

VINCENZO VENTURI

I controlli non distruttivi sulle opere di fondazione

Estratto da «TECNICA E RICOSTRUZIONE» - N. 1/1996
Organo ufficiale dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Catania

Tip. « Grafica del Libro » s.n.c. - Catania 1996

I controlli non distruttivi sulle opere di fondazione

VINCENZO VENTURI (*)

PREMESSA

Il controllo dell'esecuzione e del comportamento delle fondazioni profonde nasce dalla necessità di un più efficiente impiego dei pali di fondazione, utilizzati sempre più frequentemente sia come strutture portanti l'intero carico esterno che come elementi limitatori dei cedimenti, assoluti e differenziali.

Il largo impiego delle fondazioni profonde, conseguente anche alle migliori tecnologie di esecuzione, ha determinato il bisogno di migliorare, in senso qualitativo e quantitativo, la capacità di accertare l'integrità strutturale dei pali e verificare il loro comportamento nelle condizioni di stato limite, ultimo e di servizio.

Oltre alle tradizionali prove di carico di tipo statico si è diffuso anche in Italia negli ultimi 10-15 anni, a seguito di esperienze sviluppate in Europa e Stati Uniti, l'impiego di metodi dinamici per il controllo non distruttivo delle fondazioni profonde.

Questi ultimi uniscono al pregio della velocità di esecuzione quello della relativa economicità, consentendo quindi di realizzare controlli estesi all'intera popolazione di pali.

Un ulteriore pregio, che si può ascrivere a tali metodi, deriva dalla possibilità di controllo in corso d'opera delle varie fasi di esecuzione dei pali, che consente, durante i lavori, di individuare e quindi correggere possibili difetti o errori sistematici della produzione.

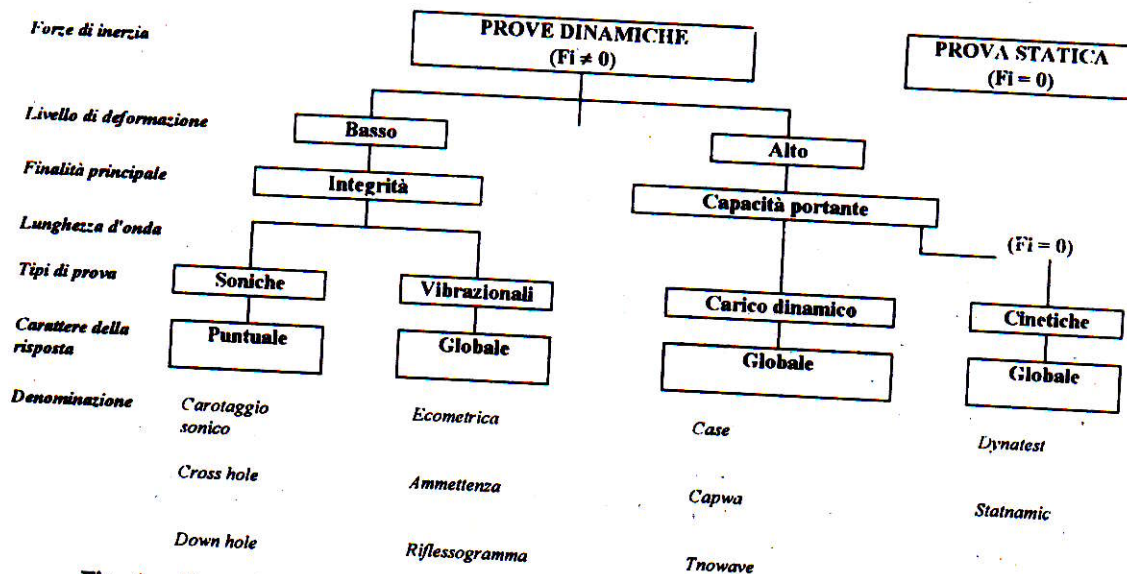


Fig. 1 - Controlli non distruttivi per fondazioni profonde (A.G.I. 27 giugno 1993)

(*) Ingegnere iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Catania. Amministratore unico e Direttore di Laboratorio dei laboratori di ricerca e sperimentazione SIDERCEM di Caltanissetta e Catania.

L'accertamento della integrità strutturale dei pali come la valutazione della loro capacità portante può essere ottenuta a seguito di controlli sperimentali.

Semplificando, i sistemi di controllo consistono generalmente nel perturbare il palo o il sistema « palo-terreno » con una sollecitazione esterna e nel misurare una o più grandezze che risultino variate a seguito della perturbazione.

Nelle tradizionali prove di carico « statico » la sollecitazione esterna è in genere una forza applicata assialmente o trasversalmente sulla testa del palo e la grandezza misurata è lo spostamento assiale o trasversale della testa del palo stesso.

Nelle prove cosiddette « dinamiche » una porzione di palo è sottoposta a sollecitazioni impulsive o periodiche e le grandezze misurate, in uno o più punti, sono in genere forze, accelerazioni, velocità ed, eventualmente, spostamenti.

La differenza fondamentale tra i controlli di tipo « statico » e quelli di tipo « dinamico » è che in quest'ultimo caso sono presenti anche le forze di inerzia.

L'accertamento dell'integrità strutturale dei pali così come la valutazione della loro capacità portante può essere ottenuta a seguito di controlli sperimentali.

Controlli di tipo statico

I controlli di tipo « statico » sono costituiti dalle tradizionali prove di carico (figg. 2a - 2b).

Queste forniscono curve carichi-cedimenti dalle quali è possibile ottenere direttamente il carico limite ultimo (*prove di progetto*) o desumerlo per estrapolazione (*prove di collaudo*) e, in ogni caso, di rilevare il comportamento del complesso « palo-terreno » in condizioni di esercizio. Se le prove sono effettuate su pali opportunamente strumentati è anche possibile conoscere le modalità di trasferimento dei carichi esterni lungo il fusto e alla punta. Le prove di carico « statico » forniscono anche indicazioni, ancorché indirette, sulla integrità dei pali.

Per le modalità con cui i pali sono sollecitati, simili a quelle connesse con la costru-

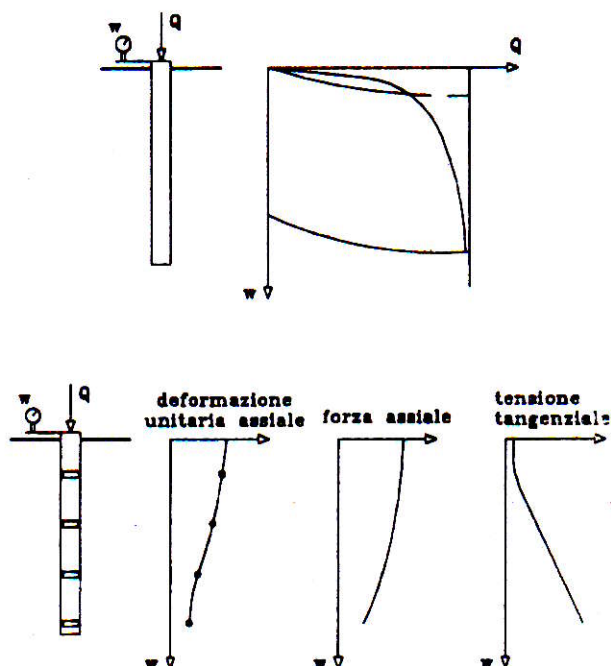


Fig. 2a e 2b - Prova di carico statico

zione e l'esercizio delle strutture in elevazione, e per la qualità e quantità di informazioni che è possibile desumere, le prove di carico « statico » sono da considerarsi attualmente non sostituibili con altri diversi tipi di valutazione sperimentale della capacità portante e del comportamento in condizioni di esercizio.

Gli inconvenienti delle prove di carico statico sono ben noti ed essenzialmente legati ai lunghi tempi di esecuzione ed ai costi elevati. Anche per questo motivo le diverse normative (D.M. 11 marzo 1988) prevedono un numero percentualmente molto esiguo, 2 ogni 100, di pali da sottoporre obbligatoriamente a prove di carico (di collaudo).

Controlli di tipo dinamico - Generalità

È noto che se si origina in un certo istante una perturbazione in un punto P di un mezzo, tale perturbazione si propaga con una velocità V , che in prima approssimazione può essere data da:

$$V = \sqrt{M/\rho} \quad (1)$$

dove M è il modulo relativo alla deformazione generata e ρ è la densità.

È noto anche che se il mezzo è omogeneo, elastico ed isotropo si possono generare due onde diverse: l'onda longitudinale (o P) e l'onda trasversale o di taglio (o S) le cui velocità sono date da

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (3)$$

in cui λ è la prima costante di Lamé, G il modulo di taglio e ν il coefficiente di Poisson. Si fa notare che il termine $(\lambda + 2G)$ è il modulo di compressione uniassiale per deformazioni laterali impediti, che è il tipo di deformazione dovuta alle onde P in un mezzo indefinito e che G è il modulo di deformazione al taglio, che è il tipo di deformazione per le onde di taglio, o S .

Se il mezzo è limitato lateralmente, diverse possono essere le velocità di propagazione. Ad esempio nel caso di un cilindro (il palo) se la lunghezza d'onda I è maggiore del diametro d del cilindro cioè

$$I = \frac{V}{f} > d \quad \text{allora} \quad C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

perchè E è il modulo di elasticità proprio della deformazione uniassiale a deformazioni laterali libere.

In questo caso quindi la velocità è inferiore a quella propria del mezzo considerato illimitato: p.e. per un coefficiente di Poisson di 0,25 la riduzione di velocità è di circa il 9%. Se il palo è vincolato dal terreno circostante la velocità sarà intermedia tra V_p e C .

La velocità in un calcestruzzo è funzione di vari parametri tra cui i principali sono:

- tipo e quantità di legante;
- caratteristiche elastiche dell'inerte;
- porosità;
- saturazione in acqua.

È ovvio che la velocità aumenta quando il legame è nel giusto quantitativo, quanto maggiore è la rigidità dell'inerte, quanto minore è la porosità e quanto maggiore è la saturazione in acqua.

Le velocità in un calcestruzzo di media ed ottima qualità, sono comprese grosso modo rispettivamente tra 3.500 e 4.500 m/s. Si ricorda che tali velocità sono nettamente maggiori delle velocità proprie dei terreni sciolti nei quali di regola i pali sono infissi o trivelati. Per dare alcuni ordini di grandezza per le velocità delle onde P , si ricorda che una argilla ha la velocità tra 1.500 e 2.000 m/s, una sabbia o ghiaia sciolta, in falda tra 1.700 e 2.500 m/s, e fuori falda tra 500 e 1.000 m/s.

Metodo cross-hole

Uno dei metodi di controllo dell'integrità dei pali è il metodo *cross-hole*, che richiede la sistemazione di tubazioni nei pali prima del getto. Generando in un tubo una perturbazione ad alta frequenza (20-50 kHz) e registrando la perturbazione stessa dell'altro foro alla stessa quota (fig. 3) si determina il tempo di percorrenza tra emittente e ricevitore e, nota la distanza tra i fori, si ricava la velocità.

Le misure vengono eseguite con continuità spostando contemporaneamente le due sonde, si ottiene quindi un diagramma velocità-profondità.

Se tra emettitore e ricevitore il calcestruzzo del palo è di cattiva qualità o se il palo stesso è interrotto si registrerà una velocità più bassa di quella propria del palo.

Consideriamo ora il caso di incidenza di un'onda su di una superficie di discontinuità fra due mezzi caratterizzati da diversi valori di densità e velocità.

L'onda che incide sulla discontinuità genera di regola un'onda riflessa che si propaga all'indietro nel primo mezzo ed un'onda rifratta che passa nel secondo mezzo.

Per incidenza normale alla superficie i rapporti tra l'ampiezza dell'onda riflessa A_r e rifratta A_i rispetto all'ampiezza dell'onda incidente A_i , sono dati da:

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (4) \quad \frac{A_t}{A_i} = \frac{2 \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \quad (5)$$

Il prodotto ρV (densità · velocità) prende il nome di *impedenza acustica*. Se si passa da un mezzo con impedenza acustica maggiore ad uno con impedenza acustica minore (p.e.: dal

palo al terreno), l'onda riflessa cambia verso, il rapporto delle ampiezze A_r/A_i è negativo, mentre l'onda rifratta si amplifica. Così se parte verso il basso un'onda di compressione ritorna verso l'alto un'onda riflessa di trazione (moto della particella ancora verso il basso, discorde con il verso della propagazione).

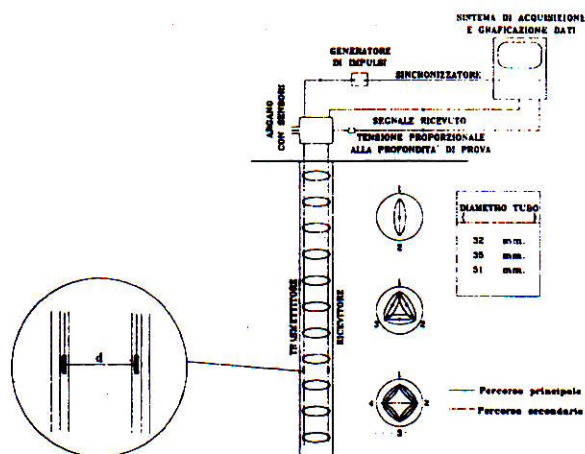


Fig. 3 - Metodo cross-hole

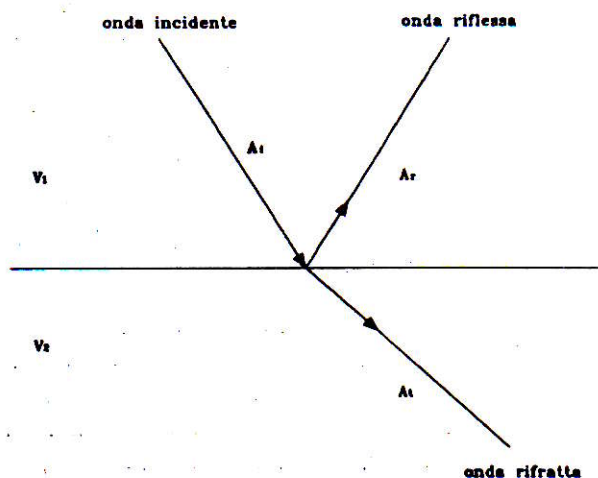


Fig. 4 - Onda incidente, riflessa, rifratta

Carotaggio sonico

Nel caso di trasmissione da un mezzo con velocità minore ad un mezzo a velocità maggiore, oltre alle onde riflesse e rifratte, dall'onda rifratta nel secondo mezzo viene generata una nuova onda, la cosiddetta onda co-

nica o birifratta, che si propaga nel primo mezzo con velocità apparente, parallelamente alla discontinuità, pari alla velocità V_2 del secondo mezzo.

Tale onda, che sta alla base del metodo ha bisogno di un tubo posto nel palo prima del getto. Questa volta l'emettitore ed il ricevitore sono nello stesso tubo ad una distanza di 0,5 — 1 m. l'uno dall'altro. L'onda attraverso l'acqua e il rivestimento si propaga per rifrazione del palo lungo il foro e genera l'onda conica nel foro che viene registrata dal ricevitore. Spostando l'apparato nel tubo si misura quindi la velocità delle onde sismiche del calcestruzzo all'intorno della tubazione lungo tutta la sua lunghezza. Se vi è una fascia con caratteristiche elastiche scadenti, questa viene individuata da una diminuzione di velocità. È ovvio che la misura non risente di difetti lontani dalla tubazione e che una singola frattura sottile può non determinare un sensibile abbassamento di velocità.

Per quest'ultimo problema si può utilizzare un altro tipo di onde, le onde superficiali. Tali onde vengono generate quando un'onda incide su una superficie di discontinuità, si propagano lungo la superficie con un'ampiezza che diminuisce esponenzialmente allontanandosi dalla superficie stessa. Sono dello stesso tipo delle onde del mare il cui moto si attenua rapidamente all'aumentare della profondità.

L'onda generata dalla sorgente dell'apparato del carotaggio sonico genera un'onda superficiale che si propaga lungo il foro con velocità di poco minore dell'onda trasversale. Quest'onda, chiamata onda di Stonely, è molto sensibile alle fratture e viene riflessa da queste.

Quando l'apparato si avvicina alla frattura, diminuisce linearmente il tempo di percorrenza dalla sorgente alla frattura e, dopo riflessione, dalla frattura al ricevitore. Oltrepassata la frattura, i tempi si allungano anche in questo caso linearmente con la profondità. Quando le registrazioni del carotaggio sonico sono spesso riportate in sismosezioni con in ascisse il tempo ed in ordinate le profondità, tali onde superficiali riflesse presentano un andamento lineare a V con il vertice in corrispondenza della frattura, che viene così individuata.

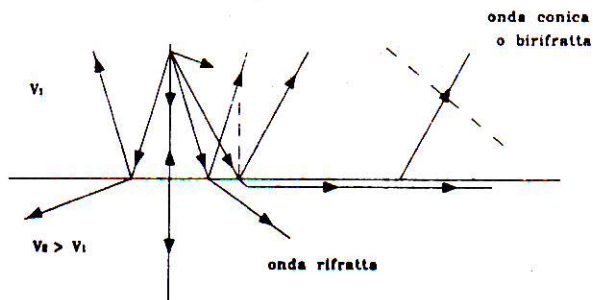


Fig. 5 - Onda rifratta, conica o birifratta

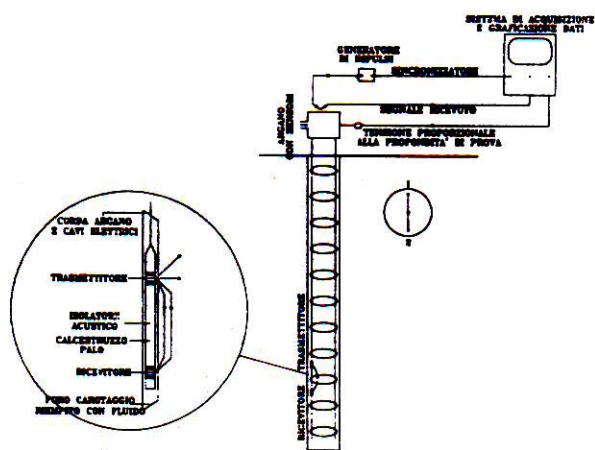


Fig. 6 - Carotaggio sonico

Impatto o metodo a riflessione o a eco

Il terzo metodo che viene utilizzato è il *metodo a riflessione o a eco* che non richiede la sistemazione di alcun apparato preventivo nel palo. Si origina una perturbazione sulla testa del palo, *p.e.* con una martellata, l'onda si propaga nel palo, viene riflessa dalle discontinuità ed è registrata da un ricevitore posto anch'esso sulla testa del palo. Se non vi sono discontinuità nel palo, l'unica onda che viene riflessa è quella dal fondo palo. Fissando la velocità C del palo, la lunghezza del palo viene ricavata dalla semplice relazione:

$$L = \frac{C \cdot t}{2} \quad (5)$$

in cui t è il tempo di andata e ritorno dell'onda.

Se vi sono interruzioni o brusche variazioni di sezione del palo, si possono generare onde riflesse o rifratte da tali discontinuità per cui si hanno echi che giungono al ricevitore prima dell'eco dovuto al fondo palo.

Occorre ora fare alcune considerazioni di tipo energetico. Quando si origina una perturbazione ad esempio con una martellata data in un punto della testa del palo, nasce un'onda sferica che incide sulle pareti del palo generando una serie di riflessioni che rimbalzano tra le pareti del palo. La parte di energia che si propaga verso il basso, per la presenza delle riflessioni sulla parete del palo diviene praticamente un'onda piana. Il palo in questo caso può considerarsi come una guida d'onda imperfetta che irradia energia nel mezzo circostante.

Tale energia irradiata è tanto maggiore quanto minore è la differenza di impedenza acustica tra palo e mezzo circostante. Ovviamente, se il mezzo avesse le stesse caratteristiche del palo, non ci sarebbe più un'onda piana che si propaga nel palo, ma un'onda sferica che si propaga in tutto il mezzo tridimensionale « terreno + palo ».

Oltre alla perdita di energia dovuta al mezzo circostante, occorre considerare anche l'assorbimento dovuto al fatto che il palo è costituito da materiale non perfettamente elastico.

L'onda pertanto si attenua all'aumentare del percorso e quindi, per l'onda riflessa, allo aumentare della lunghezza del palo. In tale attenuazione entra in gioco anche il diametro del palo da cui dipende il rapporto tra energia irradiata all'esterno ed energia che si propaga nel palo. Al di sotto di certi rapporti tra il diametro e la lunghezza, l'onda riflessa non è più distinguibile dal rumore di fondo.

Consideriamo ora la presenza di uno strato a più bassa impedenza acustica (*interruzione del palo*) intercalato in un mezzo a maggiore impedenza, *il palo*. L'onda incidente viene riflessa dalla prima discontinuità, passa nello strato con un'amplificazione di ampiezza e viene nuovamente riflessa dalla seconda discontinuità. Le due onde riflesse possono interferire tra loro ed attenuarsi o esaltarsi, mentre l'onda trasmessa continua il suo percorso verso il basso. L'onda viene quindi riflessa dal fondo palo, torna verso l'alto, incide nuovamente sulle due superfici di discontinuità con generazione di nuove onde riflesse che tornano verso il basso e arriva infine alla testa del palo ove viene registrata.

Se il salto di impedenza acustica è notevole, alle riflessi generate sulla discontinuità sia in andata che in ritorno, va la maggior parte dell'energia inviata e pertanto la riflessa dal fondo può spesso risultare troppo attenuata per essere individuabile nella registrazione.

Un effetto analogo di attenuazione si ha nel caso di restringimento del palo che generalmente produce riflessioni o diffrazioni. Tale restringimento limita il flusso di energia sia in andata che in ritorno e pertanto può determi-

nare un livello troppo basso di ampiezza per il riflesso di base.

Tale fenomeno non si verifica in modo altrettanto netto per un allargamento della sezione del palo che se avviene con variazioni brusche, può anch'esso generare riflessioni o diffrazioni. In questo caso l'allargamento non diminuisce in modo notevole il flusso di energia verso il basso e quindi l'eco del fondo palo non subisce attenuazioni.

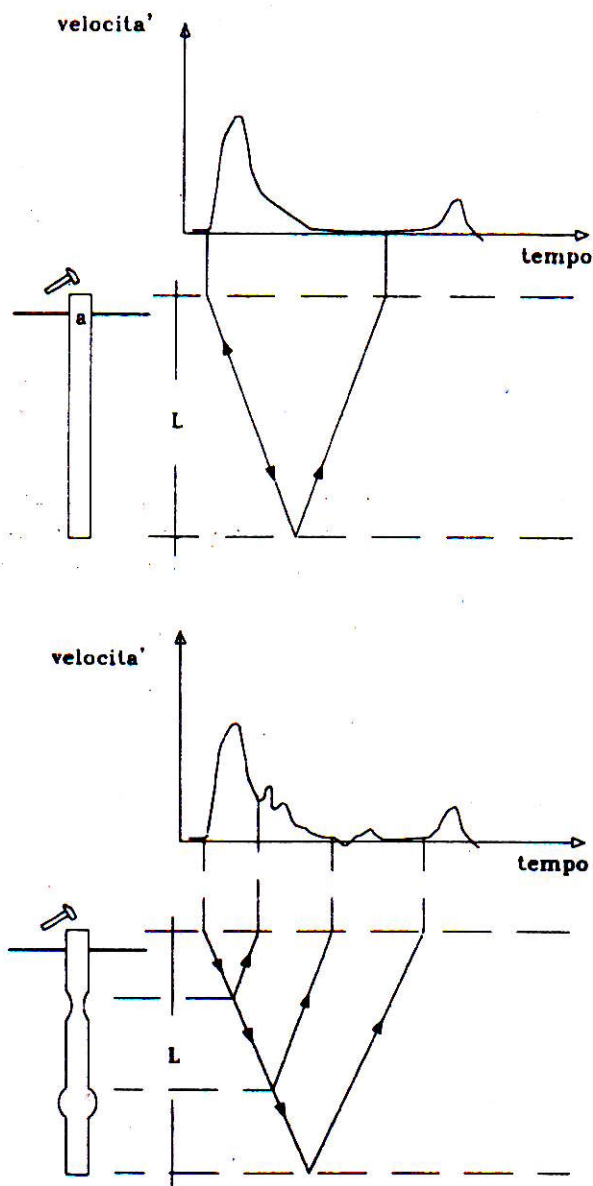


Fig. 7-8 - Trasmissione di onde di compressione lungo un palo sottoposto ad una sollecitazione impulsiva in testa.

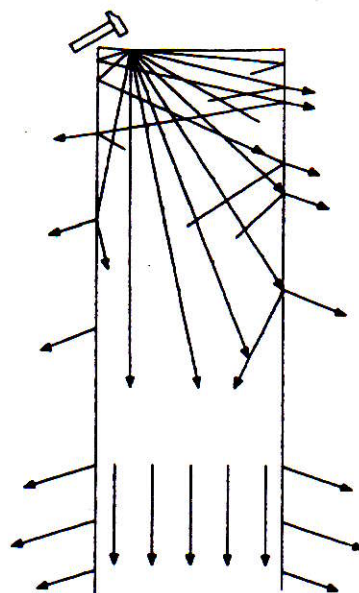


Fig. 9

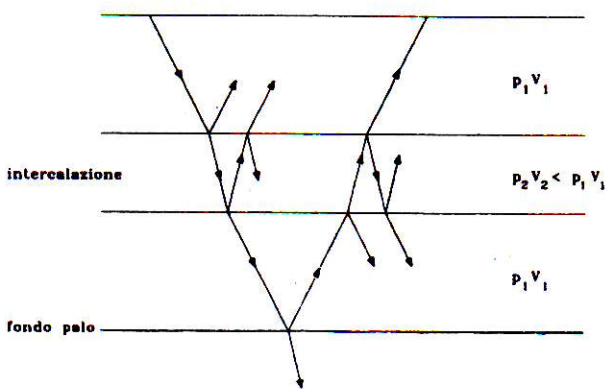


Fig. 10

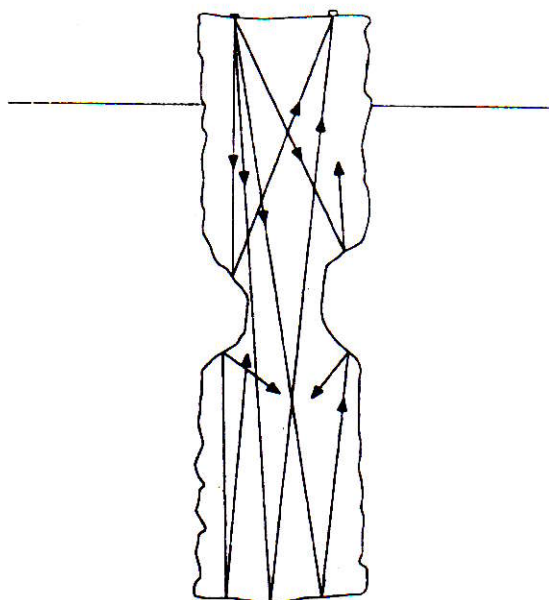


Fig. 11

Nel metodo ad eco si registrano solo tempi di percorrenza, per passare alle profondità occorre stimare la velocità dell'onda nel palo. *Un errore nella velocità si ripercuote con la stessa percentuale sulla valutazione del palo o sulla profondità delle discontinuità.*

Per concludere, in relazione alla quantità di controlli da eseguire si può pensare di strumentare un campione variabile fra il $20 \div 30\%$

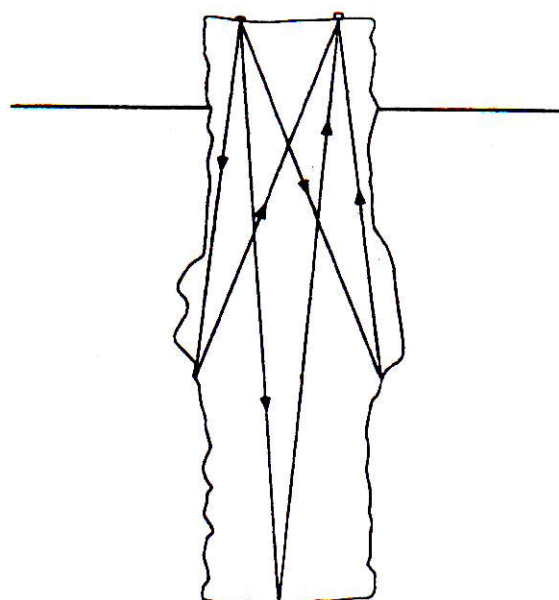


Fig. 12

dell'intera produzione di pali per le prove cross-hole e di estendere in maniera sistematica, all'intera produzione dei pali, considerando la semplicità della prova, la prova ad impatto (*metodo a riflessione*).

E consigliabile individuare preliminarmente le specifiche operative e le quantità, così da avere costantemente, durante la produzione dei pali gli opportuni indicatori di controllo.