

# TEST DI INTEGRITÀ SU PALI DA FONDAZIONE METODO DELL'AMMETTENZA MECCANICA



## 1. PREMESSA

L'impiego di fondazioni su pali comporta l'esigenza da parte dei progettisti, dei committenti e delle imprese costruttrici di verificare che il prodotto finito sia conforme ai dati di progetto ed esente da difetti che possano pregiudicarne la funzionalità.

Per soddisfare tale esigenza vengono utilizzate tecniche di indagine globali che sfruttano la propagazione delle onde elastiche all'interno del calcestruzzo al fine di stimare le dimensioni e le caratteristiche meccaniche del palo che si va investigando e valutare l'eventuale presenza di difetti al suo interno. I difetti possono essere costituiti da strozzature o sbulbature del fusto del palo o tratti del palo in cui le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo sono più scadenti.

In tale ambito il test di ammettenza meccanica è un test molto affidabile e può fornire inoltre indicazioni anche sul comportamento complessivo palo-terreno.

## 2. QUADRO NORMATIVO

In assenza di uno specifico quadro normativo nazionale si può fare riferimento alla Norma francese **AFNOR NF P94-160-4** "Auscultation d'un élément de fondation". *Partie 4: Methode par impédance*".

## 3. STRUMENTAZIONE

L'apparecchiatura per il test comprende un martello strumentato dotato di cella di carico capace di misurare la forza d'impatto, un accelerometro ed una centralina di acquisizione dati dotata di display. I dati raccolti sono trasferiti al computer per una loro elaborazione tramite il software dedicato.



Figura 1: particolare della strumentazione impiegata durante l'esecuzione della prova: martello strumentato, accelerometro e centralina di acquisizione dati.

#### 4. CAMPO DI APPLICABILITÀ

Il test si può applicare a tutti i pali di fondazione di cemento armato, sia del tipo costruito in opera o infisso, a sezione circolare o meno, inclinato o dritto, ove la testa sia accessibile.

La snellezza dell'elemento, definita come il rapporto tra la lunghezza ( $L$ ) e il diametro ( $\Phi$ ) del palo, è preferibile che sia compresa tra 10 e 30.

#### 5. MODALITÀ DI ESECUZIONE

Il metodo analizza la risposta di un palo conseguente a una azione impulsiva, la quale genera un'onda che attraversa il palo con una velocità  $C_0$  che è funzione delle caratteristiche meccaniche del materiale. Esso consiste nel:

- generare un'onda d'urto mediante l'utilizzo di un martello strumentato capace di registrare la forza trasmessa;
- misurare contestualmente la velocità prodotta alla testa del palo dal moto vibratorio mediante l'utilizzo di un accelerometro;
- riportare nel dominio delle frequenze, mediante trasformata di Fourier, i segnali della velocità e della forza registrati nel dominio del tempo;

- ricavare il diagramma dell'ammettenza meccanica (chiamato anche mobilità) come rapporto della velocità sulla forza ( $V/F$ ) in funzione della frequenza;
- analizzare il diagramma misurando la distanza tra due picchi e calcolare la lunghezza del palo tramite la seguente relazione:

$$2\Delta f = \frac{C_0}{L} \quad (1)$$

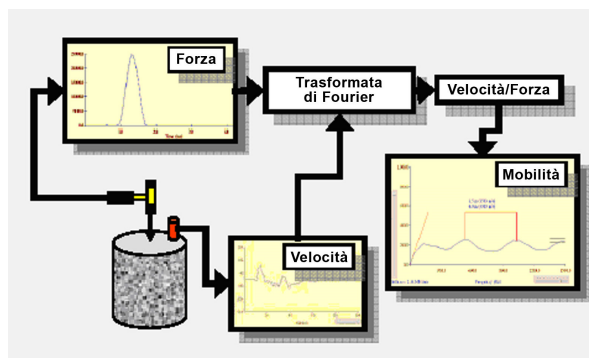


Figura 2: schematizzazione del metodo del metodo dell'ammettenza meccanica.

#### 6. QUADRO TEORICO

Un classico diagramma dell'ammettenza meccanica è il seguente:

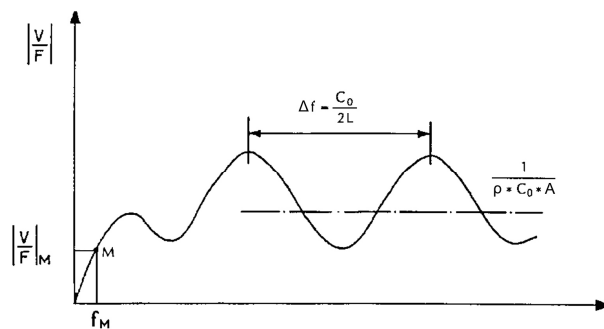


Figura 3: diagramma dell'ammettenza.

dove:

- $V$ : velocità rilevata alla testa del palo, in m/s;
- $F$ : forza applicata, in N;
- $\Delta f$ : scarto di frequenza tra i picchi, in Hz;
- $L$ : lunghezza del palo, in m;
- $C_0$ : velocità di propagazione delle onde piane nel calcestruzzo, in m/s;
- $\rho$ : densità del calcestruzzo, in  $kg/m^3$ ;

- **A:** sezione del palo, in  $m^2$ ;
- **V/F:** ammettenza meccanica o mobilità ( $M$ ) del palo.

La relazione (1) lega gli intervalli di frequenza  $\Delta f$ , la lunghezza fisica  $L$  dell'elemento testato e la velocità dell'onda  $C_0$  nel mezzo, che viene stabilita a priori in base alla qualità del calcestruzzo (vedi tabella seguente) o meglio stimata sperimentalmente su un elemento di lunghezza nota.

Velocità di propagazione (m/s)	Qualità del calcestruzzo
4500 ed oltre	Eccellente
da 3500 a 4500	Buono
da 3000 a 3500	Mediocre
da 2000 a 3000	Scadente
Fino a 2000	Molto scadente

La misura della lunghezza è quindi determinata dalla distanza compresa tra due picchi di risonanza prodotti dal piede del palo. Nel caso ci fosse un difetto di realizzazione lungo il fusto, il picco di risonanza in corrispondenza di tale difetto risulterebbe individuabile nella curva di ammettenza meccanica.

La media della mobilità caratteristica  $M$  calcolata nel diagramma dell'ammettenza come valore medio ponderale è legata alle caratteristiche fondamentali del palo secondo la seguente relazione:

$$M = \frac{1}{\rho \cdot C_0 \cdot A} \quad (2)$$

Nel caso in cui il valore della mobilità misurata non sia confrontabile con quello teorico si può ipotizzare la presenza di una anomalia lungo il fusto riconducibile ad una variazione della sezione o delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, e può essere quindi indicativa di un difetto di realizzazione.

Un'ulteriore parametro ricavabile dal grafico dell'ammettenza è la rigidità dinamica del palo, data dalla pendenza inversa del tratto iniziale della curva.

Sebbene tale parametro non sia correlabile con la pendenza del tratto iniziale della curva carico-cedimenti di una prova di carico statica, è stato dimostrato che vale la pena di approfondire l'indagine di ogni palo che abbia una

rigidezza dinamica marcatamente inferiore a quella degli altri pali testati all'interno dello stesso gruppo.

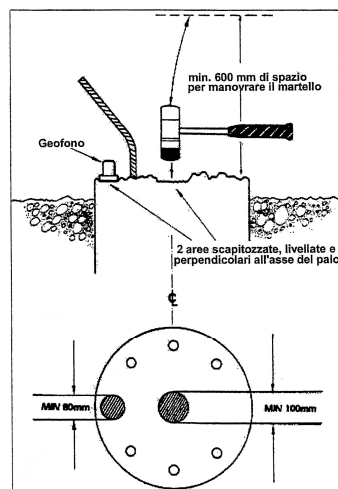


Figura 4: schema operativo di esecuzione della prova.

## 7. INDIVIDUAZIONE DEI DIFETTI

Da un punto di vista teorico si può affermare che un palo è difettoso se presenta contemporaneamente le tre condizioni di seguito elencate:

- la distanza fra i picchi di risonanza non corrisponde a ciò che dovrebbe dare il sistema secondo la lunghezza presunta del palo;
- il valore rilevato della rigidità dinamica è sensibilmente inferiore della media dei valori rilevati per i pali dello stesso tipo nello medesimo sito;
- la mobilità media risulta superiore al valore teorico.

## 8. CONDIZIONI NECESSARIE IN SITO

Oltre al fatto che i pali siano facilmente accessibili agli operatori, per ottenere i migliori risultati possibili è fondamentale che la superficie sia priva d'acqua e che la testa del palo sia perfettamente liscia nelle aree di battuta e di posizionamento dell'accelerometro. Infatti, se le misure in cantiere non sono significative, ogni successiva interpretazione risulterà priva di fondamento.

A tal fine, è bene che siano seguite le seguenti indicazioni:

1. eliminare l'acqua presente sulla superficie della testa del palo;
2. rimuovere eventuali porzioni di calcestruzzo fratturate e che suonano a vuoto;
3. legare fra loro le barre longitudinali e rimuovere il ferro a spirale dell'armatura per evitare interferenze nel segnale;
4. preparare due aree per il posizionamento della strumentazione: una per il martello strumentato, al centro del palo, e un'altra per consentire invece il posizionamento dell'accelerometro all'interno del perimetro della testa del palo.

## 9. INFORMAZIONI UTILI

È bene che l'operatore che esegue la prova reperisca i seguenti dati:

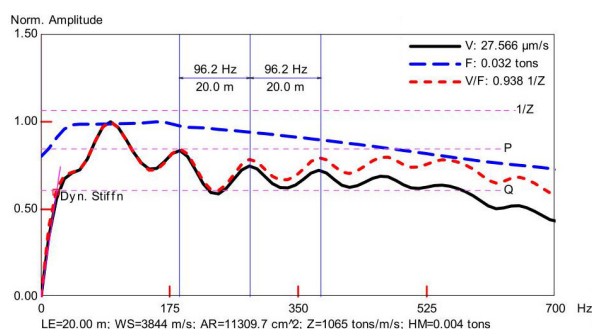
- geometria di progetto dei pali da testare;
- caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati;
- data del getto di ogni elemento;
- tecnologia adottata per la loro realizzazione;
- eventuali problemi sorti durante l'esecuzione.

## 10. ANALISI DEI RISULTATI

Con il software in dotazione l'operatore è in grado di visualizzare i segnali nel dominio delle frequenze andando a modificare alcune variabili tra cui:

- intervallo di frequenze entro il quale definire i picchi massimi e minimi della mobilità;
- frequenza di calcolo della rigidità dinamica;
- numero di picchi che devono essere ricercati dal programma;
- frequenza dalla quale il programma deve iniziare la ricerca dei picchi;
- eventuali soglie di filtraggio del segnale.

A titolo di esempio viene qui di seguito riportato il grafico di ammettenza per un palo avente lunghezza 12 m e diametro 1200 mm.



**Figura 5: elaborazione del segnale tramite l'utilizzo del software. Il diagramma rappresenta il valore dell'ammettenza meccanica del palo in funzione della frequenza: da esso è possibile ricavare, attraverso la misura della distanza tra due picchi di risonanza successivi, la lunghezza del palo o la profondità di un'eventuale anomalia.**

## 11. LIMITI DI APPLICABILITÀ

Questa metodologia di indagine indiretta fa parte dei cosiddetti *metodi vibrazionali a bassa intensità di energia*. Essi valutano la lunghezza fisica dell'elemento di palo interessato dalla propagazione delle vibrazioni indotte in sommità e ne registrano il comportamento dinamico.

Tali metodi vengono utilizzati per individuare nell'ambito di una palificata eventuali anomalie costruttive e caratterizzare il comportamento medio dei pali.

Le indicazioni così ottenute possono essere utilizzate per esprimere giudizi d'idoneità di una palificata o per indirizzare opportunamente eventuali indagini dirette supplementari.

Cambi di sezione dell'ordine del 10% possono essere non individuati, essendo il cambio d'impedenza del palo limitata.

Per quanto riguarda invece la lunghezza, l'eterogeneità del calcestruzzo comporta che l'incertezza sia intorno al 15%.

Questo test non dà informazioni sulla resistenza ultima del palo testato, e dunque sulla sua effettiva capacità portante, ma solo sulla presenza o meno di difetti lungo il fusto del palo.