

# LA SICUREZZA DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO AD ALTE PRESTAZIONI

Progetto Nazionale Cofinanziato dal Murst 1997-98  
Giornate di Studio, 11-12 Marzo 1999, Venezia

## Rilievo con metodi microsismici della formazione e della propagazione di superfici di scorrimento in cilindri di HPC compressi

Giovanni Pascale, Elena Ferretti, Roberto Carli, Filippo Bastianini

Università di Bologna      DISTART

*Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio*

**Parole chiave:** Calcestruzzo, Fessurazione, Sperimentazione, Microsismica.

***Sommario:** La ricerca si riferisce ad un'applicazione dei metodi di analisi basati sulla propagazione di onde elastiche di vibrazione, finalizzata a valutare l'insorgenza e la propagazione di fessure durante prove di compressione su cilindri in calcestruzzo ad alta resistenza.*

*La metodologia di indagine si basa sull'impiego simultaneo di un elevato numero di trasduttori piezoelettrici e sull'elaborazione dei risultati per ottenere immagini tomografiche, a partire da determinazioni di valori di velocità di propagazione e di attenuazione.*

### 1 Premessa

L'analisi non distruttiva di calcestruzzi e altri materiali lapidei, per la ricerca di stati di danneggiamento diffuso o localizzato, può essere eseguita con metodi basati sulla propagazione di onde elastiche di vibrazione. Con riferimento alle modalità esecutive, alla configurazione strumentale ed ai criteri di interpretazione dei risultati, analisi di questo tipo si ricollegano in parte alle prove ultrasoniche eseguite su materiali omogenei come quelli metallici ed in parte alle prove sismiche eseguite in campo geofisico. Per questo esse prendono il nome di "analisi microsismiche".

L'analisi microsismica si basa essenzialmente sul rilevamento dei parametri di velocità e attenuazione di onde meccaniche di vibrazione a frequenza ultrasonora durante la propagazione nel mezzo in esame. Gli strumenti più ampiamente diffusi nel campo dell'ingegneria civile impiegano trasduttori elettromeccanici di tipo piezoelettrico. L'impulso di eccitazione origina un treno di vibrazioni smorzate del trasduttore emittente, che copre uno spettro di frequenze più o meno limitato attorno alla frequenza di risonanza fondamentale dello stesso. Per le applicazioni su calcestruzzi e materiali lapidei sono impiegati trasduttori con frequenza generalmente compresa tra 25 e 300 kHz, in relazione al grado di disomogeneità del materiale.

Il trasduttore emittente, accoppiato al mezzo in esame attraverso materiali opportuni (gelatine a base d'acqua, vaselina, plastilina o malta a presa rapida) che hanno la funzione di contenere il disadattamento di impedenza acustica, invia nel materiale il treno di vibrazioni che viene poi rilevato e trasformato in un debole impulso elettrico da un trasduttore ricevente del tutto analogo. Il tempo di ritardo tra l'inizio dell'eccitazione del trasduttore emittente e la rivelazione dell'impulso da parte di quello ricevente viene assunto come tempo di propagazione dell'onda nel mezzo, mentre l'attenuazione da essa subita viene generalmente valutata come l'amplificazione necessaria a riportare il primo picco del treno di impulsi all'ampiezza che si

avrebbe con sonde a contatto e con solo materiale di accoppiamento interposto, in accordo con la normativa UNI 9524.

## **2 Tomografia sonica**

L'obiettivo di questa ricerca è quello di ottenere rappresentazioni tomografiche di sezioni verticali di cilindri di calcestruzzo in compressione. Si riporta qui di seguito in forma abbreviata la procedura adottata, più diffusamente presentata in (Pascale e altri, 1997). L'elaborazione dei dati prevede tre fasi.

### ***2.1 Correzione dei dati di tempo di transito e attenuazione***

La prima fase consente di tenere conto degli effetti sistematici che influiscono sui parametri sperimentali a causa di fenomeni indipendenti dalle caratteristiche del materiale analizzato.

In particolare il tempo di transito è sensibilmente influenzato dalla lunghezza effettiva del percorso tra le porzioni attive delle sonde. Tale lunghezza non coincide necessariamente con quella teorica poi utilizzata dall'algoritmo di elaborazione tomografica a causa di due tipi di fenomeni:

- non perfetta coincidenza tra la configurazione geometrica teorica e quella reale;
- influenza della dimensione non puntiforme delle sonde in caso di percorsi non diretti.

Nel primo caso concorrono errori dovuti alla non perfetta planarità delle sezioni analizzate, errori di parallasse, errori nel posizionamento delle sonde. E' possibile in qualche modo ovviarvi misurando la distanza sperimentale tra i centri delle sonde con l'ausilio di un calibro a forbice.

Nel secondo caso si ha invece una sovrastima della distanza tra le sonde per percorsi semidiretti, sostanzialmente dovuta al fatto che il percorso tra i lembi estremi più vicini della parte attiva delle pastiglie piezoelettriche è in questi casi inferiore alla distanza tra i centri delle sonde. Pertanto si ricorre ad una procedura di pre-elaborazione dei dati sperimentali atta a ridurre l'influenza di questi fenomeni.

Per quanto riguarda i dati di attenuazione, i fenomeni indipendenti dalle caratteristiche del mezzo che devono essere tenuti in considerazione sono invece:

- attenuazione geometrica;
- direttività dei trasduttori.

Il primo fenomeno introduce una quota di attenuazione dovuta alla curvatura del fronte d'onda generato dalla sonda emittente, se piccola rispetto alle dimensioni del mezzo, curvatura che provoca la distribuzione dell'energia di vibrazione in regioni di spazio sempre più ampie, con l'allontanarsi dal punto di emissione. Poiché tale attenuazione dipende anche dalla distanza effettiva tra le sonde, in questo fenomeno rientrano anche gli altri due già descritti a proposito del tempo di propagazione.

Il secondo fenomeno è invece legato alla direttività dei trasduttori utilizzati, e viene tenuto in conto a partire da misurazioni sperimentali di queste caratteristiche.

### ***2.2 Elaborazione tomografica***

Il procedimento di elaborazione tomografica consiste nell'attribuzione dei parametri locali caratteristici di velocità sonica ed attenuazione strutturale a settori di corone circolari concentriche tracciate in base alle condizioni di tangenza ai percorsi sonici stessi.

E' possibile classificare i percorsi in base al numero di sonde successive che separano le due agli estremi del percorso stesso. Si classificano così percorsi di classe 1 (sonde immediatamente successive), classe 2, e così via. Immaginando di tracciare le circonferenze tangenti a tutti i percorsi di una stessa classe, si potrà notare come i percorsi di classe via via crescente attraversino strati sempre più interni della sezione fino ai percorsi «diametrali» che ne attraversano il nucleo centrale (Fig. 1). Partendo quindi dai percorsi di classe 1 è possibile

attribuire delle proprietà locali di velocità sonica ed attenuazione strutturale ai vari segmenti di anello attraversati dagli stessi. Per quelli di classe successiva sarà possibile attuare un procedimento analogo considerando però non più la velocità sonica «media» su tutto il percorso ma la velocità particolare calcolata in base alla lunghezza del segmento che attraversa il solo strato interno rapportato al tempo di transito nello stesso strato. Quest'ultimo tempo potrà essere calcolato depurando il tempo totale misurato per quel percorso dal tempo necessario ad attraversare gli strati più esterni, nei quali la velocità sonica locale è già stata calcolata precedentemente. La metodologia proposta consente di calcolare tali grandezze nel caso semplificato di sezioni circolari e con qualsiasi numero di sonde purché in perfetta simmetria polare.

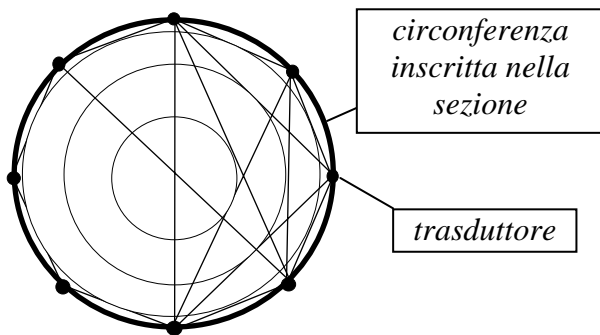


Figura 1: Suddivisione di una sezione poligonale in corone circolari

L'estensione a sezioni poligonali regolari avviene semplicemente riducendole alle sezioni circolari inscritte equivalenti.

### 2.3 Analisi grafica dei risultati

Per agevolare l'interpretazione dei risultati è stata realizzata un'apposita interfaccia grafica.

Tale strumento permette di generare delle mappe delle corone circolari dove, dopo avere suddiviso ogni corona circolare in settori, a ciascuno di essi viene attribuito un colore rappresentativo dei valori di velocità sonica ed attenuazione strutturale ivi calcolati, in accordo con una scala colori.

## 3 Applicazioni

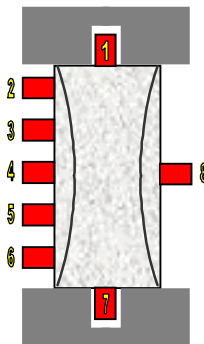


Figura 2: Disposizione dei trasduttori nelle analisi microsismiche su campioni cilindrici in compressione

Nel programma di ricerca attualmente in atto, si è pensato di applicare la procedura precedentemente esposta per valutare la formazione e la propagazione di superfici di scorrimento in cilindri di calcestruzzo durante l'esecuzione delle prove di compressione. Sono state effettuate diverse serie di rilievi microsismici ad intervalli regolari di tensione, mantenendo la tensione costante per il tempo necessario all'esecuzione di tutti i rilievi ad ogni livello di carico. Si è utilizzato un analizzatore microsismico conforme alla norma UNI 9524, con trasduttori piezoelettrici con frequenza propria di 70 kHz. I trasduttori sono stati disposti secondo lo schema di Figura 2 e sono stati incollati alla superficie del campione, per evitare errori dovuti a successivi riposizionamenti.

I dati sperimentali sono tuttora in fase di elaborazione. La procedura impiegata ha però risentito negativamente, soprattutto nella fase di softening, del tempo necessario per l'effettuazione delle singole serie di rilievi. In questa fase, infatti, è difficile poter mantenere lo stato fessurativo costante per il tempo necessario.

Nel corso di alcune delle prove eseguite, è stata comunque effettuata la registrazione in continuo dei parametri microsismici (Velocità  $V$  di attraversamento delle onde  $P$  e Attenuazione  $A$ ) in funzione del carico applicato, su di un percorso diametrico a metà dell'altezza del campione. I risultati di una prova sono riportati nella Figura 3 in termini di parametri di danno dedotti dai valori di  $V$  e di  $A$ , secondo quanto riportato in (Ferretti e altri, 1999). Si può osservare come entrambi i parametri siano in grado di rivelare lo stato di danneggiamento, la velocità in modo più progressivo e l'attenuazione solo quando lo stato fessurativo diviene più accentuato. In altri

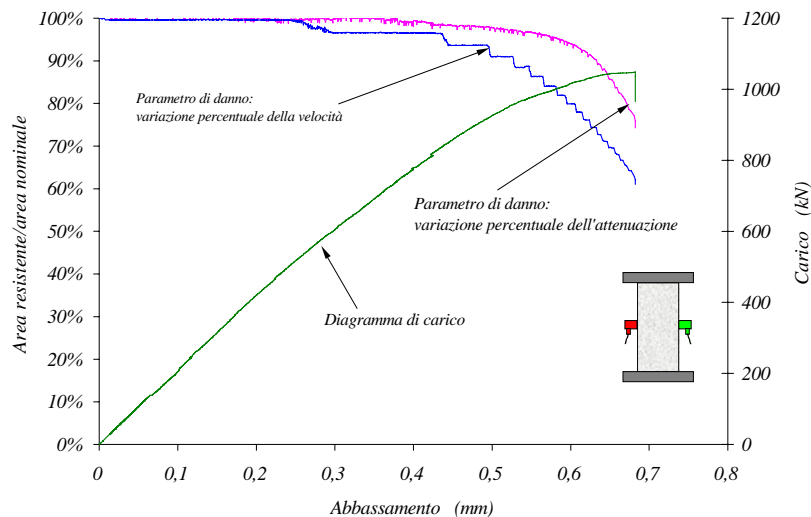


Figura 3: Prova di compressione su campione cilindrico di calcestruzzo ( $H = 300 \text{ mm}$ ,  $\phi = 150 \text{ mm}$ )

campioni con diversi rapporti altezza/diametro e costituiti da calcestruzzi diversi la dipendenza dei parametri microsismici dallo stato di danneggiamento si è manifestata in maniera diversa. Ulteriori prove sono in corso.

## Conclusioni

I parametri microsismici sono in grado di rivelare la presenza di uno stato di danneggiamento variabile con il carico applicato. La sensibilità dei due parametri

(velocità e attenuazione) dipende da diversi fattori, come la snellezza del campione e le proprietà del calcestruzzo.

L'utilizzazione dei parametri microsismici per ottenere immagini tomografiche dello stato fessurativo interno a diversi livelli di carico richiede un'affinamento delle procedure sperimentali e della catena di acquisizione.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano i tecnici del Laboratorio Resistenza Materiali del DISTART - Università di Bologna, Sig. Davide Betti e Sig. Gregorio Bartolotta, per la collaborazione nell'esecuzione del programma sperimentale.

Questa ricerca è stata svolta con il contributo finanziario del *Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica*, Progetto 9708165746\_006.

## 4 Bibliografia

- Di Tommaso A., Pascale G., Cianfrone F., *Experimental Microseismical Evaluation of Artificially Induced Defects on Stonework*, da *Fracture of Concrete and Rock: Recent Developments*, pp. 265-277, Ed Shah, Swartz and Barr, Elsevier Applied Science, Sept. 1989.
- Ferretti E., Di Leo A., Viola E., *Modellazione Del Comportamento Macroscopico in Compressione dei Calcestruzzi ad Alte Prestazioni (HPC) a Partire da Nuove Assunzioni Costitutive*, Convegno di lavoro del progetto MURST 1997-98 La sicurezza delle strutture in calcestruzzo ad alte prestazioni, Venezia, 11-12 marzo 1999.
- Pascale G., Bastianini F., *Sistema automatizzato di analisi microsismica mediante impulsi ultrasonori per calcestruzzi e materiali lapidei*, Il giornale delle prove non distruttive, monitoraggio e diagnostica, N.2, 1997, pp. 68-74.
- Pascale G., Di Leo A., Bastianini F., *Metodo tomografico semplificato per l'elaborazione di dati microsismici su elementi strutturali di materiale lapideo*, Atti della Conferenza nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Padova, 25-27/9/1997, pp. 180-193.