

**TECNICHE SPERIMENTALI INNOVATIVE PER IL CONTROLLO DEL
CALCESTRUZZO IN OPERA**

- G. Porco , G. Zaccaria, D Romano -

*** FACOLTÀ DI INGEGNERIA, UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA, ARCAVACATA DI RENDE (CS)**

*Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive
Monitoraggio Diagnostica*

11-12-13 Ottobre
PNP milano 2007



Tecniche sperimentali innovative per il controllo del calcestruzzo in opera

G.Porco, D. Romano*, G. Zaccaria**

** Dipartimento di Strutture, Facoltà di Ingegneria,
Università della Calabria, Italy.*

AUTORE DI RIFERIMENTO: Dolores ROMANO – E-mail: csaleph@tin.it

SOMMARIO

Il controllo dell'efficienza statica delle strutture costituisce oggi uno dei problemi maggiormente avvertiti nel campo dell'ingegneria civile. Tale argomento interessa diversi campi di indagine sperimentale, quali quello del controllo dei materiali e delle strutture, sia per strutture esistenti sia di nuova costruzione. In particolare, notevole impulso nel campo delle nuove strutture e delle nuove forme strutturali è oggi dato ad "informazioni di primo impianto" che possono essere utilizzate nel corso della vita utile, come parametri di comparazione per identificare eventuali scadimenti meccanici e variazioni geometriche. Molto investigati sono i calcestruzzi, che in tema di nuove strutture sono identificati con curve di correlazione e parametri meccanici. In tale contesto, estremamente utile, al fine di considerare stati di sollecitazione aggiuntivi sulle membrature resistenti, è la valutazione dell'effetto del ritiro.

Nel presente lavoro, attraverso una campagna sperimentale condotta su prototipi di trave in c.a., è stata verificata la possibilità di eseguire, tramite sistemi di controllo residenti, misure di deformazione per cogliere gli effetti prodotti dal ritiro.

Le misure effettuate tramite sensori a fibra ottica hanno consentito di valutare gli effetti previsti nel calcestruzzo durante la fase di maturazione avvenuta a contatto con l'aria nonché di predisporre una metodologia sperimentale attuabile su elementi in scala reale.

SETTORE APPLICATIVO PND: INGEGNERIA CIVILE

1. Introduzione

Il calcestruzzo è un conglomerato costituito da una miscela di legante idraulico (cemento), aggregati (sabbia, ghiaia), additivi, eventuali aggiunte minerali ed acqua. Il legante, idratandosi con l'acqua, indurisce e conferisce alla miscela una resistenza tale da renderlo simile ad una roccia. È oggi utilizzato per realizzare le parti strutturali di un edificio [7], [8].

Il notevole pregio riconosciuto al calcestruzzo dai suoi primi utilizzatori era la possibilità di ottenere rocce artificiali di qualsivoglia forma e la sua notevole diffusione si è avuta con l'avvento del cemento armato.

Il calcestruzzo possiede un'ottima resistenza a compressione ma scadente resistenza a trazione e questo ne ha limitato l'uso per millenni. Verso la metà dell'800 si incominciarono ad annegare delle barre di acciaio in matrici di calcestruzzo ottenendo così uno dei primi esempi di materiale composito in cui due differenti materiali contribuiscono in modo diverso a resistere alle varie sollecitazioni. L'acciaio, infatti, conferisce al composito quella resistenza a trazione e a flessione di cui è carente il calcestruzzo.

Negli ultimi decenni la tecnologia del calcestruzzo si è notevolmente evoluta in seguito all'introduzione di aggiunte minerali e additivi accessori che vanno a modificare comportamento e prestazioni delle miscele. Tale approccio è tipico di operatori e società specializzate nella produzione industrializzata e consegna del calcestruzzo. In seguito a tale sviluppo, solo in occasioni particolari o ambiti ristretti, il calcestruzzo viene ancora confezionato in cantiere.

Durante il periodo di presa e successivo indurimento, il calcestruzzo subisce una diminuzione di volume che dà luogo al cosiddetto fenomeno del ritiro che può provocare nel calcestruzzo la formazione di fessurazioni.

Il ritiro ed in particolare i suoi effetti costituiscono tuttora fenomeni poco indagati, sia dal punto di vista teorico sia da quello sperimentale.

Nel calcolo delle membrature resistenti di un edificio per civile abitazione, ad esempio, le sollecitazioni indotte dal fenomeno in parola non vengono portate in conto, assumendo una scarsa incidenza sui valori determinati in relazione a quelli prodotti dai carichi permanenti ed accidentali. La ragione che fonda tale ipotesi semplificativa risiede nell'entità delle dimensioni ordinarie degli elementi resistenti ed in particolare in quella longitudinale, facendo memoria della circostanza che il fenomeno del ritiro è in relazione diretta con l'entità della massa di calcestruzzo interessata.

Nel presente lavoro, viene proposta una metodologia innovativa finalizzata alla valutazione ed al controllo il fenomeno del ritiro, che fa utilizzo dei sensori a fibra ottica. Tale valutazione tende a far emergere altresì i termini quantitativi dell'approssimazione operata nel trascurare detto fenomeno.

2. Ritiro del calcestruzzo

2.1 Il fenomeno

Durante il periodo di presa e successivo indurimento il calcestruzzo subisce una diminuzione di volume che costituisce il fenomeno del ritiro [6], [9]. Tale fenomeno può provocare la formazione di fessurazioni che, in alcuni casi, si manifestano anche dopo alcuni anni dal getto.

Per limitare gli effetti del ritiro bisogna:

✓ *evitare la rapida evaporazione dell'acqua di impasto nei periodi di caldo eccessivo;*

✓ *limitare la quantità di acqua nell'impasto.*

Il ritiro è in relazione diretta alla quantità di cemento impiegata nella confezione del calcestruzzo ed inversa rispetto al diametro degli inerti.

In condizioni normali di stagionatura del calcestruzzo, il ritiro risulta compreso fra 0,1 e 0,4 mm per ogni metro e può essere distinto in due fasi:

✓ **ritiro iniziale**, *che avviene nelle ore successive al getto, in genere prima delle 24 ore, in cui l'evaporazione è tanto più elevata quanto maggiore è la superficie a contatto con l'aria. Il ritiro del calcestruzzo fresco è tanto più marcato quanto maggiore è la quantità di acqua nell'impasto. L'evaporazione di quest'acqua si traduce nell'assestamento del calcestruzzo e provoca microfessure interne e esterne nelle prime ore successive al getto.*

✓ **ritiro a lungo termine**, *che avviene nei giorni successivi al getto. Poiché l'idratazione totale del cemento fissa chimicamente solo il 25% del peso dell'acqua di impasto, il ritiro idraulico corrisponde ad una perdita di acqua non fissata qualora l'elemento si trovi in presenza di atmosfera secca. Peraltro, il cemento idrato si oppone all'avvicinamento dei grani per cui il fenomeno descritto diminuisce. Dall'atmosfera umida, l'elemento riprende una parte di acqua perduta e, quindi, una parte del suo volume iniziale.*

L'importanza del fenomeno del ritiro dipende dalla composizione del calcestruzzo e dal suo impiego. Poiché il ritiro interessa la pasta (acqua + cemento), risulta tanto più significativo quanto maggiore è il dosaggio del cemento ed è funzione della natura e della finezza di macinazione di quest'ultimo.

In un calcestruzzo, il fenomeno del ritiro è tanto minore quanto maggiore è la sua compattezza. In particolare, sia l'eccesso sia la mancanza di elementi fini dell'aggregato aumenta il fenomeno che comunque è tanto più significativo quanto più il diametro degli aggregati è ridotto.

In presenza di un corpo più massiccio il ritiro superficiale e quello interno avranno un comportamento diverso, con contrazioni differenti tra superficie e interno, spiegando così l'origine delle fessure che compaiono in superficie.

2.2 Conseguenze e rimedi

Le principali conseguenze del fenomeno del ritiro sono costituite da:

- ✓ *insorgenza di tensioni interne e di microfessurazioni, a svantaggio delle caratteristiche di resistenza del materiale. Queste tensioni possono essere di diversa entità in superficie ed all'interno.*
- ✓ *insorgenza di sollecitazioni nelle membrature di strutture iperstatiche, ordinariamente non considerate in sede di calcolo, per le ragioni indicate nell'introduzione, in assenza di puntuale conoscenza dell'entità dell'approssimazione operata caso per caso.*
- ✓ *formazione di fessure esterne visibili che compromettono la durabilità del calcestruzzo e ne danneggiano l'estetica. Se tali fessure sono abbastanza profonde e se riguardano le armature queste possono risultare esposte alla corrosione.*

Contro gli effetti e le condizioni gravose determinate dal ritiro è opportuno:

- ✓ *mantenere umida la superficie del calcestruzzo durante i primi giorni;*
- ✓ *prevedere nelle strutture "giunti di ritiro" abbastanza ravvicinati;*
- ✓ *confezionare un calcestruzzo compatto messo in opera ben costipato;*
- ✓ *utilizzare cementi a basso ritiro interno e a modesto calore di idratazione;*
- ✓ *utilizzare casseforme a forte conducibilità termica;*
- ✓ *impiegare inerti idonei, senza traccia di argilla, duri, arrotondati, con elevato modulo di deformazione, con scarsa percentuale di componente fine;*
- ✓ *prevedere armature di contrasto ad hoc nelle zone dei "punti fissi";*
- ✓ *evitare l'essiccamento rapido, dopo il getto, delle parti esposte all'aria e al sole.*

3. Campagna Sperimentale

Questa nota è espressamente dedicata alla presentazione dei risultati di una campagna sperimentale la quale ha avuto come obiettivo specifico la misura di deformazioni da ritiro effettuata tramite sensori alloggiati all'interno di prototipi di trave.

Tale sperimentazione è stata pianificata e realizzata al fine di verificare la possibilità d'uso dei sensori a fibra ottica residenti come strumento di valutazione e controllo del fenomeno del ritiro in membrature resistenti di strutture reali.

La trave oggetto di indagine è stata realizzata in calcestruzzo ($R_{ck}=300$ Kg/cm²) armato con acciaio $\phi 12$ per le armature longitudinali e $\phi 8$ per le staffe. L'acciaio è di tipo FeB 44K ad aderenza migliorata, le cui specifiche sono:

- $f_{yk} = 430$ N/mm² (tensione caratteristica di snervamento);
- $f_{tk} = 540$ N/mm² (tensione caratteristica di rottura).

La distinta delle armature è riportata nelle Figure 2 e 3.

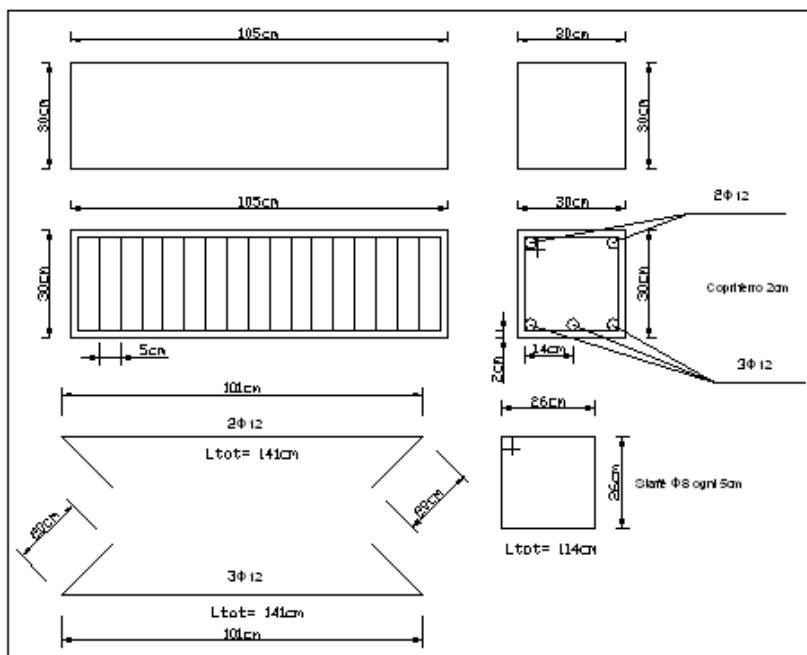


FIGURA 2 – Distinta delle armature



FIGURA 3 – Armatura prototipo di trave

Il calcestruzzo utilizzato è stato progettato attraverso le tecniche del mix design e la ricetta usata risulta [2], [3]:

- **Dosaggio del cemento:** $c = 373\text{Kg}/\text{m}^3$ con cemento 32,5 MPa
- **Volume dell'acqua:** $V_a = 148\text{litri}/\text{m}^3$
- **Volume aggregato:** $V_{agg.} = 660\text{litri}/\text{m}^3$
- **Peso aggregato:** $P_{agg.} = 1872\text{Kg}/\text{m}^3$
- **Contributo sabbia (47 %)** $\Rightarrow 1872 \cdot \frac{47}{100} = 880\text{Kg}/\text{m}^3$
- **Contributo P1 (22 %)** $\Rightarrow 1872 \cdot \frac{22}{100} = 412\text{Kg}/\text{m}^3$
- **Contributo P2 (31 %)** $\Rightarrow 1872 \cdot \frac{31}{100} = 580\text{Kg}/\text{m}^3$.

Nella trave sono stati installati due sensori a fibra ottica (Fig. 4). Uno nella parte inferiore e in particolare in aderenza all'armatura centrale; l'altro nella parte superiore. Entrambi paralleli all'asse longitudinale della trave.

Tali sensori sono caratterizzati dai parametri riportati nella Tabella 1 e Figura 5.

TABELLA 1 – Trave: caratteristiche sensori SOFO®

Sensor name	LA [m]	LP [m]	DL [mm]	DL _{min} [mm]	DL _{max} [mm]
5121 (zona inferiore)	0.3	5.0	11.016	9.709	14.209
5122 (zona superiore)	0.3	5.0	10.512	9.103	13.603

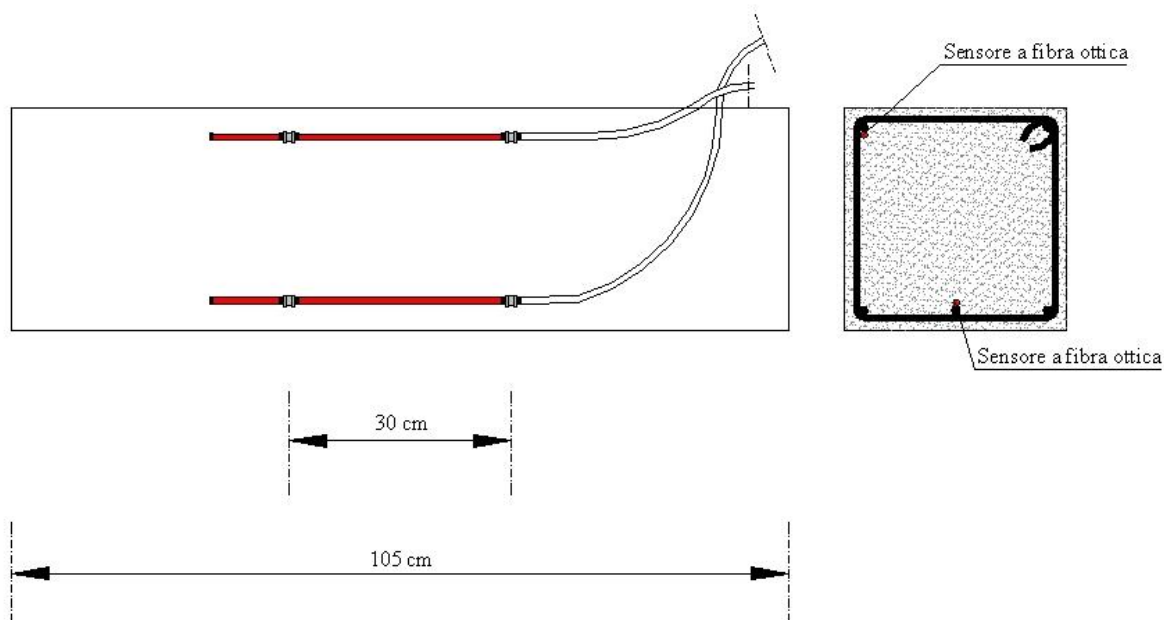


FIGURA 4 - Trave: disposizione delle fibre ottiche



FIGURA 5 - Trave: fase di montaggio delle due fibre ottiche

Installati i sensori a fibra ottica, si è proceduto, prima del getto, ad un controllo per verificare i valori di DL relativi a ciascuna fibra, con l'unità di lettura SOFO®.

Le misurazioni ottenute sono riportate nella Tabella 2.

TABELLA 2 – Misurazioni eseguite prima del getto

Prototipi	Sensor name	DL_{fabbrica}	DL_{misurati}
<i>Trave</i>	<i>5121</i>	<i>11.016</i>	<i>11.449</i>
<i>Trave</i>	<i>5122</i>	<i>10.512</i>	<i>10.445</i>

Effettuate le misurazioni e accertato il funzionamento di ogni singolo sensore, è stato eseguito il getto del calcestruzzo (Fig.6) [4].



FIGURA 6 - Trave: getto del calcestruzzo

TABELLA 3 – Misurazioni eseguite dopo il getto

			Prima del	Dopo il getto
Prototipi	Sensor name	DL_{fabbrica}	DL_{misurati}	DL_{misurati}
<i>Trave</i>	<i>5121</i>	<i>11.016</i>	<i>11.449</i>	<i>11.485</i>
<i>Trave</i>	<i>5122</i>	<i>10.512</i>	<i>10.445</i>	<i>10.486</i>

Complessivamente, la strumentazione utilizzata è stata la seguente:

- unità di lettura statica della SMARTEC SA;
- computer portatile per la gestione dell'unità di lettura attraverso il software SOFO SDB;
- due sensori standard a fibra ottica con lunghezza attiva pari a 30 cm.

Le misure effettuate con il sistema a fibra ottica hanno consentito di valutare l'effetto del ritiro nel calcestruzzo durante la fase di maturazione avvenuta a contatto con l'aria. Il diagramma relativo agli accorciamenti è di seguito riportato (Fig. 7):

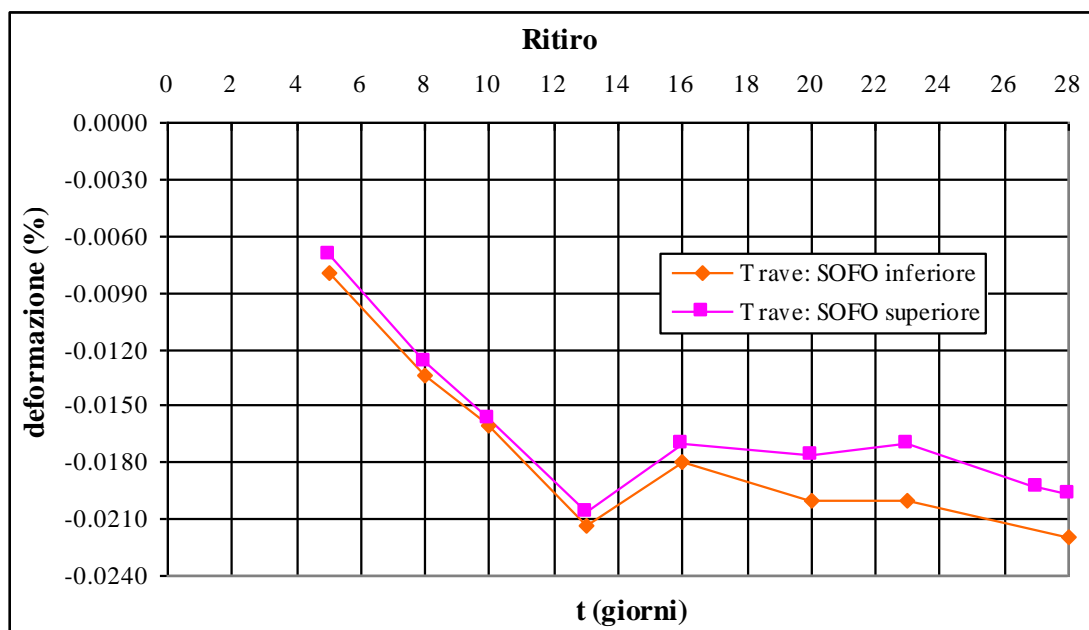


FIGURA 7 – Misure di deformazione indotte dal ritiro

Conclusioni

L'indagine sperimentale effettuata consente di attestare che il sistema di monitoraggio tramite sensori a fibra ottica residenti negli elementi strutturali può essere utilizzato in modo efficace ed affidabile per la verifica dei livelli di maturazione dei calcestruzzi armati ed in particolare del fenomeno del ritiro. Attesa la complessità di tale fenomeno, in quanto ai fattori che lo influenzano, i sensori ottici residenti, permettendo di valutare l'effetto del ritiro delle strutture in c.a. sia in termini di deformazioni sia in termini di tensioni indotte, offrono la possibilità di assumere in merito informazioni specificatamente relative alle strutture oggetto di indagine. Tale informazione ha una precisa traduzione in termini di degrado e dunque di sicurezza strutturale, quando si consideri che la fessurazione del calcestruzzo può determinare lo scoprimento delle armature. Il sistema di monitoraggio residente tramite sensori a fibra ottica, alla luce ed in forza della sperimentazione condotta con il presente lavoro, può costituire un efficace ed innovativo strumento per la misura sperimentale del fenomeno del ritiro. Esso può essere implementato su strutture civili reali per indagare il fenomeno su manufatti in c.a. di varia natura, quali edifici di tutti i tipi e manufatti infrastrutturali. Un particolare riferimento può essere posto alle strutture portuali o marittime, per le quali il fenomeno in parola si presenta di segno opposto laddove vi siano parti immerse in acqua. Per ciascuno dei casi indicati, la valutazione del fenomeno del ritiro può consentire di portare in conto in sede di calcolo statico di verifica le sollecitazioni indotte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *L. Binda, A. Saisi - Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale - DIS Dipartimento ingegneria strutturale, Politecnico di Milano*
- [2] *Mario Collepardi (2001) - Il nuovo calcestruzzo.*
- [3] *Vito Alunno Rossetti, Il Calcestruzzo – Materiali e tecnologia, McGraw-Hill Libri Italia s.r.l., Milano 2003.*
- [4] *UNI EN 12390-2 – Prova sul calcestruzzo indurito. Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza.*
- [5] *F. Braga, M. Dolce, A. Masi, D. Nigro, Valutazione delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi di bassa resistenza mediante prove non distruttive, L'Industria Italiana del Cemento n°3,1992, pp. 201-208.*
- [6] *Elio Giangreco Teoria e tecnica delle costruzioni vol. 1 – Liguori editore, Napoli 1982*
- [7] *R. Giacchetti, S. Bufarini, V. D'aria - Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e muratura , EPC Libri s.r.l., Roma 2005.*
- [8] *A. Masi, La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive, Il Giornale delle Prove non Distruttive. Monitoraggio Diagnostica, Anno XXVI, n° 1, aprile 2005, pp. 23-31.*
- [9] *D.M. Min. LL.PP. 16/1/1996 - Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche. Roma 1996.*