

1. Prova di carico statica su pali di fondazione

La portata di un gruppo di pali può essere dedotta con approssimazione per via analitica. Se si vogliono ottenere indicazioni sul loro effettivo comportamento in sito occorre ricorrere a delle procedure sperimentali indicate come prove di carico. Queste potranno essere comunque effettuate su un palo singolo quindi il comportamento di un gruppo di pali sarà una estrapolazione empirica.

1.1 Premessa

Le prove di carico su pali di fondazioni sono prescritte dalle norme attualmente vigenti sulle costruzioni, NTC 2008, e si dividono in due categorie distinte:

- prove pilota;
- prove di collaudo.

Le prove pilota sono test che servono al progettista a verificare sul campo, con pali di prova appositamente realizzati, la reale capacità portante attraverso prove statiche che dovrebbero essere condotte fino all'infissione del palo ($\geq 2,5$ SLE). In questo modo il progettista può affinare il progetto attraverso dati oggettivi ricavati direttamente dall'indagine.

Le prove pilota devono essere eseguite su pali posti e costruiti nelle medesime condizioni di contorno dei pali della futura palificata per consentire un'interpretazione affidabile dei risultati della prova. Inoltre, se possibile, è bene eseguirle in prossimità di sondaggi geotecnici in modo che i risultati siano correlabili a una precisa situazione stratigrafica.

Le prove di collaudo sono quelle che devono essere eseguite, come previsto dalla norma, in numero direttamente dipendente dal numero di pali, di pari dimensione, costituenti la palificata.

Secondo il DM del 14 /01/2008

- 1 se il numero di pali è inferiore o uguale a 20,
- 2 se il numero di pali è compreso tra 21 e 50,
- 3 se il numero di pali è compreso tra 51 e 100,
- 4 se il numero di pali è compreso tra 101 e 200,
- 5 se il numero di pali è compreso tra 201 e 500,
- il numero intero più prossimo al valore $5 + n/500$, se il numero n di pali è superiore a 500.

La scelta dei pali su cui eseguire le prove di collaudo va effettuata solo all'ultimazione della palificata per evitare una particolare cura, da parte di chi li realizza, nella esecuzione dei pali da testare.

1.2 Strumentazione

Il carico è applicato utilizzando uno o più martinetti idraulici posti su un "dado" e contrastati da un'opportuna zavorra o struttura di contrasto. Il dado è realizzato sulla testa del palo in prova per facilitare l'applicazione del carico. Il dado può essere anche di forma cilindrica, in ogni caso sarà convenientemente armato e dovrà avere una stagionatura di almeno 7 giorni.

Il palo da testare deve avere una stagionatura di almeno 28 giorni.

Il martinetto/i, impiegato/i per la produzione della forza, è azionato da una pompa oleodinamica, preferibilmente elettrica ed a controllo automatico della costanza della pressione impostata.

La lettura della forza applicata avviene tramite l'interposizione tra martinetti e contrasto, di una cella di carico.

In assenza, si potrà utilizzare un manometro di precisione, classe 1 certificata, e, nota la sezione del martinetto, calcolare l'entità del carico.

In questo caso si dovrà depurare la pressione di "primo attrito". Nella pratica si osserveranno i sensori di deformazione, quando questi segneranno un primo dato, sia pur piccolo, significa che la struttura sta ricevendo effettivamente il primo carico e la pressione fino a qui esercitata va depurata dai valori successivi.

L'operazione di depurazione va eseguita anche nella fase di scarico. Raggiunta la pressione massima, quando si inizierà la fase di scarico, si dovrà osservare il momento in cui i sensori segneranno una sia pur piccola riduzione di valore. La pressione corrispondente è omologata a quella massima la cui differenza, appunto, va depurata.

Si comprende quindi come l'utilizzo della cella di carico, per la misura della forza applicata, sia di gran lunga preferibile e affidabile.

Per quanto riguarda la scelta della centralina oleodinamica è preferibile quella elettrica, purché sia in grado di mantenere una pressione costante anche a fronte di cedimenti del palo ed eventualmente del contrasto. Infatti, la pompa a mano richiede un'attenzione continua da parte degli operatori poiché richiede un ripristino ogni qualvolta si evidenzia un cedimento del palo.

Per la misura dei cedimenti sono impiegati dei trasduttori elettronici che vanno posti attorno al palo. L'incastellatura di sostegno deve essere indipendente sia dall'influenza dei movimenti del plinto, e quindi del palo, sia da quella della struttura di contrasto. Deve pertanto essere appoggiata sul terreno il più possibile al di fuori dell'area d'influenza del carico, distante almeno 1,5 m dal palo (comunque non inferiore a 1,5 volte il diametro del palo).

Il tutto va opportunamente protetto dagli agenti atmosferici, pioggia, sole, vento.

I trasduttori devono essere in numero non inferiore a 3 e devono essere posti a 120° l'uno dall'altro. È opportuno utilizzare trasduttori con escursione di almeno 50 mm, con lettura in postazione adeguata su video di PC o display.

Sono di uso comune l'utilizzo di programmi di elaborazione e visualizzazione dati che consentono di evidenziare graficamente, in tempo reale, il segnale degli strumenti, rendendo immediatamente evidente, allo sperimentatore, eventuali anomalie.

Il sistema deve essere in grado di effettuare registrazioni a intervalli di tempo programmati. Questo permette di eseguire il monitoraggio dei cedimenti con la garanzia di avere dei dati ben distribuiti nel tempo. Inoltre è utile evidenziare sullo schermo il valore medio delle letture degli strumenti rendendo facilmente comprensibile l'andamento della prova.

Sono da preferire programmi in grado di presentare i dati, carico e cedimenti, in più modalità grafiche:

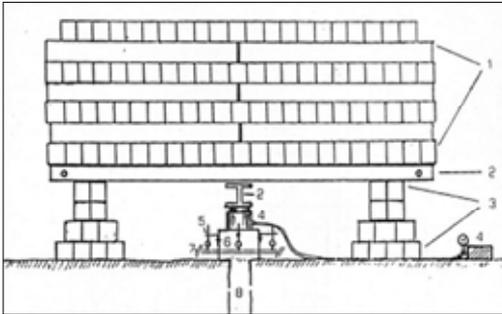
- tempo in ascissa, carico in ordinata;
- tempo in ascissa, cedimenti in ordinata;
- carico in ascissa, cedimento medio in ordinata.

1.3 Allestimento del contrasto

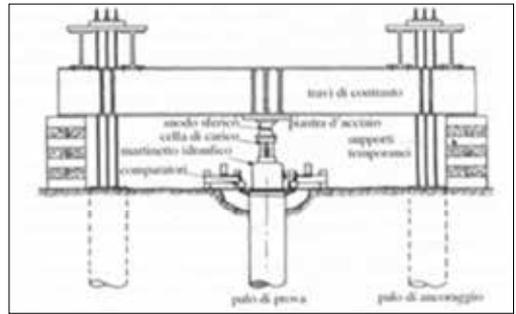
Il contrasto può essere realizzato in due modi fondamentalmente differenti:

- attraverso il collocamento di una zavorra al di sopra del palo in prova, avendo cura di lasciare lo spazio adeguato per il montaggio dei martinetti;
- attraverso una struttura di contrasto vera e propria che solitamente è costituita da una trave ancorata ad almeno due pali adiacenti.

La struttura a zavorra dovrà essere realizzata in modo che il baricentro sia centrato con l'asse del palo e i relativi appoggi dovranno essere distanti almeno 1,5 m dal palo (comunque non inferiore a 1,5 volte il diametro del palo) per limitare le possibili interferenze.



Schema zavorra



Trave di contrasto

La zavorra dovrà essere sovradimensionata rispetto al carico di prova di circa il 20%.

È particolarmente importante, soprattutto per carichi elevati, la preparazione del terreno circostante al fine di impedire lo sprofondamento dei baggioli di supporto posti ai lati del palo, che provocherebbero, nella migliore delle ipotesi, il collasso della struttura di contrasto.

Per ragioni di costi, anche se meno efficace, è più utilizzato il sistema di contrasto costituito da una trave ancorata ai pali di fondazioni esistenti che si troveranno a essere sollecitati a trazione. L'ancoraggio deve essere fatto in modo che i pali sollecitati a trazione, che possono essere in numero di due o più, devono essere distanti almeno 4 volte il diametro del palo in prova e comunque a 2 m di distanza. La corsa del martinetto deve essere adeguata, circa il 25% del diametro del palo, in modo da non essere costretti a interrompere la prova per interporre spessori tra il pistone e il contrasto.



Zavorra di contrasto



Contrasto ancorato ai pali adiacenti

1.4 Conduzione della prova

La conduzione della prova consiste nel sottoporre il palo a due cicli consecutivi di carico e scarico.

I carichi devono essere applicati a gradini costanti preferibilmente pari a 1/10 del carico di prova o, per lo meno, 1/4 del carico massimo di prova. Gli incrementi del carico e la contestuale memorizzazione dei valori del cedimento, andranno effettuati ogni 10-15 minuti. In presenza di assestamenti occorre attendere la stabilizzazione che va intesa quando, in un intervallo di mezz'ora, il cedimento non superi 0,1 mm.

Durante il primo ciclo, raggiunto il carico di esercizio Q_e , è opportuno attendere 1 ora, o più, comunque fino alla stabilizzazione del cedimento e quindi procedere allo scarico con i medesimi decrementi.

La stabilizzazione allo scarico totale risulta avvenuta se inferiore a 0,1 mm nei 15 minuti dallo scarico completo.

In alcuni casi può accadere che i sensori segnalino una risalita del palo, in realtà è un errore del complesso di misura dovuto a variazioni termiche e non se ne deve tenere conto.

Dopo un'attesa di 1 ora dalla fine del primo ciclo di carico si può procedere al 2° ciclo che dovrà spingersi al carico di prova che sarà pari 1,5 Q_e . Una volta raggiunto il carico massimo, con le medesime modalità di prova del ciclo precedente, è opportuno lasciare il carico per qualche ora; in alcuni casi, a scelta del Collaudatore, è richiesto anche un giorno. Una volta trascorso il tempo previsto si scarica con le stesse modalità del ciclo di carico.

Si osserva che l'utilizzo di strumenti in linea con lettura in continuo facilita enormemente la conduzione della prova e la comprensione dell'andamento della stessa.

1.5 Elaborazione dei dati

Il risultato di una prova di carico su palo di fondazione viene correttamente presentato sotto forma grafica con un diagramma carico - tempo, un diagramma cedimento - tempo e infine un diagramma carico - cedimento.

Inoltre devono essere riportati la data del getto, la lunghezza e diametro del palo, il tipo di calcestruzzo utilizzato e le caratteristiche principali dell'armatura. Va identificato univocamente quale palo è stato verificato solitamente riportando la planimetria della palificata contrassegnando i pali sottoposti a prova.

I valori residui di cedimento dopo lo scarico finale saranno diversi a seconda delle caratteristiche del palo e dei terreni attraversati, ma dovranno essere sempre contenuti nell'ordine massimo di 2 - 3 mm. Valori superiori potranno portare all'esecuzione di nuove prove di verifica su altri pali e potranno condurre a un riesame dell'elaborato progettuale.

La determinazione del carico limite, che riveste particolare importanza nel caso di prove su pali pilota, può essere definita in più modi.

Qualora la curva carico - deformazioni non abbia un'inflexione netta si può considerare che il carico limite sia quello che provoca un abbassamento di 0,1 D per i pali battuti e 0,25 D per i pali trivellati.

Un altro criterio abbastanza diffuso è quello di definire Q_{lim} quel carico, nel grafico carico - cedimenti, in corrispondenza del quale vale 2δ essendo δ l'abbassamento che si verifica a $0,9 Q_{lim}$.

1.6 Esempi di prova

Si riportano alcuni estratti di relazioni di prove eseguite ritenute di particolare interesse.

Esempio 1: prove di carico su 2 pali trivellati - contrasto costituito da zavorra

Le prove di carico sono state eseguite sul medesimo sito in contraddittorio con prove eseguite su pali costruiti da imprese diverse. Lo scopo delle prove è quindi quello di verificare la bontà di esecuzione dei pali costruiti da due diverse imprese costruttrici.

Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata un'attrezzatura composta da:

- Centralina elettromeccanica da pali
- Martinetto da pali da 180 ton
- Wavebook/516



Trasduttori di cedimento



Unità di acquisizione



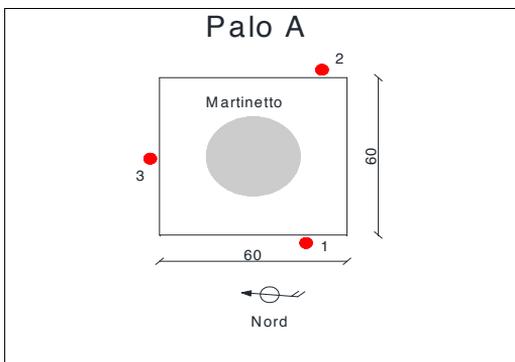
Centralina oleodinamica

Si riportano di seguito i risultati delle due prove per consentire di valutare i differenti risultati.

Descrizione della prova sul palo A

La prova di carico è stata eseguita sul palo A avente $L = 9$ m e $\phi = 400$ mm. La preparazione della prova è avvenuta il giorno precedente ove si è predisposta l'attrezzatura ed eseguito un ciclo preliminare a circa il 10% del carico di prova.

La struttura di contrasto è costituita da una zavorra di blocchi in calcestruzzo sostenuta da un'opportuna struttura metallica con 4 basamenti.



Palo A disposizione strumenti di misura



Sensore di cedimento

Il carico di prova è stato pari a **1.500 kN**.

Il carico è stato applicato mediante 2 cicli, il primo fino a **1.050 kN**, tramite 1 martinetto oleodinamico posto sulla testa del palo appositamente livellato.

I gradini di carico e le modalità di incremento del carico sono stati concordati con il collaudatore e la D.L..

Si riportano i risultati in forma di tabella (ridotta a pochi valori sintetici per motivi espositivi) e grafici:

Risultati della prova sul palo A

| Ora | Carico | CH 1 | CH 2 | CH 3 | Media |
|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| hh.mm | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 7.13 | 0 | -0.00 | 0.00 | -0.00 | 0.00 |
| 7.48 | 150 | -0,37 | -0,29 | -0,38 | -0,35 |
| 8.52 | 300 | -2,04 | -1,79 | -2,22 | -2,02 |
| 10.26 | 450 | -5,33 | -5,10 | -5,68 | -5,37 |
| 11.58 | 600 | -9,09 | -8,65 | -9,41 | -9,05 |
| 13.29 | 750 | -15,45 | -15,01 | -15,85 | -15,44 |
| 14.59 | 900 | -17,58 | -17,28 | -18,00 | -17,62 |
| 15.03 | 1050 | -19,26 | -19,01 | -19,70 | -19,32 |
| 15.33 | 1050 | -21,06 | -20,85 | -21,53 | -21,15 |
| 16.33 | 1050 | -21,83 | -21,56 | -22,31 | -21,90 |
| 16.50 | 750 | -21,12 | -20,99 | -21,62 | -21,25 |
| 17.07 | 450 | -20,27 | -20,11 | -20,75 | -20,37 |
| 17.23 | 150 | -19,06 | -18,89 | -19,45 | -19,13 |
| 17.24 | 0 | -18,21 | -17,94 | -18,59 | -18,25 |
| 6.54 | 0 | -17,66 | -17,32 | -18,08 | -17,69 |
| 7.25 | 150 | -17,70 | -17,34 | -18,13 | -17,73 |
| 7.57 | 300 | -18,36 | -17,89 | -18,79 | -18,35 |
| 8.14 | 450 | -19,02 | -18,47 | -19,47 | -18,99 |
| 8.31 | 600 | -19,66 | -19,11 | -20,22 | -19,67 |
| 8.47 | 750 | -20,30 | -19,73 | -20,91 | -20,32 |
| 9.04 | 900 | -21,34 | -20,66 | -21,94 | -21,31 |
| 10.06 | 1050 | -23,11 | -22,36 | -23,68 | -23,05 |
| 10.11 | 1200 | -24,63 | -23,88 | -25,23 | -24,58 |
| 12.11 | 1200 | -27,42 | -26,50 | -27,95 | -27,29 |
| 14.46 | 1350 | -36,54 | -35,06 | -36,99 | -36,20 |
| 14.48 | 1500 | -37,20 | -35,54 | -37,57 | -36,77 |
| 15.55 | 1500 | -39,74 | -37,90 | -40,93 | -39,53 |
| 15.59 | 1200 | -39,71 | -37,89 | -40,06 | -39,22 |
| 16.14 | 1200 | -39,70 | -37,90 | -40,04 | -39,21 |
| 16.31 | 900 | -38,81 | -36,93 | -39,11 | -38,28 |
| 16.47 | 600 | -37,69 | -35,87 | -38,01 | -37,19 |
| 17.04 | 300 | -36,21 | -34,50 | -36,52 | -35,75 |
| 17.06 | 0 | -34,04 | -32,63 | -34,46 | -33,71 |
| 17.36 | 0 | -33,62 | -32,32 | -34,12 | -33,35 |

Si riportano i grafici relativi al cedimento del palo sotto carico.

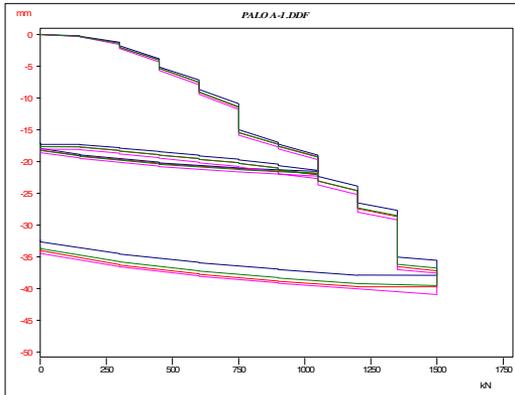


Diagramma carico - cedimenti

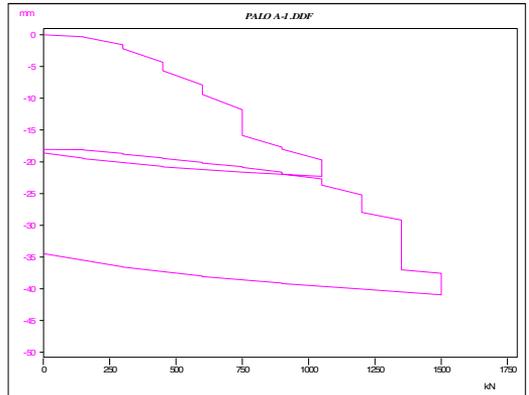


Diagramma carico - cedimenti medi

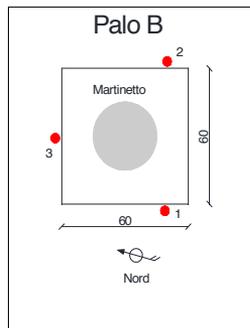
Descrizione della prova sul palo B

La prova di carico effettuata sul palo B avente $L = 9\text{ m}$ e $\phi = 400\text{ mm}$ e avrebbe dovuto condursi con le medesime modalità della prova precedente.

In realtà il carico di prova si è spinto fino a **900 kN**, in quanto l'entità dei cedimenti ha indotto il collaudatore e la D.L. a non spingersi oltre al carico di 900 kN.



Zavorra di contrasto



Schema sensori



Martinetto con cella di carico

Si riportano i risultati in forma di tabella e grafici.

Risultati della prova sul palo B

| Ora | Carico | CH 1 | CH 12 | CH 3 | Media |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| hh.mm | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 7.22 | 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7.55 | 150 | -0,19 | -0,19 | -0,34 | -0,24 |
| 8.58 | 300 | -1,00 | -0,97 | -1,40 | -1,12 |
| 10.31 | 450 | -3,38 | -3,07 | -4,03 | -3,50 |
| 12.37 | 600 | -12,71 | -12,53 | -13,58 | -12,94 |
| 14.27 | 750 | -23,72 | -24,10 | -24,93 | -24,25 |

| Ora | Carico | CH 1 | CH 12 | CH 3 | Media |
|--------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| hh.mm | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 14.42 | 750 | -23,91 | -24,34 | -25,16 | -24,47 |
| 14.48 | 900 | -35,66 | -35,96 | -37,10 | -36,24 |
| 14.53 | 900 | F. S. | F. S. | -41,61 | F. S. |
| 15.08 | 900 | | | -45,69 | |
| 16.18 | 900 | | | -50,55 | |
| 16.20 | 600 | | | -49,94 | |
| 16.37 | 600 | | | -49,87 | |
| 16.39 | 300 | | | -48,93 | |
| 16.52 | 300 | | | -48,87 | |
| 16.53 | 0 | | | -47,41 | |
| 17.08 | 0 | | | -47,01 | |

*F.S. = Sensori fuori scala

Dall'osservazione dei grafici, in particolare il grafico carico – cedimenti, si osserva che la capacità portante del palo è nettamente inferiore al carico raggiunto dalla prova precedente. Inoltre il ritorno allo scarico è pressoché nullo.

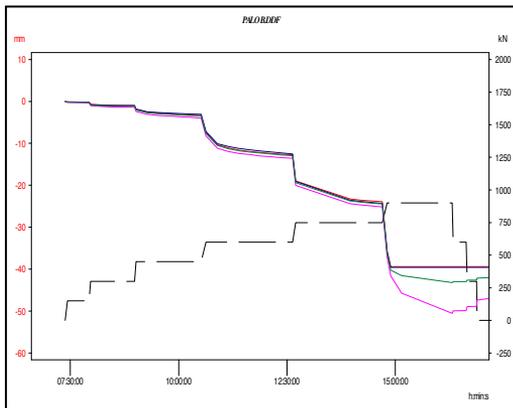


Diagramma carico tempo - tempo cedimenti

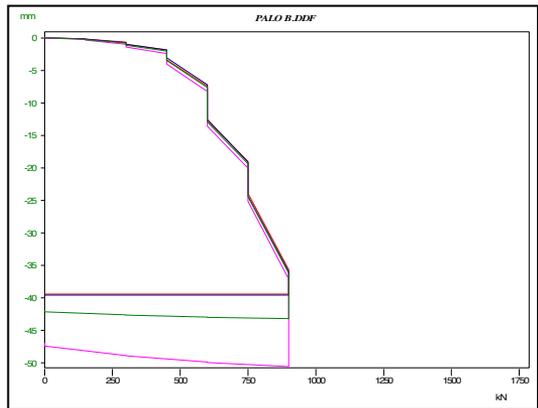


Diagramma carico - cedimenti

Esempio 2: prova di carico su palo con utilizzo di cella di carico

La prova di carico è stata effettuata su un palo trivellato avente Lunghezza 16 m e Diametro 400 mm.

La struttura di contrasto è costituita da una trave collegata a pali adiacenti.

Il carico massimo di prova è stato pari a 400 kN.

Il carico è stato applicato tramite 1 martinetto oleodinamico. Sono stati eseguiti 2 cicli di carico, il primo fino a 260 kN il secondo a 400 kN.

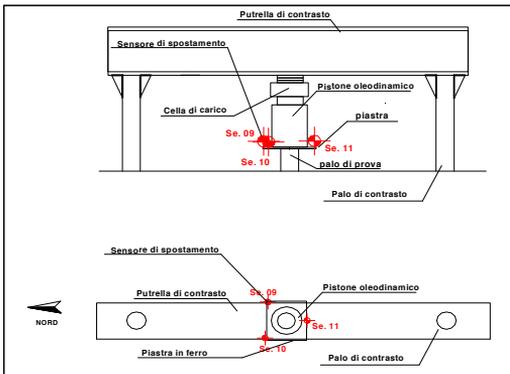
L'attrezzatura impiegata è stata:

- unità di acquisizione dati modello GS 03
- 3 Sensori elettronici con f.s. 50 mm
- centralina elettromeccanica a controllo automatico del carico
- 1 martinetto da 90 t
- cella di carico a compressione classe 1

La cella di carico ha un fondo scala di 100 ton ed una accuratezza del 0,2% F.S.

Per l'applicazione del carico, si è utilizzato un pistone oleodinamico posto su una piastra di ferro, centrata sulla testa del palo.

A sua volta il martinetto è contrastato per mezzo di due putrelle affiancate e vincolate tramite tiranti ai pali adiacenti.



Schema contrasto, pistone e sensori



Cella di carico e martinetto idraulico

Risultati di prova

| Ora | Carico | CH 1 | CH 2 | CH 3 | Media |
|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| hh.mm | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 9.55 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10.07 | 65 | -0,00 | -0,01 | -0,00 | -0,00 |
| 10.28 | 130 | -0,02 | -0,07 | -0,00 | -0,03 |
| 10.41 | 195 | -0,11 | -0,19 | -0,12 | -0,14 |
| 10.43 | 260 | -0,23 | -0,31 | -0,24 | -0,26 |

| Ora | Carico | CH 1 | CH 2 | CH 3 | Media |
|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| hh.mm | [kN] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 11.19 | 260 | -0,31 | -0,35 | -0,24 | -0,30 |
| 11.26 | 130 | -0,30 | -0,35 | -0,25 | -0,30 |
| 11.28 | 0 | -0,18 | -0,29 | -0,25 | -0,24 |
| 11.48 | 0 | -0,15 | -0,30 | -0,24 | -0,23 |
| 12.03 | 130 | -0,15 | -0,29 | -0,25 | -0,23 |
| 12.25 | 260 | -0,23 | -0,31 | -0,24 | -0,26 |
| 12.41 | 330 | -0,40 | -0,48 | -0,43 | -0,44 |
| 12.43 | 400 | -0,55 | -0,59 | -0,54 | -0,56 |
| 13.52 | 400 | -0,67 | -0,69 | -0,66 | -0,67 |
| 13.59 | 260 | -0,66 | -0,69 | -0,66 | -0,67 |
| 14.09 | 130 | -0,53 | -0,67 | -0,66 | -0,62 |
| 14.13 | 0 | -0,29 | -0,49 | -0,64 | -0,47 |
| 14.46 | 0 | -0,26 | -0,49 | -0,64 | -0,46 |

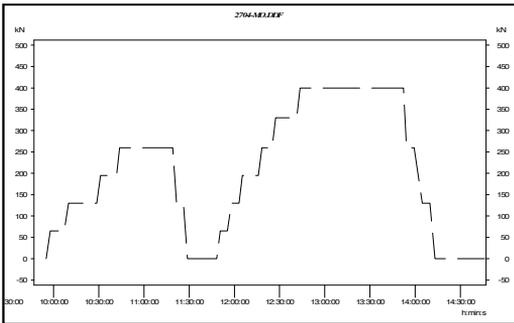


Diagramma tempo - carico

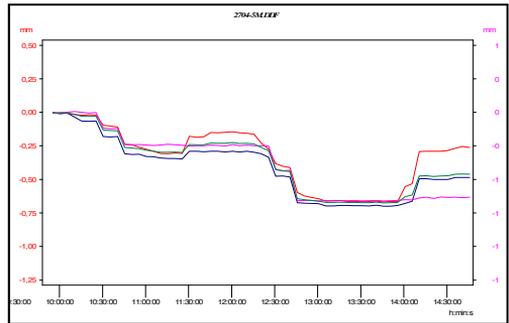


Diagramma tempo - cedimenti

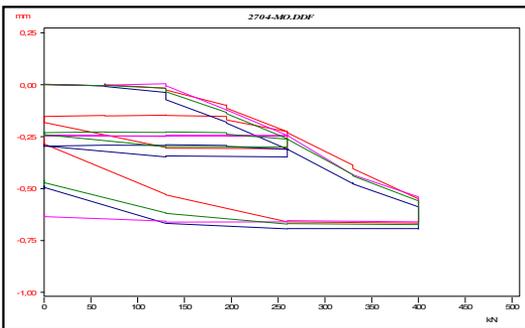


Diagramma carico - cedimenti

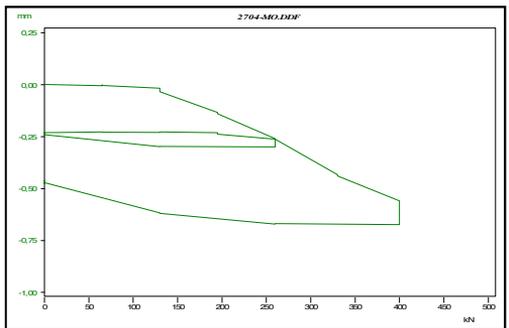


Diagramma carico - cedimento medio

1.7 Riferimenti normativi

Il TU 2008 indica con precisione il numero di pali da provare in base al numero complessivo.

La modalità di esecuzione della prova è inserita in:

- *Raccomandazioni AGI sui Pali di Fondazione (1984);*
- *CNR - Bollettino Ufficiale N. 191 del 22 dicembre.*