

PROVE ECOMETRICHE E DI AMMETTENZA MECCANICA SU PALI

I metodi di indagine utilizzati per lo studio delle proprietà dei pali e del sistema palo terreno rientrano nei metodi a bassa deformazione, definiti in letteratura come *Low Strain Methods*, che consentono di ottenere informazioni per mezzo di piccole sollecitazioni impresse al palo al fine di “mobilitarlo” nelle primissime regioni del campo elastico e misurarne la risposta grazie a sistemi di acquisizione molto sensibili ed accurati.

Indagine Ecometrica

Uno dei principi che ha guidato l’analisi dei dati è quello della ricerca degli echi generati dall’onda di pressione imposta (impulso o martellata), quando essa rimbalza da un’estremità all’altra del palo. Questo metodo, definito “*Sonic Pulse Echo Method*” prevede che venga attuata una sollecitazione impulsiva all’estremità di un palo costituito di materiale omogeneo e dotato di sezione costante e provocare in ragione di ciò un’onda meccanica che viaggia in esso. Il palo stesso funge da guida d’onda, la quale rimbalza varie volte da un’estremità all’altra, sotto forma di un fronte d’onda che è possibile intercettare e misurare con sensori di tipo accelerometrico o velocimetrico, posti ad una delle due estremità. Nella figura seguente è riportato uno schema operativo caratteristico.

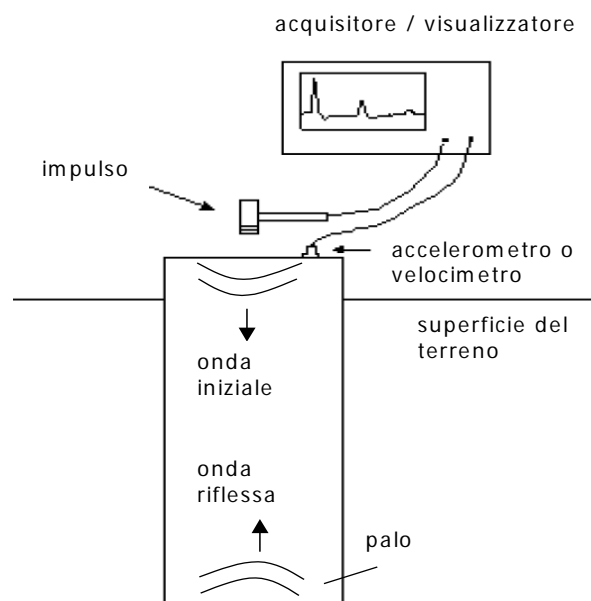


fig. 1 – Schema esemplificativo della prova

I trasduttori (accelerometro o velocimetro), posti sulla testa del palo, restituiscono un andamento della grandezza misurata in funzione del tempo, grazie al quale è possibile individuare gli istanti di partenza e ritorno della sollecitazione imposta. La differenza tra questi due istanti restituisce il tempo di volo Δt della sollecitazione tra le estremità del palo. In fig. 2 è mostrato un esempio di accelerogramma misurato sulla testa del palo grazie al quale è possibile determinare il valore Δt .

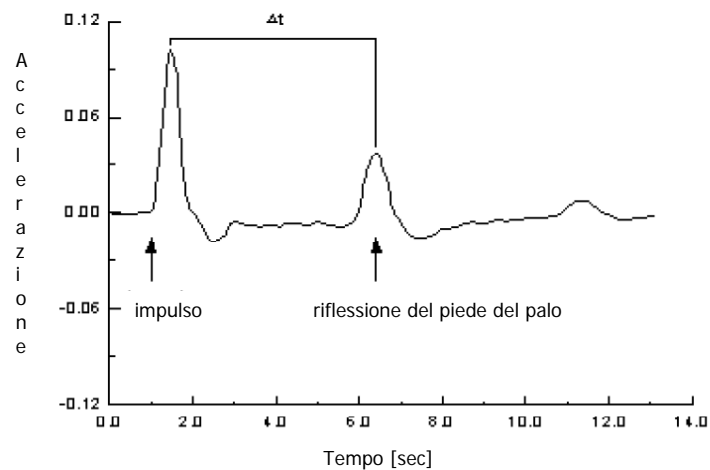


fig. 2 – Individuazione tempo di volo nel palo

La determinazione della lunghezza del palo, così come la localizzazione dei difetti che fungono anch'essi da superfici riflettenti come il piede del palo, è dunque condotta per mezzo della seguente espressione:

$$L = \frac{V\Delta t}{2} \quad (a)$$

dove V è la velocità media di propagazione delle onde elastiche nel materiale costituente il palo. Affinché sia possibile, a partire dalla misura dell'intervallo Δt , individuare la lunghezza del palo è necessario conoscere il valore della velocità V . Facendo riferimento alla fig. 3, le onde elastiche che si propagano a partire dalla martellata impressa sono di due tipi: longitudinali (o di compressione), che eccitano le particelle del mezzo in direzione parallela allo loro propagazione, e trasversali (o di taglio), che movimentano il mezzo in direzione ortogonale a quella nella quale si propagano. La V utilizzata in questo metodo rappresenta la grandezza V_p , indicata nella tabella seguente ($V=V_p$).

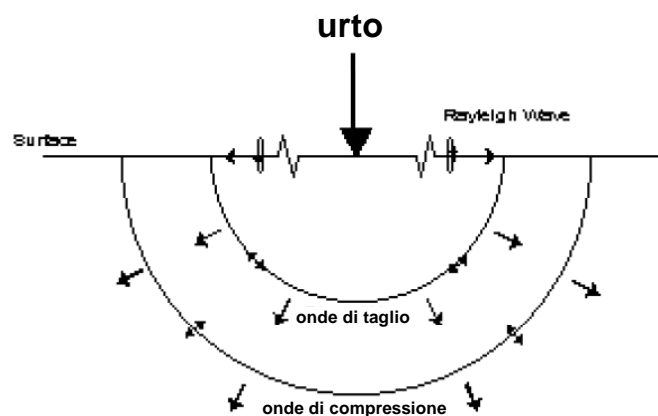


fig. 3 – Onde di compressione e onde di taglio



Per diversi tipi di materiali esistono range di velocità noti sperimentalmente per entrambe le tipologie di onde.

Mezzo	Densità [Kg/m ³]	Onde di compressione Vp [m/s]	Onde di Taglio Vs [m/s]
Aria	1,25	340	-
Acqua	1.000	1.480	-
Acciaio	7.800	5.900	3.200
Calcestruzzo	2.300	3.200÷4.500	2.500÷3.400
Sabbia	1.500÷2.100	500÷2.000	100÷850
Argilla	1.700÷2.000	400÷1.700	100÷800
Calcare	2.700	2.000÷5.900	1.000÷3.100
Granito	2.750	2.400÷5.000	1.200÷2.500

tab. 1 – Valori delle velocità delle onde Vp e Vs in diversi materiali

La tabella precedente indica che a differenza di altri materiali, la velocità V nel calcestruzzo è assai variabile anche del 30% e questo si riflette in maniera direttamente lineare, vedi la (a), sulla profondità misurata. Per ovviare a ciò, ed utilizzare quindi un valore corretto di V nelle analisi, è in necessario settare l'apparato di misura su uno o più pali di profondità nota appartenenti allo stesso gruppo di pali oggetto dell'indagine. Questa procedura può non risultare comunque sufficiente, in quanto non è escluso che anche in un insieme di pali appartenenti allo stesso impianto fondale, per i quali ci si aspetterebbe caratteristiche uniformi nella composizione delle miscele o del getto, alcuni presentino sacche o porzioni di palo con caratteristiche scadenti che si riflettono poi sul valore di V. Le relazioni seguenti, infatti, permettono di ricavare il valore di Vp e Vs a partire da misure sperimentali del modulo elastico E, del modulo di taglio G della densità ρ del materiale e del modulo ν di Poisson:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad G = \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (b)$$

dalla prima delle (b) si deduce che il valore di V è suscettibile delle stesse grandezze che condizionano il valore di E e quindi, tra le altre:

- la composizione granulometrica della miscela;
- il rapporto acqua/cemento: (al crescere del quale diminuisce il valore di E);
- le modalità di posa in opera;

Quanto descritto sopra è relativo a condizioni ideali: palo libero, costituito da materiale omogeneo, sezione costante e direzione di eccitazione longitudinale allo sviluppo del palo. Nei casi reali in primo luogo vi è il terreno ove il palo è infisso che, con le sue caratteristiche fisiche (densità

e modulo elastico), fa sì che la guida d'onda non sia più costituita dal solo palo, bensì dall'insieme palo-terreno. Nella figura seguente, a puro titolo di esempio, viene mostrato come varia l'accelerogramma nel caso di un palo in condizioni ideali (suolo omogeneo e sezione costante) e reali (suolo di due tipologie diverse e varie sbulbature e restringimenti della sezione).

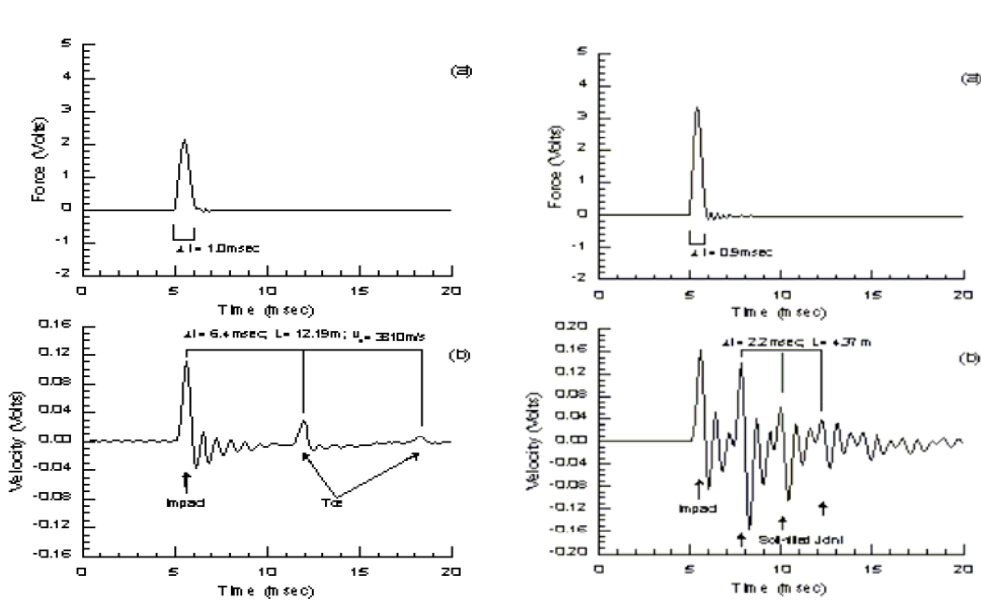


fig. 4 - Echi di ritorno dell'impulso nel caso ideale e nel caso di palo con difetti nella sezione

La determinazione della lunghezza del palo, così come la localizzazione dei difetti, può essere condotta, oltre che nel dominio del tempo anche nel dominio delle frequenze. In generale il valore L cercato può quindi essere ricavato mediante le due espressioni:

$$L = \frac{V\Delta t}{2} ; \quad L = \frac{c}{2\Delta f} \quad (c)$$

una relativa alla misura della lunghezza nel dominio del tempo ed la seconda nel dominio delle frequenze. Le grandezze Δt e Δf rappresentano rispettivamente la distanza tra due picchi consecutivi nell'accelerogramma e nello spettro della risposta misurati in testa al palo.

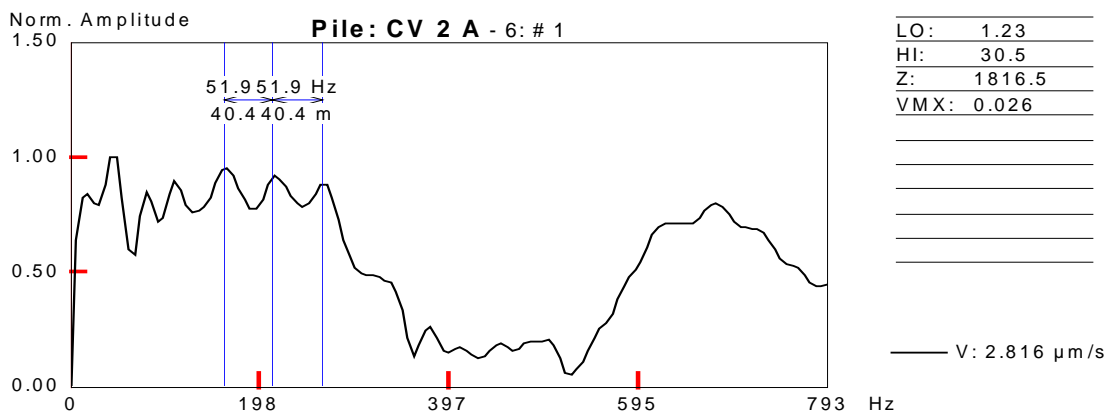


fig. 5 - Andamento tipico dell'analisi nel dominio della frequenza del segnale di risposta

Ammettenza Meccanica

La seconda tecnica utilizzata, quella dell'Ammettenza Meccanica, che si differenzia dal metodo ecometrico per il fatto che aggiunge a questo la possibilità di ottenere informazioni di carattere meccanico del sistema palo-terreno, deriva il suo nome dalla traduzione dall'inglese della grandezza *Mechanical Admittance*, altrimenti chiamata *Mobility (M)*. Essa è una funzione residente nel dominio della frequenza e definita come il rapporto tra lo spettro della risposta del palo, espressa in termini di velocità, $V(f)$, e lo spettro della sollecitazione impressa al palo, espressa in termini di forza, $F(f)$:

$$M = \left| \frac{V(f)}{F(f)} \right| \quad (d)$$

Per come è definita, questa grandezza rappresenta un indicatore del grado di elasticità del sistema palo-terreno. La rappresentazione tipica di questa grandezza assume le forme riportate nella figura seguente:

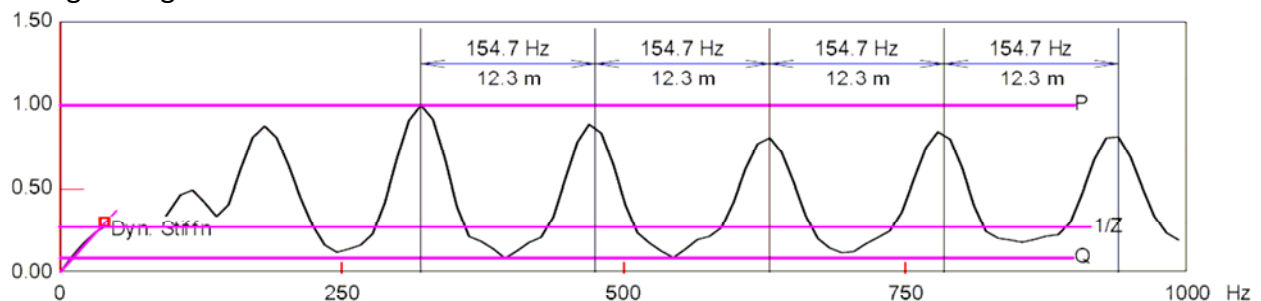


fig. 6 - Andamento tipico della grandezza M nel dominio delle frequenze

Il tratto iniziale della curva, che parte dall'origine degli assi, può essere approssimato da una linea retta. L'inverso dell'angolo d'inclinazione di questa linea fornisce il modulo elastico dinamico:

$$K_d = \frac{2\pi \cdot f_M}{M} \quad (e)$$

Con riferimento alla figura precedente i valori considerati sono quelli relativi al punto ove la funzione M abbandona l'andamento rettilineo. In generale, la grandezza K_d può essere comparata al modulo elastico totale del sistema palo-terreno (ove cioè viene considerata sia la rigidità del palo in quanto tale e quella del terreno nel quale è inserito) per mezzo della relazione generale $E_t A/L$, ove E_t è il modulo elastico dell'insieme palo terreno, A l'area della sezione ed L la lunghezza del palo:

$$K_d = \frac{2\pi \cdot f_M}{M} = \frac{E_t A}{L} \quad (f)$$

dal che deriva che una stima indiretta del Valore di E può essere ottenuta a mezzo dalla relazione:

$$E_t = \frac{2\pi \cdot f_M}{M} * \frac{L}{A} \quad (g)$$



Il valore medio della funzione M ove essa assume un andamento costante (per esempio alte frequenze, non riportate in figura) è definito come:

$$N_c = \frac{1}{\rho A c} = \frac{1}{Z} \quad (h)$$

dove:

- ρ è densità del materiale costituente il palo (kg/mc) ;
- c è la velocità delle onde (m/s);
- A è l'area della sezione del palo (mq);
- Z è l'impedenza meccanica del palo (N/m/s)

D'altra parte il valore medio della funzione Mobility (sperimentale) può essere rappresentata da una media geometrica:

$$N_m = \sqrt{PQ} \quad (i)$$

dove, in riferimento alla figura precedente, fig. 6, P è il valore del picco più alto della funzione e Q è valore che la funzione assume nella valle più profonda. La grandezza N_m fornisce una misura relativa della grandezza Mobility per il palo indagato rispetto alle misure della stessa grandezza di altri pali. Le tre grandezze, nel loro insieme, rappresentano una misura della qualità del palo.