

3. Rilevazione dello stato deformativo di un palo sottoposto a carico

3.1 Premessa

Questo tipo di misurazione sperimentale è eseguita durante l'esecuzione delle prove di carico statiche di progetto su pali prova. I pali sono caricati fino al raggiungimento del carico limite ultimo, maggiore di 2,5 volte il carico di esercizio.

Tenuto conto della finalità della prova e nell'ottica di progettare successivamente, in base ai risultati, una palificata perfettamente aderente con le esigenze progettuali, è necessaria la rilevazione dello stato deformativo sotto carico della gabbia d'armatura.

Queste misurazioni consentono di valutare l'andamento della capacità portante lungo il fusto del palo, discriminando con precisione la eventuale quota di punta. Da questi risultati, confrontati con la stratigrafia del terreno, si potrà calcolare con precisione la portata reale dell'intera palificata raggiungendo il miglior risultato con il minore sforzo economico.



Lo stesso tipo di determinazioni possono essere raggiunte eseguendo le prove di carico dinamiche con metodo Case, vedi capitolo 2, con la differenza che qui si utilizza una misura diretta, molto precisa, piuttosto che elaborazioni matematiche di un modello per quanto molto aderente al reale.

L'esecuzione di prove di carico allo stato ultimo con il rilievo dello stato deformativo della gabbia d'armatura presenta i seguenti vantaggi:

- consente di ottimizzare i parametri di progetto attraverso la stima del coefficiente di adesione, basandosi sul reale comportamento del complesso palo-terreno;
- permette di verificare se le tecniche di realizzazione sono in grado di garantire una pulizia a fondo foro prima del getto; in questo modo, la resistenza alla punta può mobilitarsi senza eccessivi cedimenti (aspetto particolarmente rilevante per quei pali di lunghezza minore dove il contributo alla punta è richiesto anche sotto carichi di esercizio);
- riduce i rischi associati alla metodologia costruttiva in quanto consente di validare la tecnica adottata dal palificatore prima che partano i lavori.

3.2 Metodologia di prova

L'indagine consente di rilevare lo stato deformativo, e quindi lo stato tensionale attraverso il Modulo Elastico, di un palo di fondazione o di un diaframma sottoposto a prova di carico statica, possibilmente, portata allo stato ultimo. La procedura consiste nell'annegare nel calcestruzzo una serie di sensori di misura di deformazione fissati in varie sezioni della gabbia d'armatura. I sensori, barrette estensimetriche a resistenza e/o barrette estensimetriche a corda vibrante, consentono di misurare le deformazioni subite dal palo e, noto il legame sforzo-deformazione, la sollecitazione agente su quella determinata sezione.

L'interpretazione delle misure richiede un attento esame di tutti gli elementi disponibili, quali la risoluzione strumentale, la stabilità delle letture a parità di condizioni.

La procedura di rilevazione prevede che tutti i sensori siano collegati a una centralina di acquisizione dati e prima di cominciare ad applicare il carico statico siano eseguite le letture dello "zero" di riferimento.

Le misure successive avvengono durante la prova di carico, registrando, durante gli step di applicazione del carico, le deformazioni e seguendo il loro andamento lungo il palo.

I risultati permettono di valutare il carico assorbito dal terreno alle varie quote identificando con precisione l'eventuale carico alla punta.

3.3 Strumentazione

Per il rilievo delle deformazioni sono impiegate centraline di acquisizione estensimetriche e/o a corda vibrante.

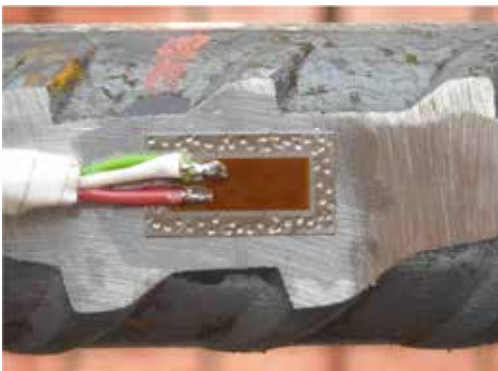


Centralina di acquisizione a lettura digitale

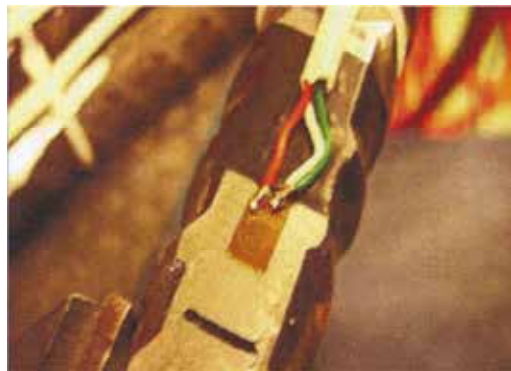


Centralina di acquisizione programmabile

Di seguito sono riportate alcune immagini dei sensori utilizzabili.



Estensimetro resistivo saldato su barra di armatura



Estensimetro resistivo incollato su barra di armatura



Estensimetro a corda vibrante

3.4 Caratteristiche tipiche dei sensori

Sensori estensimetrici a resistenza		Sensori estensimetrici a corda vibrante	
Resistenza elettrica	120.0±0.6%	Tratto attivo	165 mm (6.5")
Gage factor	+1.3±0.2	Campo di misura	3000 µε (±1500 µε)
Campo di misura	2500 µε (±1000 µε)	Gamma di frequenza	500 - 1000 Hz
Sensibilità	1.0 µε	Sensibilità	1.0 µε
Accuratezza	±0.5% FS	Accuratezza	±0.5% FS
Stabilità	0.1% FS	Stabilità	0.1% FS/ yr
Campo di temperatura	-50°C + 200°C	Campo di temperatura	-20°C + 80°C

Il "Gauge factor" è il rapporto tra la variazione relativa di Resistenza sulla variazione relativa della Lunghezza(deformazione relativa).



Saldatura degli estensimetri



Messa in opera della gabbia



Collegamento dei sensori

3.5 Esempio di prova

Di seguito si riportano le principali elaborazioni grafiche e numeriche di una prova di carico su palo avente le seguenti caratteristiche:

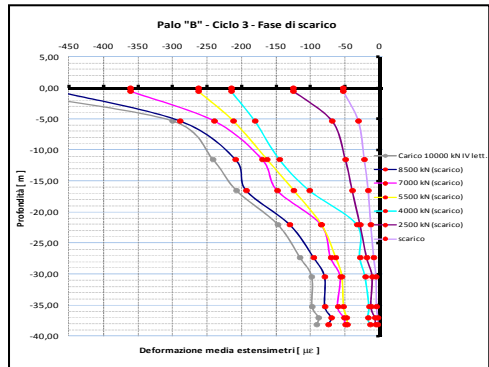
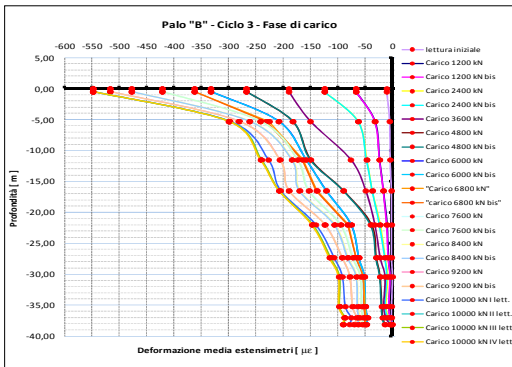
- Diametro nominale 800 mm
- Lunghezza utile 39,5 m

Il carico massimo raggiunto nel corso della prova di carico è stato di 10.000 kN.

Le caratteristiche principali del calcestruzzo utilizzato

Tipo di cemento	Diametro massimo dell'inerte	Contenuto massimo di cloruri	Classe di esposizione	Classe di consistenza	Classe Rck	Tipo di acciaio d'armatura
32.5R IV/A	20 mm	0,20%	XC2	S5	35 N/mm ²	B450C

A seguire sono riportati alcuni elaborati grafici ottenuti durante l'esecuzione della prova.



Diagrammi deformazioni - profondità al variare del carico

Palo "B" - 3° CICLO				
Carico Q applicato sulla testa del palo [kg]	Area A del palo [cm ²]	ε media (valore assoluto) in prossimità della testa [με]	ε media (valore assoluto) in prossimità della testa [ε]	Modulo elastico E del calcestruzzo [kg/cm ²]
120000	5026	67	0,0000670	356356
240000	5026	125	0,0001250	382014
360000	5026	190	0,0001897	377517
480000	5026	268	0,0002677	356778
600000	5026	333	0,0003329	358622
680000	5026	363	0,0003635	372225
760000	5026	422	0,0004221	358223
840000	5026	478	0,0004778	349818
920000	5026	517	0,0005168	354214
1000000	5026	549	0,0005486	362710
850000	5026	468	0,0004680	361369
700000	5026	361	0,0003610	385805
550000	5026	263	0,0002630	416087
400000	5026	215	0,0002150	370168
250000	5026	125	0,0001253	396978

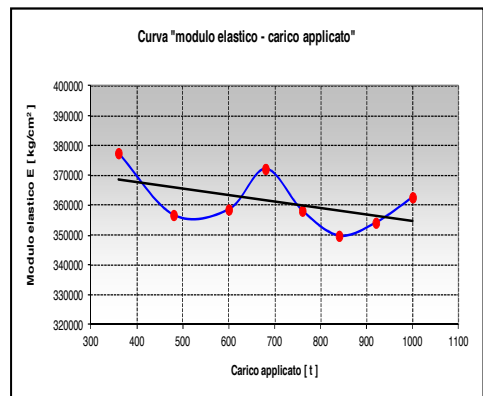
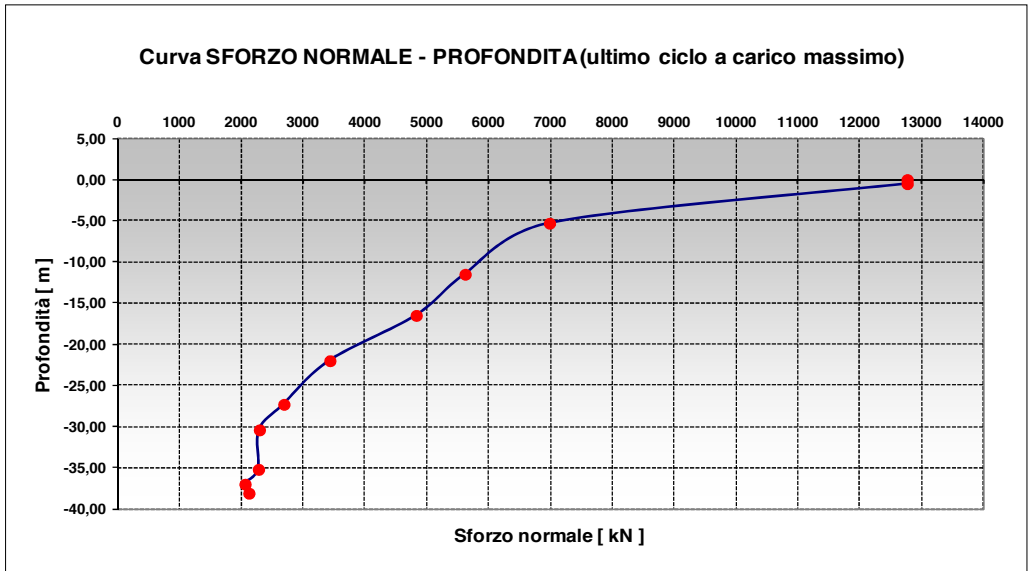


Tabella diagramma di elaborazione modulo elastico - carico applicato

Nel grafico a seguito si riporta l'andamento dello sforzo normale lungo la profondità del palo all'applicazione del carico massimo.

E' interessante notare come il 50% del carico è assorbito nei soli primi 5 m di palo e che alle profondità tra -30 e -38 m l'assorbimento laterale è praticamente nullo.

Si osserva inoltre che dei 13.800 kN applicati circa 2.000 kN, il 15%, sono sopportati dalla punta.



Dal grafico precedente è possibile ricavare la quota a parte di resistenza laterale mobilitata per ogni fase di carico compresa tra due sezioni di misura.

Assumendo che il Modulo Elastico si mantenga costante lungo il palo e che la geometria sia regolare, il carico assiale nel palo diminuisce d'intensità con la profondità per effetto della forza di attrito del terreno.

Per ogni tratto, nel seguito, per semplicità espositiva, chiamato "concio", il contributo è direttamente proporzionale alla superficie laterale, alle caratteristiche del terreno e all'intensità del carico applicato, finché non è raggiunta la resistenza limite.

Quando le risorse di resistenza laterale del concio sono mobilitate e si produce la rottura locale per distacco dal terreno all'interfaccia, ogni ulteriore incremento di carico si trasferisce al concio inferiore, fino ad interessare progressivamente la punta.

Pertanto, dall'equilibrio del concio, è possibile quantificare il contributo dell'attrito al fusto come l'integrale del prodotto delle deformazioni assiali misurate da ogni terna estensimetrica per la sezione del palo e la sua rigidezza, lungo la superficie laterale.

Detta ε_{zi} la deformazione misurata nel tratto di lunghezza l_i , è possibile ricavare gli spostamenti della punta del palo W_p mediante la relazione:

$$W_p = W - \sum_{i=1}^n \varepsilon_{zi} \cdot l_i$$

in cui W rappresenta lo spostamento della testa del palo e n il numero di tratti strumentati.

Per quanto concerne gli spostamenti della superficie laterale W_s , variabili con la profondità, sono riferiti al punto medio del palo ($z = L/2$) e valutati con la seguente espressione:

$$W_s = W - \sum_{i=1}^k \varepsilon_{zi} \cdot l_i$$

in cui k rappresenta il numero di tratti strumentati al di sopra della semilunghezza del palo.

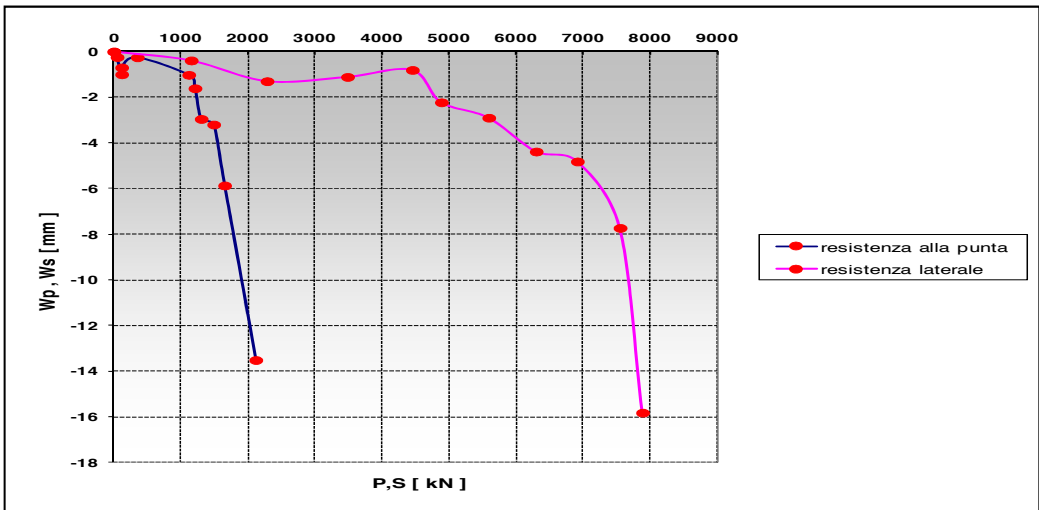
Nota il carico Q applicato alla testa del palo e il carico trasmesso alla base del palo P , dall'equazione di equilibrio:

$$S = Q - P$$

Si ottiene il carico trasmesso per attrito lungo la superficie laterale.

In questo modo sono state ottenute le seguenti curve di mobilitazione sia della resistenza laterale ($S - W_s$) che della resistenza alla punta ($P - W_p$).

Diagramma curve di mobilitazione della resistenza laterale e della resistenza alla punta



3.6 Normativa di riferimento

- Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 (Art. 6.4.3.7.1)
- A.G.I. 1984