

6. Prova di Integrità del palo a bassa energia di impatto

6.1 Premessa

La Prova di Integrità, comunemente denominata PIT (Pile Integrity Test) o SIT (Sonic Integrity Test), è molto utilizzata nei controlli dei pali di fondazione.

Nell'uso comune si identifica genericamente con le seguenti denominazioni:

- SIT (Sonic Integrity Test)
- PIT (Pile Integrity Test)
- Prova ecometrica a bassa energia d'impatto
- Echo Test
- Sonic Test
- Integrity Test
- Ammettenza Meccanica

L'impiego principale di questa tecnica d'indagine è la verifica dell'integrità dei pali di fondazione, allo scopo di individuare eventuali anomalie lungo il fusto relative a variazioni repentine di diametro, inclusioni interne o interruzioni lungo la sezione e fornire una stima della lunghezza effettiva del palo in opera.

L'esecuzione di questi test è diffuso per il costo relativamente basso e la semplicità esecutiva. Infatti non sono necessarie predisposizioni particolari sui pali al momento della realizzazione, se non un'accurata scapitozzatura prima dell'esecuzione delle prove stesse.

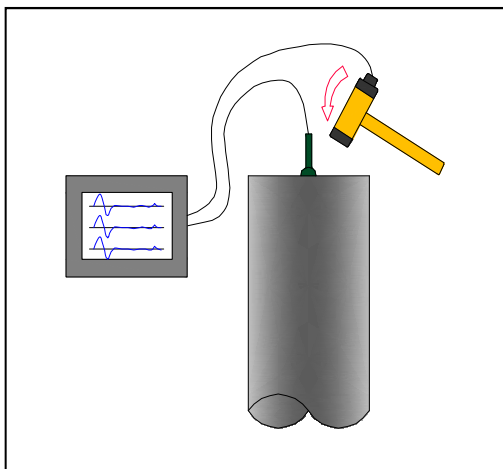
Le anomalie riscontrabili sono relative a difetti macroscopici che potrebbero indicare una riduzione della capacità portante del palo o relative a una lunghezza rilevata inferiore a quella di progetto.

L'individuazione di eventuali difetti di piccola entità presenta maggiori difficoltà ed è legata soprattutto all'esperienza dell'operatore.

L'indagine si esegue sollecitando la testa del palo con un martello e registrando l'impulso di risposta attraverso un accelerometro posto in sommità del palo.

Nel caso di analisi di Ammettenza Meccanica, è utilizzato un martello strumentato con una cella di carico, che consente di quantificare l'entità dell'impulso applicato al momento della sollecitazione del palo.

La prova ecometrica a bassa energia o prova PIT, come sarà indicata di seguito, analizza la risposta dell'elemento di fondazione con le specificità uniche del tipo di palo, delle sue caratteristiche meccaniche e del tipo di terreno in cui è inserito.



6.2 Strumentazione

L'attrezzatura è costituita da un accelerometro che rileva l'andamento dell'onda di compressione, da un martello semplice o strumentato che provoca l'impulso e da un'unità di acquisizione ed elaborazione del segnale.

Caratteristiche dell'unità di acquisizione:

- Dimensioni: 75 x 175 x 235 mm
- Microprocessore: SA1110 a 205 MHz
- Convertitore analogico digitale a 24-bit
- Velocità di campionamento: 50 kHz
- Precisione di frequenza: entro 0,01 %



Caratteristiche dell'accelerometro:

- Dimensioni: 20 x 20 x 60 mm
- Temperature di lavoro: -50 ÷ 120° C
- Sensibilità nominale: 50 mV/g
- Accelerazione massima: 30.000 g
- Linearità dell'ampiezza: $\pm 1\%$
- Cavo protetto a bassa rumorosità



6.3 La metodologia

Il sistema si basa sull'analisi della propagazione di un'onda di compressione nel palo (compressive stress wave), al fine di determinare la presenza di riflessioni anomale dovute a variazioni di geometria, inclusioni o zone di conglomerato di qualità scadente.

La prova si esegue in sito applicando un accelerometro in sommità del palo e, mediante un impulso meccanico prodotto col martello, si genera un'onda di compressione. L'accelerometro registra lo spostamento della testa del palo mentre l'unità di acquisizione visualizza istantaneamente l'andamento dell'onda di compressione.



La propagazione delle onde meccaniche, generate dal colpo di martello, avviene con una velocità V nel fusto del palo e in un tempo t che è l'intervallo compreso tra il colpo iniziale del martello e l'individuazione dell'onda riflessa fatta dall'accelerometro secondo la relazione:

$$t = \frac{2L}{V}$$

dove $2L$ rappresenta la distanza percorsa dall'onda, pari al doppio della lunghezza L del palo, considerando il percorso di andata e ritorno.

Rilevato il tempo t , registrato dall'accelerometro e assunta la velocità V , derivante da una valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo, è possibile stimare la lunghezza L attraverso la relazione:

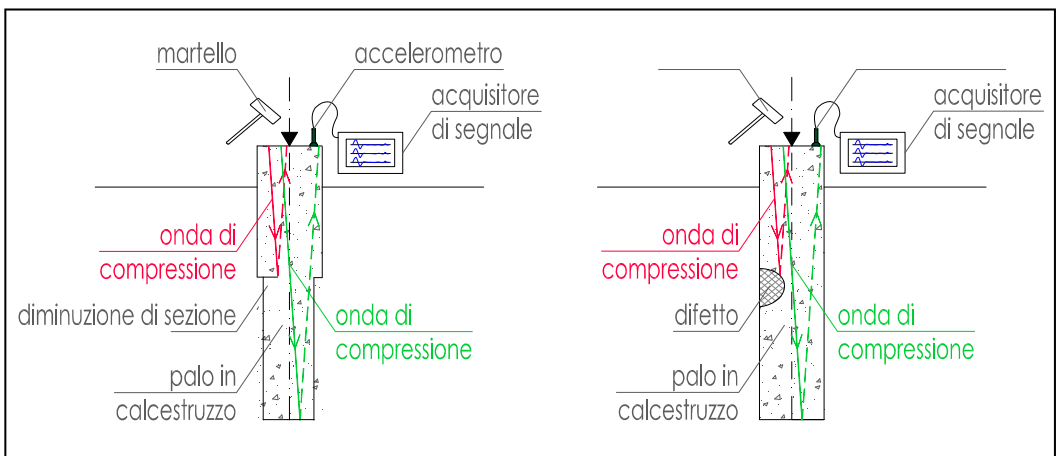
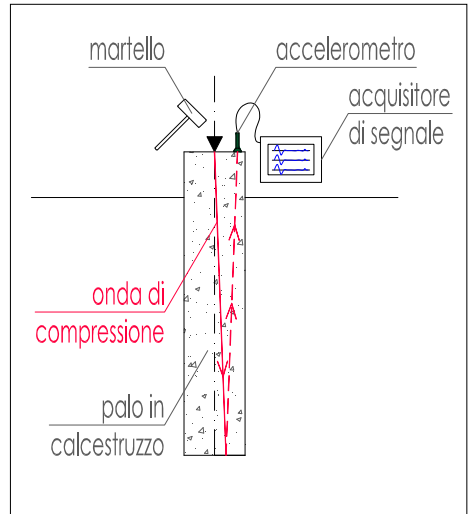
$$L = \frac{V * t}{2}$$

Nel cosiddetto "palo ideale", considerata solo la sua geometria, le proprietà meccaniche e intendendolo libero da qualsiasi interazione esterna, le onde meccaniche innescate dal colpo di martello viaggiano lungo il fusto e sono riflesse dal piede del palo ritornando alla testa per essere rilevate dall'accelerometro.

Eventuali riflessioni intermedie possono essere innescate solo da:

- inclusione di materiale diverso dal getto;
- modifiche delle caratteristiche meccaniche del conglomerato;
- variazione della geometria della sezione.

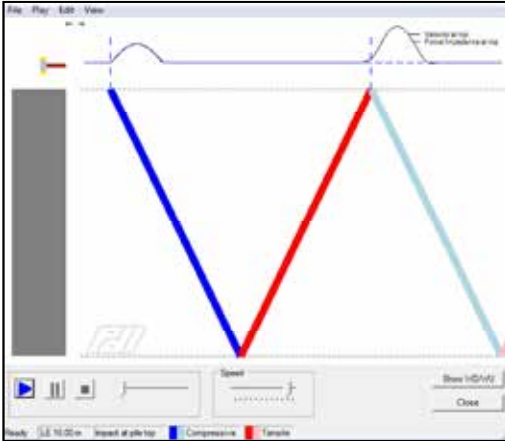
Queste variazioni delle caratteristiche fanno sì che una parte delle onde siano immediatamente riflesse e registrate alla testa del palo, mentre la parte restante arriva al piede per essere riflessa dopo un tempo maggiore. Gli schemi a seguito riportano due casi tipici di difetto: la presenza di una riduzione di diametro e l'inglobazione di materiale diverso dal getto.



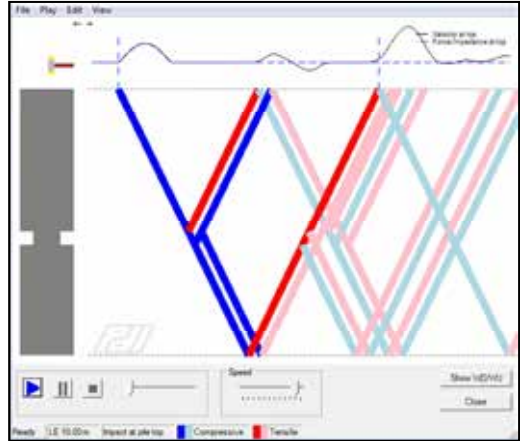
Nelle due immagini che seguono è semplificato il percorso delle onde meccaniche lungo il fusto del palo.

In un palo dalla geometria o dalle caratteristiche meccaniche omogenee (figura a sinistra), le onde non subiscono nessuna variazione se non l'unica riflessione al piede del palo stesso.

Qualsiasi disomogeneità nel fusto, quale potrebbe essere una diminuzione di sezione (figura a destra), genera delle onde di riflessione.



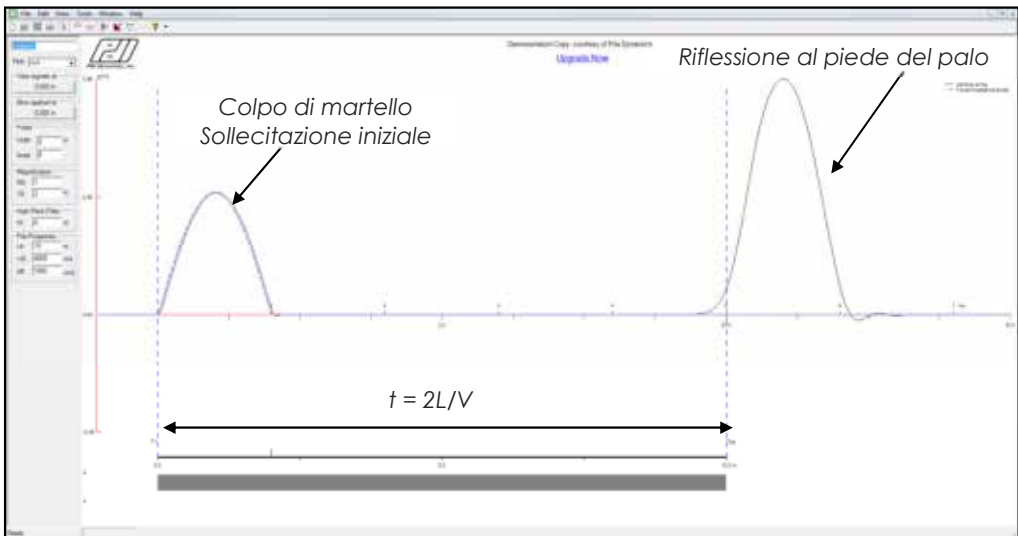
Palo libero privo di difetti



Palo libero con restrizione

Nei grafici d'acquisizione, rappresentati a seguito, l'ascissa è trasformata in lunghezza del palo immettendo, quale input, il valore presunto della velocità di propagazione dell'onda, variabile in funzione delle caratteristiche meccaniche del materiale.

Nel primo grafico è rappresentato un palo ideale, omogeneo lungo tutto il fusto e posto su terreno di stratigrafia costante.



Risposta tipica del palo ideale

Il grafico che segue rappresenta un palo di caratteristiche simili al precedente ma con una riduzione di sezione.



Palo con diminuzione di sezione a quota 5,5 m

Le onde che si trasferiscono lungo il fusto del palo, causate dalla sollecitazione iniziale con il martello, interagiscono con il materiale in cui si propagano e generano delle riflessioni ogni volta che queste caratteristiche variano.

Qualsiasi variazione delle caratteristiche fisiche, meccaniche o geometriche dell'elemento comporta una variazione dell'Impedenza meccanica con conseguente parziale o totale riflessione delle onde elastiche. Si definisce l'Impedenza meccanica come il rapporto tra una forza applicata in un punto della struttura e la velocità risultante in quel punto stesso. L'impedenza è il fattore rappresentativo di eventuali variazioni di velocità a seguito di specifiche variazioni delle caratteristiche fisiche o meccaniche della struttura.

Nel campo delle prove ecometriche a bassa deformazione, l'Impedenza, Z , è definita come:

$$Z = \frac{V * A * \rho}{g}$$

Dove:

V = velocità di trasmissione delle onde

A = area della sezione del palo

ρ = densità del materiale

g = accelerazione di gravità

Si nota come il valore dell'Impedenza è direttamente proporzionale alla velocità V , alla sezione A e alla densità del materiale.

Il piede del palo fornisce la massima variazione d'Impedenza, con risultato una risposta molto netta nel grafico tempo-Impedenza, mentre minime variazioni di sezione o delle caratteristiche meccaniche producono nel grafico effetti inferiori, mantenendo comunque evidente il fondo palo.

Considerando la realtà del palo in opera, i parametri che comportano variazioni di Impedenza comprendono tutte le variabili del sistema palo-terreno:

- piede del palo
- modifiche delle caratteristiche meccaniche del conglomerato (qualità del calcestruzzo)
- variazione della geometria della sezione
- inclusioni all'interno del fusto
- discontinuità per riprese di getto, fessure, giunzioni
- variazioni o sovrapposizioni della gabbia d'armatura
- repentine variazioni della stratigrafia del terreno e della conseguente rigidità
- tipologia del terreno e conseguente valutazione per palo che lavora di punta o per attrito laterale

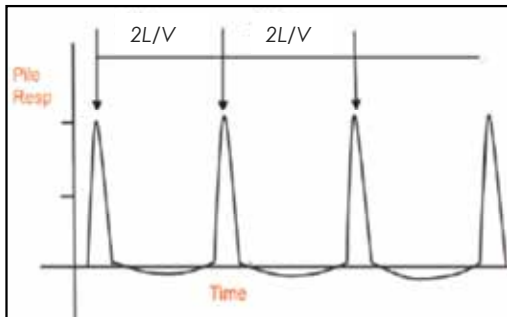
6.4 Analisi del segnale

I segnali registrati in sito possono essere successivamente analizzati con due metodologie, indipendenti e complementari:

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

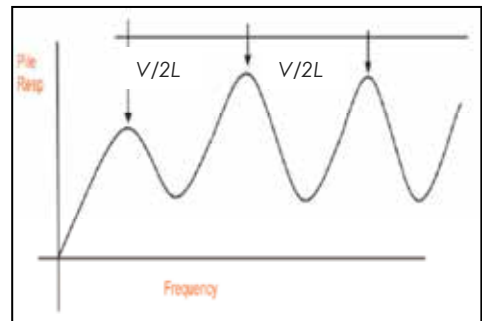
Entrambi i metodi consentono di fare delle considerazioni sul profilo dei pali analizzati, di stimarne la lunghezza e di valutare l'influenza del terreno alle variazioni stratigrafiche.

Riferendosi al palo ideale, quale potrebbe essere quello posto in un terreno assolutamente uniforme, si otterrebbero i seguenti segnali, rispettivamente nel dominio del tempo e nel dominio delle frequenze.



Palo ideale - Dominio del tempo

$$L = \frac{V * t}{2}$$



Palo ideale - Dominio delle frequenze

$$L = \frac{V}{2\Delta f} \quad (6)$$

I dati in input nelle due analisi sono esattamente gli stessi e la lunghezza dell'elemento è calcolata in base alla formula (6), in cui si considera l'introduzione dell'intervallo di frequenza $\Delta f = 1/t$.

Come si nota dai diagrammi e dalle formule utilizzate, dalle due analisi si ottiene la stessa lunghezza L dell'elemento preso in esame.

6.5 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.

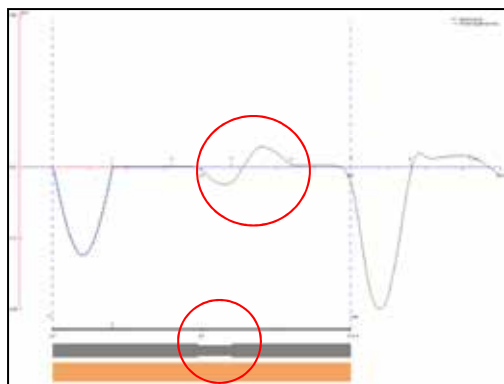
Il profilo del palo è analizzato valutando gli effetti delle riflessioni delle onde di compressione indotte dalla sollecitazione sulla testa del palo quando incontrano delle variazioni di impedenza.

Per elementi integri, con sezione regolare, si ottengono due sole riflessioni: la prima corrisponde al colpo di martello, la seconda al fondo del palo.

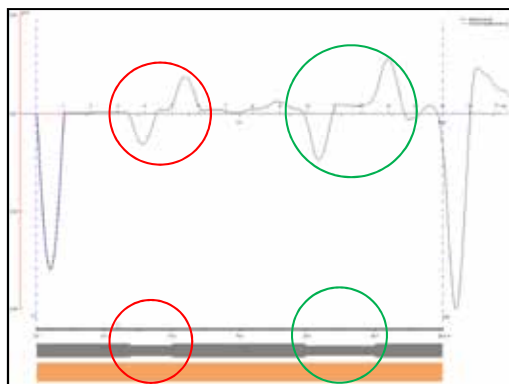
Ogni altra riflessione si analizza sulla base della sua fase:

- 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 scadenti del calcestruzzo;
- analogamente, per un'onda in fase inversa, l'Impedenza aumenta, indicando un aumento della sezione dovuta ad una sbulbatura.

Negli schemi che seguono, il profilo del palo è schematizzato nella parte inferiore mediante una fascia grigia, mentre la stratigrafia del terreno con una fascia colorata.



Fusto del palo con una restrizione



Fusto del palo con due restrizioni

Stratigrafia costante

I due segnali sopra riportati rappresentano un palo realizzato su un terreno composto da un solo materiale, senza cambi di strato, con variazioni di sezione a diverse profondità.

In entrambi i grafici le riflessioni dovute alla restrizione vengono lette con il picco in fase con il colpo di martello.

Le successive riflessioni, in controfase, evidenziano un aumento di sezione. In questo caso non si tratta di vere e proprie sbulbature, quanto piuttosto del ritorno del fusto alla sezione originaria.

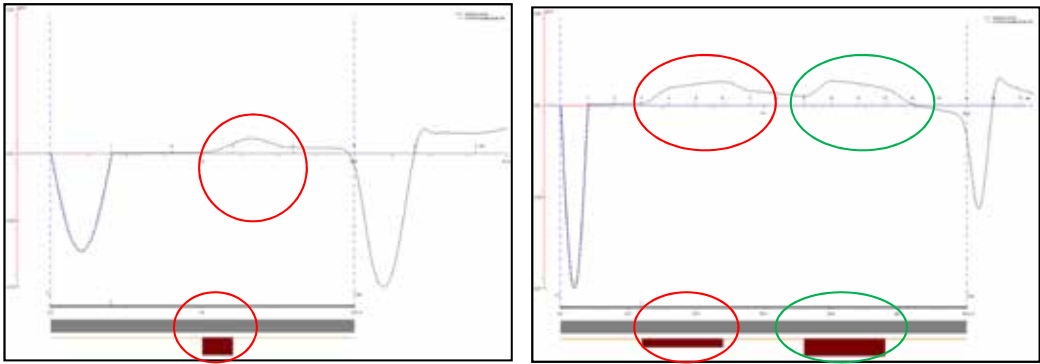
La distanza tra i due picchi, in fase e controfase, può dare un'informazione sull'estensione effettiva della restrizione lungo l'asse longitudinale del fusto.

Oltre alle riflessioni dovute a variazioni di Impedenza, strettamente legata alle proprietà del materiale, ci sono le riflessioni dovute al terreno dove è stato realizzato il palo.

Va evidenziato che la presenza di strati ben delimitati nel terreno potrebbe produrre una riflessione anticipata delle onde di compressione dirette sul fondo del palo. Tali riflessioni possono essere interpretate come sbulbature o restringimenti che in realtà non sono presenti.

Ai fini pertanto di una corretta interpretazione dei dati assume fondamentale importanza conoscere la stratigrafia del terreno.

I segnali riportati nei grafici successivi rappresentano dei pali integri realizzati su terreni caratterizzati da cambi di strato ben definiti.



Terreno con un cambio di strato ben definito Terreno con due cambi di strato ben definiti
Fusto del palo integro e omogeneo

6.6 Il Fattore di Integrità

L'analisi del profilo del palo nel dominio del tempo può essere coadiuvata dall'analisi del parametro adimensionale β , Fattore di Integrità (vedi anche nel Cap. 2. Prova di carico dinamica - Metodo Case).

Questo parametro, 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 comprendere il significato del Fattore di Integrità si immagini un palo caratterizzato da una prima parte con impedenza Z_1 ed una seconda parte con impedenza Z_2 .

Il Fattore di integrità è calcolato come:

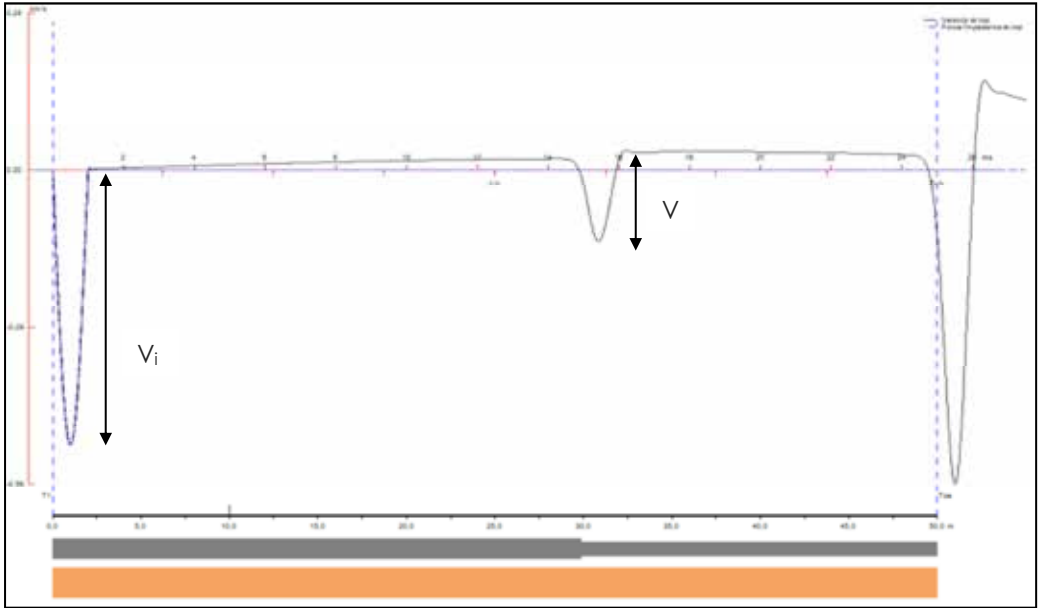
$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)}$$

dove $\alpha = \frac{2V_i}{V}$

V_i corrisponde alla velocità dell'impulso iniziale e V rappresenta la velocità delle onde riflesse dalla riduzione di sezione.

Questo fattore è funzione del primo picco registrato e varia da 0 a 1.

Il grafico sotto riportato evidenzia la valutazione delle velocità dell'impulso iniziale V_i e della riflessione relativa alla riduzione di sezione.



Valutazione in grafico di V_i e V

Quale esempio, nell'analisi del profilo riportato a seguito, sono evidenziate due variazioni significative del parametro β , la prima pari a 0,75 e la seconda pari a 0,33 in corrispondenza del fondo palo.

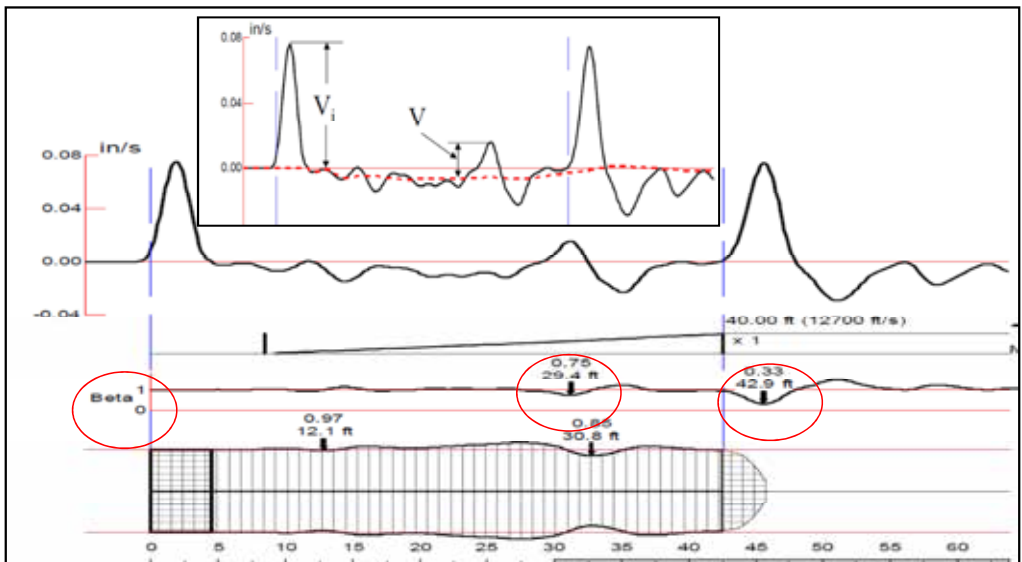


Grafico di acquisizione e valutazione di β

6.7 Analisi nel dominio delle frequenze

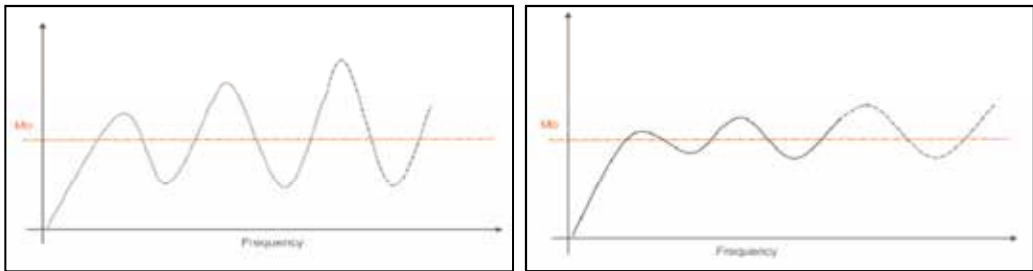
L'analisi eseguita nel dominio delle frequenze (TRM) utilizza sia i valori di forza, derivati dall'uso del martello strumentato, sia i valori di velocità ottenuti integrando i valori di accelerazione registrati dall'accelerometro.

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

Le frequenze generate sul palo sono provocate dal colpo di martello, il quale induce uno spettro di frequenze che dipende dalla massa del martello stesso e che è sufficientemente ampio da comprendere la frequenza di risonanza del palo.

Il terreno circostante svolge una funzione di attenuazione (damping factor) molto importante, come evidenziato nei due grafici che seguono.

Il fenomeno si può manifestare sia in pali di dimensioni ridotte inseriti in un terreno molto resistente, sia in pali di grande dimensione di lunghezza inseriti in terreni deboli.



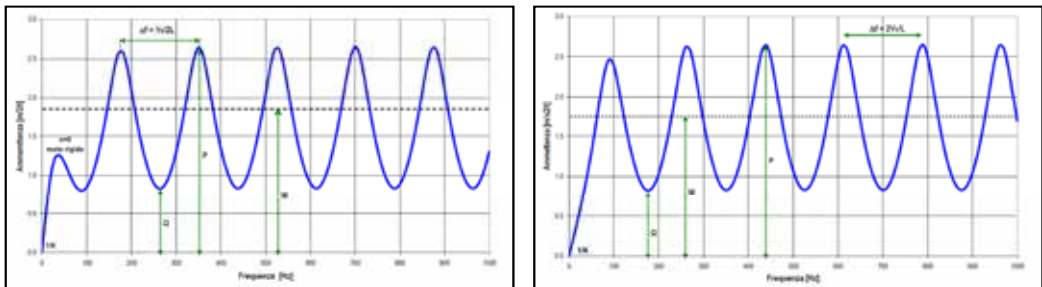
Effetti della resistenza del terreno nella curva di mobilità

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, in italiano Ammettenza Meccanica, che viene calcolata come:

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

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



Diagrammi di mobilità per un palo incastrato e un palo libero

La Mobilità è definita anche come inverso dell'Impedenza:

$$M = \frac{1}{Z}$$

Nel diagramma sotto riportato viene rappresentato il valore di Mobilità, indicato nel grafico dalla linea 1/Z.

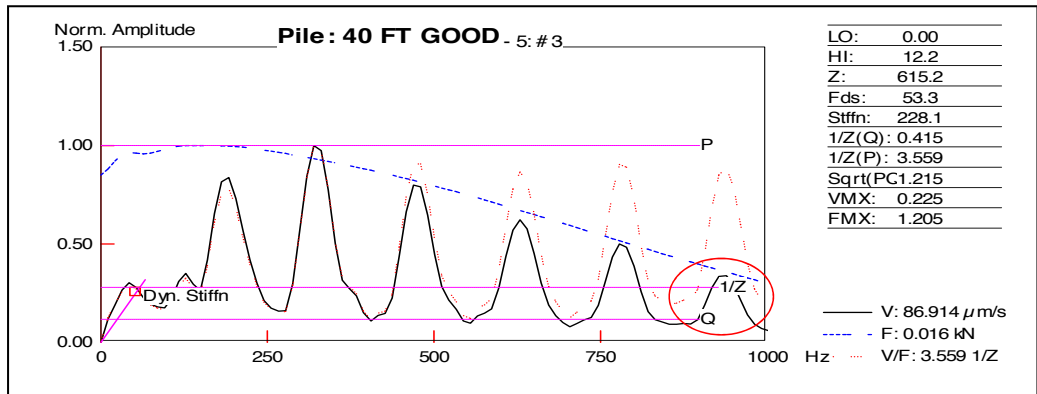


Diagramma di Mobilità

Il valore massimo e minimo di questo parametro sono definiti rispettivamente dalle rette P e Q.

L'Ammettenza Meccanica o *Characteristic Mobility* 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 Teorica che, assieme al valore di Ammettenza Meccanica Sperimentale e a quello di Rigidezza Dinamica (vedi pagina seguente), costituisce uno dei parametri per valutare qualitativamente un palo.

L'Ammettenza Meccanica Teorica N_c va calcolata attraverso la relazione:

$$N_c = \frac{1}{Z}$$

L'Ammettenza Meccanica Sperimentale N_m va calcolata attraverso la relazione:

$$N_m = \frac{\sqrt{PQ}}{Z}$$

dove P e Q sono rispettivamente il massimo ed il minimo valore della Mobilità.

Il confronto diretto tra l'Ammettenza Meccanica Sperimentale e l'Ammettenza Meccanica Teorica è il primo metodo di valutazione qualitativa delle caratteristiche di un palo.

Si possono distinguere tre possibili situazioni:

- $N_c \approx N_m$ indica che il palo è uniforme;
- $N_c > N_m$ indica che il palo può presentare delle sbulbature;
- $N_c < N_m$ indica che il palo può avere dei difetti.

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

Prendendo come esempio il diagramma della Mobilità alla pagina precedente, l'analisi viene eseguita come segue:

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

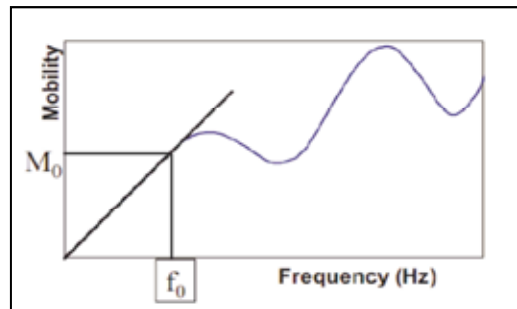
In questo caso $N_m > N_c$ per cui il palo potrebbe avere dei difetti.

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

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

Nel caso non sia possibile seguire il confronto diretto di questi due parametri si può procedere a un'analisi comparativa dei diversi pali di uno stesso sito. La presenza della stessa stratigrafia del terreno consentirà di individuare facilmente i pali i cui valori di N_m si discosteranno dalla media del sito.

Un'analisi di questo tipo consente inoltre l'individuazione del valore di Rigidezza dinamica K_d (*Dynamic Stiffness*). Questo parametro è 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, inseriti in un determinato terreno.



Curva di Mobilità

Il valore della Rigidezza Dinamica va 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" (vedi grafico sopra riportato).

La Rigidezza Dinamica rappresentata dal metodo 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:

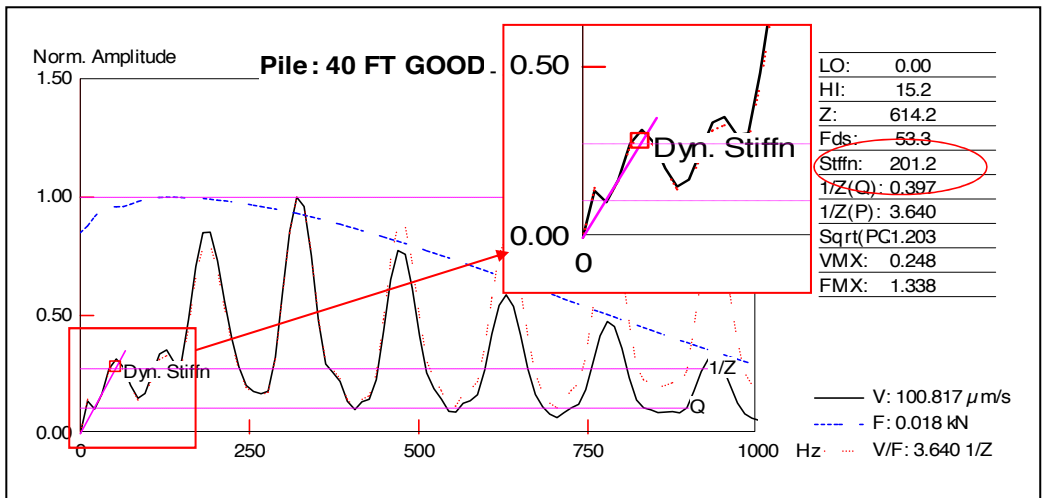
$$K_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot F_{sd}}{\text{NormAmp} \cdot 1/Z(P) \cdot 1/Z}$$

dove:

- F_{sd} = frequenza alla quale è calcolato K_d ;
- NormAmp = valore di velocità normalizzato che corrisponde al valore di F_{sd} scelto per il calcolo di K_d ;
- $1/Z(P)$ = valore massimo della mobilità normalizzato in funzione dell'Ammettenza Meccanica Teorica;
- $1/Z$ = Ammettenza Meccanica Teorica.

IL valore di NormAmp è *fondamentale* e va ricavato dopo aver normalizzato il valore della forza nei pali dello stesso sito.

Il software PIT-W esegue automaticamente il calcolo di K_d una volta normalizzato il valore della forza nel sito e definito il valore di F_{sd} che meglio approssima l'andamento della curva di Mobilità in prossimità dell'origine, come evidenziato nel grafico sottostante.



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

6.8 Limiti della metodologia

La prova d'integrità a bassa deformazione è utilizzabile nel momento in cui la testa del palo stesso è accessibile.

Esistono comunque dei limiti di applicabilità da prendere in considerazione:

➤ Rapporto dimensionale lunghezza / diametro (L/\varnothing)

Si considera eseguibile la prova per pali con snellezza inferiore a 30, limite oltre il quale l'attenuazione progressiva delle onde e l'interazione con le variazioni stratigrafiche del terreno potrebbero rendere difficoltosa l'individuazione del fondo palo.

In questo caso la prova perde di significato.

In realtà, per terreni di stratigrafia particolarmente omogenea, conglomerato ottimale e utilizzo di un martello adeguato, L/\varnothing può arrivare fino a 50.

In linea generale pertanto il campo di snellezza in cui si rende possibile la prova é:

- per terreni omogenei e di bassa rigidezza $50 > L/\varnothing > 30$
- per terreni con alto valore di rigidezza $30 > L/\varnothing$.

➤ Pali tronco-conici

La progressiva variazione di diametro, soprattutto su terreni con stratigrafia disomogenea, potrebbe non consentire una corretta individuazione del fondo palo.

In questo caso diventa fondamentale il rapporto dimensionale che deve essere ottimale per la buona riuscita della prova.

➤ Micropali

La struttura stessa di questo tipo di elemento è tale da superare spesso il limite del rapporto dimensionale possibile per poter effettuare l'indagine.

Inoltre la tecnica costruttiva causa spesso variazioni di sezione sulla corona, che provocano molteplici riflessioni del segnale. Va poi considerato che il calcestruzzo utilizzato per la corona, spesso una miscela acqua/cemento, è inadatto a subire l'impatto del martello.

In ultima analisi, il conglomerato stesso, in fase di scapitozzatura, è soggetto a microfessurazioni che non permettono l'ottimale propagazione dell'onda di compressione.

È possibile tentare di eseguire l'indagine solo con particolari accortezze da concordare con il palificatore:

- confezionamento con una miscela di ottime caratteristiche meccaniche;
- preparazione della corona (la parte esterna alla camicia d'acciaio) con taglio in sezione utilizzando un flessibile.

➤ Gabbia d'armatura in vista

La presenza dell'armatura, fuori dalla testa scapitozzata, può creare effetti di risonanza al momento dell'impatto del martello, dando un segnale armonico, inutilizzabile ai fini della prova.

La situazione può migliorare "legando" le barre d'armatura, rendendole solidali e cercando di annullare la vibrazione.



➤ Difetti alla testa del palo

Una condizione necessaria, nel caso di pali che devono essere scapitozzati, è che durante le fasi di demolizione della parte sommitale le parti incoerenti non vengano asportate con metodi troppo cruenti, quale potrebbe essere un demolitore di dimensioni eccessive.

Le fessurazioni e microfessurazioni innescate dalle vibrazioni possono impedire la propagazione dell'onda di compressione o, alla meno peggio, evidenziare nel grafico una serie di riflessioni tali da impedire una corretta analisi del segnale.

➤ Difetti lungo l'asse del palo

Questo tipo di anomalia, quale potrebbe essere una sottile frattura con andamento verticale, non sono identificabili da questa metodologia di prova.

Anche uno "svuotamento" del nucleo, se la parte corticale rimane intatta con uno spessore consistente, potrebbe non essere identificato.

➤ Disomogeneità della stratigrafia con strati di elevata rigidità

In tale situazione, le riflessioni potrebbero essere molto simili nel grafico a quelle causate da variazioni di Impedenza.

6.9 L'approccio in cantiere

L'operatore che esegue la prova in sito è il primo che può rendersi conto se quanto si sta eseguendo ha un risultato utile allo scopo.

La capacità e l'esperienza non devono essere fondamentali solo per chi analizza i risultati e dà le conclusioni ma, anche e soprattutto, per chi acquisisce tali dati in sito.

L'esecuzione dell'indagine richiede una serie di condizioni e informazioni:

- si siano attesi almeno 10 giorni di maturazione del calcestruzzo;
- la testa del palo ben accessibile dall'operatore;
- la superficie della testa piana, non regolata con malta, ma scabra per l'affiorare degli inerti e pulita con un getto d'aria compressa;
- la testa deve essere svincolata da solette o travi e deve inoltre essere libera da acqua stagnante;
- planimetria con numerazione e ubicazione dei pali;
- disponibilità in sito di una stratigrafia dell'area d'intervento con relative indagini geognostiche e dati geotecnici rilevati;
- informazioni sulle vicende di scavo e getto (es. reso volumetrico di getto ecc....);
- caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato.

Una volta predisposta l'unità di acquisizione, l'accelerometro con il materiale accoppiante, il martello (prova nel dominio del tempo - PEM) o martello strumentato (prova nel dominio delle frequenze - TRM), si procede all'esecuzione delle battute.

Preliminarmente l'unità di acquisizione sarà stata predisposta con una serie di dati che sono elencati a seguito.

Parametri di input:

- *Fattore di calibrazione:* introduzione nel software dell'acquisitore del fattore di calibrazione dell'accelerometro e, in caso di prova TRM, del martello strumentato impiegato.

- *Lunghezza presunta del palo (L)*: valore indicativo della lunghezza del palo che, in fase di analisi del segnale, sarà corretto con il valore effettivo in funzione del tempo misurato di arrivo delle onde sul fondo del palo. Il valore inserito ha inoltre la funzione di regolare l'apertura della finestra temporale di acquisizione del segnale in quanto $t=2L/c$.
- *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 di trasmissione delle onde (V)*: 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.
- *Amplificazione del segnale*: impostazione del valore esponenziale per l'amplificazione del riflessogramma.

Quando la lunghezza del palo è nota con certezza, la velocità corrisponde al valore che determina la lunghezza di progetto.

Se invece la lunghezza del palo è una variabile da stimare è necessario rilevare la velocità dell'onda sulla testa del palo attraverso un'attrezzatura ultrasonica con le sonde poste diametralmente opposte.

Scelta del martello

L'onda di compressione generata dal martello non può dipendere dall'entità della martellata, che deve essere data in maniera netta ma non violenta.

Assume quindi fondamentale importanza la massa battente, che deve essere commisurata alla massa del palo da provare.



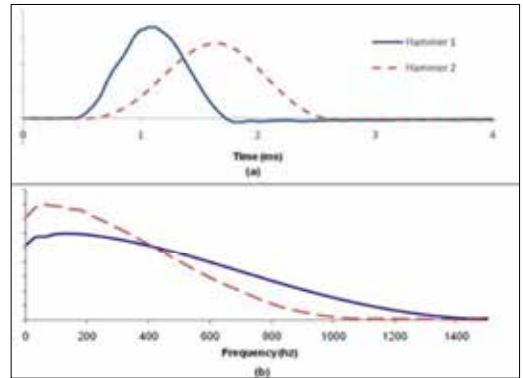
Esecuzione indagine con martelli di masse diverse

La forza da applicare per mettere in vibrazione il sistema palo-terreno a una data velocità è tanto minore quanto più la frequenza di risposta generata dal colpo di martello si avvicina alla frequenza di risonanza della struttura.

La frequenza propria di risonanza del sistema palo-terreno è caratteristica del valore di Impedenza minimo (massima mobilità).

Nell'utilizzo del martello, caratteristiche materiali e dimensioni diverse generano onde con ampiezze dell'impulso diverse, come evidenziato nell'immagine a fianco. Applicato l'impulso con il colpo di martello, lunghezze d'onda differenti forniscono segnali di risposta differenti.

Un colpo d'intensità eccessiva con massa inadeguata, tende a causare una serie di microriflessioni che riducono sensibilmente la qualità del segnale acquisito, fino a mascherare possibili difetti.



*Martelli di peso e materiale diversi
Ampiezza dell'impulso*

Si riportano a titolo di esempio due acquisizioni sullo stesso palo, usando martelli di massa differente.

Caratteristiche del palo:

- Palo trivellato
- Diametro \varnothing 80 cm
- Lunghezza LE = 20,50 m

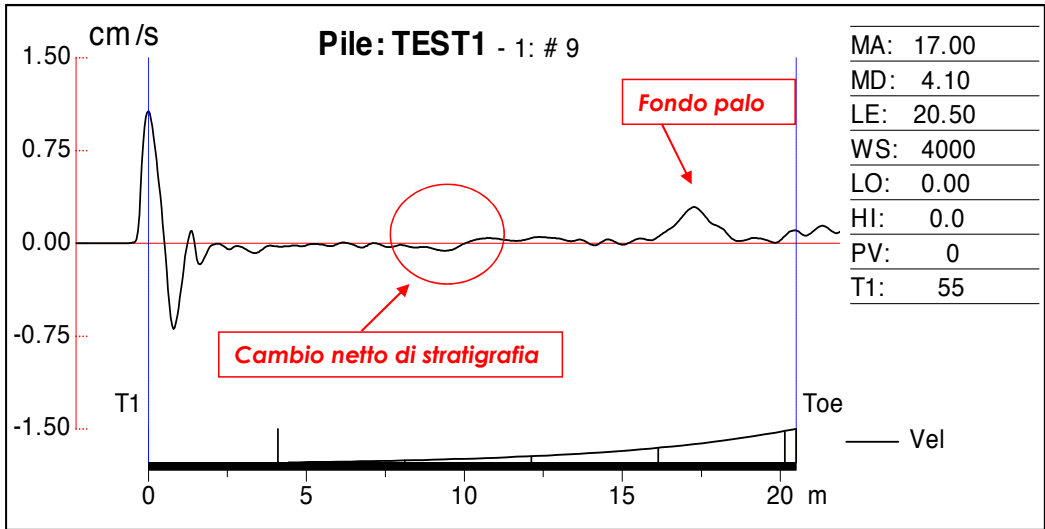
Nel grafico a seguire, il test è stato condotto applicando l'impulso con un martello di materiale e massa certificata (1,270 kg).

Si nota una lieve anomalia a quota 9÷11 m, riconducibile a una variazione di attrito e/o compressione con il terreno.

Tale riflessione si ripete su quasi tutti i pali indagati ed è compatibile con le variazioni stratigrafiche segnalate nella relazione geotecnica del sito.

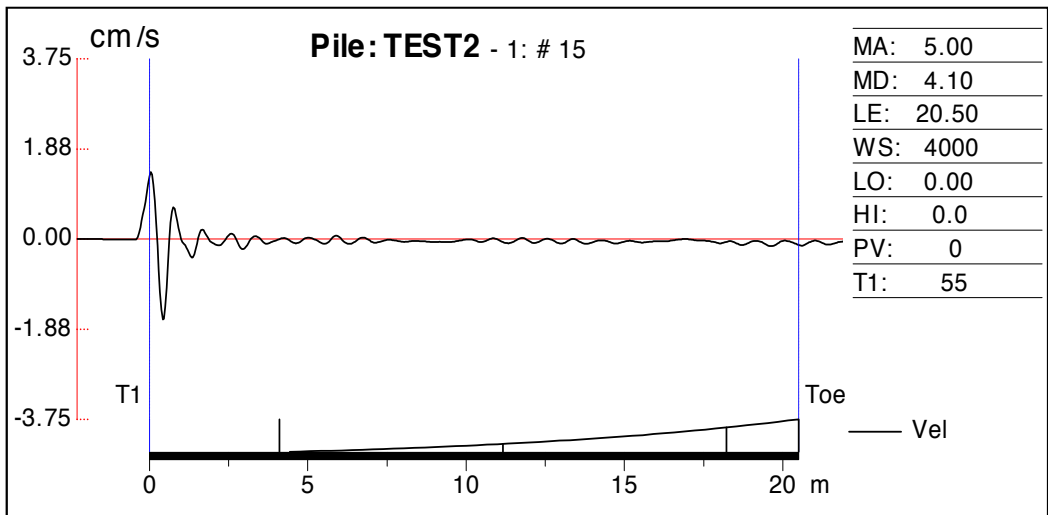
Rispetto alla lunghezza dichiarata, il palo risulta avere una lunghezza di circa 17.5 m.

Sono presenti delle lievi riflessioni alla testa del palo, dovute alla scapitozzatura e alla presenza della gabbia d'armatura.



Riflessogramma - Martello certificato con massa 1,270 kg

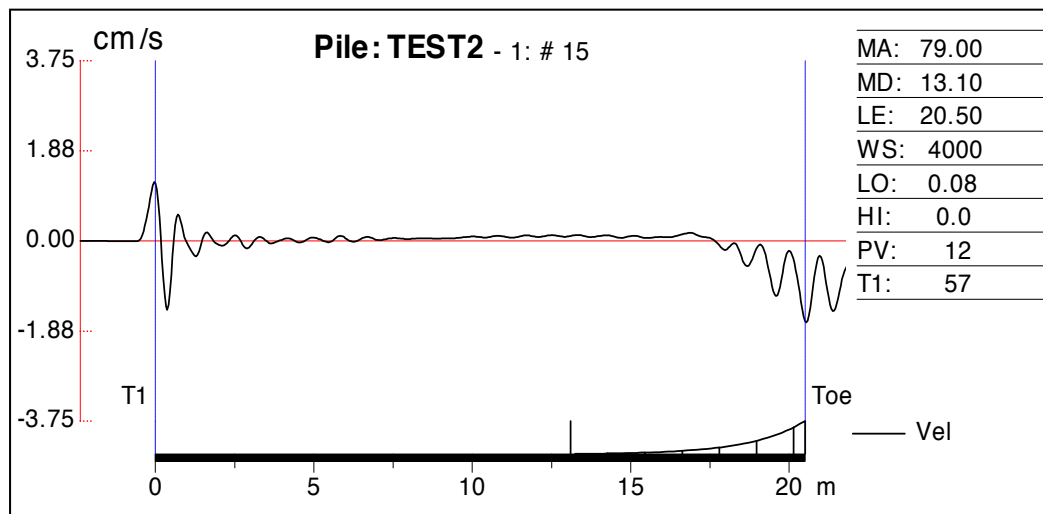
Nel grafico successivo, l'acquisizione è stata eseguita battendo con un martello generico di massa inadeguata.



Riflessogramma - Martello generico con massa 0,610 kg

Si nota immediatamente il ripetersi di riflessioni di onde superficiali, tali da non consentire l'individuazione del cambio di stratigrafia a quota 9÷11 m e da non riuscire a individuare il piede del palo.

Un tentativo in post processing di massima amplificazione del segnale porta a individuare un fondo palo evidentemente errato, trattandosi in realtà dell'amplificazione delle onde superficiali e relative alle microriflessioni alla testa del palo.



Massima amplificazione del segnale - Martello generico con massa 0,610 kg

L'operatore a questo punto, scelto lo strumento adeguato, eseguirà una serie di battute con un minimo di n. 3, registrando il dato acquisito e verificando a display:

- andamento dei riflessogrammi ottenuti;
- costanza e comparabilità dei singoli segnali;
- acquisizione del fondo palo;
- lunghezza rilevata rispetto alla lunghezza impostata in input;
- particolari anomalie del segnale.

Per la corretta acquisizione dei dati, assume fondamentale importanza che i segnali ottenuti, nella singola serie di battute effettuate, siano comparabili tra di loro, praticamente identici, e che sia ben identificabile il fondo palo.

Una prima analisi in cantiere permette di verificare la presenza di anomalie per variazioni di Impedenza o per riflessioni dovute alla stratigrafia del terreno.

Il ripetersi delle stesse anomalie su pali diversi, può aiutare a comprendere di essere eventualmente di fronte a riflessogrammi rappresentativi di particolari "caratteristiche del sito".

E' importante che su ogni palo vadano eseguite più serie di battute.

6.10 Analisi del segnale - Il dominio dei tempi

Esempio 1 - Palo trivellato tipo CFA a elica continua

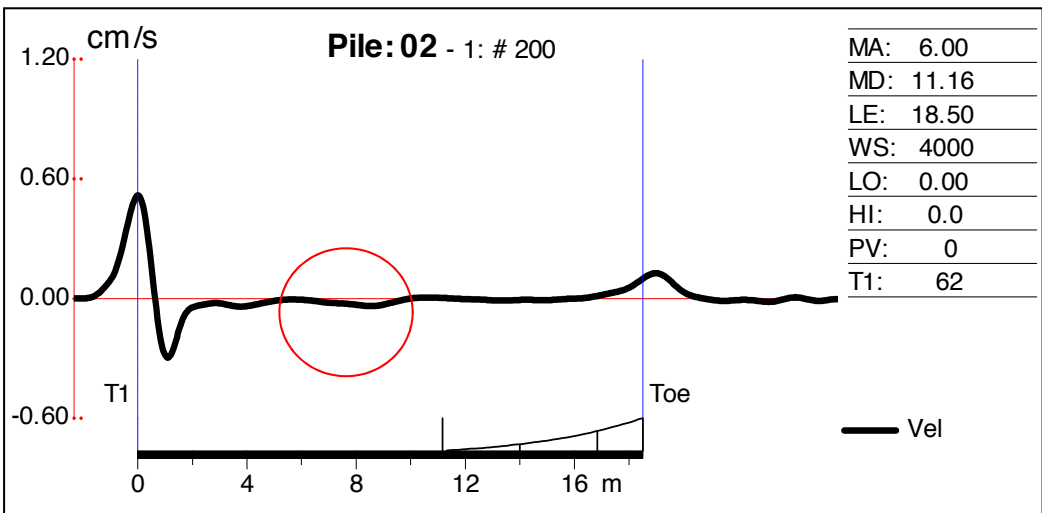
Caratteristiche del palo e principali dati in input:

Diametro Ø: 80 cm
 Lunghezza di progetto: 18,5 metri
 Lunghezza da prova: 19,0 metri
 Classe cls: C 28/35
 Velocità onde V: 4000 m/s

Il grafico sotto riportato presenta le cadenze di risonanze che corrispondono a quelle previste sull'intera lunghezza, per una velocità di propagazione delle onde meccaniche impostata a 4000 m/s (si è ipotizzato tale valore costante lungo tutto il profilo del palo).

La continuità e la lunghezza del palo risulta conforme rispetto al dichiarato, con fondo palo ben visibile.

La misura di lunghezza rilevata rientra nei limiti di tolleranza della strumentazione (il valore riportato è una stima della lunghezza fatta sulla media delle lunghezze ottenute dai tre segnali riportati in relazione per ogni palo).



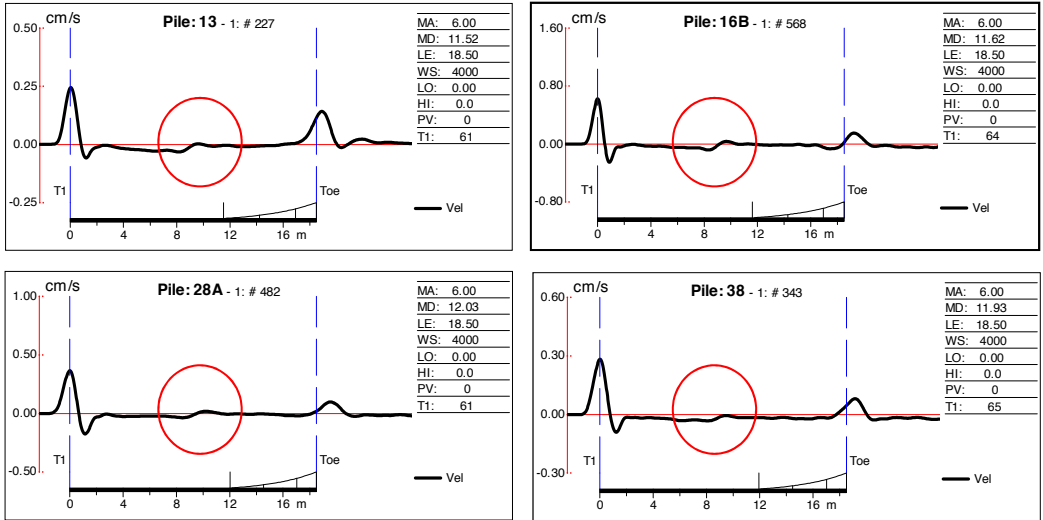
Analisi del segnale - Dominio del tempo

Si nota a quota 7,5÷10,5 m una lieve anomalia.

L'acquisizione sopra riportata rientra in una campagna d'indagine svolta su una palificata di 62 elementi.

L'analisi svolta su tutta la palificata, ha portato a riscontrare la stessa anomalia, in maniera più o meno evidente, in quasi tutti gli elementi.

Si riportano a pagina seguente altri quattro riflessogrammi acquisiti nello stesso sito.



Pali CFA - Analisi dei segnali nel dominio del tempo

Queste lievi anomalie (variazioni di Impedenza), riconducibili a frizioni lungo il fusto per variazioni di attrito e/o compressione con il terreno, sono compatibili con le variazioni stratigrafiche riportate nella relazione geotecnica e assumono una connotazione di caratteristica del sito.

Esempio 2 - Palo tipo SCAC - Acquisizione in nicchia

Caratteristiche del palo e principali dati in input:

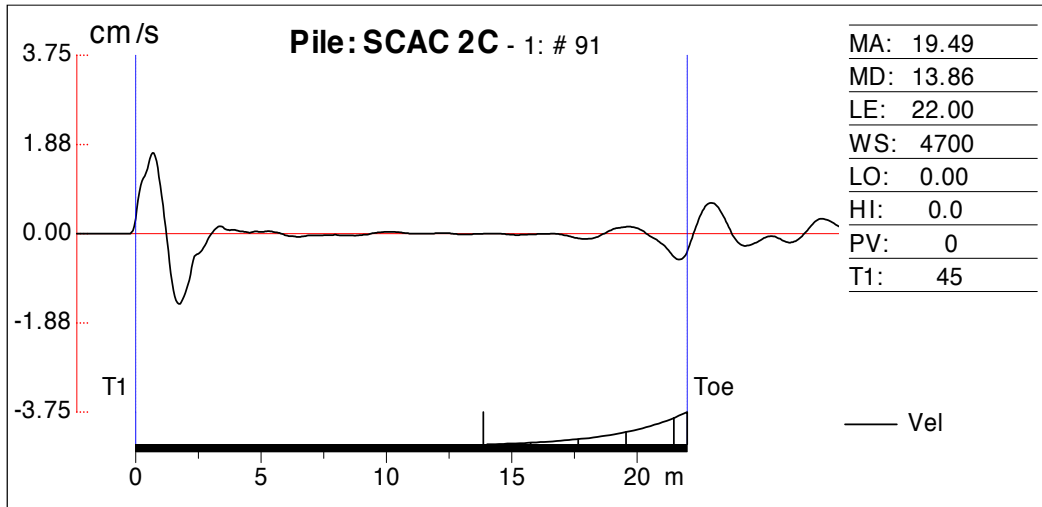
Diametro \varnothing :	75 cm
Lunghezza di progetto:	22,0 metri
Lunghezza da prova:	22,5 metri
Resistenza cilindrica cls:	65,8 N/mm ² (Certificato di Laboratorio su provino cilindrico)
Velocità onde V:	4700 m/s (misurata su provino con attrezzatura ultrasonica)

In questo caso le acquisizioni sono state eseguite con struttura in opera, creando delle nicchie di alloggiamento per l'accelerometro e la zona di battuta del martello.

Si è proceduto sia con acquisizioni con accelerometro singolo, sia con doppio accelerometro per depurare le onde riflesse dalle sovrastrutture (vedi Cap. 6.12). Nel caso in esempio si mette in evidenza l'acquisizione con accelerometro singolo.



Impulso e accelerometro in nicchia



Palo SCAC in opera con sovrastrutture - Analisi del segnale nel dominio del tempo

Con una velocità di propagazione delle onde meccaniche impostata a 4700 m/s (valore costante considerato che il palo SCAC è di tipo centrifugato, confezionato in stabilimento), il grafico presenta le cadenze di risonanze che corrispondono a quelle previste sull'intera lunghezza.

La continuità e la lunghezza del palo è conforme rispetto al dichiarato, con fondo palo ben visibile.

Esempio 3 - Palo tipo SCAC - verifica rottura - Analisi nel dominio dei tempi e in frequenza

Caratteristiche dei pali e principali dati in input:

- Diametro Ø: 60 cm
- Lunghezza di progetto: 22,0 metri
- Lunghezza da prova: 22,0÷23,0 metri
- Velocità onde V: 4350 m/s (misurata in sito con attrezzatura ultrasonica)

Si è eseguita un'indagine su un palo parte integrante di un pontile per approdo mercantili, in previsione dell'esecuzione di una prova di carico statica di verifica a seguito di un urto.

Per completezza e confronto dei dati, le prove sono state estese ad altri pali dello stesso pontile.

Il palo è stato isolato dalla struttura sovrastante, mentre le altre indagini sono state eseguite utilizzando delle nicchie appositamente predisposte.



Impulso e accelerometro in nicchia

Dovendo verificare l'integrità e stimare le lunghezze dei pali, allo stato solo ipotizzate, si è provveduto ad acquisire la velocità di trasmissione delle onde sul fusto dei pali con l'attrezzatura ultrasonica.

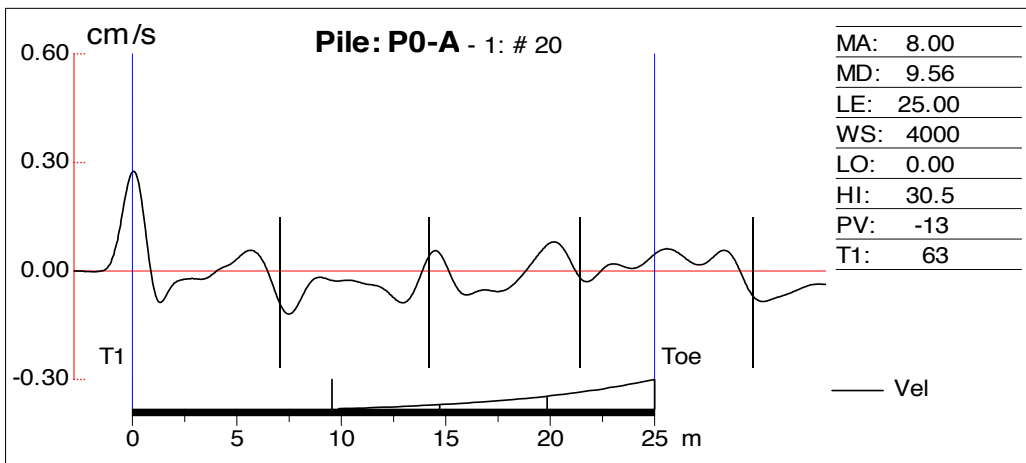
Da questa analisi, si sono ottenuti dei valori di velocità di trasmissione delle onde variabili tra 4000 e 4350 m/s.

In fase d'acquisizione dei segnali si è impostato in sito un primo valore per la velocità di 4000 m/s, allo scopo di variare i dati in input fino a verificare con buona approssimazione la lunghezza effettiva del palo.



Acquisizione ultrasonica su fusto del palo

A seguire si riporta il riflessogramma del palo P0.



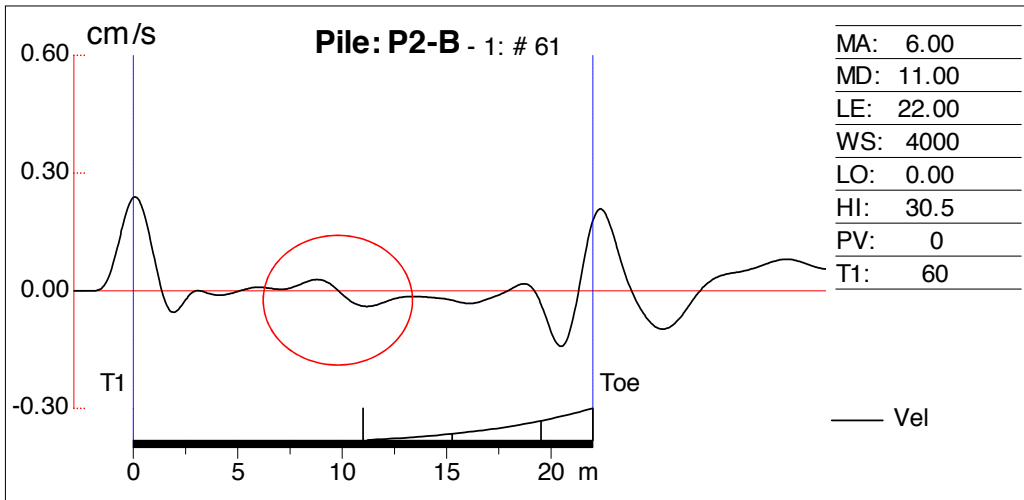
Analisi del segnale nel dominio del tempo

Dall'analisi del segnale è evidente una forte variazione di Impedenza a una quota di 6,5 metri, con fondo palo non individuabile e riflessione ripetuta delle onde.

Il risultato è tale da poter stabilire che a quella quota il palo è rotto o fortemente compromesso.



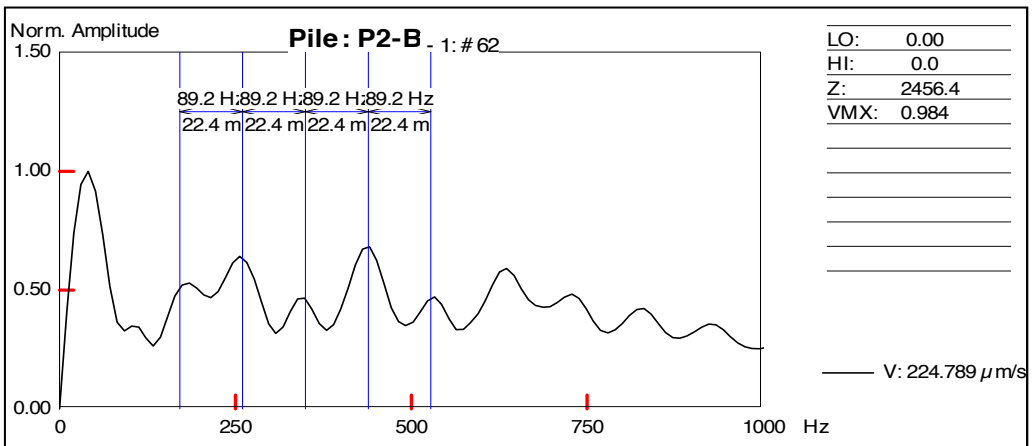
Per completezza si riporta una delle acquisizioni effettuate in nicchia su un altro palo dello stesso pontile.



Palo P2 in opera con sovrastrutture - Analisi del segnale nel dominio del tempo

Si nota una variazione di Impedenza a quota 9 metri circa, compatibile con l'infissione del palo nel terreno solido.

Nel grafico che segue si riporta l'analisi nel dominio delle frequenze, al fine di meglio identificare la lunghezza del palo, stimata in 22,4 metri.



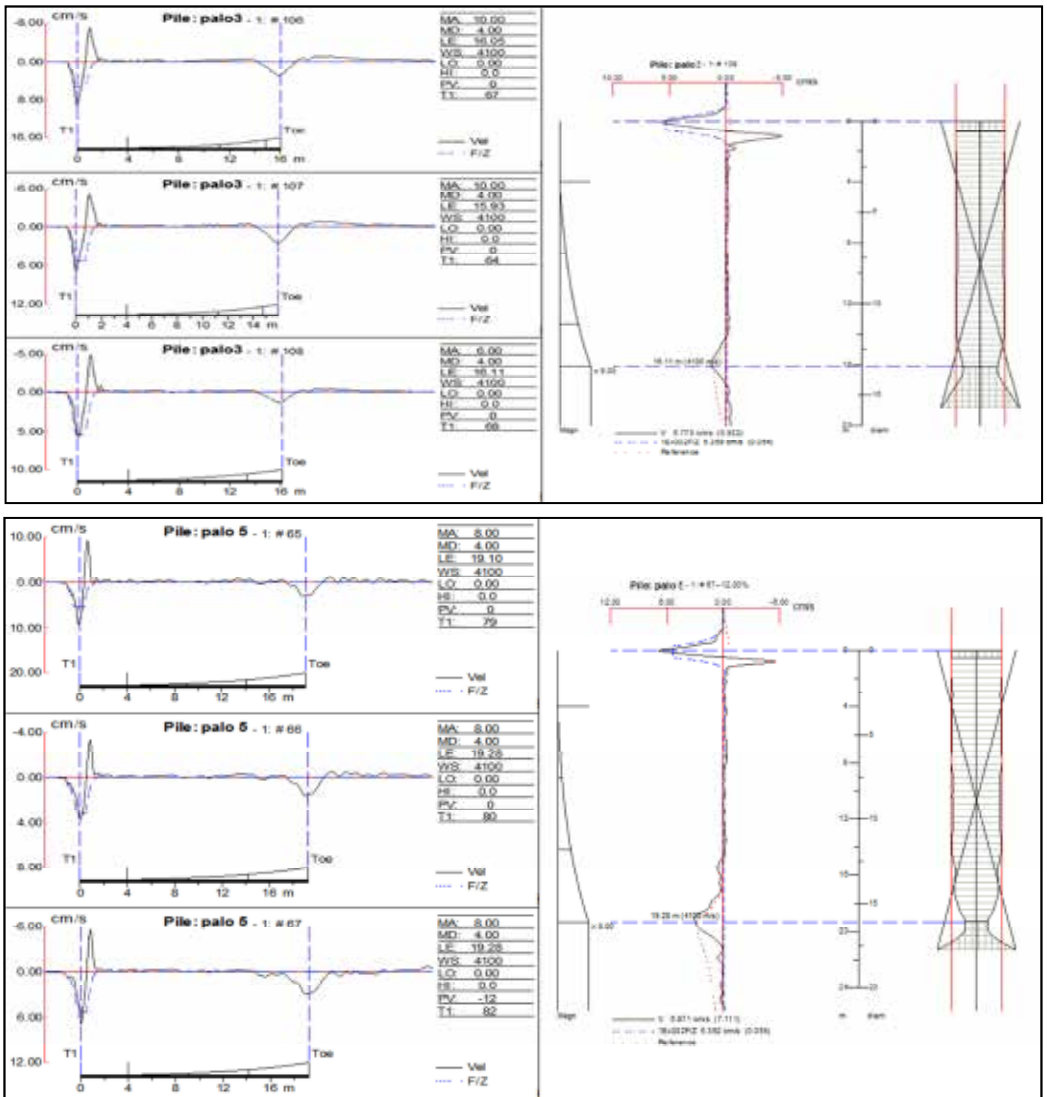
Palo P2 in opera con sovrastrutture - Analisi del segnale nel dominio delle frequenze

Esempio 3 - Analisi nel dominio dei tempi su pali trivellati - il profilo del palo

Caratteristiche dei pali e principali dati in input:

Diametro Ø: 120 cm
 Lunghezza di progetto: 20,0 metri
 Lunghezza da prova: 18,2÷19,9 metri
 Classe cls: C 25/30
 Velocità onde V: 4100 m/s

Si riportano alcuni grafici d'acquisizione nel dominio dei tempi, in cui viene inserito il profilo del palo così come generato dal Software PIT W.



Calcolo dell'Ammettenza meccanica teorica:

$$N_c = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\frac{V_s \cdot A \cdot \rho}{g}} = \frac{1}{\frac{4300 \cdot 0,5024 \cdot 24}{9,81}} = \frac{1}{5285} = 0,00018921$$

Ammettenza meccanica sperimentale:

$$N_m = \frac{\sqrt{PQ}}{Z} = \frac{0,983}{5285} = 0,00018589$$

Dal calcolo effettuato, risulta $N_m < N_c$ con valori comunque molto vicini, per cui il palo è virtualmente privo di difetti.

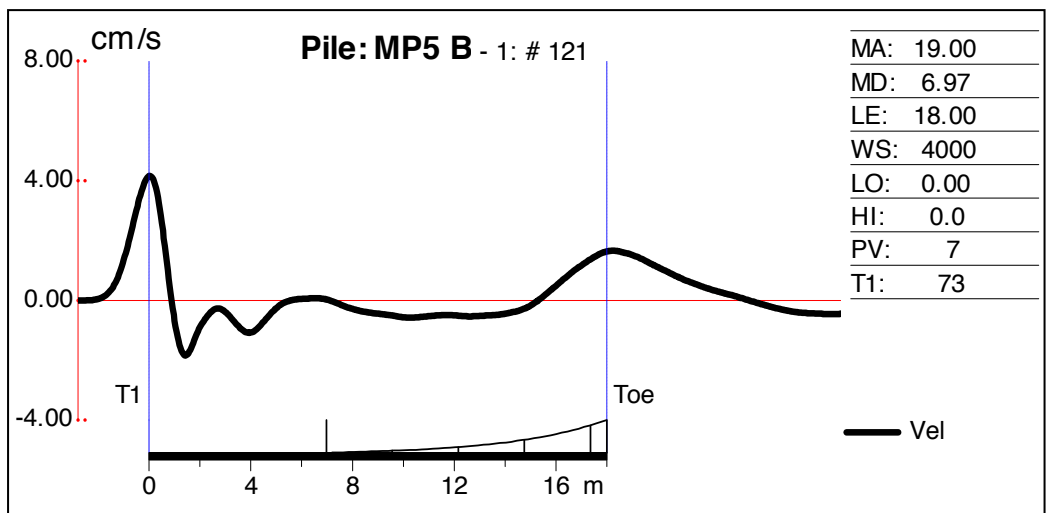
Esempio 2 - Micropalo

Caratteristiche del micropalo e principali dati in input:

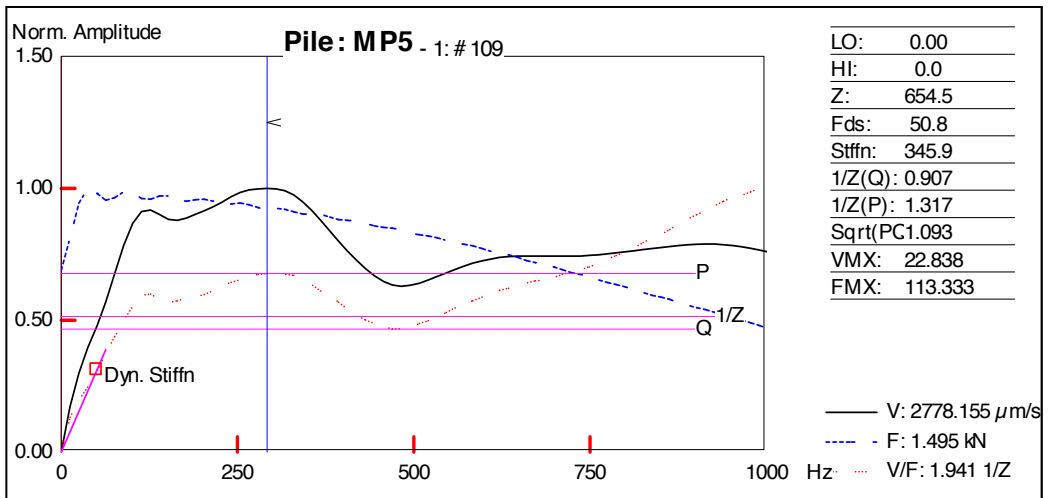
Diametro Ø:	30 cm
Area A:	706,9 cm ²
Densità di massa ρ :	22,67 kN/m ³ (valutata sulla sezione composta del micropalo)
Lunghezza di progetto:	18,0 metri
Lunghezza da prova:	18,0 metri
Velocità onde V:	4000 m/s

Il segnale analizzato nel dominio dei tempi, impostato con la parte positiva del grafico verso l'alto, evidenzia delle variazioni del segnale di lieve entità a partire da quota 4 metri. Da quota 6 metri circa si nota la variazione stratigrafica. Queste anomalie sono riconducibili a frizioni lungo il fusto per probabili variazioni di attrito e/o compressione con il terreno, compatibili con la stratigrafia riportata nella relazione geotecnica.

Fondo palo individuato a quota 18,0 metri.



Analisi del segnale - Dominio del tempo



Analisi del segnale - Dominio delle frequenze

Valori di ammettenza meccanica:

- $N_c = 0,000153$
- $N_m = 0,000167$
- $N_m > N_c$

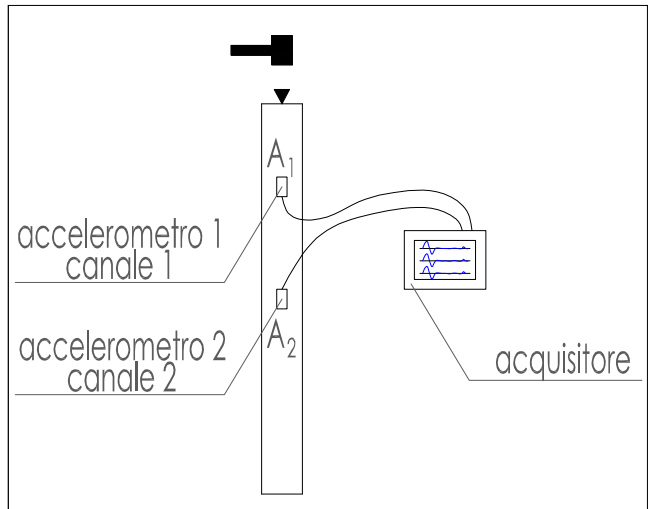
L'Ammettenza sperimentale N_m risulta in questo caso lievemente maggiore dell'Ammettenza meccanica teorica N_c , indicando una possibile presenza di difetti lungo il fusto della corona del micropalo.

È altresì possibile attribuire quest'aspetto al netto cambio di stratigrafia riscontrato. Assume, a questo punto, fondamentale importanza l'esecuzione di ulteriori indagini sulla palificata per evidenziare se i parametri riscontrati rappresentino effettivamente una caratteristica del sito o se si tratti di anomalie locali del singolo elemento indagato.



6.12 Analisi con due velocità - Il palo e le sovrastrutture

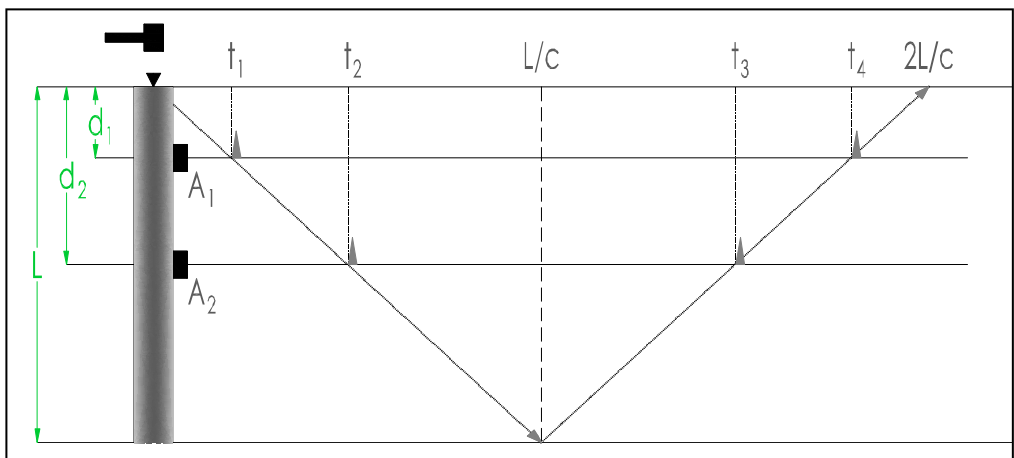
Nella situazione in cui ci si trovi a dover valutare dei pali già collegati alle strutture sovrastanti, è possibile condurre l'indagine con particolari accorgimenti, mettendo in opera un secondo accelerometro.



Predisposizione di doppio accelerometro sul fusto del palo

Il metodo consente di misurare la velocità delle onde che viaggiano verso la testa del palo separandole da quelle che si propagano verso il piede. Il sistema di misura risulta efficace anche nel caso in cui la lunghezza del palo sia una variabile da stimare.

A tale scopo, come da schema sottostante, sono posizionati due accelerometri, A_1 e A_2 , rispettivamente a distanza d_1 e d_2 dalla testa del palo.



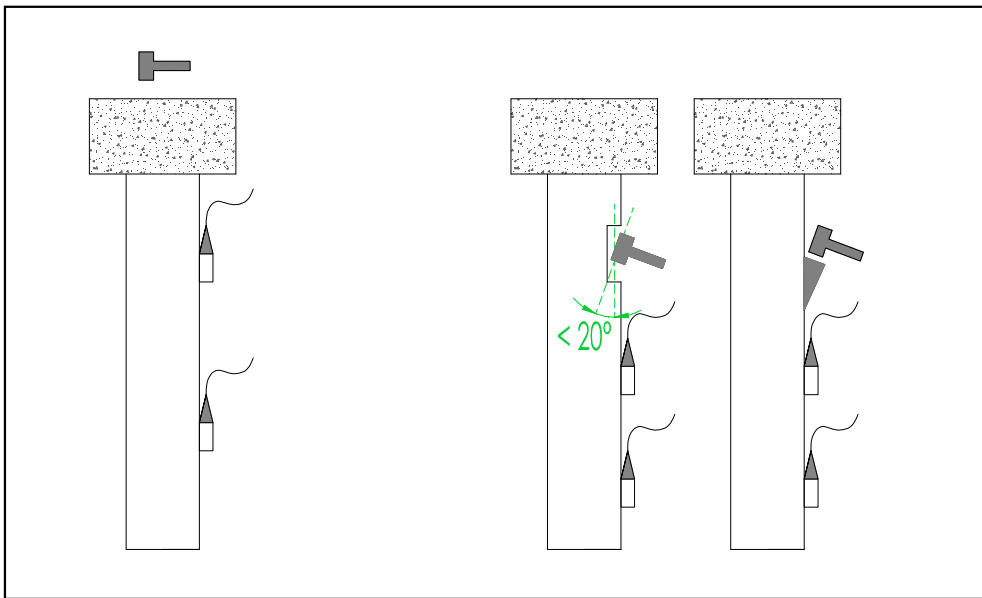
Propagazione delle onde e posizionamento degli accelerometri

Le onde di riflessione della parte superiore, testa del palo e sovrastrutture, devono essere identificate per evitare che diano luogo a confusione o dubbi con le riflessioni del fondo palo o con le riflessioni dovute a variazioni di impedenza lungo il fusto.

Posizionamento degli accelerometri:

- gli accelerometri vanno collocati lateralmente al fusto del palo;
- A_1 deve essere posto nella parte superiore, il più possibile vicino alla zona di battuta e collegato al canale primario dell'acquisitore;
- A_2 va posto nella zona inferiore e collegato al secondo canale dell'acquisitore;
- la zona di collocamento di A_2 deve essere distante in linea verticale di almeno 75 cm da A_1 .

Negli schemi seguenti si mostra come, a seconda del tipo di struttura, l'impulso possa essere prodotto sia da sopra che lateralmente con un cuneo ben aderente al fusto o, preferibilmente, in nicchia appositamente predisposta.



Zona d'impatto e posizionamento accelerometri

Il tempo di transito dell'onda tra A_1 e A_2 , Δt , risente dall'accuratezza con cui vengono posizionati e misurata la distanza tra gli accelerometri.

Un aumento della distanza tra gli accelerometri, fino ad almeno 1,5 m, può migliorare l'accuratezza del segnale.

In questo tipo d'indagine è fondamentale il corretto inserimento dei valori di calibrazione dei sensori utilizzati.

Nelle immagini che seguono si mostrano due casi tipici in cui, rispettivamente, il posizionamento dell'accelerometro avviene nella stessa nicchia in cui viene dato l'impulso con il martello o in una nicchia separata.

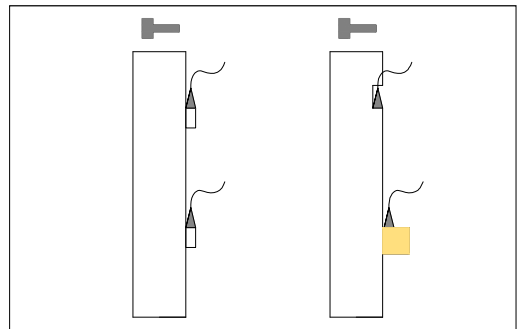


Martello e accelerometro in nicchia unica

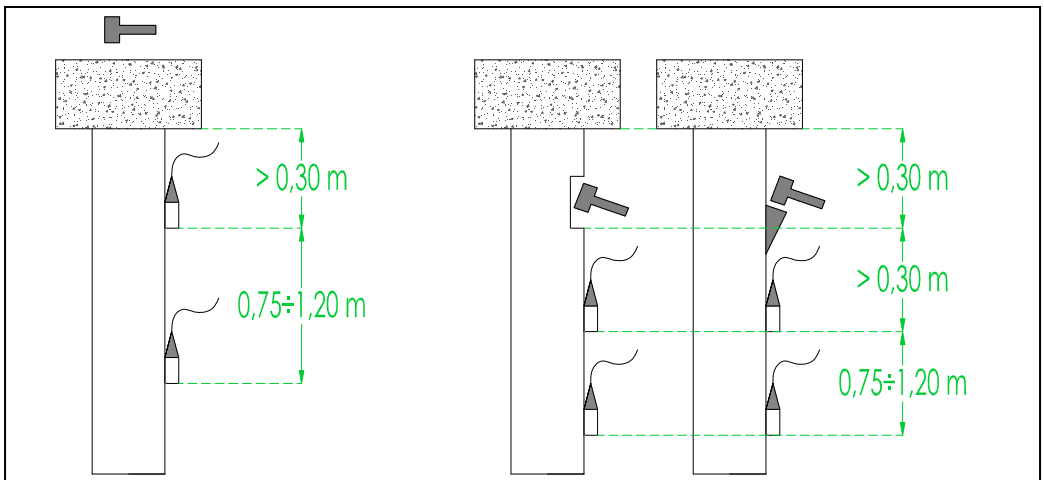


Martello e accelerometro in nicchie separate

Nella figura a lato e in quella sottostante sono proposte schematicamente delle configurazioni possibili per utilizzare la tecnica dei due accelerometri.



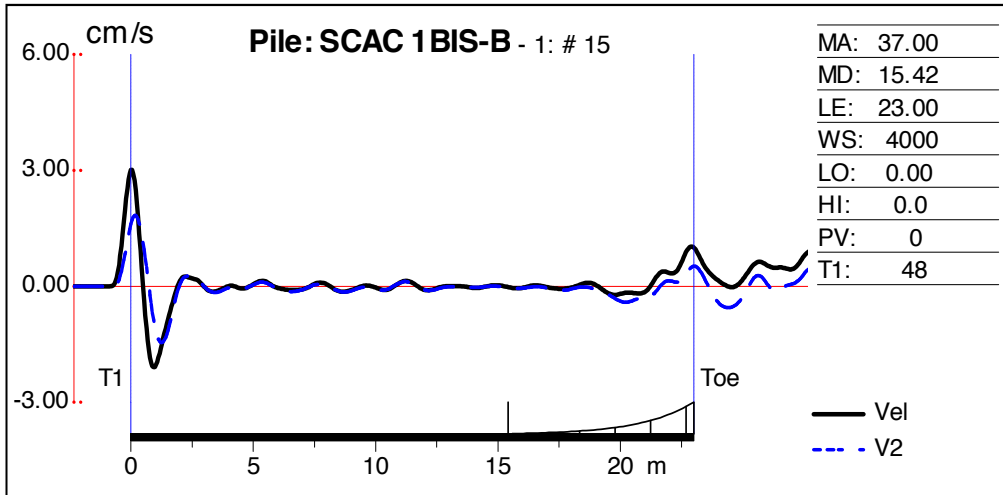
Possibile posizionamento accelerometri



Distanze di applicazione accelerometri sul fusto del palo

Si riporta infine un esempio di acquisizione su palo SCAC, parte della struttura di un pontile.

Si notano le risposte dei due accelerometri, posti a una distanza di 75 cm, con il fondo palo inequivocabilmente individuato a 23,0 m di profondità.



Riflessogramma - Doppio accelerometro

6.13 Normativa di riferimento

- ASTM D 5882-07 - "Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations"
- D.M. 14 gennaio 2008 - "Norme tecniche per le costruzioni"