

ANALISI DI INTEGRITA' SU PALI DI FONDAZIONE

PROVA DINAMICA A BASSA ENERGIA

PIT – PROVE DI AMMETTENZA MECCANICA

Ing. Thomas Pavan

Ing. Settimo Martinello

4 EMME Service Spa

La prova PIT, *Pile Integrity Test*, è utilizzata per la verifica dell'integrità dei pali di fondazione. Viene eseguita allo scopo di individuare eventuali anomalie lungo il fusto del palo come ad esempio variazioni repentine di diametro, intrusioni di altri materiali, grandi fessure, vuoti e fornisce una stima della lunghezza effettiva del palo.

L'esecuzione di questi test non necessita predisposizioni particolari sui pali al momento della realizzazione ed anche per tale ragione sono eseguite frequentemente nel controllo delle palificate.

La metodologia è impiegata in maniera diffusa in particolare nel mondo anglosassone e nei paesi bassi dove l'impiego dei pali è molto frequente.



PROVA ECOMETRICA PIT

Il metodo di prova utilizzato per l'indagine PIT fa riferimento a quanto prescritto nella norma ASTM D 5882-07.

La prova si esegue sollecitando la testa del palo con un martello e registrando l'impulso di risposta del palo attraverso un accelerometro molto sensibile posto in sommità del manufatto. In alcuni casi viene utilizzato un martello strumentato che consente di quantificare l'entità dell'impulso applicato al momento della sollecitazione del palo.

Al momento dell'indagine vengono richiesti alcuni parametri di input:

Lunghezza presunta del palo (L): valore indicativo della lunghezza del palo che, in fase di analisi del segnale, sarà corretto con un valore calcolato dal software sulla base della effettiva velocità del suono misurata.

Diametro del palo: valore utilizzato per il calcolo dell'area. Importante per la determinazione dell'impedenza (Z) e per la comparazione di forza e velocità registrati durante la prova.

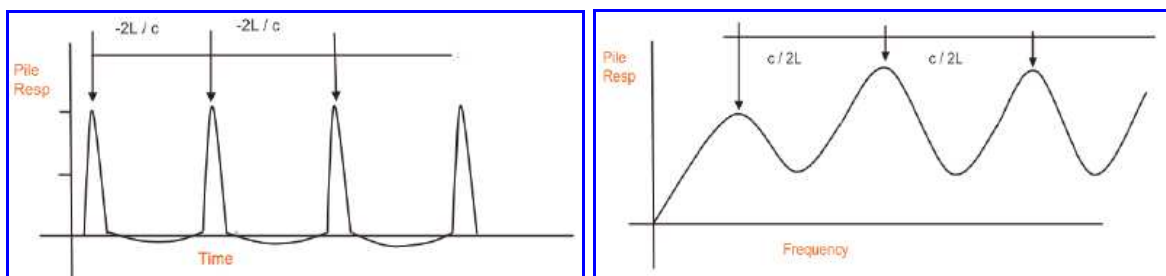
Velocità delle onde (Ws): valore indicativo della velocità di trasmissione delle onde nel materiale in cui è realizzato il palo. Nel caso di più materiali viene inserito il valore medio. Questo parametro è poi variato in fase di post processing del segnale in funzione della lunghezza (L) e del tempo misurato di arrivo delle onde sul fondo del palo (vedi lunghezza L).

Peso specifico del materiale (ρ): valore utilizzato per il calcolo dell'impedenza (Z). E' necessario solamente quando si eseguono le indagini utilizzando il martello strumentato.

I segnali registrati dall'accelerometro e dal trasduttore all'interno del martello strumentato possono essere analizzati seguendo due vie complementari tra loro:

- analisi nel dominio del tempo (*Pulse Echo Method – PEM*);
- analisi nel dominio delle frequenze (*Impulse Transient Response Method – ITRM- TRM*);

Entrambi i metodi consentono di fare delle considerazioni sul profilo dei pali analizzati, di stimarne la lunghezza e di valutare l'influenza del terreno e delle variazioni stratigrafiche. Se si prendesse un palo ideale posto in un terreno uniforme i segnali che si otterrebbero, rispettivamente nel dominio dei tempi e delle frequenze, sarebbero i seguenti:



dove:

L : lunghezza del palo

c : velocità di trasmissione delle onde (Ws).

Analisi nel dominio del tempo

L'analisi eseguita nel dominio dei tempi (*PEM*) utilizza un diagramma velocità/tempo ottenuto integrando i valori di accelerazione registrati dall'accelerometro al momento della prova.

Il profilo del palo è analizzato valutando gli effetti delle riflessioni sulle onde di compressione indotte dalla sollecitazione sulla testa del palo quando incontrano delle variazioni di impedenza Z . Per elementi integri e di sezione regolare si ottengono due sole riflessioni: la prima corrisponde al colpo di martello, la seconda al fondo del palo.

L'impedenza è data dalla relazione:

$$Z = \frac{W_s A \rho}{g} \quad (1)$$

dove:

A : area del palo

W_s : velocità di trasmissione delle onde

ρ : densità di massa del materiale

g : accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Oltre alle riflessioni dovute a variazioni di impedenza Z , che come si vede dalla relazione (1) è strettamente legata alle proprietà del materiale, ci sono le riflessioni dovute al terreno dove è realizzato il palo.

Queste riflessioni non devono essere ricondotte a variazioni di sezione lungo il fusto del palo, ma alla presenza di una stratigrafia con cambi di materiale ben definiti.

Ogni altra riflessione si analizza sulla base della sua fase. Un'onda in fase a quella generata dal colpo di martello indica una diminuzione dell'impedenza e quindi un difetto del palo riconducibile ad una restrizione di sezione, fessurazioni e/o caratteristiche del cls più scadente.

Sono a seguito riportati i segnali di due possibili situazioni riconducibili ad un difetto sul palo o ad una variazione stratigrafica.

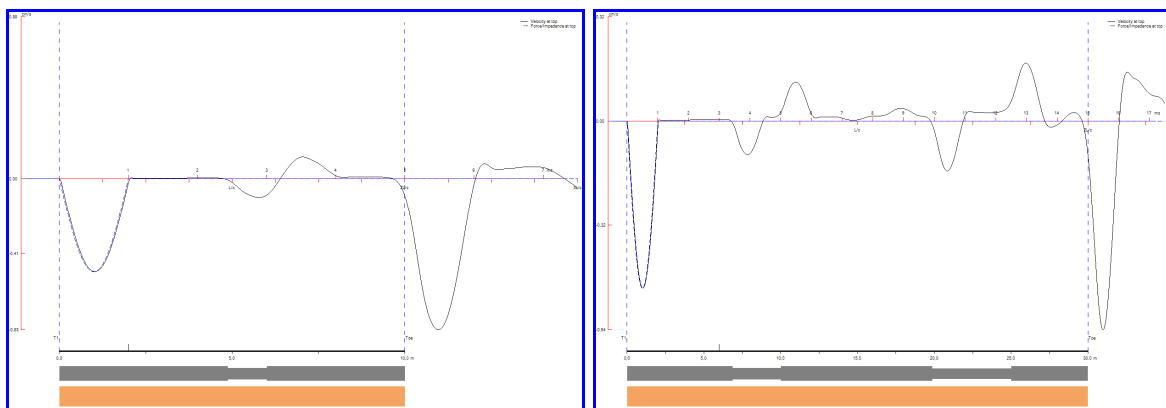


Fig. 1 - Palo con difetto

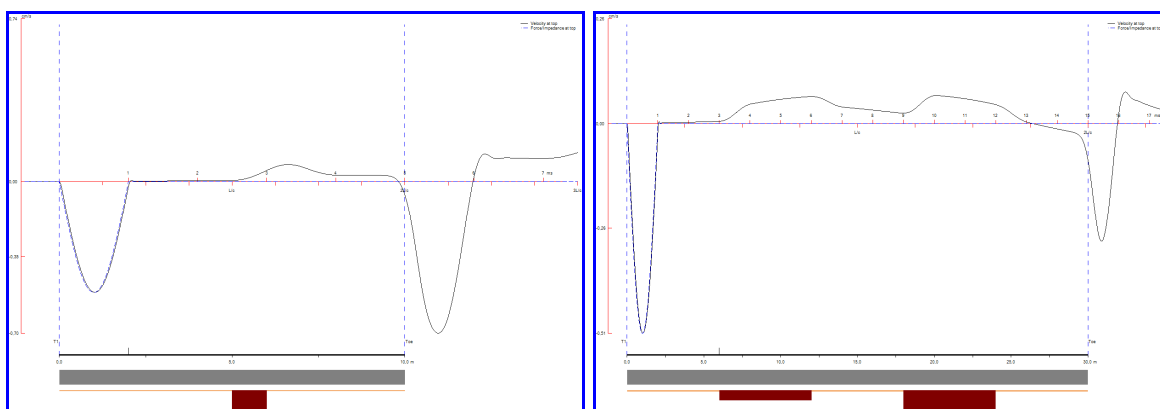


Fig. 2 - Palo intero

Nei quattro diagrammi esemplificativi il profilo del palo è schematizzato nella parte inferiore mediante una fascia grigia, mentre la stratigrafia del terreno con fasce marroni.

I primi due segnali, Fig.1, rappresentano un palo realizzato su un terreno composto da un solo materiale (senza cambi di strato) con variazioni di sezione a diverse profondità.

I segnali in Fig.2 rappresentano un palo intero realizzato su un terreno caratterizzato da cambi di strato ben definiti.



A seguito si riporta l'analisi di un segnale nel dominio del tempo eseguita con il software PIT-W – profile.

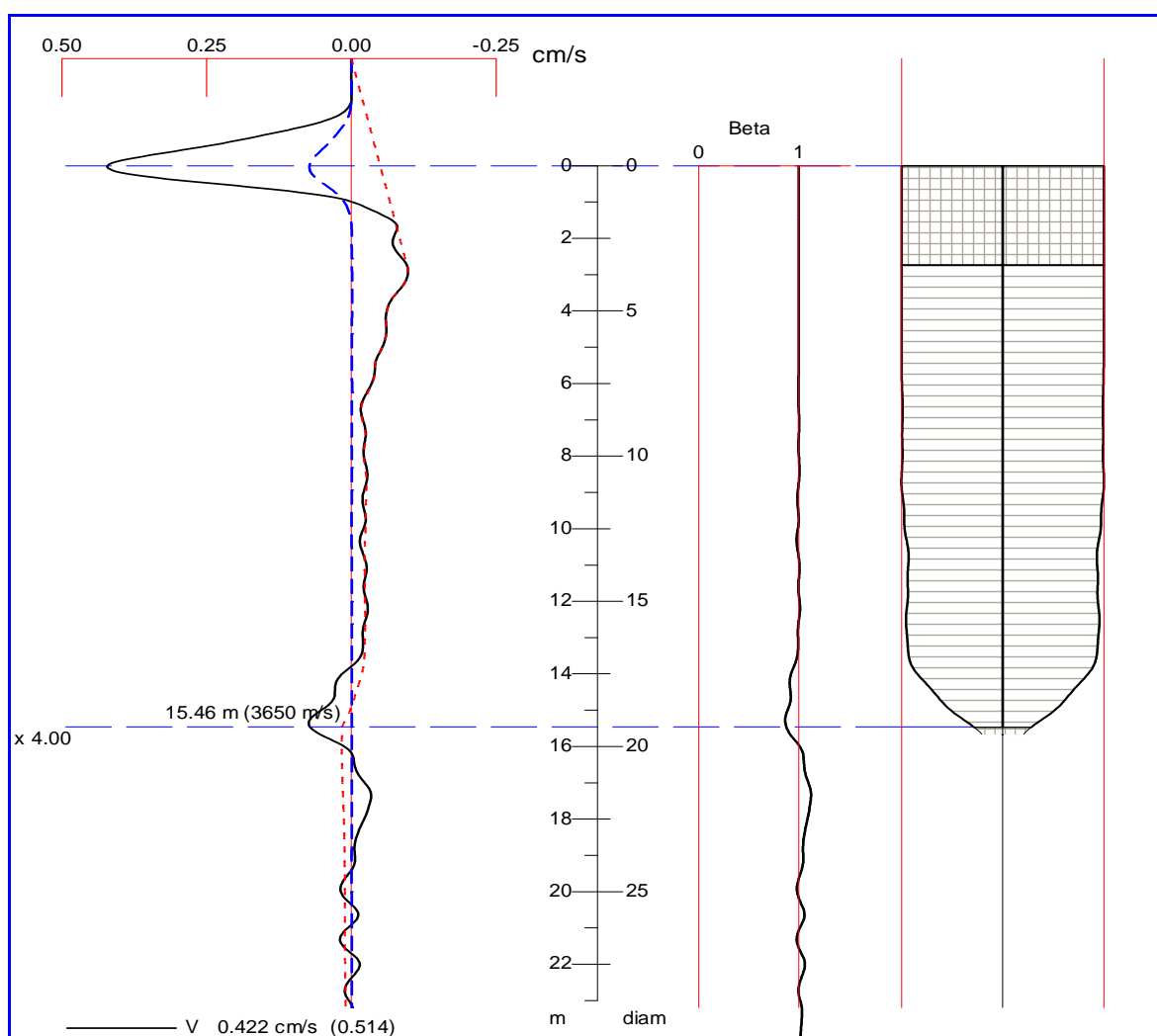


Fig 3 - Analisi del profilo del palo

Sulla destra è possibile vedere il digramma velocità/tempo ottenuto integrando i valori di velocità registrati in fase di prova.

Le linee orizzontali tratteggiate di colore blu indicano la testa ed il fondo del palo che, in questo specifico caso si trova a 15,5 metri.

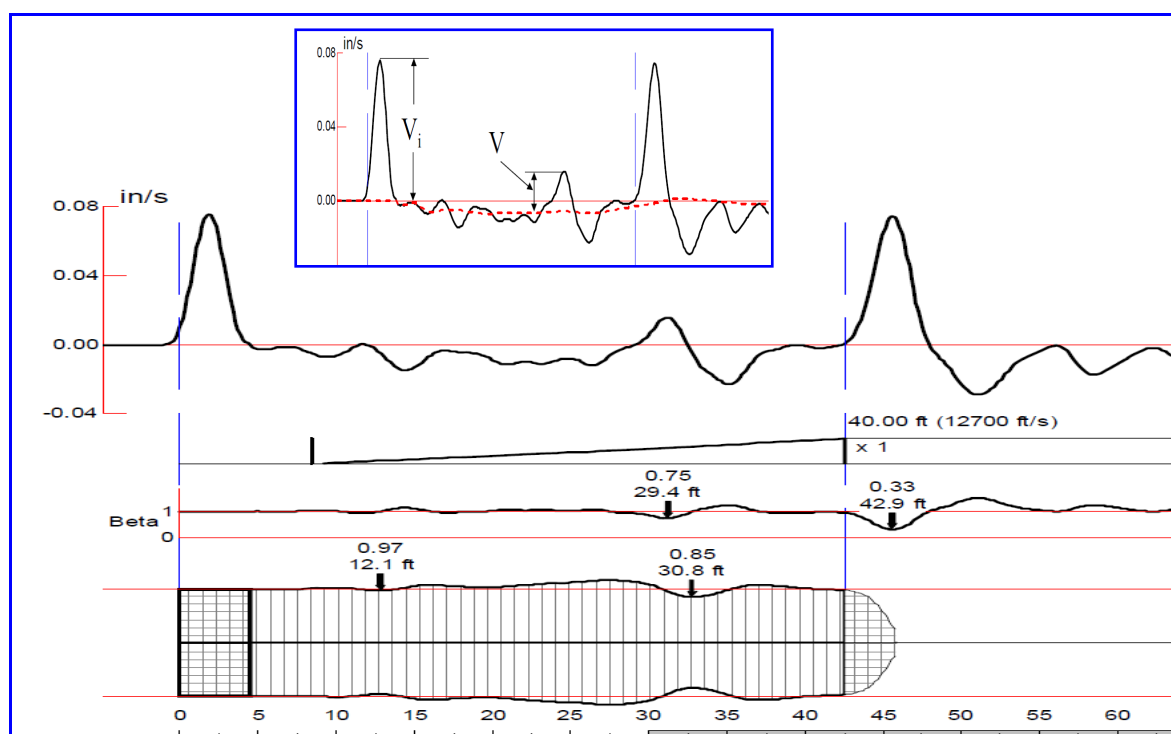
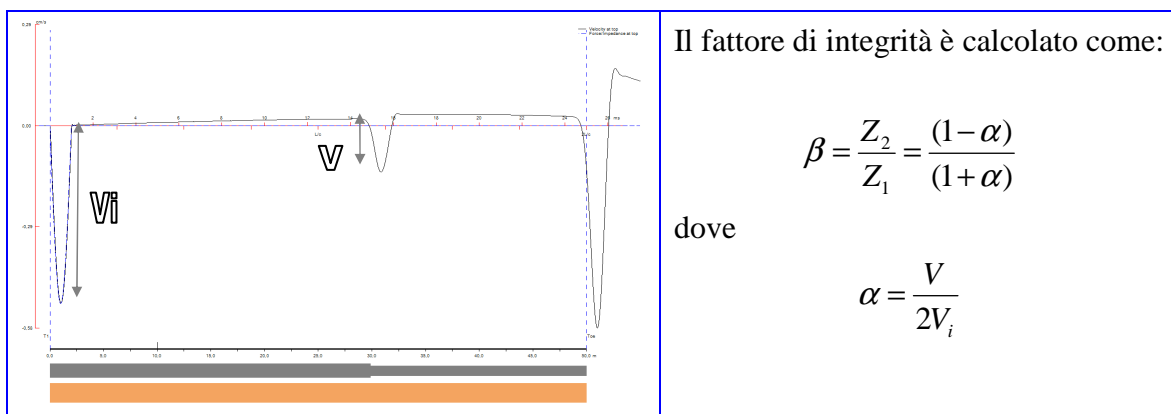
La retta graduata posta sulla destra del diagramma indica profondità in metri e rapporto profondità/diametro. Nel caso in esame, trattandosi di un palo con diametro 800 mm, il rapporto è 19,3. Quando questo rapporto è molto elevato si corre il rischio che l'impulso indotto sulla testa del palo non sia sufficiente a creare delle onde di compressione tali da percorrere l'intero manufatto fino in profondità e di risalire per essere registrate dall'accelerometro (impossibilità di determinare il fondo palo).

Il valore massimo del rapporto tra lunghezza e diametro è circa 50.

L'analisi del profilo del palo nel dominio del tempo può essere coadiuvata dall'analisi del *Fattore di Integrità Beta* (β).

Tale valore è molto importante perché assieme alla visualizzazione del diagramma velocità/tempo consente di individuare variazioni di impedenza dovute a difetti e/o cambi di stratigrafia e di quantificarli.

Per spiegare meglio il parametro Beta prendiamo un palo caratterizzato da una prima parte con impedenza Z_1 ed una seconda parte con impedenza Z_2 .



Questo fattore è funzione del primo picco registrato e varia da 0 a 1. Nell'analisi del profilo a sinistra, sono indicate due variazioni significative del parametro β , la prima pari a 0,75 e la seconda pari a 0,33 in corrispondenza del fondo palo.

Analisi nel dominio delle frequenze

L'analisi eseguita nel dominio delle frequenze (*TRM*) utilizza sia i valori di forza (eseguendo le indagini con un martello strumentato) sia i valori di velocità ottenuti integrando i valori registrati dall'accelerometro.

Il passaggio dal dominio dei tempi al dominio delle frequenze si ottiene eseguendo la Trasformata di Fourier (*FFT*) del segnale.

Questo concetto è lo stesso che sta alla base delle prove vibrazionali dove una vibrodina viene collocata sulla testa del palo e viene azionata inducendo sul manufatto una frequenza nota.

Nel caso di prove dinamiche a bassa energia, le frequenze generate sul palo sono provocate dal colpo di martello, il quale induce uno spettro di frequenze che va da zero ad un massimo solitamente usato nelle prove vibrazionali.

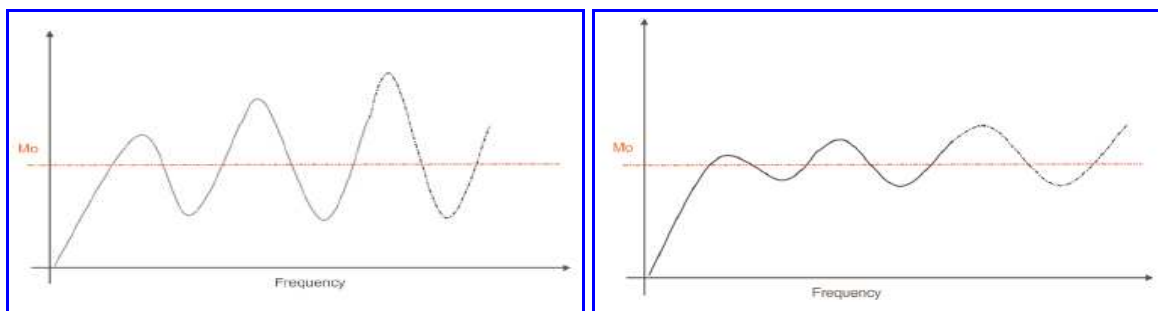
Il terreno circostante svolge una funzione di attenuazione molto importante (*damping factor*) e si può manifestare sia in pali di dimensioni ridotte inseriti in un terreno molto resistente, sia in pali di grande dimensione (lunghezza) inseriti in terreni deboli.

Poiché l'intensità della forza generata da un semplice colpo di martello varia in funzione della frequenza e si riduce man mano che si sale nello spettro delle frequenze, è necessario normalizzare il valore di forza in funzione della velocità.

Viene introdotto quindi il concetto di *Mobility* o ammettenza meccanica che è calcolata come:

$$M(f) = \frac{V(f)}{F(f)} \quad (2)$$

dove $V(f)$ è la velocità alla frequenza f ed $F(f)$ è la forza alla frequenza f .



Effetto della resistenza del terreno nella curva di mobilità

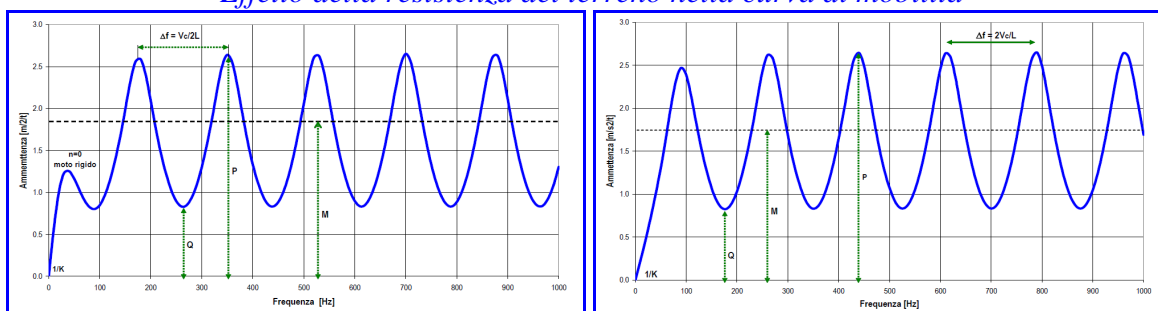


Diagramma mobilità in un palo incastrato ed in un palo libero

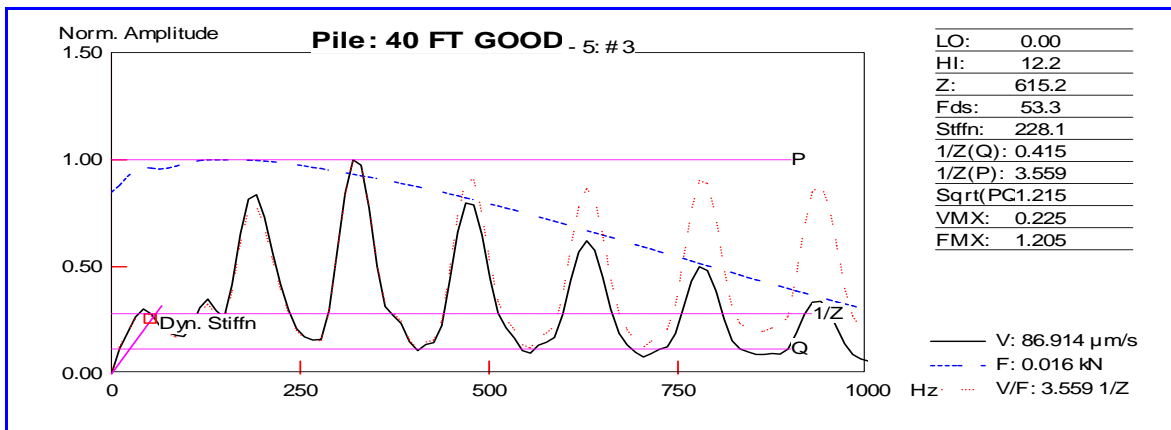


Fig. 4 – Analisi nel dominio delle frequenze

Nel diagramma sopra riportato è rappresentato il valore di mobilità dalla linea tratteggiata in rosso.

Il valore massimo e minimo di questo parametro è definito rispettivamente dalle rette P e Q tratteggiate in rosa.

L'ammettenza meccanica è quindi l'indice della flessibilità del sistema palo/terreno. Maggiore è il valore di mobilità, maggiore è la "flessibilità" del sistema, ossia una maggiore facilità della massa che compone il palo a muoversi ad una particolare velocità. Valori elevati di questo parametro sono indici di bassi valori di impedenza.

Per ciascun palo si deve quindi calcolare una valore di ammettenza meccanica caratteristica che, assieme al valore di ammettenza meccanica teorica e a quello di rigidezza dinamica costituisce uno dei parametri per valutare qualitativamente un palo.

L'ammettenza meccanica caratteristica va calcolata attraverso la relazione:

$$N_m = \frac{\sqrt{PQ}}{Z} \quad (3)$$

dove:

P e Q sono rispettivamente il massimo ed il minimo valore della *Mobility*.

Z, definita come impedenza, va calcolata come da relazione (1).

L'ammettenza meccanica teorica va calcolata attraverso la relazione:

$$N_c = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\frac{W_s A \rho}{g}} \quad (4)$$

dove:

A : area del palo

W_s : velocità di trasmissione delle onde

ρ : densità di massa del materiale

g : accelerazione di gravità (9,81 m/s²)

Il confronto diretto tra l'ammettenza meccanica caratteristica e l'ammettenza meccanica teorica è il primo metodo di valutazione qualitativa delle caratteristiche di un palo.

Si possono distinguere tre possibili situazioni:

$N_c \approx N_m$ il palo è uniforme

$N_c > N_m$ il palo può presentare delle sbulbature (valore di rigidezza dinamica elevato)

$N_c < N_m$ il palo può avere dei difetti (valore basso di rigidezza dinamica)

Solitamente i valori di N_m oscillano tra 0,5 e 2,0 volte N_c .

Prendendo come esempio il diagramma in Fig. 4, l'analisi viene eseguita come segue:

$$N_c = \frac{1}{Z} = \frac{1}{615,2} = 0,00162548 \quad N_m = \frac{\sqrt{PQ}}{Z} = \frac{1,215}{615,2} = 0,00197496$$

In questo caso $N_m > N_c$ da cui si comprende che il palo potrebbe avere dei difetti.

Non sempre però è possibile basare l'analisi del profilo di un palo dal confronto tra questi due valori poiché N_m contiene al suo interno il contributo del terreno, mentre N_c è un valore legato alle sole caratteristiche geometriche e del materiale.

Il susseguirsi di cambi di strato molto ben definiti e la presenza di terreni molto resistenti comportano valori di N_m molto elevati che potrebbero far pensare a difetti sul palo che nella realtà non sono presenti.

Nel caso non sia possibile procedere ad un confronto diretto di questi due parametri si può procedere ad una analisi comparativa dei pali di un sito. La presenza della stessa stratigrafia del terreno consentirà di individuare facilmente i pali i cui valori di N_m si discostano dalla media del sito.

Una analisi di tipo *TRM* consente inoltre l'individuazione del valore di rigidezza dinamica K_d (*Dynamic Stiffness*); una grandezza funzione della resistenza del terreno che non fornisce una misura quantitativa della qualità o delle proprietà del palo, ma permette di eseguire una analisi comparativa e relativa tra un gruppo di pali con dimensioni e caratteristiche note.

Il valore della rigidezza dinamica va

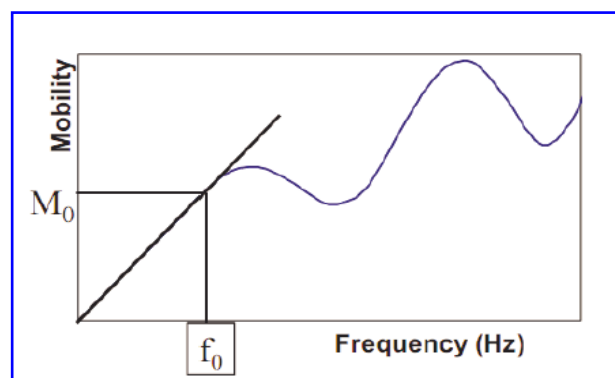


Fig. 5 – Curva di mobilità

ricercato nella prima parte della curva di mobilità con valori di frequenza molto bassi (vicini allo zero), dove con determinati valori di forza e velocità la curva ha andamento “quasi lineare”.

La rigidezza dinamica rappresentata nel software PIT è espressa in MN/mm e non dovrebbe essere utilizzata per la determinazione della capacità portante di un palo.

In alcuni casi, quando la curva di mobilità non ha andamento lineare in prossimità dell’origine, non è possibile determinare il valore di rigidezza K_d , negli altri casi questo valore può essere ricavato dalla seguente relazione matematica:

$$K_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot F_{sd}}{NormAmp \cdot 1/Z(P) \cdot 1/Z}$$

dove:

- F_{sd} : frequenza alla quale viene calcolato K_d ;
- $NormAmp$: valore di velocità normalizzato, corrisponde al valore di F_{sd} scelto per il calcolo di K_d ;
- $1/Z(P)$: valore massimo della mobilità normalizzato in funzione dell’ammittenza meccanica teorica;
- $1/Z$: ammettenza meccanica teorica.

Il software PIT-W esegue automaticamente il calcolo di K_d una volta definito il valore di F_{sd} che meglio approssima l’andamento della curva di mobilità in prossimità dell’origine.

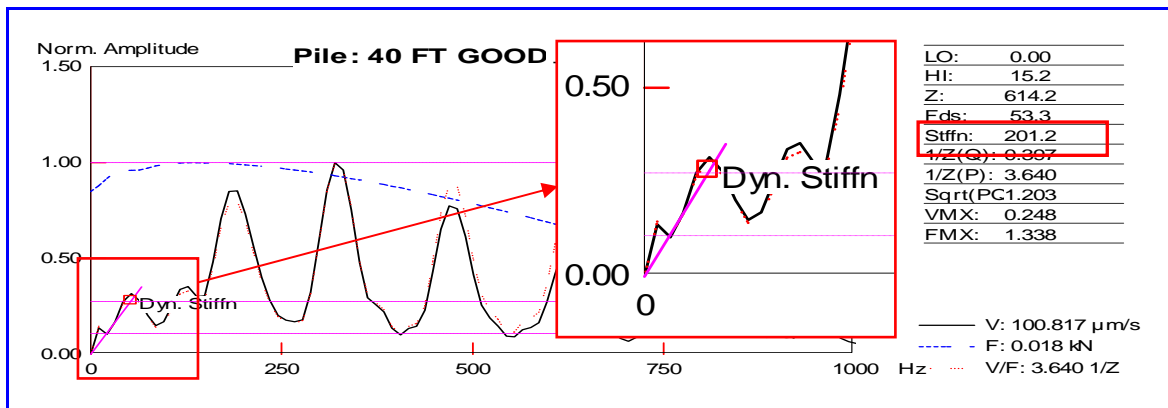


Fig. 6 - Rappresentazione grafica di K_d

Valori bassi di K_d indicano possibili difetti nel palo e comunque una bassa resistenza; valori alti indicano elevata resistenza del fusto del palo e possibile presenza di allargamenti.

Conclusioni

L'analisi dei segnali di prove dinamiche a bassa energia eseguite nel dominio dei tempi (*PEM*) e delle frequenze (*TRM*) permette di effettuare un controllo generalizzato semplice e veloce di una palificata utilizzando criteri interpretativi oggettivi.

Valori alti di mobilità (bassa impedenza) o valori bassi di rigidità dinamica possono indicare delle anomalie del palo o scarsa qualità dello stesso.

La valutazione della rigidità dinamica è funzione del sistema palo-terreno e quindi strettamente legata all'interfaccia che si crea tra il manufatto ed il sistema in cui è inserito. Tramite il confronto dei diagrammi di mobilità nelle basse frequenze di eccitazione è inoltre possibile eseguire una valutazione dell'omogeneità dell'esecuzione delle indagini e delle caratteristiche del terreno.

Un palo senza problemi o un'elevata resistenza del terreno produce un valore di mobilità basso o un alto valore di rigidità dinamica.

Un palo con difetto o con basso valore di rigidità dinamica comporta un elevato valore di Mobilità o un basso valore di rigidità dinamica.

Oltre alle valutazioni in precedenza descritte sui valori di ammettenza meccanica e rigidità dinamica si possono fare delle valutazioni sulla qualità della prima parte del palo analizzando i picchi di forza e velocità registrati al momento dell'impatto del martello sulla testa del palo. Se il picco di forza ha ampiezza molto inferiore a quello della velocità o se è sfasato nel punto di massimo, con quanto misurato dall'accelerometro, si può concludere che sono presenti difetti sulla prima parte del palo.

Bibliografia

M.Lenzi, P. Campana – *Annotazione sulle prove di ammettenza meccanica sui pali di fondazione* - (2006).

L. Liang, J. Beim – *Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method* – IOS Press (2008).

Ple Dynamics Inc – *PIT-W Software for pile integrity tester data analysis* – (2011).

GRL Engineers Inc, Ple Dynamics Inc – *Interpretation and analysis of PIT data* – (2010).