

4. Rilevazione delle caratteristiche meccaniche di un palo - Cross Hole

4.1 Premessa

Il Cross-Hole è un metodo di analisi che, mediante l'utilizzo degli ultrasuoni, permette di effettuare su pali o diaframmi, una stima della resistenza del calcestruzzo e una individuazione di eventuali difetti lungo il fusto.

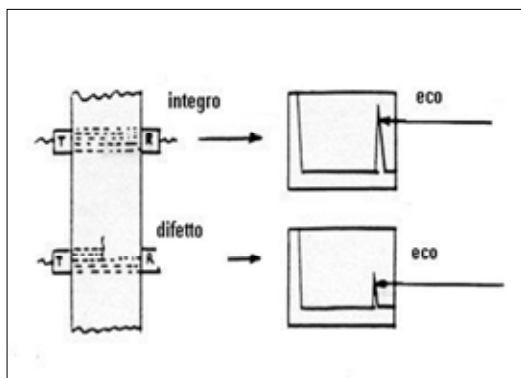
La sua applicazione è riportata nel D.M. del 2008 dove, al punto 6.4.3.6. Controlli di integrità dei pali, viene evidenziata l'obbligatorietà di eseguire il controllo di integrità con metodi diretti o indiretti di comprovata validità su almeno il 5% dei pali con il minimo di due.

La prova Cross-Hole è descritta nelle UNI EN 12504 - 4:2005, per le indagini su elementi strutturali quali pilastri, travi setti etc.. La prova è eseguita per mezzo di particolari sonde che sono inserite all'interno di tubi posti nelle strutture fondali anche fino a sezioni molto profonde.

Si riporta innanzitutto l'applicazione della tecnologia ultrasonica per strutture in evidenza dove le sonde sono tenute in mano da un operatore. Nelle figure, le sonde, un'emittente T e l'altra ricevente R sono manualmente poste su due facce contrapposte di un elemento in calcestruzzo. Anche in questo caso lo scopo è quello di stimare le caratteristiche di resistenza del calcestruzzo e/o di individuare eventuali irregolarità.



Indagine ultrasonica per trasparenza



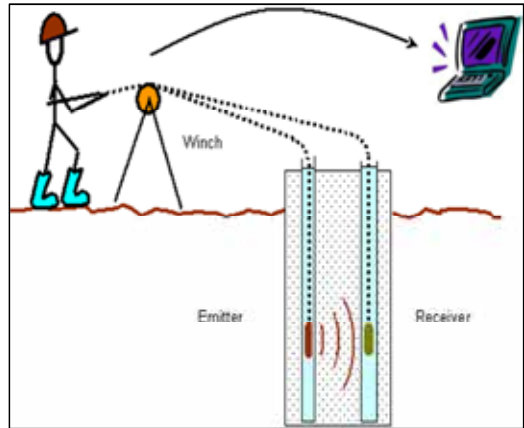
Indagine per trasparenza - schema

Nel caso delle strutture fondali vanno preventivamente inseriti, all'atto del getto, dei tubi in acciaio lungo l'intera lunghezza. Per la rilevazione le sonde sono inserite all'interno dei tubi, per mezzo di un sistema ad argani, permettendo, durante la risalita, la misura del tempo di volo (tempo necessario perchè il segnale emesso dalla sonda T venga ricevuto dalla sonda R). Le sonde sono inizialmente poste al fondo e quindi ritirate lentamente avendo cura di mantenere il loro parallelismo. Durante la risalita, generalmente ogni 5 cm, è fatta la misura del tempo di transito dell'ultrasuono nella porzione di materiale interposta fra i tubi.

Attraverso questa misura di tempo, conoscendo la distanza tra i tubi, si potrà calcolare la velocità di transito.



Applicazione in campo



Schema operativo

4.2 Principi teorici

La prova si basa sulla misura delle velocità di propagazione in un mezzo delle onde sonore ed in particolare sul principio che la velocità dell'onda ultrasonica e la sua energia sono influenzate dalla densità e dalle proprietà elastiche del materiale attraversato.

La relazione tra le onde ultrasoniche di tipo P (di compressione o longitudinali) e le caratteristiche del materiale attraversato è:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Dove:

V_p = Velocità di transito [m/s]

E_d = modulo elastico [N/m²]

ρ = densità di massa: [Kg/m³] diviso l'accelerazione di gravità g [m/s²]

ν = coefficiente di Poisson

In un calcestruzzo di buone caratteristiche meccaniche, integro, omogeneo e compatto, si hanno velocità di propagazione delle onde ben definite e di valore elevato tra 3500 e 4500 m/s.

Se il calcestruzzo presenta dei difetti (discontinuità, vespai, inclusione di terra, ecc.), si manifesta un maggiore tempo di attraversamento dell'onda con conseguente diminuzione della velocità di propagazione.

4.3 Procedura di prova

Durante il getto della struttura fondale sono annegati un certo numero di tubi, in genere per i pali sono 3, disposti a triangolo equilatero mentre per i diaframmi variano da 4 a 6 distanti non più di 1 m. I tubi sono in acciaio o PVC, di diametro 50 mm, e tali che al proprio interno, le sonde possono scorrere per tutta la loro lunghezza.

Per tenerli in posizione durante il getto i tubi sono ancorati alla gabbia d'armatura avendo cura di otturarne il fondo in quanto, prima dell'esecuzione delle misure, dovranno essere riempiti con acqua che svolgerà la funzione di "liquido di accoppiamento".

Di questi tubi deve essere misurata la reciproca distanza, corrispondente alla distanza tra sorgente e ricevitore, in modo che, determinato il tempo di propagazione delle onde, sia possibile calcolare la velocità dell'ultrasuono in senso orizzontale.

Ciò premesso, le due sonde ultrasoniche, un'emittente e l'altra ricevente, sono fatte muovere da un operatore, lungo tutta la lunghezza del palo partendo dal basso verso l'alto. I dati sono in seguito elaborati in un'apposita unità di acquisizione.

In questo modo è possibile indagare il materiale compreso fra le due sonde.

Utilizzando tutti i tubi a disposizione, nelle varie combinazioni, è possibile verificare le caratteristiche del calcestruzzo ottenendo una rappresentazione tomografica sia in 2D che, attraverso uno specifico software di elaborazione, anche in 3D.

E' bene che i tubi d'ispezione fuoriescano dal fusto del palo per consentire un comodo aggancio dei sostegni degli argani utilizzati per filare le sonde.

E' consigliabile utilizzare tubi in acciaio tipo gas da 1,5" manicottati, tappati sul fondo, puliti e riempiti con acqua poco prima dell'inizio della prova.

E' importante che il calcestruzzo abbia almeno una settimana di maturazione.



Inserimento delle sonde



Fase di acquisizione in campo

Nell'immagine seguente sono mostrate tre diagrafie, riguardanti l'esame di un palo trivellato, gettato con l'ausilio del tubo getto, avente le seguenti caratteristiche:

- diametro 800 mm
- profondità 16,0 m
- predisposizione con n. 3 tubi per l'inserimento delle sonde, denominati 1 - 2 - 3, dando luogo conseguentemente alle misure lungo gli allineamenti 1-2, 1-3 e 2-3

Si leggono:

- in ordinata la profondità in metri
- in ascissa le velocità calcolate attraverso il rapporto tra il tempo di transito misurato dalla macchina e la distanza fra i tubi annotate ed inserite dall'operatore

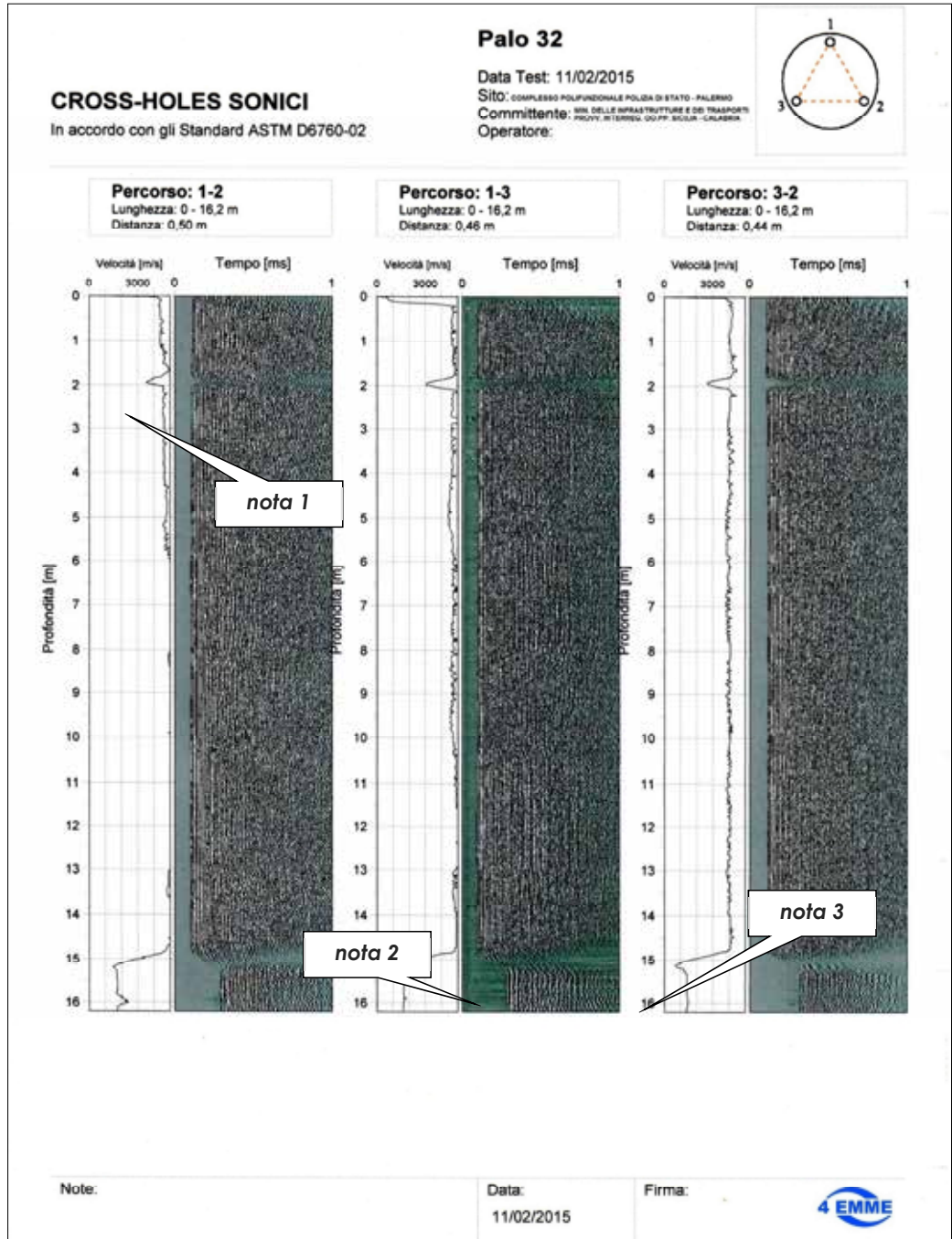
Nel palo in esame è evidenziato:

- una lieve discontinuità alla profondità di circa 2,0 m dal piano di campagna (nota 1)
- una sostanziale regolarità strutturale fino alla quota di 15,0 (nota 2)
- una soluzione di continuità tra le quote di 15,0 metri e 15,5 m ed un decadimento della qualità del calcestruzzo nell'ultimo metro di palo dove la velocità di transito è più che dimezzata (nota 3)

Trova utilità in questa fase potere confrontare i risultati ottenuti con il giornale di cantiere dove devono essere annotate tutte le operazioni riguardanti il getto e ancora, per opere di significativa importanza, il confronto con i valori di rottura ottenuti su almeno un prelievo di calcestruzzo eseguito sullo stesso materiale utilizzato per il medesimo palo.



Predisposizione della misura con tre tubi



Diagrafie di elaborazione

4.4 Vantaggi e svantaggi del metodo

Come ogni tecnica presenta dei vantaggi e degli svantaggi che è bene mettere in evidenza.

Vantaggi:

- accuratezza elevata del rilievo di integrità; le apparecchiature di più recente realizzazione permettono anche l'acquisizione dei dati ad ogni centimetro di risalita;
- nessun danno strutturale.

Svantaggi:

- inefficacia del controllo a campione, in quanto è noto prima del getto quale palo sarà sottoposto a verifica sperimentale.

4.5 La strumentazione

L'apparecchiatura consiste in un generatore d'impulsi elettrici, una coppia di trasduttori, un amplificatore e un dispositivo elettronico per la misurazione dell'intervallo di tempo che intercorre tra la partenza di un impulso generato dal trasduttore emittente e il suo arrivo al trasduttore ricevente. La presenza di una barra di calibrazione fornisce le linee di riferimento per la misurazione della velocità.

Devono essere disponibili due distinti sistemi di misura dei tempi:

- un oscilloscopio sul quale il primo fronte di impulso è visualizzato in relazione ad una scala di tempo idonea;
- un contatore dei tempi con un display digitale a lettura diretta.

L'apparecchiatura deve essere conforme ai requisiti prestazionali seguenti:

- deve essere in grado di misurare i tempi di transito sulla barra di calibrazione fino a uno scostamento limite di $\pm 0,1 \mu\text{s}$ e una accuratezza del 2%;
- l'impulso di eccitazione elettronica applicato al trasduttore emittente deve avere un tempo di salita non maggiore di un quarto del suo periodo naturale. Ciò consente di garantire una forte pendenza del fronte d'onda di partenza;
- la frequenza di ripetizione degli impulsi deve essere sufficientemente bassa per assicurare che il fronte del segnale ricevuto sia privo di interferenze da riverberi;
- la frequenza naturale dei trasduttori dovrebbe essere compresa nell'intervallo da 20 kHz a 150 kHz.



4.6 Normativa di riferimento

- UNI 1250404_2005 – Prove sul calcestruzzo nelle strutture “Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici”
- ASTM D6760-8
- D.M. del 14 gennaio 2008 (Art. 6.4.3.6)
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - *Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive.* - Febbraio 2008