bibliografia

- [1] "ASTM D4945-00 - Standards test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles" - ASTM Committee D18 on Soil and Rock and ASTM Subcommittee D18.1 on Deep Foundation (2000).
- [2] "CAPWAP manual"- Globe Rausche Likins and Associates Inc. – Cleveland Ohio (1995).
- [3] "Manual of Deep Foundation Signal Analysis" - Rausche F. - Cleveland Ohio (2010).
- [4] "Dinamic determination of pile capacity" - Frank Rausche ,George G. Globe, Garland E. Links - Journal of Geotechnical Engineering, vol. 111, No3, (March 1985).
- [5] "Standardization and Codification of Dynamic Pile Testing" - Rausche F., Beim J., Gravace C.J., Klingmüller O., De-Qing L. - Seventh International Conference & Exhibition on Pile and Deep Foundations - Vienna Austria (1998).
- [6] "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).
- [7] "Correlation of CAPWAP with Static Load Tests" - Likins G. E, Rausche F. - Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of the Stresswave Theory to Piles - Petaling Jaya Malaysia (2004).
- [8] "Value of Methods for Predicting Axial Pile Capacity" - Long J., Bozkurt D. & Kerrigan J, - Transportation Research Board Paper No.99-1333,76 - Washington DC (1999).
- [9] "Nondestructive Testing of Deep Foundations" - Bernard Hertlein, Hallen Davis - WILEY (John Wiley & Sons Ltd) - Chichester, England (2006).