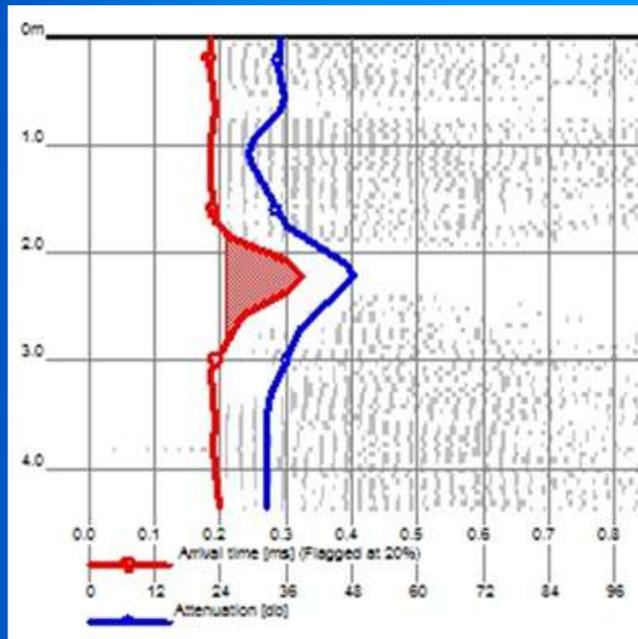


Controlli di integrità delle fondazioni profonde



Ing. Santo Mineo

Amministratore Unico della CIMENTO S.r.l. – Laboratorio di diagnostica strutturale

Certificato al liv. 3 (UNI EN 9712) per i metodi MG, SC, UT, MO, liv. 2 per TG, MPT e liv. 1 nel metodo VT

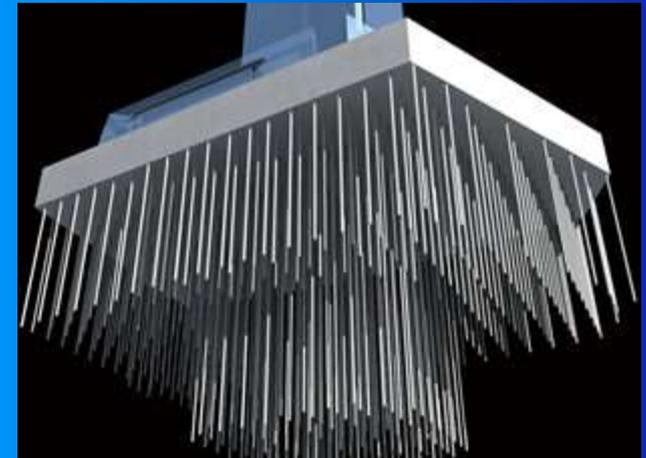
Vicedirettore Associazione MASTER



Le fondazioni profonde: i pali

I pali di fondazione sono una tipologia di fondazioni profonde o indirette, costruiti con lo scopo di trasmettere il carico della sovrastruttura ad uno strato profondo resistente del sottosuolo, attraverso terreni soffici ed inadatti, acqua o aria, ovvero diffondere il peso della costruzione a larghi strati di terreno capaci di fornire una sufficiente resistenza al carico.

Si ricorre alle fondazioni su pali ogni qualvolta risulta impossibile, o a volte antieconomico, adottare fondazioni superficiali ordinarie.



fonte: www.mori.co.jp



Le fondazioni profonde: i pali

In base alla tecnica costruttiva e di posa in opera, i pali di fondazione si distinguono in:

pali trivellati, con asportazione di terreno

pali infissi, senza asportazione di terreno

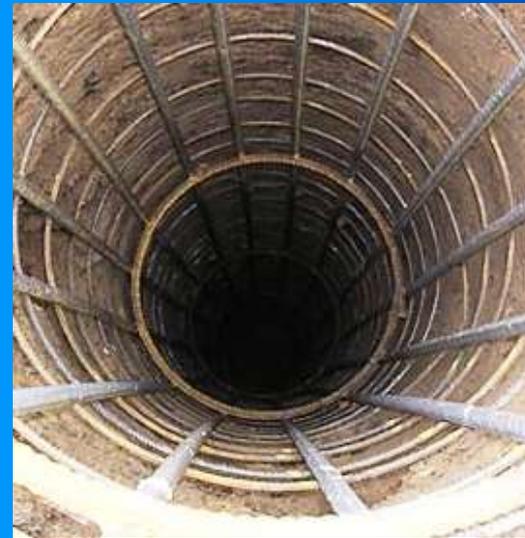


Le fondazioni profonde: i pali

Nel primo caso i pali si realizzano perforando il terreno, estraendo un volume di terreno circa uguale a quello del palo, con o senza l'ausilio di un tubo forma, inserendo la carcassa di armatura in acciaio ed eseguendo un getto finale di calcestruzzo.



fonte: <http://www.franki-geotechnics.be>



fonte: www.trivel-jonica.com



Le fondazioni profonde: i pali



fonte: <http://www.franks-geotechnics.be>

Nel secondo caso i pali, costruiti fuori opera, vengono infissi nel terreno mediante battitura, o mediante applicazione di pressione statica ovvero per vibrazione alla punta.



Defectologia

Il palo trivellato è certamente tra i più economici e versatili, potendolo realizzare in tutte le condizioni di terreno e di ambiente.

Tuttavia, per riuscire ben eseguito, ha bisogno di grande cura e sorveglianza in fase di realizzazione, perché basta una svista, una noncuranza, per creare nel palo soluzioni di continuità e danno tali da compromettere la stabilità della fondazione.



fonte : www.marchesegroup.net



Defectologia

La realizzazione del palo deve inoltre tenere conto della stratigrafia del terreno attraversato (desumibile per definizione per ogni trivellazione) e dell'influenza che questa può avere in fase esecutiva.



fonte : /www.altaviamilano.it



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati

Tra gli inconvenienti che possono arrecare danno al palo:

- **formazione di un tappo di calcestruzzo durante il getto (ad esempio in caso di utilizzo di cemento a rapido indurimento)**
- **dilavamento del calcestruzzo ancora fresco per effetto di una corrente d'acqua sotterranea**
- **formazione di nidi di ghiaia per cattiva esecuzione del getto**
- **restrizioni della sezione (ad esempio attraversamento di uno strato di argilla la quale, notoriamente, dopo la trivellazione tende a richiudersi)**



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati

Tra gli inconvenienti che possono arrecare danno al palo:

- **sbulbatura della sezione**
- **mescolamento di materiale terroso con il calcestruzzo ancora fresco (in caso di terreno incoerente, di scarsa resistenza o immerso in acqua)**
- **intrusioni di materiale spurio (ad esempio in caso getto in presenza di fanghi bentonitici, con sollevamento anticipato del tubo forma prima che il calcestruzzo sia stato gettato)**
- **rottura del palo, etc.**



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.dot.ca.gov



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati

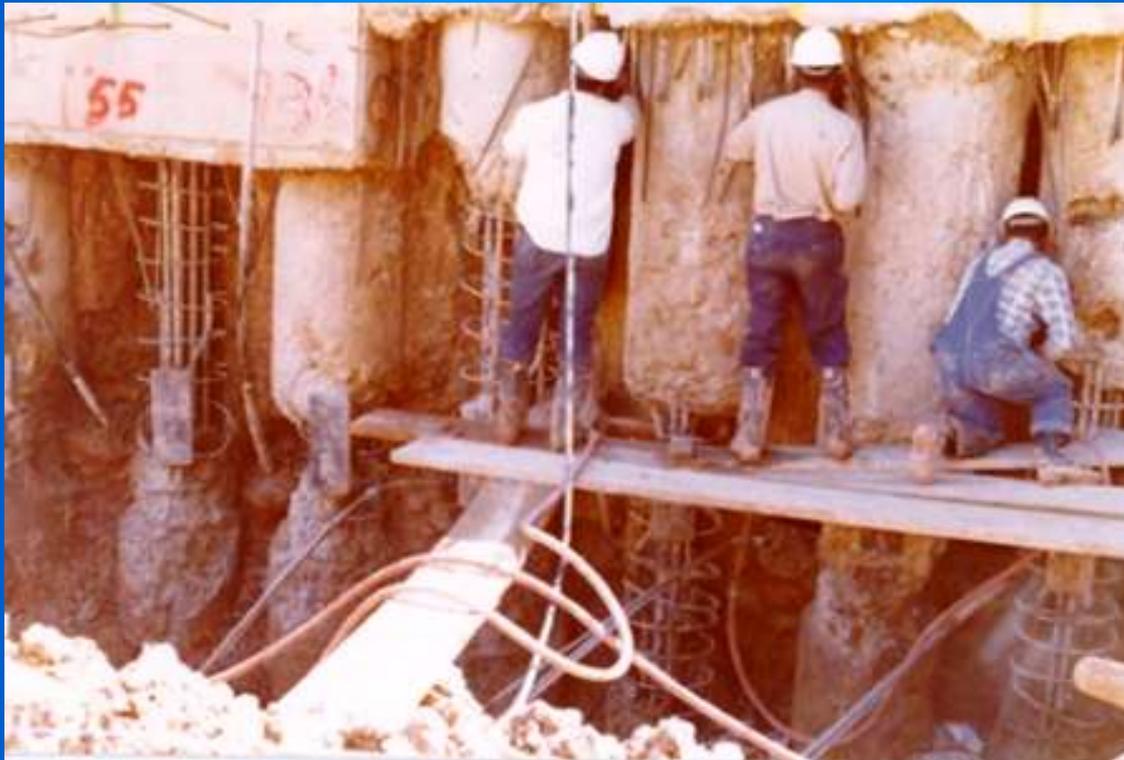


fonte: www.dot.ca.gov



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.ulrichengineers.com



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.ulrichengineers.com



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.ulrichengineers.com



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.ulrichengineers.com



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: www.foundtest.com.my



fonte: ndtechnology.co.uk



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali trivellati



fonte: ndtechnology.co.uk



fonte: ndtechnology.co.uk



Defectologia

Difetti costruttivi dei pali prefabbricati ed infissi

I difetti di esecuzione nei pali prefabbricati ed infissi sono più rari e si riferiscono essenzialmente ad errori nel sistema di infissione: eccesso di battitura o errata applicazione del sistema adottato.



Normativa

D.M. 14 gennaio 2008 - “Norme tecniche per le costruzioni”

6.4 OPERE DI FONDAZIONE

6.4.1 CRITERI GENERALI DI PROGETTO

Le scelte progettuali per le opere di fondazione devono essere effettuate contestualmente e congruentemente con quelle delle strutture in elevazione.

....(omissis)

Nel caso di fondazioni su pali, le indagini devono essere dirette anche ad accertare la fattibilità e l' idoneità del tipo di palo in relazione alle caratteristiche dei terreni e delle acque del sottosuolo.

....(omissis)



Normativa

D.M. 14 gennaio 2008 - “Norme tecniche per le costruzioni”

6.4.3 FONDAZIONI SU PALI

Il progetto di una fondazione su pali deve comprendere la scelta del tipo di palo e delle relative tecnologie e modalità di esecuzione, il dimensionamento dei pali e delle relative strutture di collegamento, tenendo conto degli effetti di gruppo tanto nelle verifiche SLU quanto nelle verifiche SLE.

Le indagini geotecniche, oltre a soddisfare i requisiti riportati al § 6.2.2, devono essere dirette anche ad accertare la fattibilità e l'idoneità del tipo di palo in relazione alle caratteristiche dei terreni e delle acque presenti nel sottosuolo.

....(omissis)



Normativa

D.M. 14 gennaio 2008 - “Norme tecniche per le costruzioni”

6.4.3.6 Controlli d'integrità dei pali

In tutti i casi in cui la qualità dei pali dipenda in misura significativa dai procedimenti esecutivi e dalle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione, devono essere effettuati controlli di integrità.

Il controllo dell'integrità, da effettuarsi con prove dirette o indirette di comprovata validità, deve interessare almeno il 5% dei pali della fondazione con un minimo di 2 pali.

Nel caso di gruppi di pali di grande diametro ($d \geq 80$ cm), il controllo dell'integrità deve essere effettuato su tutti i pali di ciascun gruppo se i pali del gruppo sono in numero inferiore o uguale a 4.



Metodologie e tecniche di controllo

Controllo di tipo distruttivo: CAROTAGGIO DEL PALO

Controllo mediante ultrasuoni: CROSS-HOLE

Prove dinamiche a basse deformazioni nel dominio del tempo: PROVA ECOMETRICA

Prove dinamiche a basse deformazioni nel dominio della frequenza: PROVA VIBRAZIONALE O DI AMMETTENZA MECCANICA



CONTROLLO DI TIPO DISTRUTTIVO

CAROTAGGIO DEL PALO



Carotaggio del palo

Il carotaggio del palo, ovvero l'estrazione di carote di calcestruzzo indurito, effettuata longitudinalmente al fusto del palo, è un metodo distruttivo con asportazione di materiale dall'elemento strutturale indagato.



fonte : www.geo-in.it



Carotaggio del palo

E' il metodo più invasivo ma a volte necessario:

- per tarare metodi non distruttivi
- per estrarre carote di calcestruzzo da sottoporre a prova a schiacciamento
- per l'installazione a posteriori della strumentazione per il cross-hole
- per verificare con esattezza la lunghezza in caso di contenziosi, etc.



Carotaggio del palo

La tecnica per l'estrazione delle carote dai pali è la stessa utilizzata per l'estrazione di carote da altri elementi in cls.

In relazione alla profondità che si vuole raggiungere possono usarsi delle semplici carotatrici, utilizzando in accoppiamento al carotiere delle astine di prolunga, ovvero delle vere e proprie trivelle utilizzate per carotaggi geognostici.



Carotaggio del palo



fonte : www.sidercem.it



fonte : www.piletest.com



Carotaggio del palo



Fonte: CIMENTO S.r.l.



Fonte: CIMENTO S.r.l.

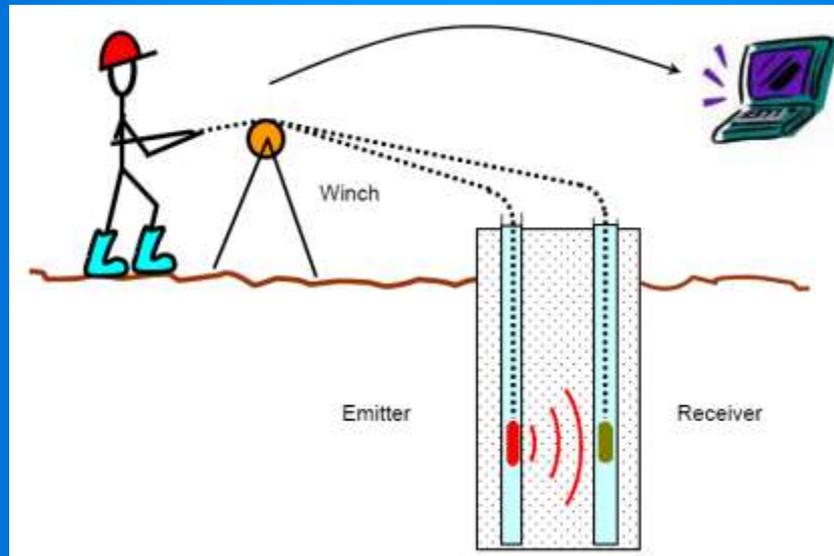
CONTROLLO MEDIANTE ULTRASUONI

CROSS-HOLE



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Il metodo cross-hole (CLS ovvero cross-hole sonic logging) è un metodo di controllo non distruttivo che si basa sulla registrazione in continuo di impulsi ultrasonici tra due sonde, una trasmittente ed una ricevente, che attraversano le sezioni di calcestruzzo entro fori che corrono longitudinalmente dalla testa al piede del palo.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Mediante tale tecnica di indagine è possibile controllare:

- qualità del calcestruzzo
- omogeneità del calcestruzzo
 - presenza di vuoti
 - irregolarità del getto

in definitiva l'integrità di un palo di fondazione.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE



fonte: www.dot.ca.gov

L'impiego di tale indagine deve essere prevista in fase di progettazione: prima del getto, all'interno della gabbia d'armatura del palo, è necessario predisporre dei tubi in PVC o in acciaio, da 2 a 8 in funzione del diametro del palo.

Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE



fonte: www.dot.ca.gov

I tubi devono essere fissati in modo da risultare paralleli, opportunamente distanziati ed in posizione, in opera, quanto più verticale ai fini della corretta interpretazione dei dati e del rilievo dei difetti. In caso di necessità, i fori possono essere realizzati anche mediante carotaggio continuo.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

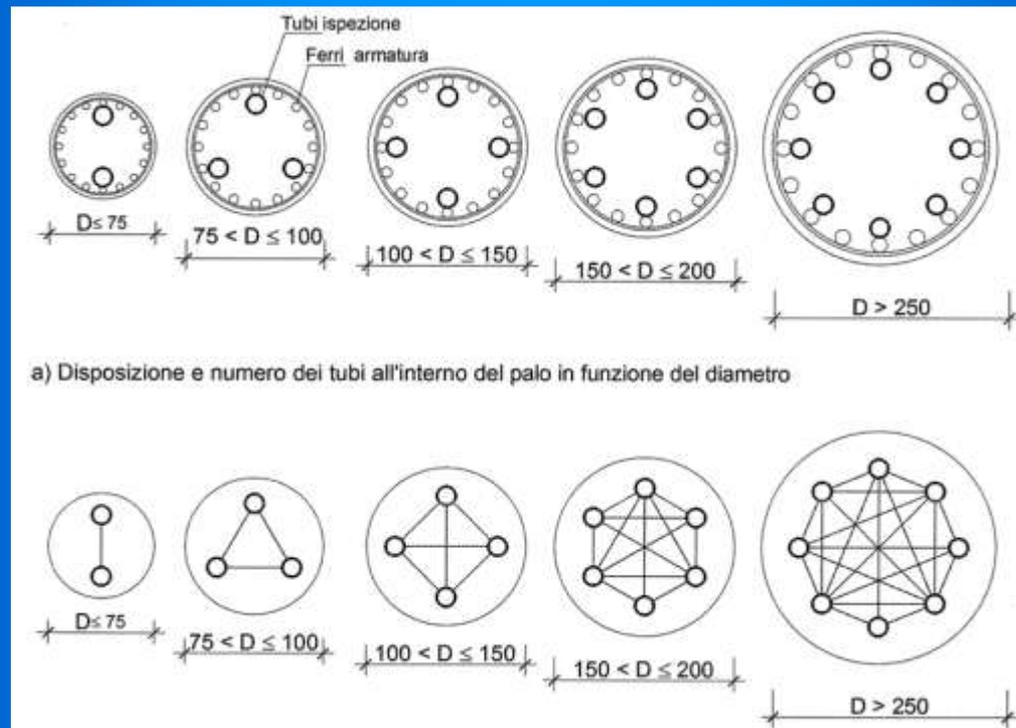
Di seguito si riporta, in relazione al diametro del palo, il numero minimo di tubi di ispezione raccomandati e la relativa disposizione angolare:

Diametro del palo	Numeri minimo di tubi di ispezione	Disposizione angolare relativa
$D \leq 75$ cm	2	180°
75 cm $< D \leq 100$ cm	3	120°
100 cm $< D \leq 150$ cm	4	90°
150 cm $< D \leq 250$ cm	6	60°
$D > 250$ cm	8	45°



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Di seguito si riporta, in relazione al diametro del palo, il numero minimo di tubi di ispezione raccomandati e la relativa disposizione angolare:



fonte: S. Lombardo – V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccivio



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

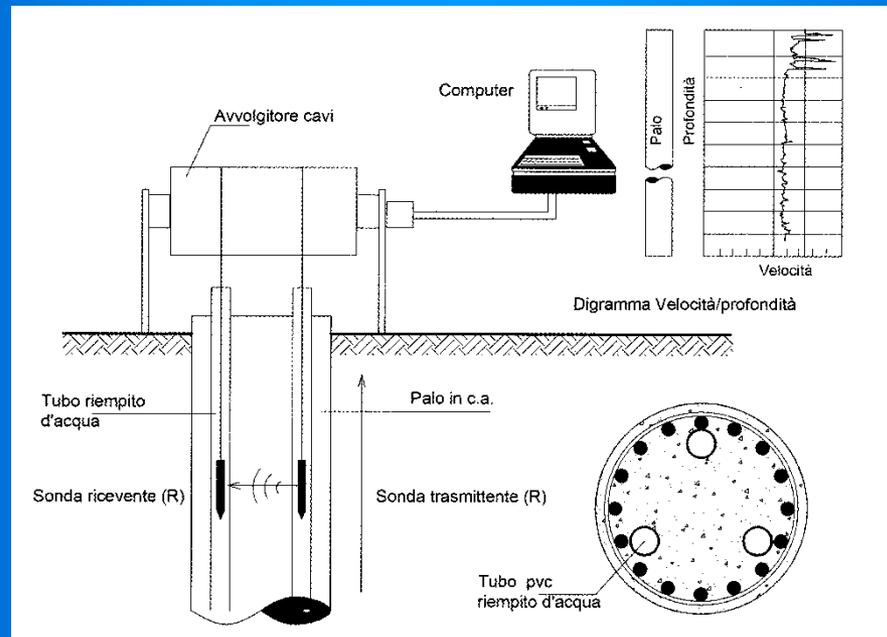
La prova può eseguirsi già dopo 7 giorni dal getto di calcestruzzo; è indubbio che dopo tempi di stagionatura superiori a 28 giorni si ottengono risultati più attendibili.

Prima di iniziare la prova i tubi devono essere riempiti di acqua al fine di creare continuità acustica tra le sonde ed il mezzo che le onde elastiche devono attraversare



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Per la rilevazione, la coppia di sonde, trasmettente e ricevente, viene calata simultaneamente all'interno dei tubi.

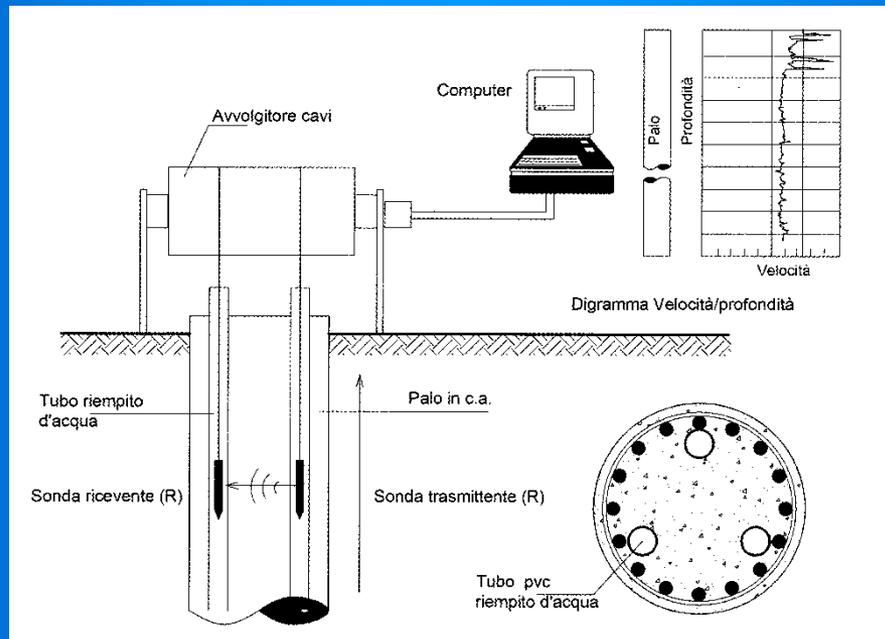


fonte: S. Lombardo – V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccvio



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Le sonde sono collegate ad uno strumento ad ultrasuoni che provvede a generare il segnale sonico impulsivo (sonda trasmittente) e a visualizzare-registrare il tempo impiegato all'impulso per raggiungere la sonda ricevente.



fonte: S. Lombardo – V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccvio



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Il sistema di acquisizione registra il tempo di propagazione dell'onda relativo a ciascun impulso, assieme alla posizione delle sonde al momento dell'acquisizione.



fonte: www.piletest.com



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Le sonde vengono recuperate mediante uno speciale argano, e le misurazioni vengono eseguite mediamente ogni $5 \div 10$ cm.



fonte: BOVIAR S.r.l.



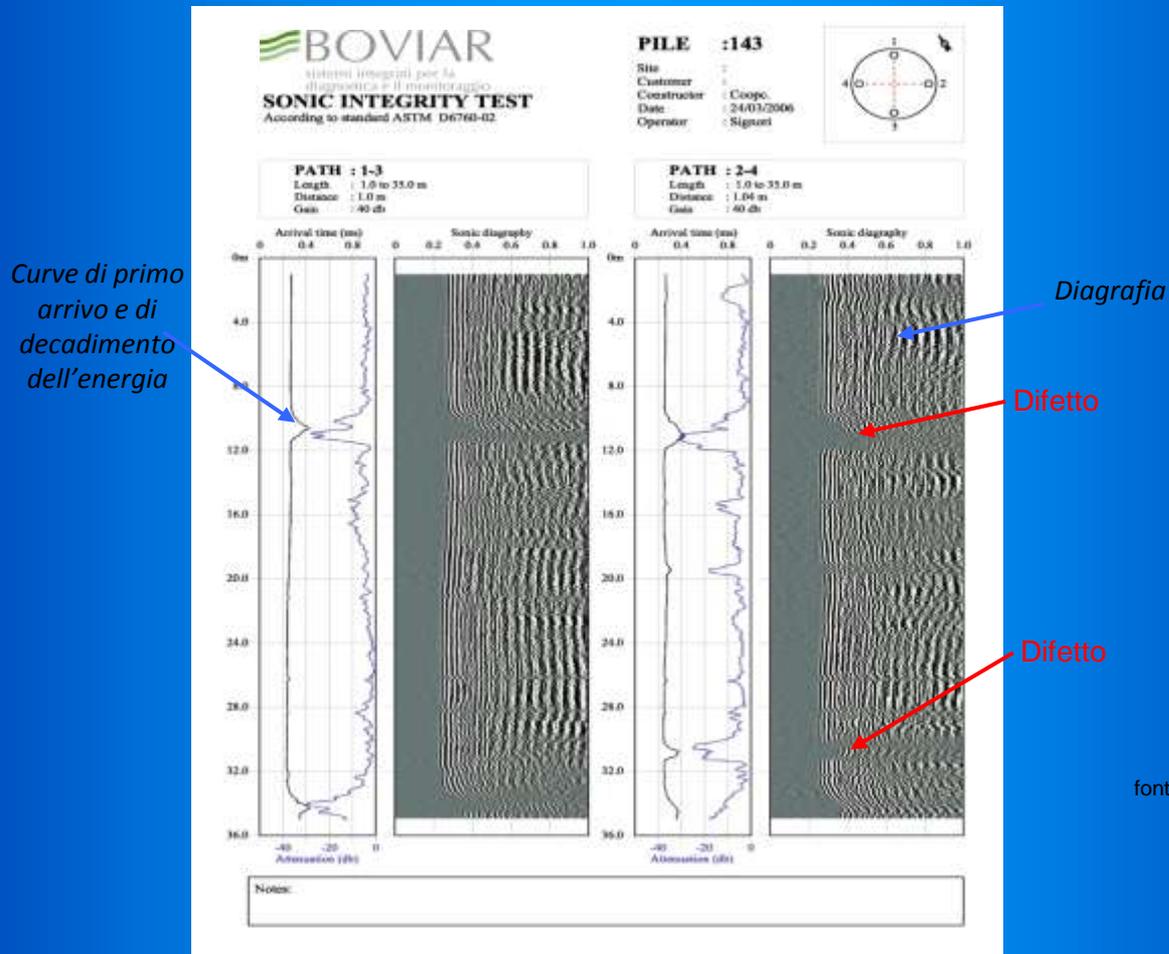
fonte: www.ndt.net

Le due sonde, T ed R, collocate in due tubi distinti, vengono spostate contemporaneamente in modo da trovarsi sulla stessa congiungente orizzontale o leggermente sfalsate.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

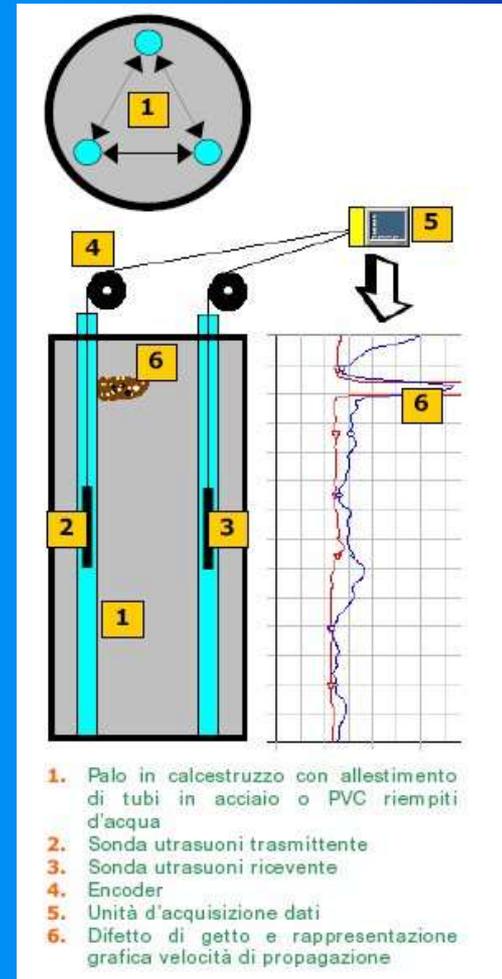
Il report della prova consiste in un diagramma nel quale, alle diverse profondità, vengono riportati i tempi di percorrenza dell'impulso ultrasonico.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Essendo nota la distanza reciproca dei tubi, si ricava immediatamente il valore della velocità di propagazione dell'onda ultrasonica alle varie profondità, velocità che è direttamente correlata alle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (o meglio del mezzo attraversato).

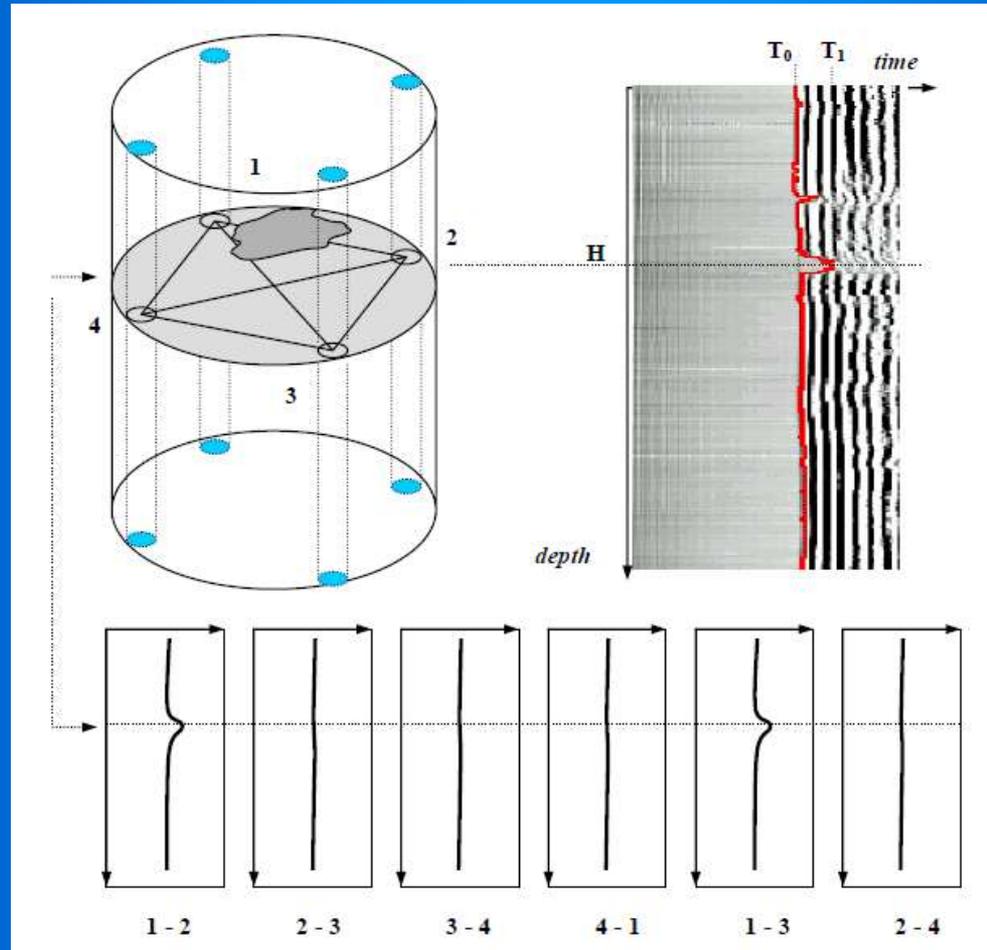
L'eventuale interruzione del getto, possibili nidi di ghiaia, l'inclusione di altri materiali, viene immediatamente evidenziata con una riduzione repentina o totale interruzione del segnale.



fonte: www.geoconsulab.com



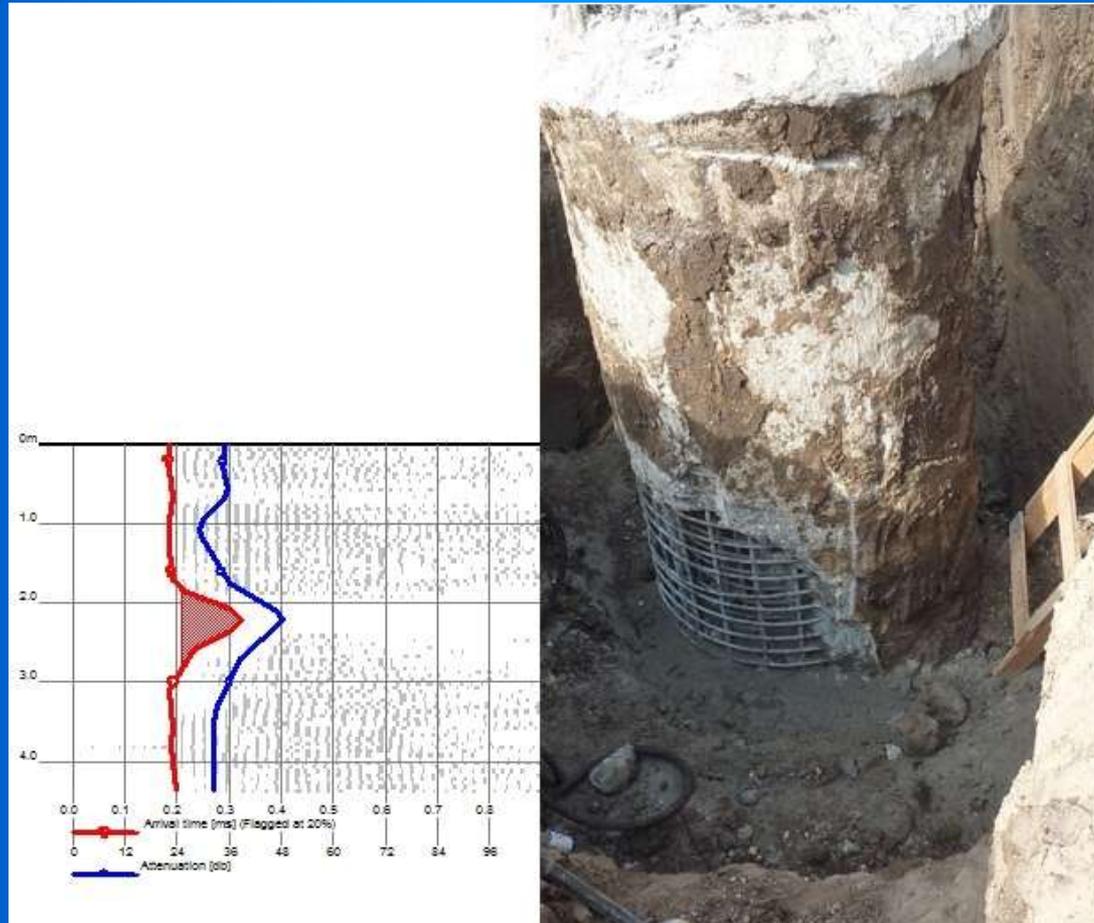
Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE



fonte: www.piletest.com



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE



fonte: www.piletest.com



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

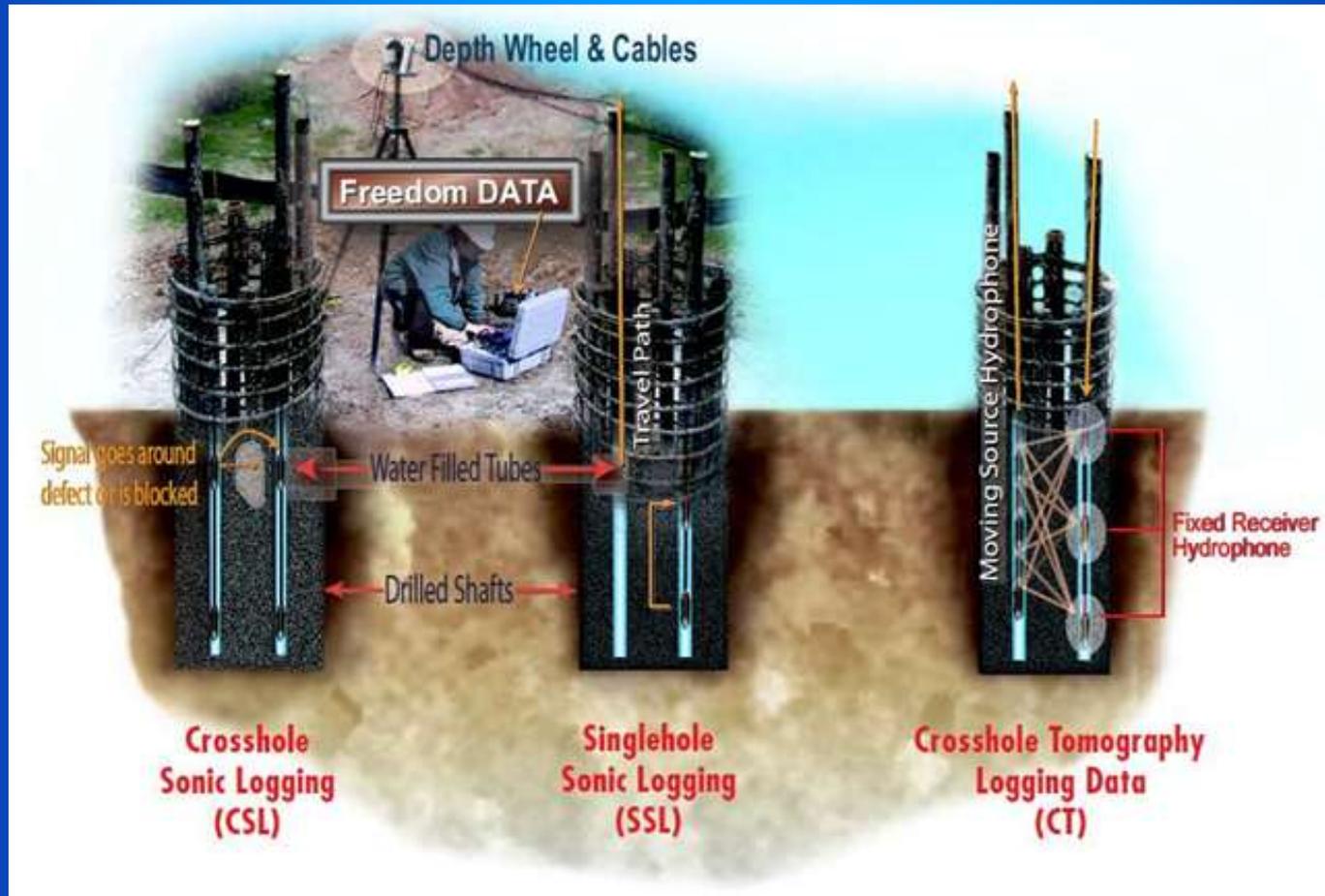
La metodologia sopra descritta presenta le seguenti varianti:

-il metodo **SINGLE-HOLE**
(single-hole sonic logging, SSL)

-la **TOMOGRAFIA SONICA**
(cross-hole sonic logging tomography, CSLT)



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE



fonte: pcte.com.au



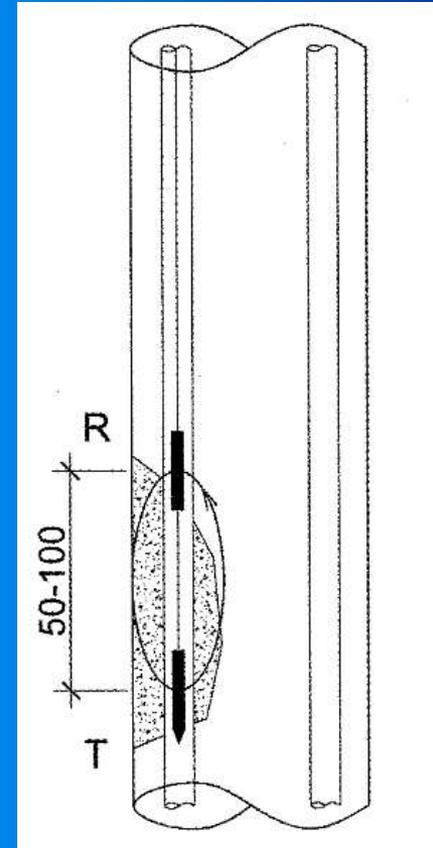
Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Metodo SINGLE-HOLE (single-hole sonic logging, SSL)

Definito anche carotaggio sonico, l'indagine ultrasonora è svolta mediante la calata nello stesso foro delle sonde, R e T, distanziate verticalmente di circa $50 \div 100$ cm, opportunamente isolate acusticamente.

Rispetto al CSL i soli difetti costruttivi del palo individuabili sono quelli adiacenti al tubo di ispezione.

Per le molte incertezze e limitazioni di indagine il procedimento non ha avuto una larga diffusione.



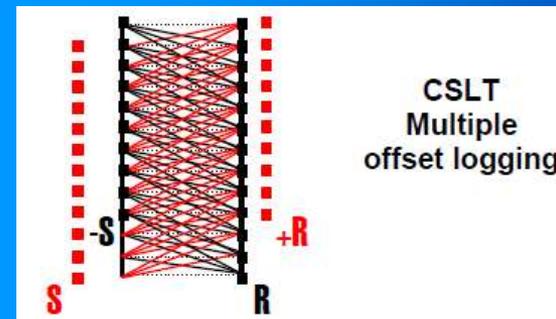
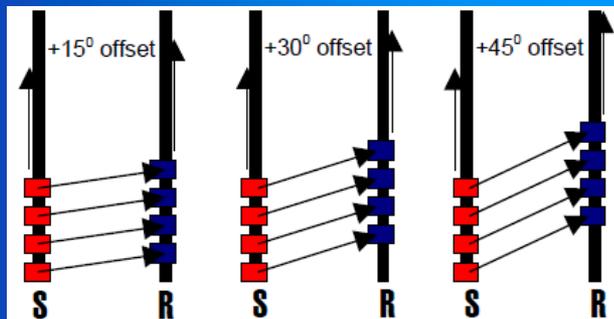
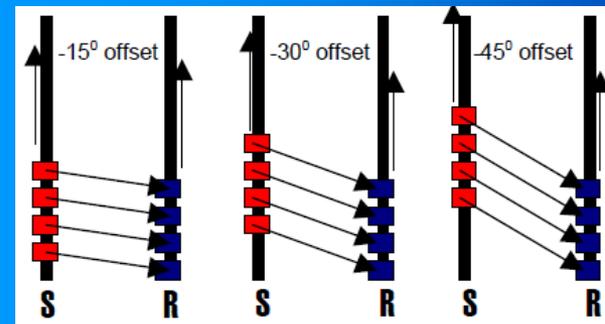
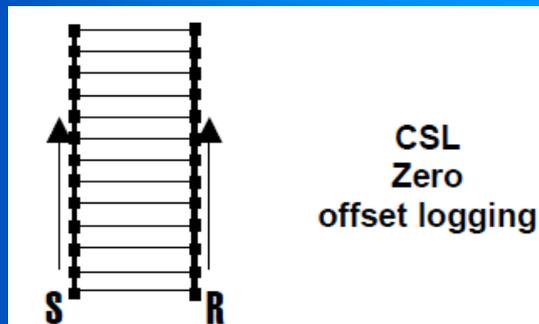
fonte: S. Lombardo – V. Venturi
"Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccovio



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Tomografia sonica (cross-hole sonic logging tomography, CSLT)

E' una estensione del metodo cross-hole, e si basa su una maggior numero di combinazioni di profondità relative tra la sonda trasmettente e la sonda ricevente per tutta la lunghezza del palo.

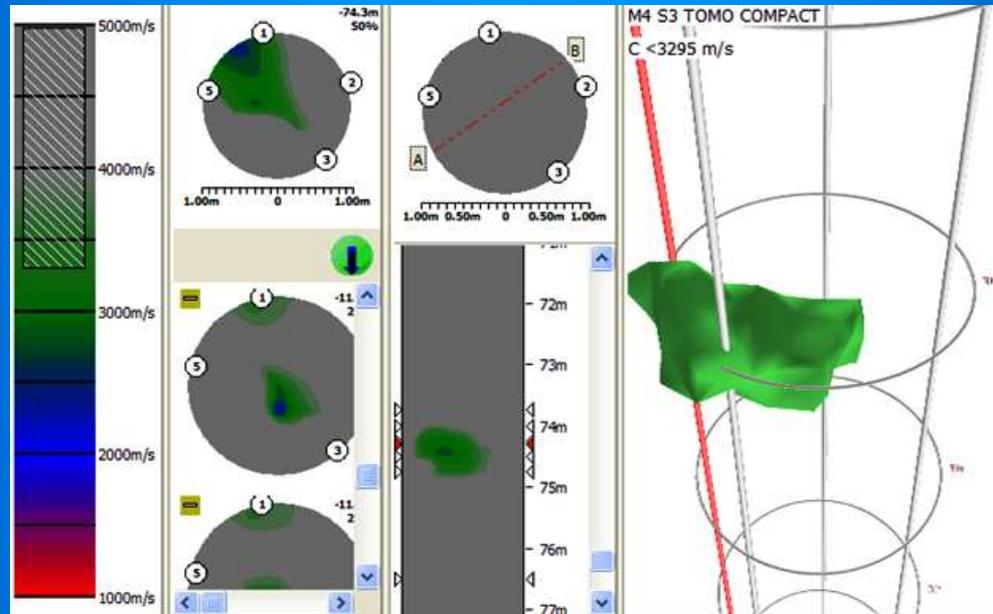


fonte: www.dot.ca.gov



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Tomografia sonora (cross-hole sonic logging tomography, CSLT)



fonte: www.piletest.com

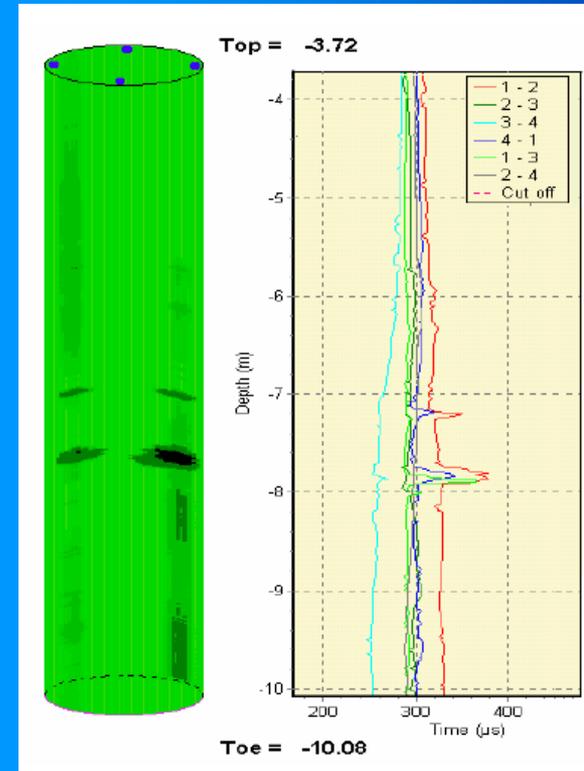
Dai dati così raccolti, con il metodo CLST è possibile ricostruire immagini tomografiche sia 2D che 3D, potendo fornire una definizione volumetrica più esatta delle zone di difetto all'interno del palo indagato rispetto al metodo CLS.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

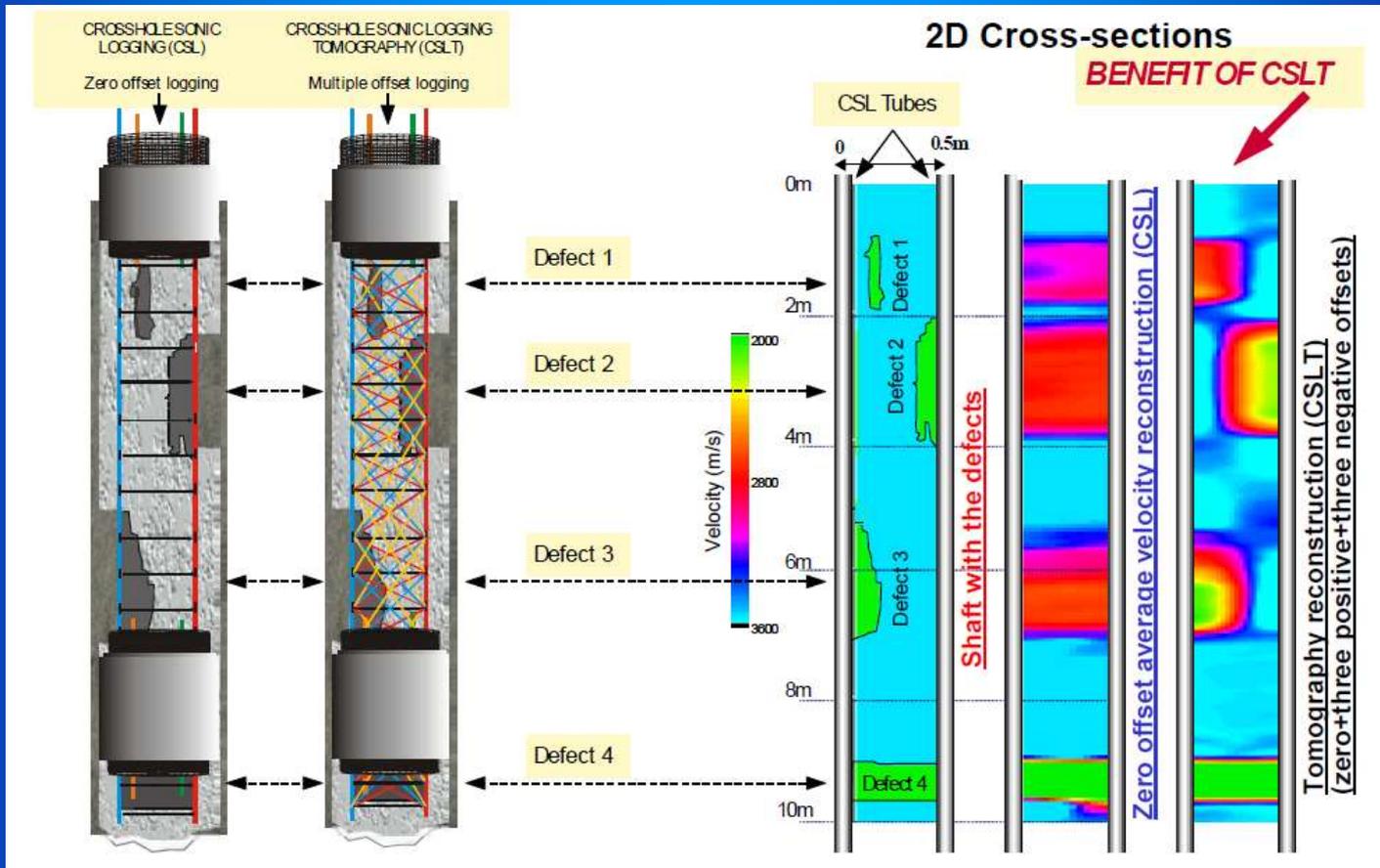
Tomografia sonora (cross-hole sonic logging tomography, CSLT)

La tomografia, inoltre, fornisce una correlazione più esatta fra la diminuzione percentuale nella velocità delle onde ultrasoniche e quello della resistenza del calcestruzzo ai fini dell'accettazione del palo.



Controllo mediante ultrasuoni – CROSS-HOLE

Tomografia sonica (cross-hole sonic logging tomography, CSLT)



fonte: www.dot.ca.gov



LE PROVE DINAMICHE A BASSE DEFORMAZIONI NEL DOMINIO DEL TEMPO

Prova ecometrica



Prova ecometrica

La prova ecometrica, o prova di eco sonica, è una prova non distruttiva, a bassa deformazione, che si basa sull'analisi della propagazione di un'onda elastica lungo il palo da indagare, generata da un impulso a bassa energia sulla testa del palo.

Le ridottissime dimensioni della strumentazione di prova e la semplicità di esecuzione della stessa, fanno sì che questa possa essere eseguita con grande rapidità, e soprattutto economicità, su tutti i pali di un'intera palificata.



Prova ecometrica

L'interpretazione dei risultati, tuttavia, è fortemente legata alle condizioni al contorno del palo indagato: maggiori sono le informazioni a disposizione dello sperimentatore e migliore sarà l'interpretazione delle elaborazioni dei segnali registrati.

Particolarmente significative sono la stratigrafia del terreno attraversato dal palo e la tecnica esecutiva del getto.



Prova ecometrica

La strumentazione di prova è costituita da un sistema di acquisizione composto da una centralina di acquisizione ed elaborazione del segnale, al quale viene collegato un trasduttore accelerometrico.



fonte: www.diagnosticastrutturale.it



Prova ecometrica

La strumentazione di prova è costituita da un sistema di acquisizione composto da una centralina di acquisizione ed elaborazione del segnale, al quale viene collegato un trasduttore accelerometrico.



fonte: Aek Ingegneria



Prova ecometrica

La prova si esegue applicando l'accelerometro sulla sommità del palo, opportunamente preparata mediante scapitozzatura, e sollecitando la testa del palo mediante un colpo di martello.

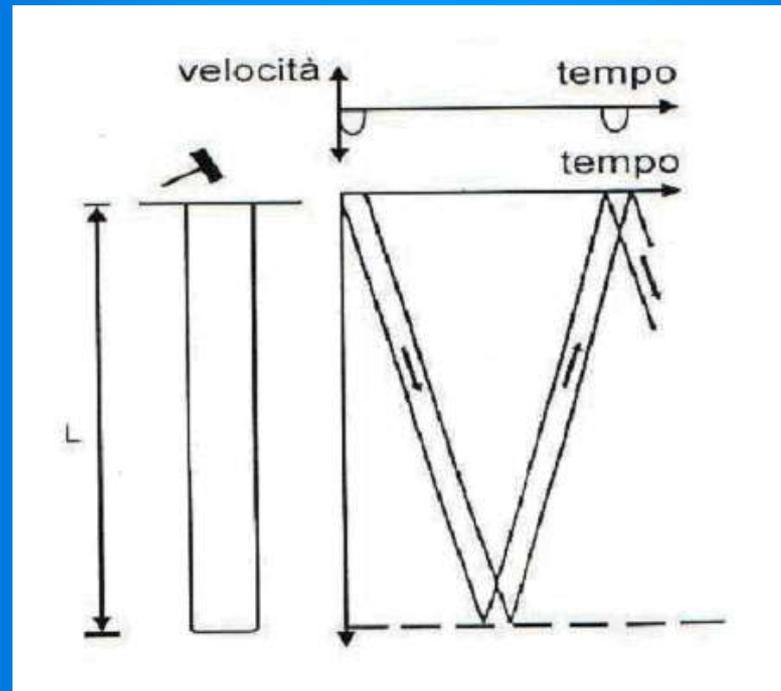


fonte: CIMENTO S.r.l.



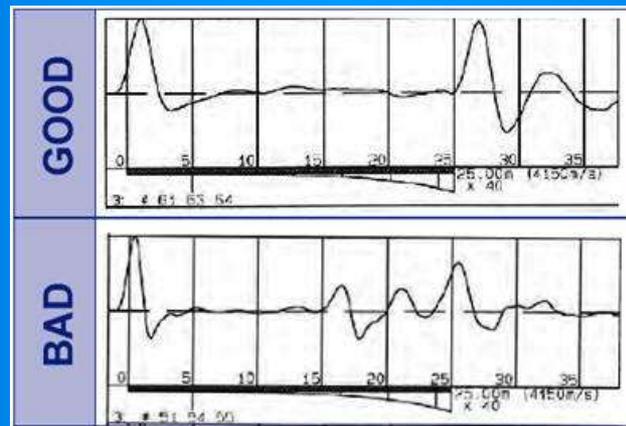
Prova ecometrica

Si genera così un'onda di compressione che percorre il palo e torna in direzione opposta riflettendosi al piede del palo.



Prova ecometrica

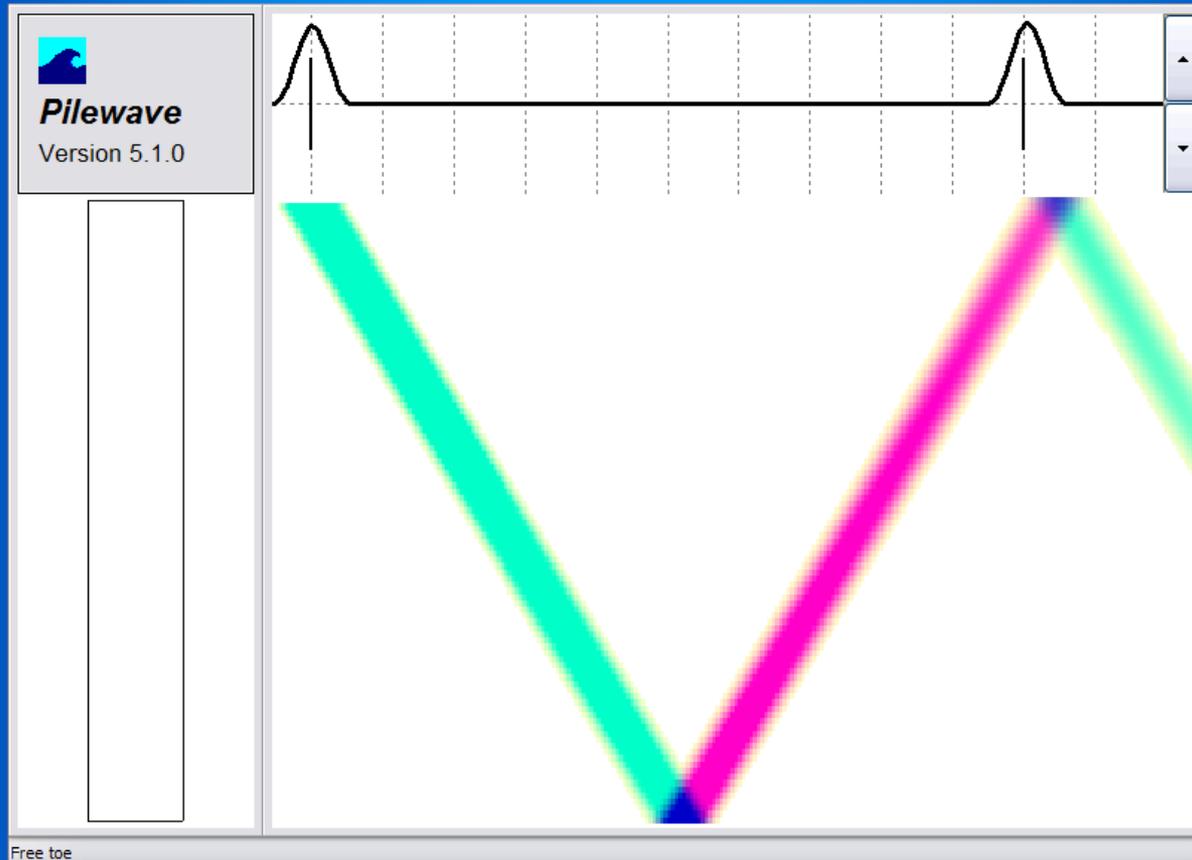
Il software registra le accelerazioni alla testa del palo e le integra rispetto al tempo, restituendo un diagramma delle velocità in funzione della profondità del palo.



In un palo integro e di sezione regolare si ottengono due sole riflessioni: la prima generata dal colpo di martello, la seconda dalla riflessione sul fondo del palo. Ogni altra riflessione indica una anomalia lungo il fusto del palo.



Prova ecometrica



fonte: www.piletest.com



Prova ecometrica

L'intervallo di tempo tra la sollecitazione impulsiva iniziale ed il ritorno allo stesso punto dell'onda riflessa è uguale al tempo richiesto dell'onda elastica a percorrere due volte (dall'alto in basso e viceversa) l'estensione del palo.

Nel caso di palo integro e di sezione omogenea, è possibile valutare la lunghezza L con l'espressione.

$$L = V * t / 2$$

V - velocità di propagazione delle onde elastiche di compressione nel calcestruzzo

t - tempo intercorso tra la battuta e la ricezione del segnale



Prova ecometrica

Altre riflessioni oltre a quella del piede del palo, sono causate da variazioni di impedenza del palo.

L'impedenza Z può essere calcolato come:

$$Z = A * \sqrt{(E / \rho)}$$

dove:

A - sezione trasversale del palo

ρ - densità

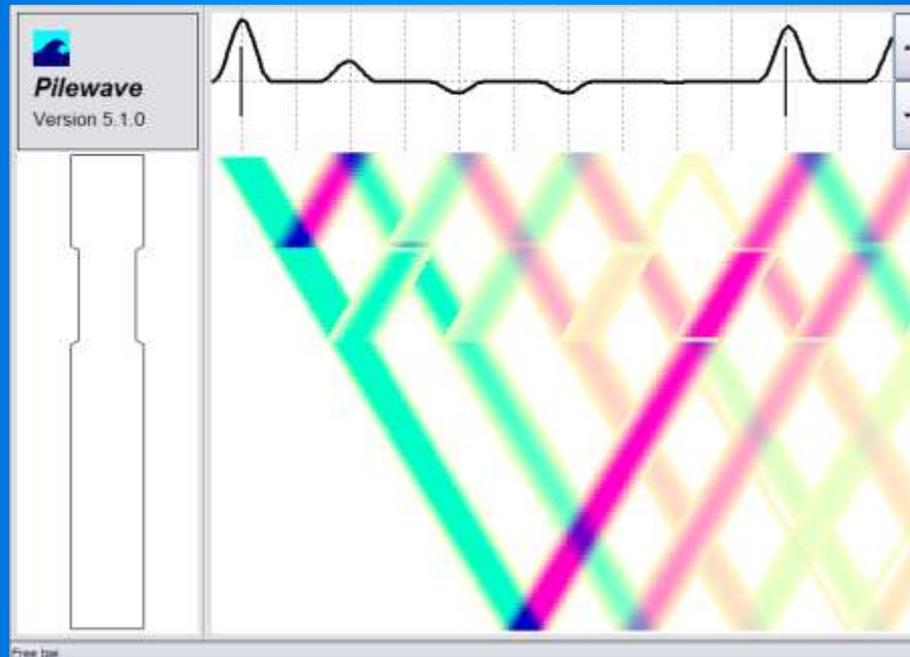
E - modulo elastico del calcestruzzo

Le riflessioni intermedie possono pertanto essere dovute a cambiamenti sia della sezione che del materiale.



Prova ecometrica

Una zona con impedenza decrescente (come ad esempio una riduzione della sezione, fessurazioni o caratteristiche del calcestruzzo più scadenti) presenta una riflessione di trazione, producendo una velocità nella stessa direzione (in fase) dell'impatto.

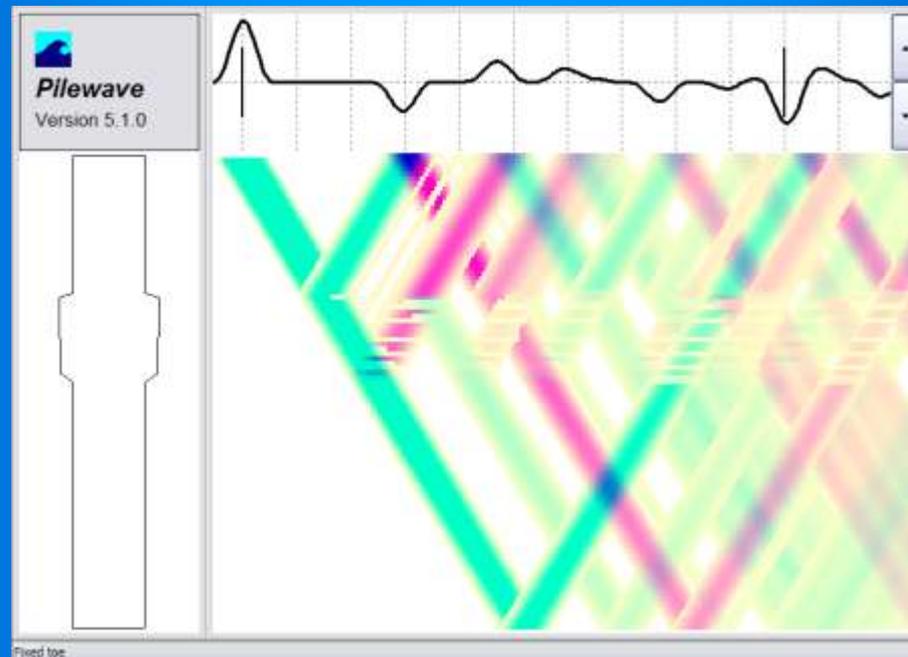


fonte: www.piletest.com



Prova ecometrica

Una zona con impedenza crescente (come ad esempio una sbulbatura) provoca un riflesso di compressione, producendo una velocità in direzione opposta l'impatto.



fonte: www.piletest.com



Prova ecometrica

Le riflessioni devono essere interpretate per determinare se i cambiamenti associati sono accettabili o di grave preoccupazione per l'integrità del palo.

Ogni interpretazione dovrebbe considerare i verbali di getto di calcestruzzo, la lunghezza di progetto ed altre osservazioni.

Altro fattore che influenza il segnale è l'attrito tra terreno e palo: questo produce un'attenuazione del segnale che va da un minimo per i terreni argillosi ad un massimo per i terreni sabbiosi.

Tale attenuazione può essere tale da far esaurire lungo il percorso l'energia dell'onda che non viene più rilevata alla testa del palo.



Prova ecometrica

Nel metodo ecosonico si registrano solo tempi di percorrenza, per passare alle profondità occorre stimare la velocità dell'onda nel calcestruzzo.

Le velocità dell'onda elastica nel calcestruzzo dei pali varia da 3.500 a 4.000 m/sec.

Errori di stima nella valutazione del tempo di transito delle onde elastiche e del modulo di elasticità del calcestruzzo possono comportare errori nella stima della lunghezza del palo e della posizione degli eventuali difetti rilevati, errore che può arrivare anche al 10%.

Tale inconveniente può essere ridotto mediante l'adeguata taratura del metodo, eseguendo misure dirette come carotaggio o cross-hole.



Prova ecometrica

Proprio per la semplicità di esecuzione ed il ridotto onere, durante l'esecuzione dei pali è opportuno che la quantità dei controlli da eseguire con l'indagine eco sonica interessi l'intera popolazione dei pali e che si preveda la possibilità di strumentare almeno il 20% dei pali per le prove cross-hole.



fonte: Aek Ingegneria



Prova ecometrica

Fattori che possono influenzare l'interpretazione dei riflessogrammi:

- effetto dell'attrito laterale: maggiore è l'attrito laterale tra palo e terreno (minimo nei terreni torbosi, medio negli argillosi e massimo nei sabbiosi) e maggiore è lo smorzamento dei segnali in quanto è maggiore la quantità di energia elastica che passa dal calcestruzzo al terreno circostante

- effetto dell'umidità del calcestruzzo: all'aumentare dell'umidità del calcestruzzo si riduce l'ampiezza del segnale



Prova ecometrica

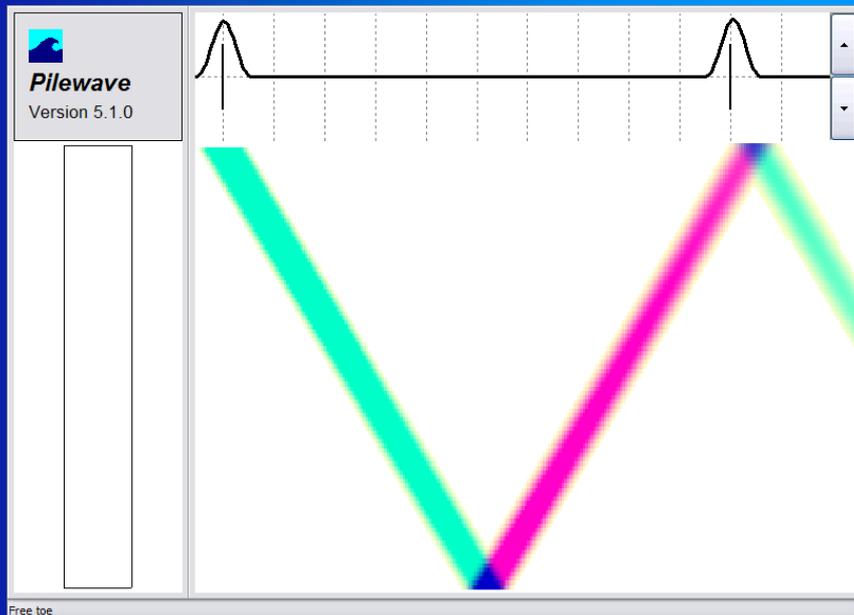
Fattori che possono influenzare l'interpretazione dei riflessogrammi:

- rapporto tra lunghezza e diametro del palo: a parità di lunghezza in un palo con diametro maggiore il riflesso alla base risulterà più marcato
- vincolo al piede del palo: in un palo libero al piede l'onda riflessa è di trazione (riflesso di segno concorde a quello della battuta), mentre in un palo incastrato al piede, l'onda riflessa è di compressione (riflesso discorde a quello della battuta)

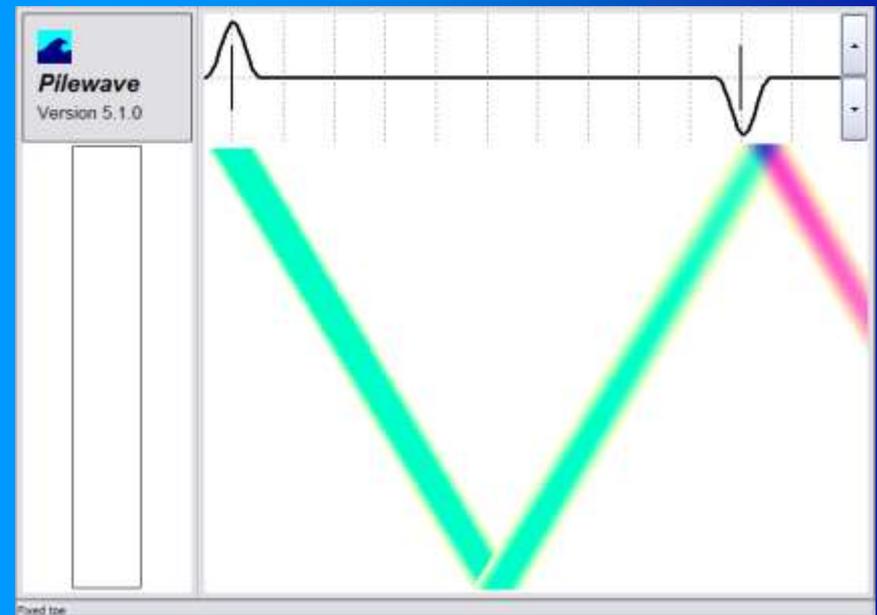


Prova ecometrica

Palo libero al piede



Palo incastrato al piede

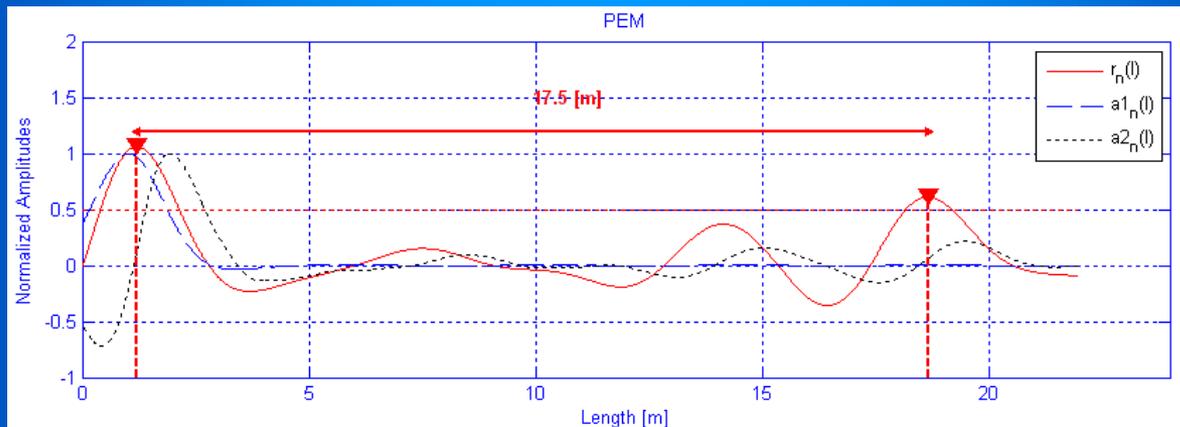
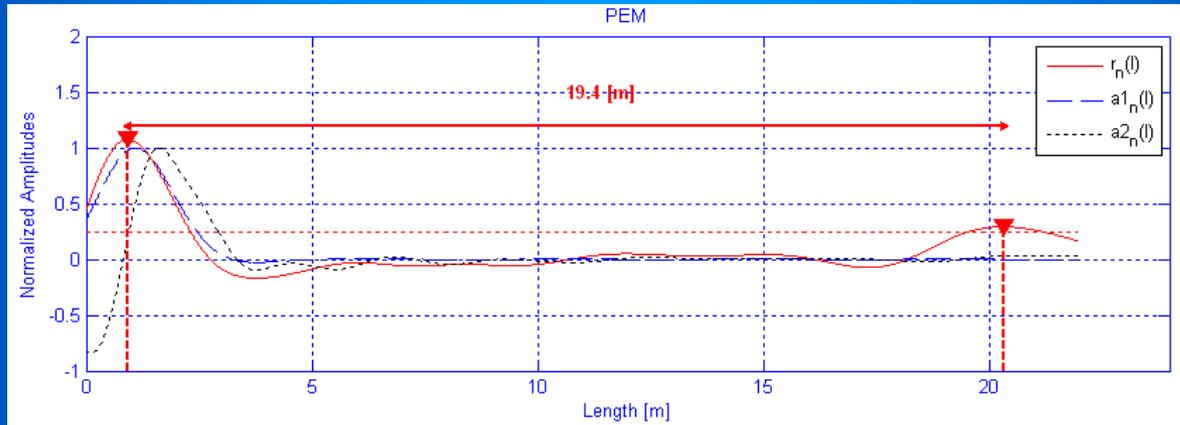


fonte: www.piletest.com



Prova ecometrica

Esempi di report



fonte: BOVIAR S.r.l.



PROVE DINAMICHE A BASSA DEFORMAZIONE NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

La prova di ammettenza meccanica, o prova vibrazionale, è una prova dinamica a basse deformazioni, per la verifica della geometria del palo e le eventuali imperfezioni costruttive.



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Anche in tal caso l'apparecchiatura è di dimensioni ridotte e molto semplice da mettere in opera; è costituita da:

- una vibrodina, da posizionare sulla testa del palo, per generare una forzante verticale sinusoidale continua di ampiezza F_0 costante e frequenza angolare ω variabile;
- un accelerometro da posizionare anch'esso sulla testa del palo per misurare le velocità
- un elaboratore, collegato sia alla vibrodina che all'accelerometro, per registrare ed elaborare i segnali.



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica



fonte: www.essebiweb.it

Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

La stessa prova può eseguirsi sostituendo la vibrodina con un martello strumentato.

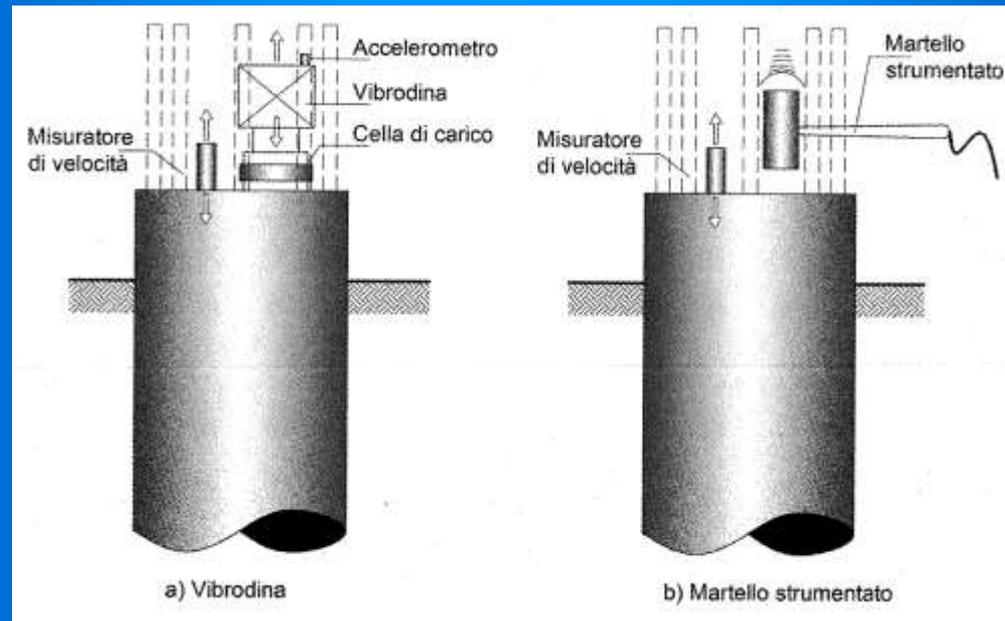


L'utilizzo del martello strumentato è raccomandato per il controllo di pali di piccolo e medio diametro, mentre per i pali di grande diametro, al fine di applicare una sufficiente energia cinetica per mettere in vibrazione il palo, è necessario utilizzare la vibrodina.



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

La prova consiste nel mettere in vibrazione (con il martello strumentato o con la vibrodina) il palo e di registrare il rapporto tra la velocità V di oscillazione, rilevata alla testa del palo e la forza F applicata, nel dominio della frequenza.



fonte: S. Lombardo – V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccvio



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Il rapporto tra la velocità V e la forza F viene definito ammettenza meccanica

Ammettenza meccanica = Velocità / Forza

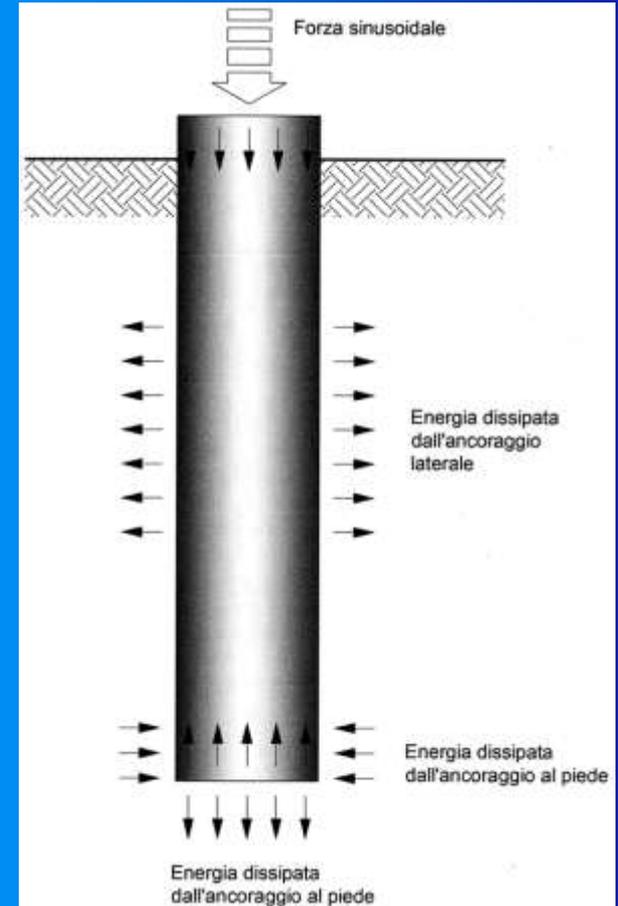
$$A = V / F$$



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Nel palo sollecitato, a regime, si instaura un sistema di onde stazionarie, involuppo tra quelle emesse e quelle riflesse (dalla fine del palo o da eventuali variazioni o difetti), che dipendono da:

- entità della forzante;
- geometria del palo (lunghezza e diametro);
- caratteristiche meccaniche del calcestruzzo (modulo di elasticità e densità);
- vincoli esterni (attrito laterale, vincolo al piede).

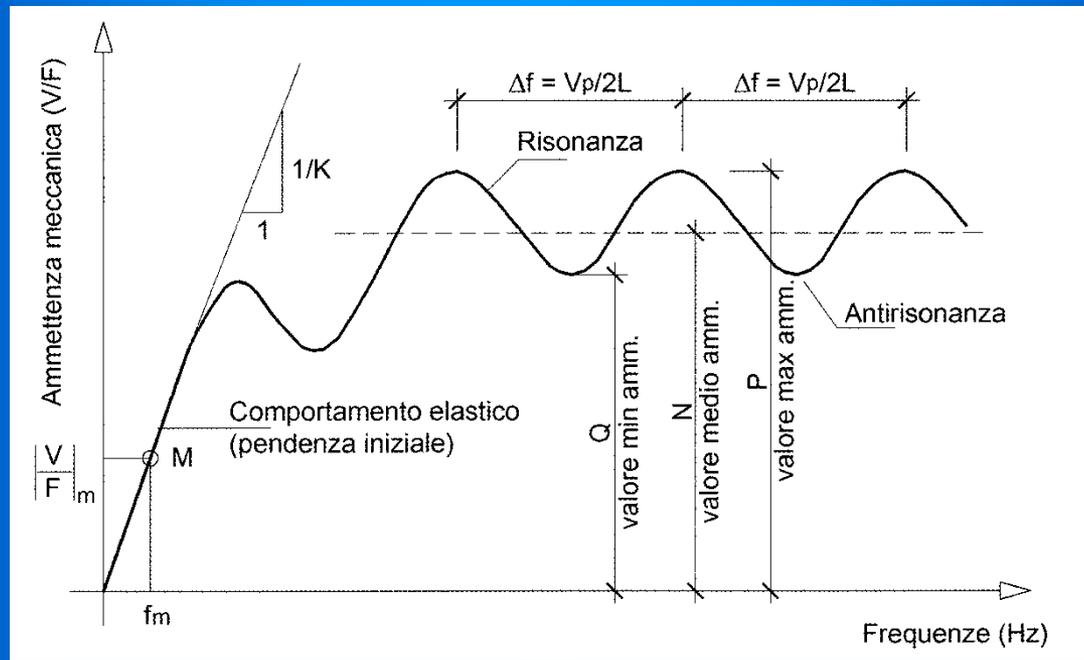


fonte: S. Lombardo – V. Venturi
"Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccio



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

L'elaboratore elettronico, a seguito della prova, fornisce un vibrogramma, ossia un diagramma nel quale in ordinata è riportata l'ammettenza meccanica ($A = V / F - m / \text{sec} * N$), ed in ascissa il campo di frequenza esplorato (Hz): in pratica un vero e proprio spettro di vibrazione del palo.

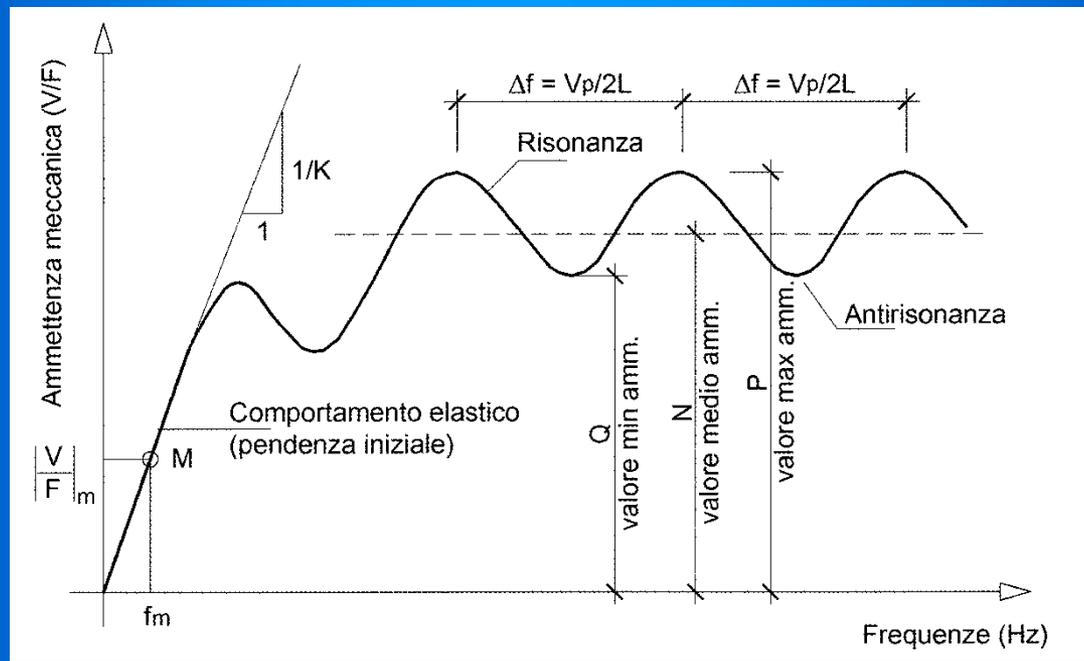


fonte: S. Lombardo - V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccivio



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Dall'interpretazione del vibrogramma, ossia della curva di ammettenza meccanica in funzione della frequenza, è possibile ottenere informazioni in merito alla geometria del palo ed all'eventuale presenza di difetti.



fonte: S. Lombardo - V. Venturi "Collaudo statico delle strutture" - Ed. Dario Flaccivio



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Stima della lunghezza del palo

Al variare della frequenza nel palo si generano successioni di risonanze i cui picchi sono indipendenti dalla frequenza ma strettamente dipendenti dalla lunghezza di vibrazione L del palo.

Tale successione di picchi è intervallata della quantità

$$\Delta f = V_p / 2L$$

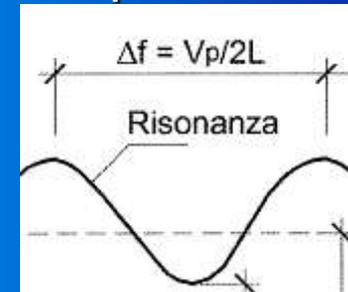
con:

Δf = distanza tra i picchi di risonanza con intervalli costanti in Hz

V_p = Velocità di propagazione delle onde elastiche nel calcestruzzo

(3.500 ÷ 4.000 m/sec)

L = Lunghezza del palo



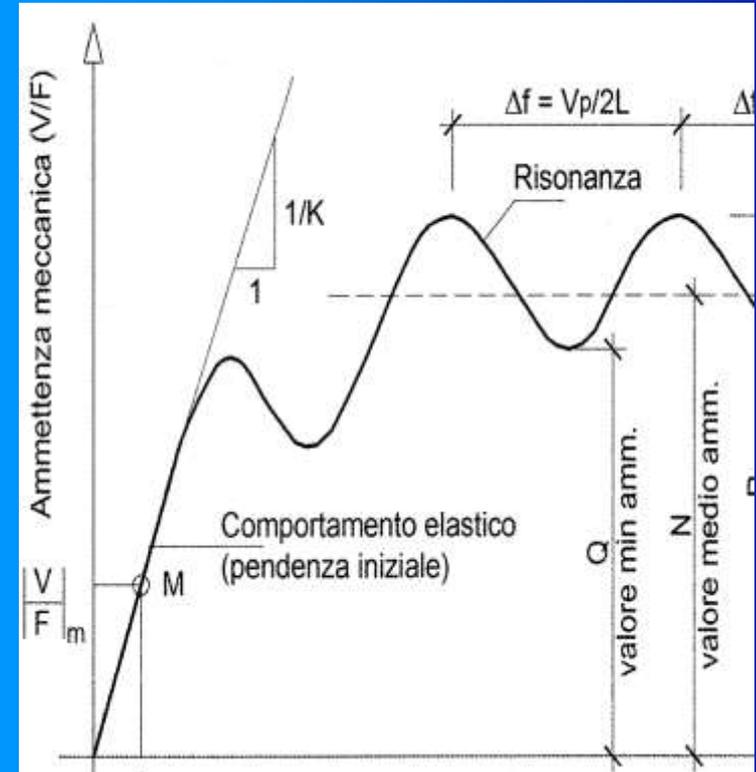
Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Stima della sezione effettiva del palo

Rilevato il **valore medio dell'ammettenza meccanica N**, o ammettenza caratteristica, nel vibrogramma, noti i valori della **densità ρ** del materiale e la **velocità di propagazione delle onde elastiche V_p** , dalla seguente formula (di Paquet)

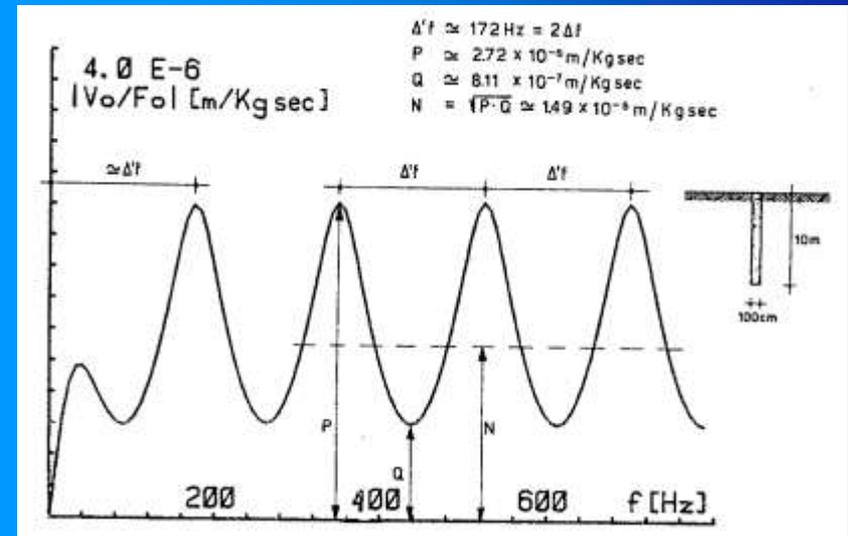
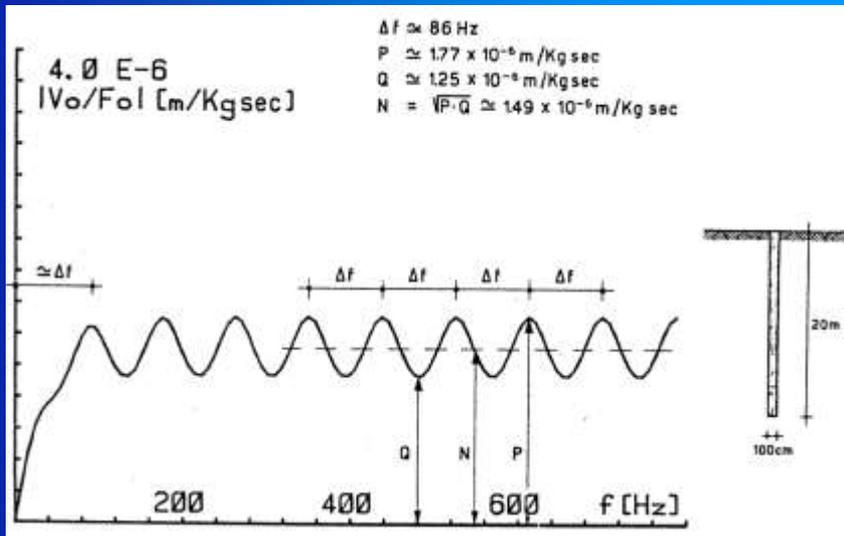
$$N = 1 / (\rho * V_p * S)$$

con **S = sezione media del palo** è possibile stimare la sezione effettiva del palo di prova.



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

L'interpretazione dei vibrogrammi, soprattutto per il rilievo di difetti nel palo, è alquanto complessa e si basa fondamentalmente nel confronto tra **vibrogrammi sperimentali** (rilevati in situ) e **vibrogrammi teorici**, costruiti matematicamente fissate a priori particolari condizioni e deviazioni dal palo perfetto e delle condizioni al contorno.

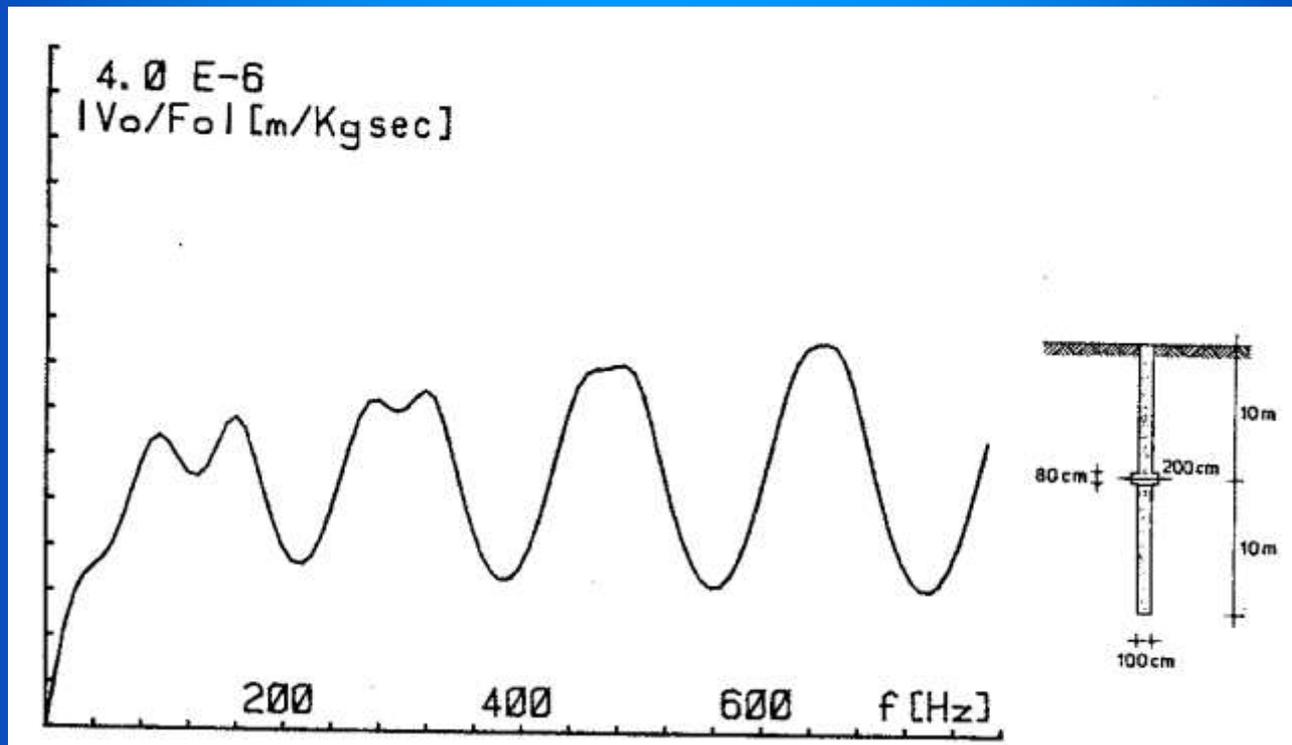


fonte: Cosenza E. Greco C. "Sulle prove di ammettenza meccanica nel controllo dei pali di fondazione" – R.I.G. 2/86



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

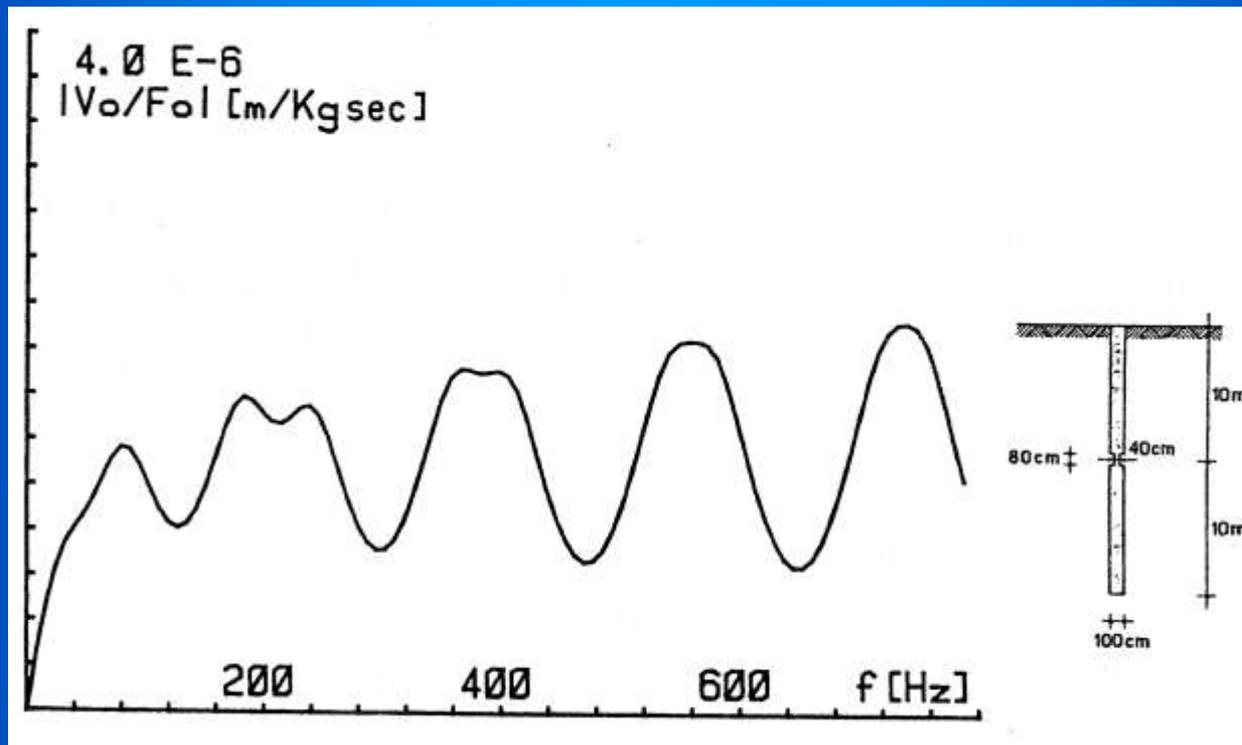
Grafico teorico dell'ammettenza meccanica di un palo di 20 m con sbulbatura a 10 m



fonte: Cosenza E. Greco C. "Sulle prove di ammettenza meccanica nel controllo dei pali di fondazione" – R.I.G. 2/86

Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Grafico teorico dell'ammettenza meccanica di un palo di 20 m con strozzatura a 10 m

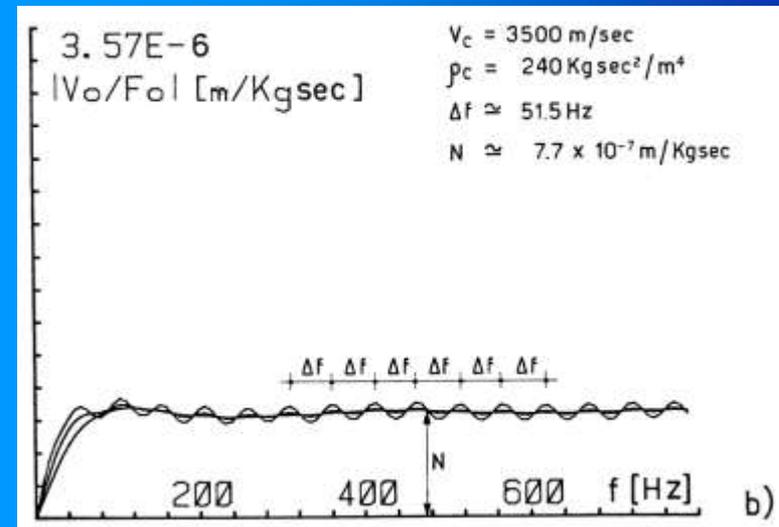
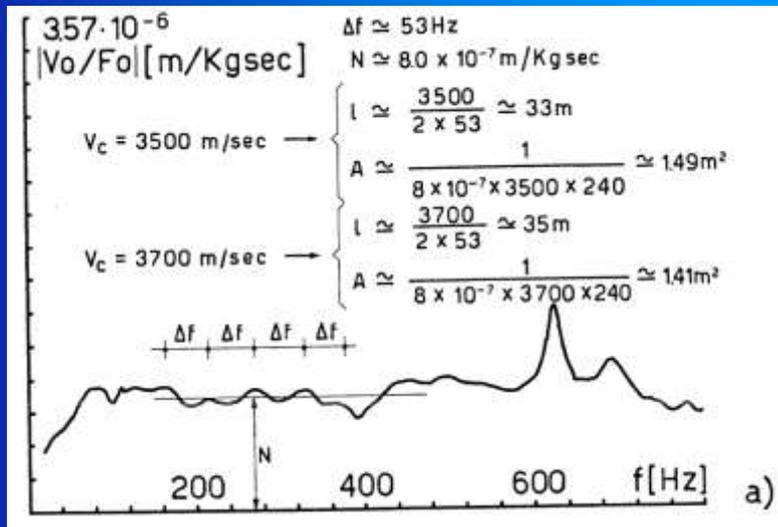


fonte: Cosenza E. Greco C. "Sulle prove di ammettenza meccanica nel controllo dei pali di fondazione" – R.I.G. 2/86



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Confronto tra risultato sperimentale a) e la simulazione teorica del palo perfetto b)

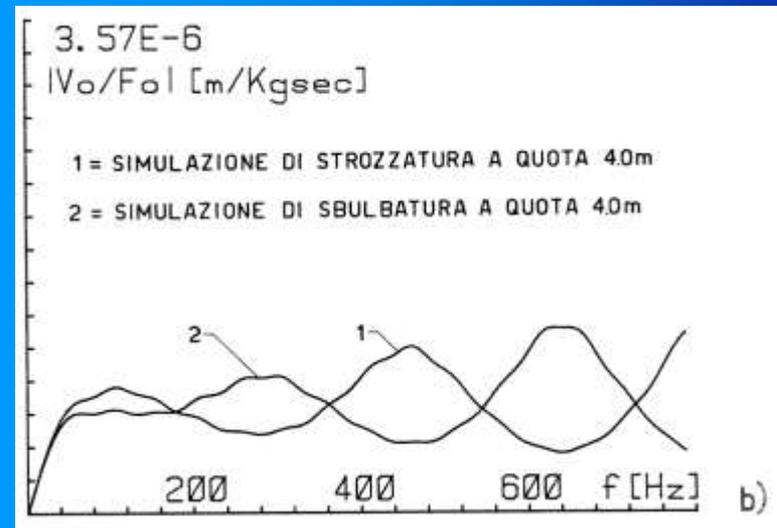
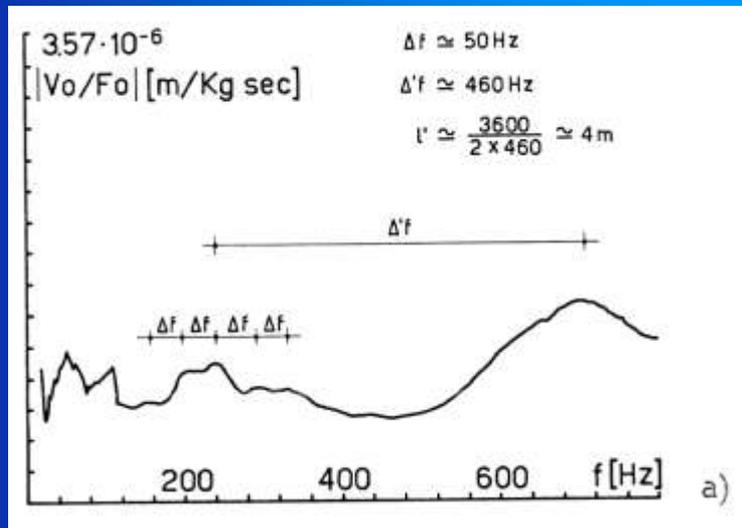


fonte: Cosenza E. Greco C. "Sulle prove di ammettenza meccanica nel controllo dei pali di fondazione" – R.I.G. 2/86



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Confronto tra risultato sperimentale a) e le simulazioni teoriche del palo perfetto b) del palo rispettivamente con sbulbatura e strozzatura a 4 metri

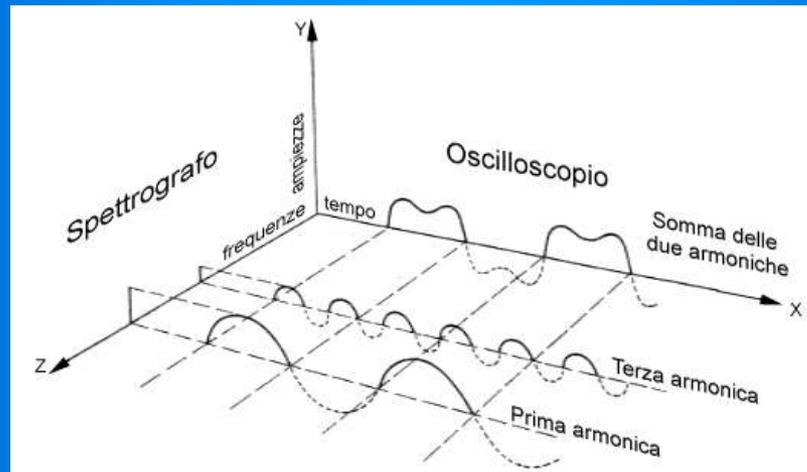


fonte: Cosenza E. Greco C. "Sulle prove di ammettenza meccanica nel controllo dei pali di fondazione" – R.I.G. 2/86



Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Infine, mentre con l'utilizzo della vibrodina la curva di ammettenza meccanica si ottiene direttamente, con l'utilizzo del martello strumentato l'analisi della risposta ottenuta viene convertita nel dominio delle frequenze mediante l'impiego delle procedure basate sulle trasformate di Fourier.



fonte: www.dizionarioinformatico.com



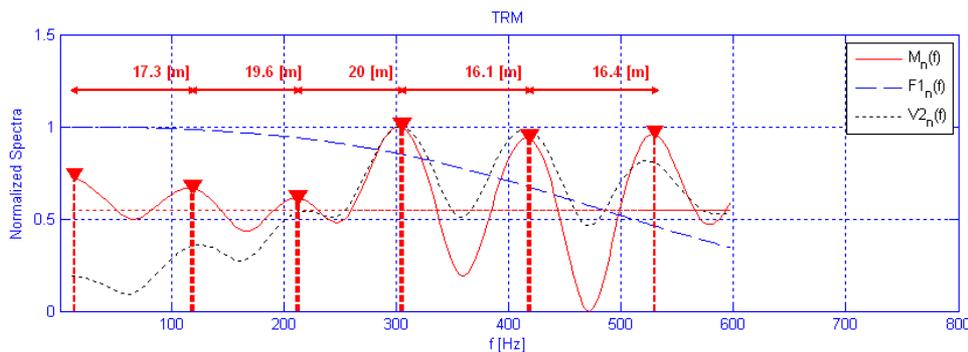
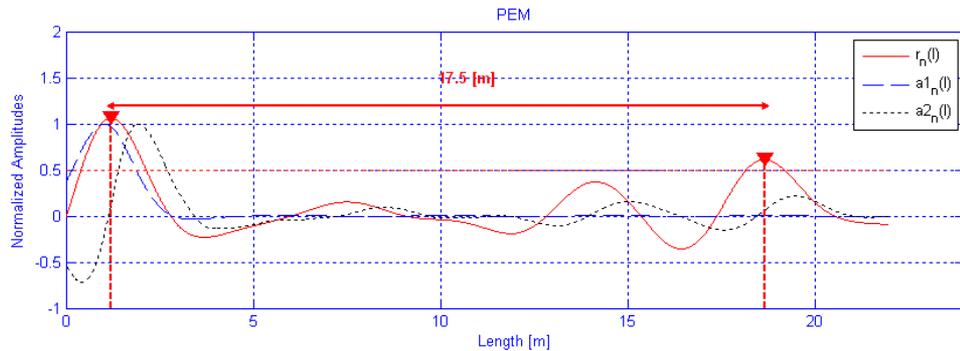
Prova vibrazionale o di ammettenza meccanica

Esempio di report combinato prove ecometrica – ammettenza meccanica



Report 1/2

TREVI	20/05/2010 10.51
Porto Turistico Sira	C1A_8
C1A_8_1.pil	Note:



Assumed concrete properties:

$v = 3600$ [m/s]
$\rho = 2300$ [kg/m ³]

Assumed hammer properties:

$m = 0.32$ [kg]

Filtering properties:

$f1_BP = 1$ [Hz]
$f2_BP = 600$ [Hz]

Assumed geometrical properties:

$l = 22$ [m]
$r_n = 0.46$ [m]

Observed signals properties:

$B -8dB = 510$ [Hz]
$F_p = 810.8$ [N]

Estimated geometrical properties:

$l_PEM = 17.5$ [m]
$l_TRM = 17.9$ [m]

Processed by Pile Processing Software V.1.13

fonte: BOVIAR S.r.l.

Controllo integrità delle fondazioni profonde



Bibliografia

D.M. 14 gennaio 2008 – **Norme tecniche per le costruzioni**

A. Zizzi, S. Mineo, S. Bufarini, V.D'Aria – **Controlli e verifiche delle strutture di calcestruzzo armato in fase di esecuzione** – EPC Editore

S. Lombardo, V. Venturi – **Collaudo statico delle strutture** – Dario Flaccovio Editore

Per la documentazione fotografica si ringraziano:

- la **CIMENTO S.r.l. – Laboratorio di diagnostica strutturale**
- la **BOVIAR S.r.l.**

