

## **La metodologia non distruttiva Pulse-Echo per la determinazione dello spessore di lastre in calcestruzzo ispezionabili da un solo lato. Nuovo Protocollo FCA (Frequency Concrete Analysis).**

*Prof. Fabrizio Davì, Dr. Francesco Pirani, Dr. Stefano Bufarini, Dr. Vincenzo D'Aria*

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura - Università Politecnica delle Marche*

### **Sommario**

Nel presente articolo vengono illustrati i risultati ottenuti da una campagna sperimentale relativa all'applicazione della metodologia Pulse-Echo mediante strumentazione ACT (Acoustic Concrete Tester).

L'obiettivo principale delle indagini riguarda la stima dello spessore di elementi a lastra in calcestruzzo mediante una misurazione indiretta.

Tale studio è stato condotto eseguendo delle prove di misura su lastre in calcestruzzo di diverso spessore utilizzando una procedura sperimentale per il calcolo della velocità di propagazione delle onde longitudinali (Onde-P, Primary waves), la quale rappresenta un parametro fondamentale dell'analisi.

### **Introduzione**

Nella pratica professionale accade sempre più spesso di trovarsi di fronte a delle strutture o parti di esse con evidenti carenze prestazionali le quali compromettono la durabilità delle opere stesse. Per fronteggiare i numerosi contenziosi che nascono in virtù di queste lacune è quindi necessario l'ausilio di strumenti e metodologie di indagine che consentano una misurazione dei parametri fisici e meccanici in modo da poter stabilire con precisione la reale rispondenza dell'opera ai requisiti prestazionali stabiliti in fase di progetto.

In tale contesto possiamo affermare che la strumentazione ACT (Acoustic Concrete Tester), sviluppata dalla Pile Dynamics Inc rappresenta un ottimo strumento di indagine per la valutazione dello spessore di elementi a lastra in calcestruzzo mediante un'analisi indiretta e non distruttiva caratterizzata da costi contenuti ed elevata velocità di esecuzione. Questi aspetti consentono quindi di incrementare i volumi significativi di indagine fornendo una conoscenza più capillare dell'elemento in esame.

Dal punto di vista normativo viene fatto riferimento alla norma ASTM C1383-04 relativa alla metodologia Impact-Echo rispetto alla quale sono state fatte delle modifiche in termini di generazione dell'impulso, al fine di ottenere la metodologia Pulse-echo sulla quale si basa la strumentazione di prova. Nel caso della Impact-Echo primo l'impulso viene generato dall'urto di sferette metalliche di diverse dimensione, mentre nel caso della Pulse-Echo l'impulso viene generato da un trasduttore piezoelettrico al fine di eliminare l'influenza della superficie di contatto sulla frequenza del segnale in ingresso.

In Italia nel settore dell'ingegneria civile, la norma UNI EN 12504-04 disciplina le "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici" (richiamata all'interno del Capitolo 11 – Paragrafo 11.2.6 delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 Gennaio 2008); nella stessa non si fa alcun riferimento alla metodologia Impact-Echo, descritta nella normativa ASTM sopra riportata.

### **Campi di applicazione**

L'applicazione della strumentazione è destinata alla stima dello spessore di elementi a lastra in calcestruzzo ispezionabili da un unico lato. Le principali applicazioni interessano quindi:

- Pavimentazioni industriali
- Pareti controterra
- Serbatoi in calcestruzzo
- Calotte di gallerie

## Obiettivo

- Valutare la precisione e l'affidabilità della metodologia Pulse-Echo applicata mediante strumentazione ACT seguendo la procedura illustrata nel manuale d'uso della strumentazione.
- Sviluppo di una procedura di prova sperimentale alternativa con lo scopo di incrementare la precisione e l'affidabilità della metodologia.

Il confronto tra le due procedure ci consentirà di individuare la procedura caratterizzata dalla maggiore efficacia.

## Strumentazione

Componenti:

- unità centrale con display touchscreen;
- n. 2 cavi schermati per il collegamento delle sonde;
- n. 2 sonde (trasduttori piezoelettrici);
- memoria flash per il salvataggio dei dati;
- batteria incorporata;
- alimentatore.



L'Acoustic Concrete tester è a tutti gli effetti uno strumento ad ultrasuoni con la particolarità di poter convertire automaticamente il segnale di risposta registrato nel dominio del tempo (in termini di spostamenti ortogonali alla superficie nel tempo) nel dominio della frequenza.

L'impulso viene generato da un trasduttore piezoelettrico, il quale attraversato da una differenza di potenziale è in grado di generare delle onde elastiche; Queste ultime vengono trasferite all'elemento oggetto d'indagine accoppiando opportunamente la sonda con la superficie di prova interponendo del grasso universale ad alte prestazioni tra i suddetti elementi al fine di garantire una buona trasmissione dell'impulso.

Le onde così generate si propagheranno all'interno dell'elemento e saranno riflesse in prossimità delle soluzioni di continuità delineate dall'interfaccia tra due materiali con diversa impedenza acustica (per esempio: calcestruzzo-aria; calcestruzzo-guaina; calcestruzzo-ghiaia).

Le riflessioni così generate saranno registrate dalla sonda ricevente in termini di spostamenti ortogonali alla superficie nel tempo. Successivamente lo strumento converte in modo automatico il segnale nel dominio della frequenza mediante l'applicazione della trasformata di Fourier individuando la frequenza dominante o di spessore (FR) contenuta nello spettro ottenuto. Applicando il principio dell'analisi in frequenza, il quale ci dice che esiste un'unica relazione tra la frequenza dominante e lo spessore, è quindi possibile, nota la velocità di propagazione delle onde P ( $V_p$ ) caratteristica del mezzo indagato, determinare il valore dello spessore attraverso questi due parametri applicando la seguente relazione:

$$Spess = \frac{V_p \left[ \frac{m}{s} \right]}{2FR [KHz]} = [mm] \quad (1.1)$$

Tale formulazione è valida se le due sonde (trasmittente e ricevente) vengono collocate in posizione sufficientemente vicine; Per le normali applicazioni su elementi compresi tra 100-200mm si è potuto constatare che un interasse tra le stesse pari a 65mm risulta fornire risultati ottimali.

Di seguito vengono illustrate le procedure da applicare per il calcolo dei due parametri fondamentali.

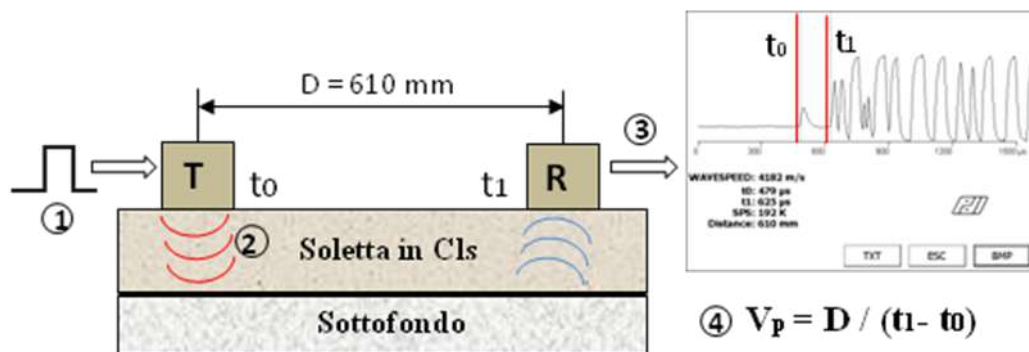
## Determinazione dei parametri fondamentali della metodologia

Al fine di rendere più chiare le procedure per la determinazione dei parametri fondamentali si illustrano le diverse fasi facendo riferimento ad un esempio schematico di una pavimentazione industriale.

### Velocità di propagazione ( $V_p$ )

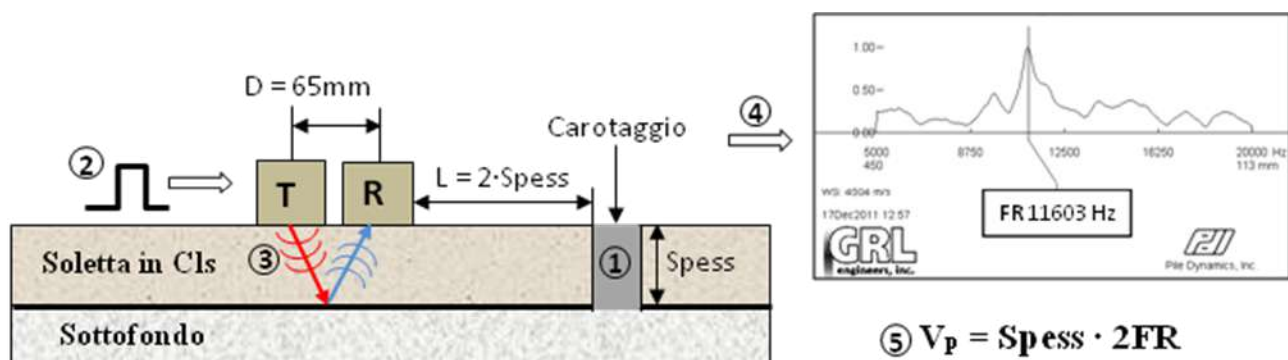
Per la determinazione di tale parametro sono state adottate due diverse procedure; la prima è rappresentata dalle linee guida fornite dal manuale d'uso della strumentazione (Procedura ACT), mentre la seconda è stata sviluppata caratterizzando la velocità di propagazione in funzione della frequenza dominante misurata in prossimità di un punto di spessore noto (Procedura FCA, *Frequency Concrete Analysis*).

#### Procedura ACT:



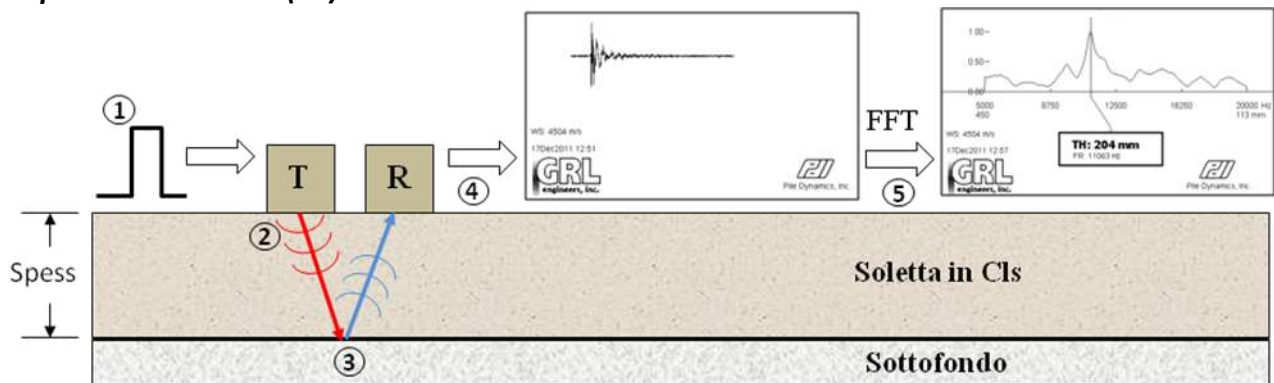
- 1) Generazione dell'impulso.
- 2) Propagazione dell'onda all'interno del mezzo solido.
- 3) Lettura del segnale di risposta nel dominio del tempo ed individuazione del tempo di transito.
- 4) Nota la distanza  $D$  tra le sonde e il tempo di transito ( $t_1 - t_0$ ) si ricava la  $V_p$  caratteristica.

#### Procedura FCA:



- 1) Esecuzione di un foro di ispezione per la determinazione dello spessore in un determinato punto dell'elemento indagato.
- 2) Generazione dell'impulso.
- 3) Propagazione dell'onda all'interno del mezzo solido.
- 4) Determinazione della frequenza dominante in prossimità del punto di spessore noto.
- 5) Noto lo spessore e la frequenza dominante in punto si ricava la  $V_p$  caratteristica.

## Frequenza dominante (FR)



- 1) Generazione dell'impulso.
- 2) Trasmissione dell'impulso e propagazione dell'onda nell'elemento oggetto di indagine.
- 3) Riflessione dell'onda sulla soluzione di continuità definita dall'interfaccia tra la soletta e il sottofondo, caratterizzati da una diversa impedenza acustica.
- 4) Lettura del segnale di risposta nel dominio del tempo.
- 5) Conversione del segnale di risposta nel dominio della frequenza mediante applicazione della trasformata di Fourier.
- 6) Nota la frequenza dominante (FR) e la velocità di propagazione ( $V_p$ ) misurata come illustrato al punto precedente, si ricava direttamente lo spessore dell'elemento nel punto indagato applicando la formula 1.1 .

## Sviluppo e risultati delle prove sperimentali

In primo luogo sono stati scelti tre elementi di diverso spessore che simulano perfettamente lastre in calcestruzzo e presentano una soluzione di continuità di tipo calcestruzzo-aria al fine di valutare la precisione e l'affidabilità del metodo ottenuto applicando le due diverse procedure per il calcolo della  $V_p$  sopra illustrate.

Per ciascun elemento sono stati individuati 12 punti di misura sui quali è stata eseguita la lettura dello spessore mediante strumentazione ACT.

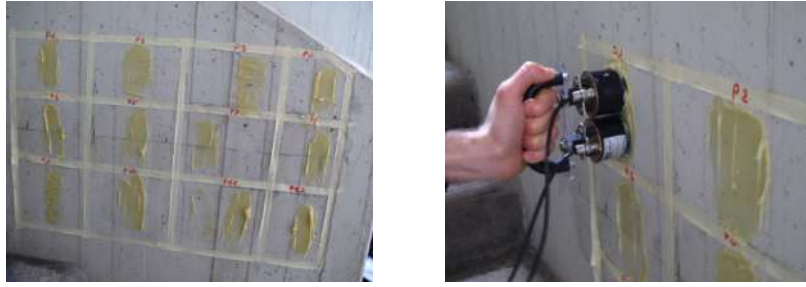
Al fine di poter validare i risultati ottenuti è stata applicata la medesima procedura su di un caso reale rappresentato da una pavimentazione industriale esistente in cui la soluzione di continuità è definita da un'interfaccia di tipo calcestruzzo-ghiaia compattata. Di seguito vengono riportati in sintesi i risultati ottenuti, confrontando la precisione in termini di spessore misurato che caratterizza ciascuna delle due procedure utilizzate per il calcolo della  $V_p$ .

## Indagini su elementi con soluzione di continuità di tipo calcestruzzo-aria

- 1) Parapetto in calcestruzzo di spessore 100mm:

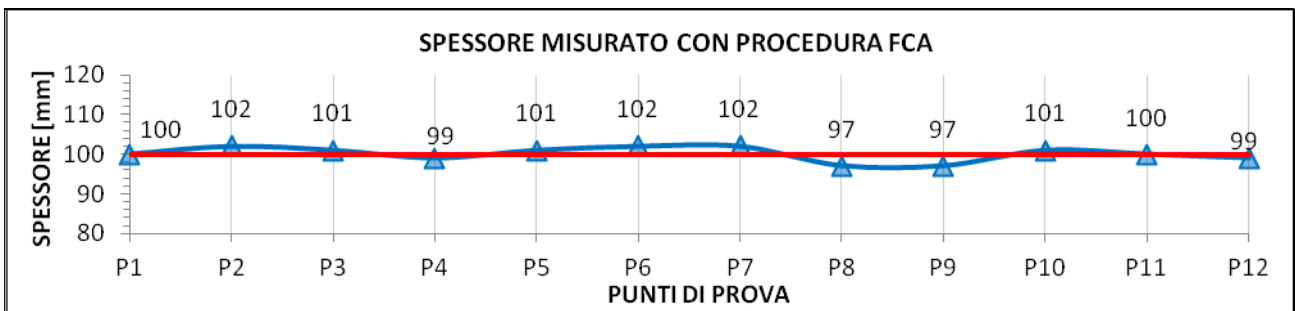
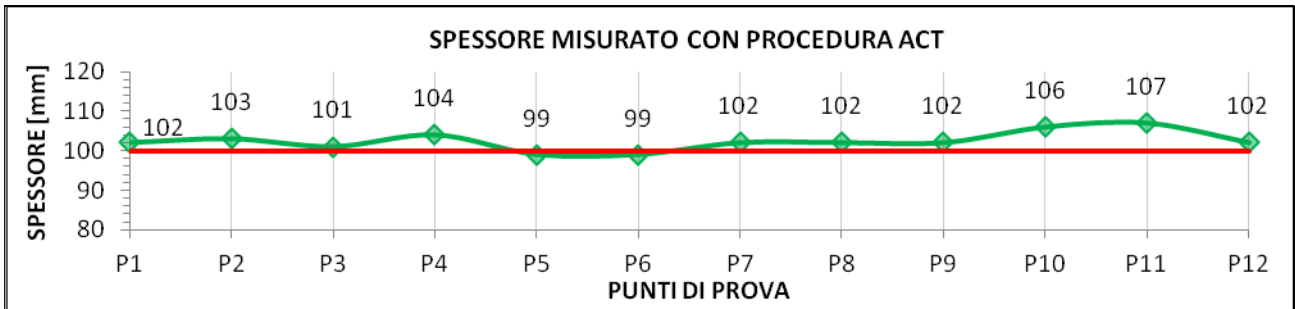


**Figg.1 - 2:** Parapetto in calcestruzzo oggetto di indagine; individuazione dei punti di misura



**Figg. 3 - 4:** Stesura del grasso per l'accoppiamento; posizionamento delle sonde per la misurazione

Risultati ottenuti utilizzando la Procedura ACT e la Procedura FCA sui 12 punti di prova:



Analizzando i valori delle misure registrate con ciascuna delle due procedure possiamo ricavare i relativi coefficienti di variabilità ottenuti eseguendo il rapporto tra lo scarto quadratico medio ottenuto dai valori delle 12 misure eseguite e lo spessore reale indicato nei grafici con la linea rossa.

Coefficienti di variabilità:

Procedura ACT: **2,8%** = errore medio di **2,8mm**

Procedura FCA: **1,4%** = errore medio di **1,4mm**

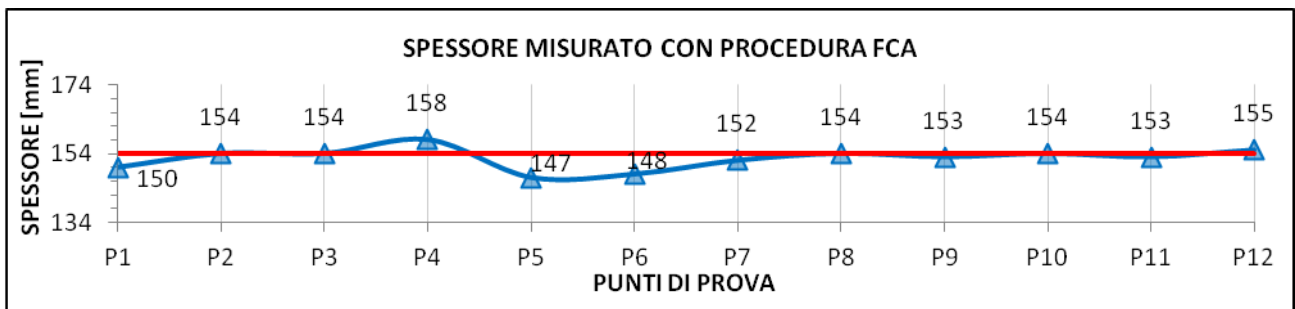
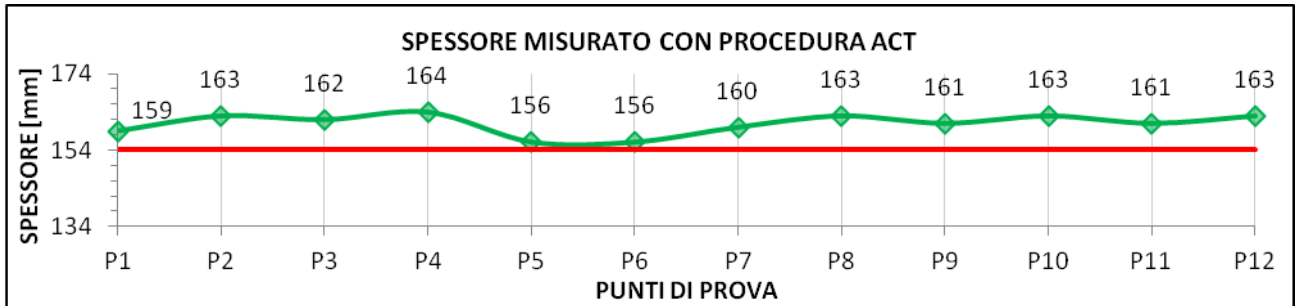
2) Soletta in calcestruzzo di spessore 154mm:



**Figg. 5 - 6:** Soletta in cls oggetto di indagine; individuazione dei punti di misura



**Figg. 7 - 8:** Stesura del grasso per l'accoppiamento; posizionamento delle sonde per la misurazione. Risultati ottenuti utilizzando la Procedura ACT e la Procedura FCA sui 12 punti di prova:



Coefficienti di variabilità:

Procedura ACT: **4,5%** = errore medio di **6,9mm**

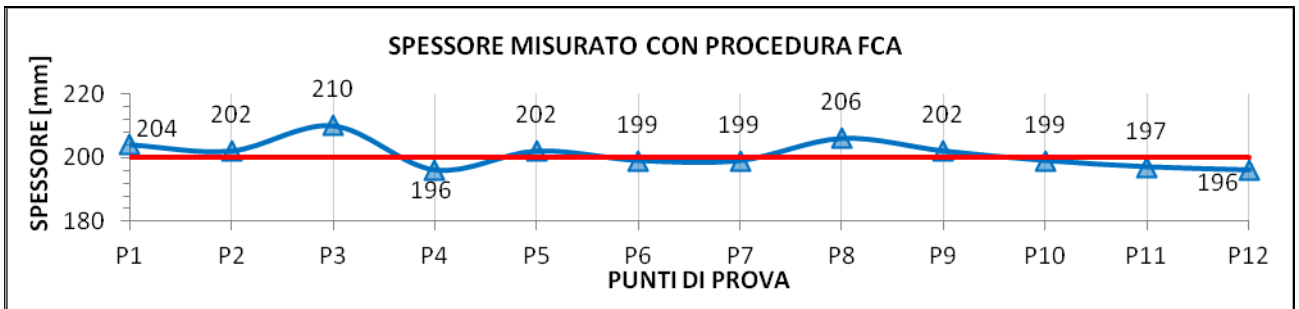
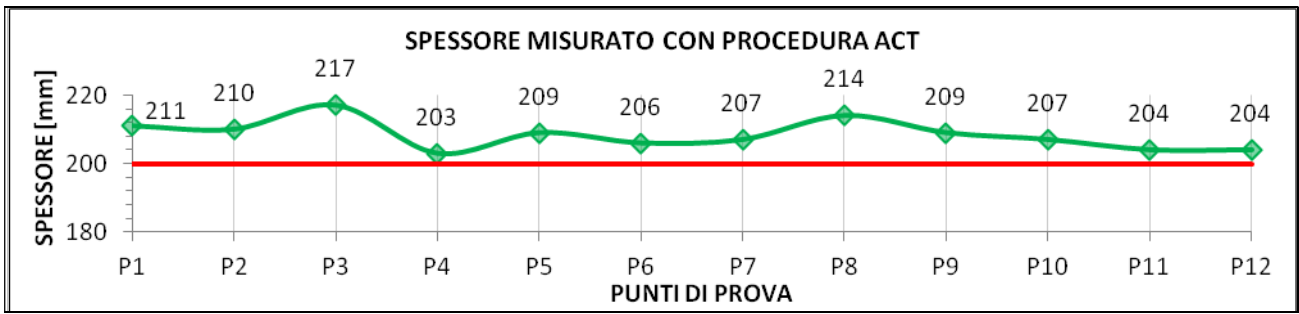
Procedura FCA: **1,4%** = errore medio di **2,1mm**

3) Setto in calcestruzzo di spessore 200mm:



**Figg. 9 - 10 - 11:** Setto oggetto di indagine; individuazione dell'area di prova; distribuzione del grasso di accoppiamento

Risultati ottenuti utilizzando la Procedura ACT e la Procedura FCA sui 12 punti di prova:



Coefficienti di variabilità:

Procedura ACT: **4,2%** = errore medio di **8,4mm**

Procedura FCA: **1,7%** = errore medio di **3,4mm**

**Indagine sulla pavimentazione industriale con soluzione di continuità di tipo calce-ghiaia compattata:**

Spessore stimato mediante foro di ispezione: 182mm

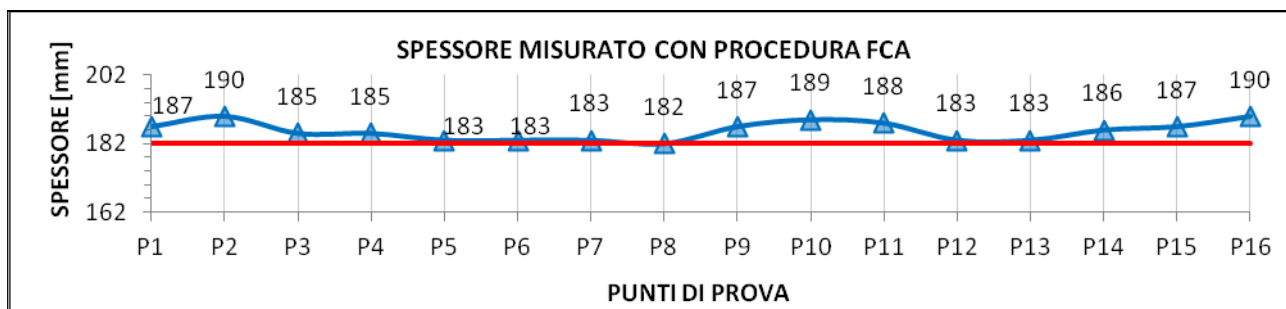
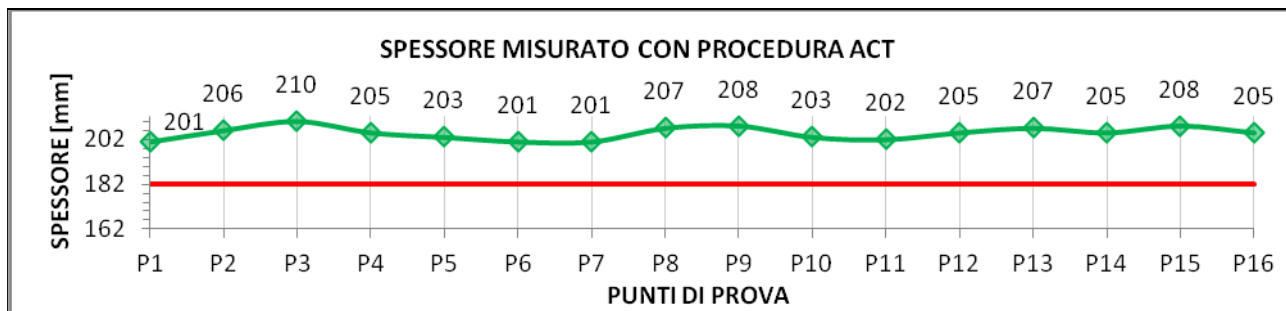


**Figg. 12 - 13:** Esecuzione di un carotaggio; misura dello spessore sulla carota estratta



**Figg. 14 - 15:** Individuazione dell'area di prova; lettura dello spessore

Risultati ottenuti utilizzando la Procedura ACT e la Procedura FCA sui 16 punti di prova:



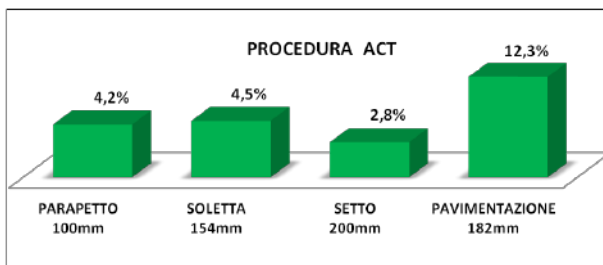
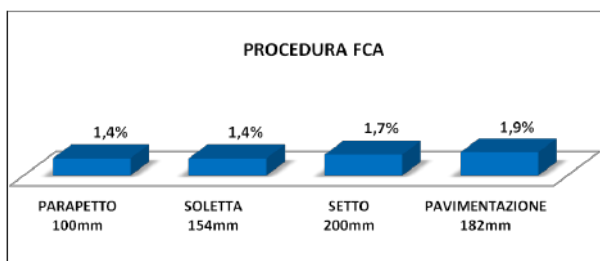
Coefficienti di variabilità:

Procedura ACT: **12,3%** = errore medio di **22,3mm**

Procedura FCA: **1,9%** = errore medio di **3,5mm**

### Conclusioni

Nei seguenti grafici vengono confrontati i coefficienti di variabilità ottenuti sui diversi elementi suddivisi in base alla procedura utilizzata.



Dai risultati ottenuti si evince come la procedura FCA restituisca dei valori più precisi ed affidabili rispetto alla procedura ACT ed inoltre fornisce dei coefficienti di variabilità, al variare dello spessore dell'elemento indagato, che si mantengono su valori omogenei mostrando quindi un'ottima affidabilità del metodo.

Le prove eseguite seguendo la procedura sperimentale ci hanno consentito di ottenere per spessori compresi tra 100 e 200 mm degli errori medi che vanno da 1,4mm a 3,5mm, tali valori risultano essere assolutamente accettabili per indagini su strutture in calcestruzzo in quanto risultano essere ininfluenti ai fini delle prestazioni e della durabilità dell'opera oggetto di indagine.

\*\*\*

*Si ringrazia vivamente Michele Massaccesi della DRC Srl per aver messo a disposizione in fase di tesi sperimentale dello studente Francesco Pirani la strumentazione ACT e tutta la documentazione tecnica a corredo.*



### **Bibliografia**

- Mary J. Snsalone and William B. Street, *Impact echo, Nondestructive evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier.
- V.M. Malhotra and N.J. Carino, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Pres.
- Stefano Bufarini, Vincenzo D’Aria e Roberto Giacchetti, *Il controllo degli edifici in cemento armato e muratura: tecniche diagnostiche, indagini strumentali, esempi di prove su materiali e strutture secondo le nuove Norme Tecniche per le costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008) e la Circolare esplicativa n.617/2009*, EPC libri.
- “*Nde conference on civil engineering*”. A joint conference of the 7<sup>th</sup> Structural Materials Technology: NDE/NDT for Highways and Bridges and the 6<sup>th</sup> International Symposium on NDT in Civil Engineering. Edit by Imad Al-Qadi University of Illinois at Urbana –Champaign and Glenn Washer University of Missouri- Columbia. 14-18 August 2006 St. Luis, Missouri.
- Ed Pristov, Wayne Dalton, George Pisciacko and Garland Likins, *Comparison of Impact-Echo with Broadband Input to Determine Concrete Thicknes, Pile Dynamics Inc.*

### **Norme di riferimento**

- ASTM C1383 – 04:2010, *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using The Impact-Echo Method.*
- UNI-EN 12504–4:2005, *Prove sul calcestruzzo nelle strutture: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.*
- D.M. 14/01/2008, *Norme Tecniche per le costruzioni* e relativa circolare esplicativa n.617 del 02/02/2009.

**Protocollo del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell’Università Politecnica delle Marche n. 214 del 20.03.2013.**

**Proprietà intellettuale riservata agli autori.**