

INFLUENZA DELLO STATO TENSIONALE SULLA STIMA DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO IN OPERA MEDIANTE IMPULSI D'ONDE VIBRAZIONALI AD ALTA FREQUENZA (ULTRASUONI)

AUTORI:

Stefano Bufarini, Vincenzo D'Aria*, Roberto Giacchetti***

** Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura - Università Politecnica delle Marche.*

*** Libero professionista - Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni.*

Un lavoro sperimentale ha permesso di chiarire alcuni aspetti comportamentali del calcestruzzo con particolare riguardo al ruolo svolto dal carico applicato nella evoluzione delle caratteristiche prestazionali di questo materiale. Le conclusioni a cui si è pervenuti dopo l'esecuzione di una campagna di prove su campioni prismatici realizzati in laboratorio con calcestruzzi di diversa resistenza caratteristica, sono in sintesi le seguenti:

- il calcestruzzo, se presollecitato con carichi ciclici di ampiezza variabile (con tensione massima fino all'80% del carico di rottura) e scaricato prima di essere portato a rottura, manifesta un recupero prestazionale inteso come incremento del carico massimo di rottura e del modulo elastico rispetto al calcestruzzo non presollecitato;
- parallelamente a questi fenomeni di "re-loading" si assiste ad un infragilimento del materiale, il quale presenta una diminuzione del valore della deformazione a rottura e dell'energia dissipata prima di arrivare a rottura;
- le presollecitazioni sui provini hanno determinato distribuzioni statistiche delle variabili (ad esempio la resistenza a rottura) caratterizzate da una riduzione dei valori delle deviazioni standard, quindi da una maggiore ripetibilità. Questo risultato è stato attribuito alla caduta dei picchi di tensione che si sviluppano nel materiale e ad una redistribuzione delle tensioni in conseguenza della maggiore compattezza raggiunta dalla struttura resistente del calcestruzzo;

- è stata verificata la dipendenza del fenomeno dalla classe di resistenza del calcestruzzo. Ad una classe di resistenza più bassa sono attribuite le maggiori variazioni prestazionali (sia miglioramenti, per quanto riguarda la resistenza e il modulo elastico, sia peggioramenti, per quanto riguarda la duttilità del materiale). All'aumentare della classe di resistenza, la tendenza ad un'evoluzione prestazionale dovuta al precarico è meno marcata. L'aumento di resistenza varia da un minimo di circa il 3% per una classe R_{ck} 60 MPa, a circa il 5% per una classe R_{ck} 30 MPa fino ad un massimo di circa il 10% per una classe R_{ck} 15 MPa. Ancora più evidente è l'aumento del valore del modulo elastico (dinamico) che migliora di circa il 9% per il calcestruzzo di classe R_{ck} 60 MPa, di circa il 10% per il calcestruzzo di classe R_{ck} 30 MPa e di oltre il 20% per il calcestruzzo di classe R_{ck} 15 MPa;
- il risultato riportato al punto precedente ha portato alla conclusione che la causa principale, cui si deve attribuire tale cambiamento nelle prestazioni, sia la riduzione, ad opera dell'azione compattante del carico, delle porosità capillari del materiale; infatti, a parità di tempo di stagionatura, un calcestruzzo con classe di resistenza maggiore, presentando un rapporto acqua/cemento minore, è caratterizzato da una minore porosità;
- le cause dell'evoluzione prestazionale dovute al carico applicato non sono da attribuire solo ad una mera compattazione meccanica, ma sono prodotte anche da reazioni di tipo chimico e, sostanzialmente, sono accompagnate da mutamenti della struttura resistente. Questa conclusione è dovuta al risultato di una sperimentazione analoga, nella quale sono state monitorate le variazioni di temperatura di alcuni provini durante l'applicazione di carichi ciclici. All'aumentare del numero dei cicli di carico si è sempre rilevato un abbassamento della temperatura dei provini; tale fenomeno è stato attribuito, appunto, a reazioni endotermiche sviluppatesi, a causa dell'azione del carico, all'interno del calcestruzzo.

Le evidenze sperimentali descritte precedentemente pongono la questione dell'interpretazione dei risultati di prove ultrasoniche eseguite in situ (foto n. 1) tarate sui valori di resistenza ottenuti su provini cilindrici estratti per carotaggio (foto n. 2), dal momento che all'atto della prova di

compressione (foto nn. 3-4) il provino ha già subito nella realtà una presollecitazione seguita da un completo rilascio tensionale.



Foto n. 1



Foto n. 2



Foto n. 3

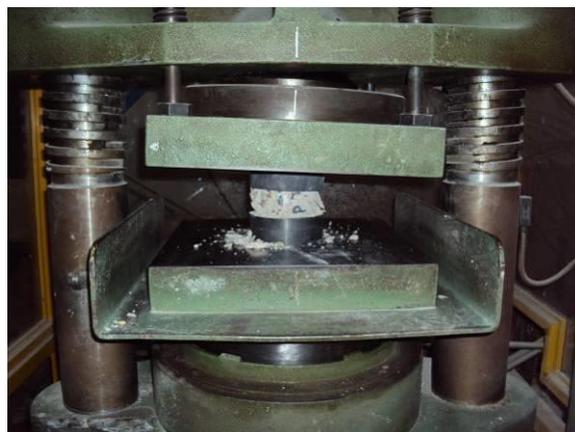


Foto n. 4

Occorre sottolineare a questo proposito che, in casi di studio purtroppo abbastanza frequenti nella pratica professionale, si trova che, in presenza di calcestruzzi di modesta qualità, il rapporto tra la resistenza a rottura e la tensione di esercizio effettiva è di gran lunga inferiore al coefficiente di sicurezza, il che significa che il calcestruzzo è in realtà sollecitato da tensioni dell'ordine di oltre il 50% della resistenza. A questi livelli di tensione si formano microfessurazioni all'interno del volume del materiale; dunque riveste una notevole importanza dare significato alle correlazioni esistenti fra la velocità degli ultrasuoni e la resistenza del calcestruzzo valutata in maniera diretta

tramite prova di compressione sulle carote estratte introducendo come parametro di influenza lo stato tensionale.

A questo riguardo è stata condotta una campagna sperimentale, volta ad indagare sui cambiamenti delle proprietà meccaniche che interessano il calcestruzzo qualora sia sottoposto ad una serie di carichi ciclici (foto n. 5).



Foto n. 5

Il risultato che ci si attendeva era quello secondo il quale i provini presollecitati, subendo, a causa della microfessurazione indotta dai carichi, un danneggiamento della loro struttura resistente, avrebbero fornito valori di resistenza leggermente inferiori a quelli forniti da provini perfettamente identici ai precedenti ma non presollecitati e quindi con una struttura resistente intatta (fatto salvo per quella microfessurazione sempre presente dovuta al ritiro della pasta cementizia). Si ipotizzava, inoltre, che all'aumentare della classe di resistenza del calcestruzzo, tale fenomeno potesse ridursi a seguito dei migliorati legami all'interfaccia pasta-aggregato; questo avrebbe portato a concludere che il fenomeno era principalmente riscontrabile e quindi temibile nelle strutture dei vecchi edifici. I risultati della sperimentazione hanno invece messo in evidenza che a seguito del carico applicato, il

calcestruzzo subisce, oltre al fenomeno previsto della microfessurazione, una sorta di “recupero prestazionale”, imputabile da un lato ad una compattazione meccanica ottenuta a seguito della riduzione dei pori capillari e dall’altro a probabili reazioni chimiche che determinano una vera e propria mutazione nella struttura resistente del materiale.

Questo risultato appare, quindi, in contrasto con le evidenze sperimentali, riguardanti il danneggiamento del materiale ad opera della microfessurazione.

Da un lato, cioè, esiste un’evidenza sperimentale secondo cui l’applicazione di un carico determina, fra l’altro, un incremento della tensione di rottura e del modulo elastico del materiale, dall’altro, numerose esperienze sperimentali che hanno messo in evidenza il fatto che, in generale, a bassi valori delle velocità degli ultrasuoni (microfessurazione sviluppata) corrispondono bassi valori di resistenza a compressione (misurata su carote). Nella sperimentazione sono stati applicati al calcestruzzo carichi molto elevati (superiori all’80% del carico di rottura) che hanno sicuramente determinato un notevole sviluppo del quadro microfessurativo, e, nonostante questo, contrariamente a quanto ci si aspettava, i valori di resistenza ultima e del modulo elastico hanno subito degli incrementi piuttosto che degli abbattimenti.

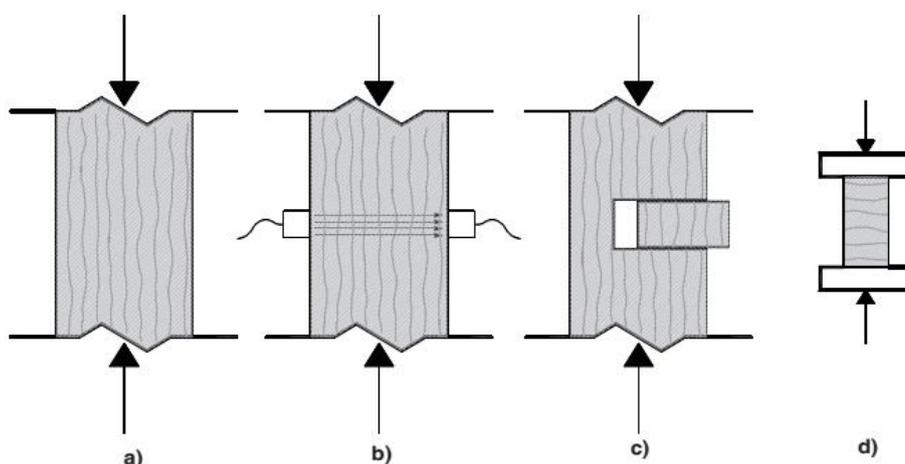


Figura 1

Fessurazione longitudinale in un pilastro soggetto a forte tensione di compressione.

Una possibile interpretazione di questa apparente contraddizione può essere ricercata nella

modalità di formazione e propagazione delle microfessure all'interno del calcestruzzo. Se si considera un pilastro soggetto per semplicità a pura forza assiale e, di conseguenza, ad un determinato stato tensionale, all'aumentare della pressione si forma un quadro fessurativo interno con lesioni aventi giacitura parallela alla direzione del carico (Figura 1a). La presenza delle staffe impedisce all'elemento strutturale di esplodere ma il meccanismo è assolutamente simile a quello che si registra durante una prova di compressione su un provino cilindrico snello.

In questo modo una normale indagine ultrasonica nell'elemento strutturale (Figura 1b) rivelerebbe una riduzione della velocità di propagazione conseguente all'aumento del numero e dell'ampiezza delle microfessure.

La successiva operazione di carotaggio viene eseguita in direzione perpendicolare alle linee isostatiche di compressione (Figura 1c).

Una volta prelevata, la carota viene sottoposta ad una prova di compressione nella direzione perpendicolare a quella del carico agente (Figura 1d) ed il valore della resistenza su provino viene normalmente assunto come resistenza del calcestruzzo in situ. Così facendo si assume che il calcestruzzo sia un materiale isotropo e che i valori di resistenza (e di altre grandezze quali il modulo elastico) determinati lungo una direzione siano rappresentativi del comportamento del calcestruzzo anche in altre direzioni ed in particolare nella direzione ortogonale coincidente con la direzione di applicazione dei carichi, che è quella di maggiore interesse ai fini delle verifiche. In realtà, la prova di compressione, condotta in questo modo, seppure non influenzata dalla presenza delle fessure (che vengono richiuse per effetto della compressione), può sottostimare il valore della resistenza in quanto il beneficio indotto dalla compattazione del materiale, che è stato provato sperimentalmente, non viene colto in quanto interessa la direzione ortogonale a quella del carico applicato. Ne consegue che, in presenza di stati tensionali significativi, oltre il 50% del valore della resistenza, il metodo ultrasonico, ancorché tarato sui valori di resistenza di carote estratte dalla struttura, tende a sottostimare il valore effettivo della resistenza in situ.

Bibliografia

1. Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura - II edizione. *Tecniche diagnostiche, indagini strumentali, esempi di prove su materiali e strutture secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) e la Circolare esplicativa n. 617/2009.*
Stefano Bufarini, Vincenzo D'Aria, Roberto Giacchetti. EPC Libri - Giugno 2010.
2. Controlli e verifiche delle strutture di calcestruzzo armato in fase di esecuzione. *Compiti e responsabilità del Direttore dei Lavori secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008) e la Circolare esplicativa n. 617/2009.*
Alessandro Zizzi, Santo Mineo, Stefano Bufarini, Vincenzo D'Aria. EPC Editore - Settembre 2011.

Articoli scientifici

- 1) Riflessioni sul metodo combinato ultrasuoni sclerometro (SonReb).
Presentato da: Giovanni Menditto, Stefano Bufarini, Vincenzo D'Aria - Università Politecnica delle Marche, Giacinto Porco - Università della Calabria.
Pubblicato da: Memorie del "15° Congresso C.T.E. - Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia". Bari 4-6 Novembre 2004.
- 2) Metodo combinato ultrasuoni- sclerometro (Sonreb): considerazioni e riflessioni.
Presentato da: Giovanni Menditto, Stefano Bufarini, Vincenzo D'Aria - Università Politecnica delle Marche - Giacinto Porco - Università della Calabria.
Pubblicato da: Atti della Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica - 11° Congresso Nazionale dell'AIPnD. Milano 13-15 Ottobre 2005.
- 3) Esempio di stima delle resistenze strutturali del calcestruzzo in opera mediante l'applicazione del metodo SonReb. Stefano Bufarini - Università Politecnica delle Marche.
Pubblicato da: Master Magazine Anno 2012 - numero 1, rivista ufficiale dell'associazione "Materials and Structures, Testing and Research".

Norme di riferimento:

- UNI EN 12504-4:2005 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici".