

Additivi “cristallizzanti” nel calcestruzzo

Dalla riduzione della permeabilità e del ritiro alla autoriparazione delle fessure (“crack self healing”)

Liberato Ferrara, Politecnico di Milano

Enricomaria Gastaldo Brac, Penetron Italia Srl

1. INTRODUZIONE

L'attuale situazione di strutture ed infrastrutture nei paesi industrializzati e la crescente domanda di esse nei paesi emergenti ed in via di sviluppo, alla luce tanto di condizioni ambientali e di utilizzo in continua evoluzione e, nel caso, caratterizzate da crescente severità, quanto delle esigenze di sostenibilità del quadro complessivo, pongono, in misura sempre più pressante, alla attenzione della comunità di professionisti che in tale contesto opera, le problematiche della durabilità di materiali, componenti e strutture. Nell'ambito dell'approccio prestazionale alla progettazione strutturale, alla base di tutte le più avanzate normative tecniche nazionali ed internazionali, il concetto di **durabilità** viene inteso come *la capacità dell'opera di soddisfare ai requisiti prestazionali richiesti, nell'ambito delle condizioni di utilizzo ed a fronte delle azioni previste, per tutta la vita di servizio, senza richiedere interventi di manutenzione e/o ripristino non programmati.*

Il calcestruzzo, come ben noto, è un materiale caratterizzato da una struttura porosa, con pori che si estendono dalla scala nanometrica a quella micro e millimetrica, quando non esacerbata da fattori esterni di errata posa in opera e cura dei getti. L'acqua, tanto in presenza di un gradiente di pressione quanto in assenza di esso per assorbimento capillare, può penetrare all'interno di tale struttura, innescando una serie di processi chimico-fisici che possono andare a detrimento della durabilità.

Il controllo della struttura porosa del calcestruzzo può ottenersi ad esempio attraverso i cosiddetti “supplementary cementitious materials” (ceneri volanti, fumi di silice, loppe etc.) caratterizzati da una distribuzione granulometrica più fine di quella del cemento: questi densificano la matrice, riducendo sia il volume complessivo dei pori sia il loro diametro e dunque contribuiscono a ridurre la permeabilità e l'ingresso di ioni potenzialmente aggressivi e a controllare i movimenti di acqua ed umidità all'interno del materiale, ripercuotendosi in maniera positiva sulla durabilità.

Negli ultimi decenni in tale quadro, accanto ai *supplementary cementitious materials* ovvero ad altri “filler” solidi, siano essi inerti (talco, bentonite, argille etc.) o chimicamente attivi (calce, silice colloidale) la cui azione si esplica secondo i medesimi meccanismi di densificazione della

matrice e raffinamento dei pori, si sono venuti affermando sul mercato anche specifici **additivi “riduttori” di permeabilità**. Questi possono essere distinti in additivi “*idrofobi*” ed additivi *cristallizzanti*.

I primi, costituiti da sostanze chimiche analoghe a quelle contenute nei saponi e negli acidi grassi ovvero a base di petrolio, non agiscono sulla struttura porosa ma fanno sì che sulla superficie dei pori stessi venga a depositarsi uno strato idro-repellente, che esplica in tal modo la sua azione idrorepellente. Gli additivi cristallini sono polveri, normalmente aggiunte a secco ai componenti solidi nella fase di miscelazione in dosaggi massimi pari a qualche punto percentuale del peso di cemento, i cui costituenti chimici si caratterizzano per una natura fortemente “idrofila”, che, reagendo con l’acqua, anche sotto forma di umidità atmosferica, danno luogo a composti cristallini che, da un lato, contribuisce ad aumentare la densità della fase di idrosilicato di calcio e, dall’altro, comunque riduce la porosità della matrice cementizia, opponendosi in tal modo alla penetrazione dell’acqua e delle sostanze aggressive da essa veicolate.

Numerose esperienze di laboratorio, eseguite negli ultimi anni, hanno verificato la capacità degli additivi cristallizzanti di agire efficacemente sulla struttura porosa della matrice cementizia di calcestruzzi, confezionati anche per diverse classi di esposizione ambientale, riducendo l’assorbimento e la penetrazione dell’acqua, tanto a pressione atmosferica quanto sotto pressione, e la penetrazione degli ioni cloruro.

È stata altresì verificata la capacità di tali additivi di agire positivamente nei riguardi del fenomeno del ritiro idraulico, riducendone l’entità e quindi, in presenza di vincoli che si oppongono alle deformazioni da ritiro, ritardando la comparsa delle fessure e limitandone l’ampiezza. Pure sono stati riscontrati evidenti benefici nel miglioramento delle prestazioni a fronte di cicli gelo-disgelo.

Ciò ha portato ad un uso sempre più esteso di tali additivi in calcestruzzi impiegati per la realizzazione di strutture esposte a significative sollecitazioni di tipo ambientale: fra le applicazioni recenti più significative vale la pena di citare, per complessivi 150.000 m³ di calcestruzzo confezionato con l’aggiunta dell’additivo cristallizzante PENETRON® ADMIX, le strutture interrato del Terminal 3 dell’aeroporto Changi di Singapore, costruito tutto su terreno sottratto al mare, le cui strutture si trovano dunque in condizioni di esposizione particolarmente severe. L’analisi di carote estratte da un muro contro terra appartenente ad una delle strutture interrato del terminal ha evidenziato la presenza dei prodotti di cristallizzazione sopra descritti, che l’analisi al microscopio elettronico a scansione ha rivelato essere costituiti principalmente da calcio, ossigeno e silicio, con tracce di zolfo ed alluminio (ettringite), nonché la presenza di cristalli di carbonato di calcio CaCO₃. La crescita di tali cristalli è stata evidenziata anche all’interno di fessure, presenti all’interno delle carote, fenomeno al quale è stato peraltro attribuito anche l’arresto di alcuni fenomeni di infiltrazione verificatisi immediatamente dopo la realizzazione del muro stesso. Ciò ha spinto ad impostare un programma di ricerca volto a verificare le capacità dei suddetti additivi di “risigillare” le fessure, grazie all’innesco dell’attività di cristallizzazione dei componenti chimici dell’additivo stesso a contatto con l’acqua, anche a seguito del completamento dei processi di idratazione.

Nel seguito di questo lavoro verranno presentati i primi risultati di tale ricerca, a seguito di una breve introduzione circa il fenomeno della autoriparazione delle fessure (crack self healing) nei compositi cementizi.

2. IL FENOMENO DEL SELF-HEALING NEL CALCESTRUZZO

La capacità di auto-riparazione dei compositi cementizi è nota da diverso tempo: il primo studio sistematico risale all'anno 1937, quando per primo Turner [01] riconobbe il verificarsi di questo fenomeno in diversi casi reali, quali per esempio di serbatoi e condotte idriche, pile da ponte e altri elementi strutturali prefabbricati, che risultassero danneggiati da impatti accidentali o da vibrazioni.

L'acqua, anche solo in forma di umidità atmosferica, è il parametro "attore" del fenomeno. Infatti, l'abilità dei compositi cementizi di auto-ripararsi dopo la formazione delle lesioni è dovuta principalmente ad una idratazione ritardata dei componenti della pasta cementizia presenti ancora allo stato anidro lungo le interfacce delle fessure e pronti a reagire con l'acqua, che penetra all'interno della fessura stessa. A causa di questa reazione sulla superficie delle fessure viene dunque a localizzarsi un nuovo processo di idratazione e i conseguenti prodotti di reazione che si formano si depositano lungo le facce della fessura stessa, venendo a ridurre la ampiezza e fino a raggiungere, eventualmente, anche la il completo ripristino della continuità.

I primi a spiegare i meccanismi del processo di auto-riparazione delle fessure furono Lauer e Slate [02], i quali dimostrarono che i materiali prodotti dalle reazioni di autoriparazione consistono essenzialmente di cristalli di idrossido di calcio e carbonato di calcio. Questi ultimi sono prodotti dalle reazioni tra l'idrossido di calcio, che è un prodotto del processo d'idratazione del cemento, con l'anidride carbonica presente nell'acqua o nell'aria. Il consumo d'idrossido di calcio sulla superficie delle fessure produce, per differenza di concentrazione, la sua migrazione dall'interno del cemento. Questo continua ad alimentare la produzione di carbonato di calcio e conseguentemente la precipitazione dei suddetti cristalli sulla superficie libera della fessura, con progressiva richiusura della stessa.

Hearn and Moorley [03] hanno evidenziato l'importanza della continuazione del processo di idratazione quale possibile motore del processo di auto-riparazione dei materiali cementizi. Affinché ciò possa verificarsi sono necessari non solo l'acqua ed i componenti cementizi non idratati ma anche lo spazio libero per i nuovi prodotti di idratazione. Secondo Neville [04], ciò può avvenire principalmente nella prima fase della maturazione, quando il calcestruzzo è giovane, le fessure sono più scabre, grazie anche ai bassi livelli di resistenza e tenacità della pasta cementizia, e possono così essere esposti alle condizioni ambientali esterne più ampi aggregati di particelle di cemento non idratate. Invece, nei calcestruzzi vecchi, il materiale che, a motivo dei processi di autoriparazione, viene a riempire le fessure consiste principalmente di carbonato di calcio, secondo quanto precedentemente descritto.

Sul fenomeno di auto-riparazione, oltre la presenza dell'acqua, e, se del caso, della anidride carbonica in essa disciolta, possono influire anche:

- *i costituenti del mix design* (Dhir et al. [05] hanno ad esempio riscontrato che l'auto-riparazione è certamente più efficace in presenza di maggiori quantitativi di cemento);
- *lo stato tensionale lungo le fessure e la stabilità degli stati fessurativi* ([06]);
- *la temperatura dell'acqua* (Reinhardt and Joos, [07], hanno ad esempio trovato che temperature più elevate favoriscono l'auto-riparazione);
- *l'alternanza tra le condizioni di saturazione con l'acqua e l'esposizione all'aria con diversi tassi di umidità relativa.*

Se da un lato i meccanismi del processo di auto-riparazione sono oramai ben noti e le reazioni che tale fenomeno producono sono state ampiamente ed esaustivamente caratterizzate dal punto di vista chimico, la valutazione quantitativa degli effetti del fenomeno sulle proprietà ingegneristiche del calcestruzzo e compositi cementizi ha ancora bisogno e merita uno studio più approfondito.

La maggior parte degli studi fin qui proposti [03], [08-10] si sono concentrati sulla variazione della permeabilità all'acqua e solo alcuni di essi (ad esempio, Dhir et al., [05]) hanno focalizzato l'attenzione sul recupero della resistenza.

Negli ultimi anni la questione dell'auto-riparazione è stata oggetto di rinnovato interesse scientifico, principalmente per due motivi.

Da un lato si è dato il via ad un fecondo e vasto campo di studio concernente l'utilizzo, al fine del processo di auto-riparazione, con l'aiuto di batteri [11], capaci di produrre carbonato di calcio il quale poi risigilla le fessure.

Dall'altra parte un nuovo campo di interesse è rappresentato dai Compositi Cementizi Fibro-Rinforzati ad Alte Prestazioni. (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HFRCC) i quali sono assai "inclinati" ad auto-ripararsi, a causa della loro composizione, caratterizzata dalla presenza di elevati quantitativi di cemento (o di sostituti del cemento) e da un basso rapporto acqua/cemento. Inoltre, il comportamento di tali materiali si caratterizza per la presenza, prima della localizzazione instabile del processo fessurativo, di un esteso campo di multi fessurazione stabile. A motivo di ciò infatti si ha una significativa quantità di particelle non idratate, caratterizzate da attività cementizia o pozzolanica, che viene esposta, lungo le superfici delle molteplici fessure che si formano, all'umidità atmosferica e che può potenzialmente innescare le reazioni caratteristiche del fenomeno di auto-riparazione. Inoltre, proprio a motivo delle limitate aperture delle singole fessure, è altresì verosimile che possa verificarsi la completa richiusura delle fessure, che, come risultato può portare a un recupero significativo ovvero totale della resistenza e della duttilità del materiale, in funzione delle condizioni di esposizione e del livello di danno preesistente [12].

Quanto sopra detto apre nuovi fronti d'interesse per l'uso degli HPFRCC nella riparazione delle strutture vecchie o danneggiate. Prima di tutto, perché gli HPFRCC sono materiali intrinsecamente più durevoli, grazie alla loro maggiore compattezza ed agli effetti dovuti alla presenza delle fibre, le quali limitano l'apertura della fessura e, in conseguenza, prevengono o

riducono la penetrazione degli agenti aggressivi. Inoltre, grazie alla capacità di auto-ripararsi, il materiale è in grado di recuperare le proprie originali caratteristiche di durabilità e resistenza, con interessanti ricadute, ad esempio, sul ciclo della vita utile della struttura.

Come detto i risultati della ricerca illustrati in questo lavoro concernono l'utilizzo di additivi "cristallizzanti" [13], quali promotori del fenomeno di auto-riparazione. Per quantificare la capacità di auto-riparazione e il suo effetto sul recupero delle proprietà meccaniche è stata sviluppata una metodologia sperimentale che sarà presentata in quest'articolo. Tale metodologia consiste nel pre-fessurare dei provini prismatici, realizzati con due tipi di calcestruzzo, con e senza l'additivo sopra indicato, fino a diversi livelli di apertura di fessura, mediante prove di flessione su tre punti eseguite in controllo di spostamento e misurando l'apertura di fessura. I provini, successivamente alla pre-fessurazione, sono stati esposti, per diverse durate, a cicli di temperatura e di umidità in camera climatica, a simulare in maniera accelerata le naturali condizioni di esposizione. Alla fine sono state rieseguite le prove di flessione su tre punti, istituendo quindi un confronto fra i risultati, in termini di carico-apertura di fessura, delle prove eseguite su provini "vergini" con quelli delle prove eseguite su provini pre-fessurati a seguito del trattamento termo-igrometrico. Questo permette di valutare in termini effettivi il recupero di apertura di fessura e di definire e quantificare opportuni "indici di auto-riparazione". È opportuno ricordare che i risultati, presentati in questo studio si riferiranno solo a condizioni di esposizione accelerate in camera climatica, definite quali rappresentative di un tipico clima invernale dell'Italia settentrionale, e rappresentano il primo passo di una più ampia campagna sperimentale in corso.

3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Lo scopo di questo studio è la valutazione della capacità di auto-riparazione delle fessura da parte di compositi a matrice cementizia nonché della affidabilità degli additivi "aero-cristallizzanti" sulla attivazione e sulla efficacia di tale fenomeno, quantificando il suo effetto sulle proprietà meccaniche del materiale. Per questo motivo sono stati realizzati due calcestruzzi, entrambi a normale resistenza normale, secondo il mix-design riportato in Tabella 1.

Per ciascun tipo di calcestruzzo sono stati realizzati 31 provini prismatici, di spessore 50 mm, lunghezza di 500 mm ed aventi una larghezza di 100mm. Dopo aver maturato nei casseri per 72h, i provini sono stati scasserati e posti in un ambiente a temperatura ed umidità controllate, rispettivamente pari a 20°C ed al 95%, ove sono rimasti per una stagionatura durata 35 giorni. Durante tutto questo periodo lo sviluppo della resistenza del calcestruzzo è stato monitorato mediante prove di compressione su cubi del lato di 150 mm, realizzati ad hoc. Non si sono riscontrate differenze significative tra il calcestruzzo con e quello senza additivo "aero - cristallizzante" (Figura 1), i quali hanno entrambi mostrato uno sviluppo delle resistenze congruente con la legge proposta nell'Eurocodice 2.

Al termine della maturazione, i provini realizzati con entrambi i tipi di calcestruzzo sono stati suddivisi ciascuno in tre gruppi; i provini dei primi due gruppi per ogni calcestruzzo, sono

stati pre-fessurati mediante una prova di flessione su tre punti (Figura 2), fino ad una apertura di fessura rispettivamente pari a 130 e 270 μm , mentre i provini del terzo gruppo sono stati lasciati integri. Nel corso delle prove di prefessurazione, eseguite in controllo di spostamento, la apertura di fessura (Crack Opening Displacement – COD) in corrispondenza della sezione di mezzeria è stata costantemente misurata mediante un clip-gauge.

Successivamente i provini sono stati posti in una camera climatica ed esposti a cicli di temperatura e umidità illustrati nella Figura 3. Ogni ciclo, della durata di sei ore vuole simulare in maniera accelerata un'intera giornata media della stagione autunnale nel Nord dell'Italia (si veda la Figura 4 per una registrazione delle temperature e dell'umidità durante il mese di novembre 2011 a Milano).

Tabella 1. Mix-design dei calcestruzzi impiegati nel presente studio.

Costituente	Senza additivo (kg/m^3)	Con additivo (kg/m^3)
Cemento 42.5 R tipo II	300	300
Aggregato fine 0-8 mm	975	975
Aggregato grosso 8-16 mm	975	975
Acqua (w/c)	165 (0.55)	165 (0.55)
Superfluidificante	3	3
Additivo aero-cristallizzante	=	3

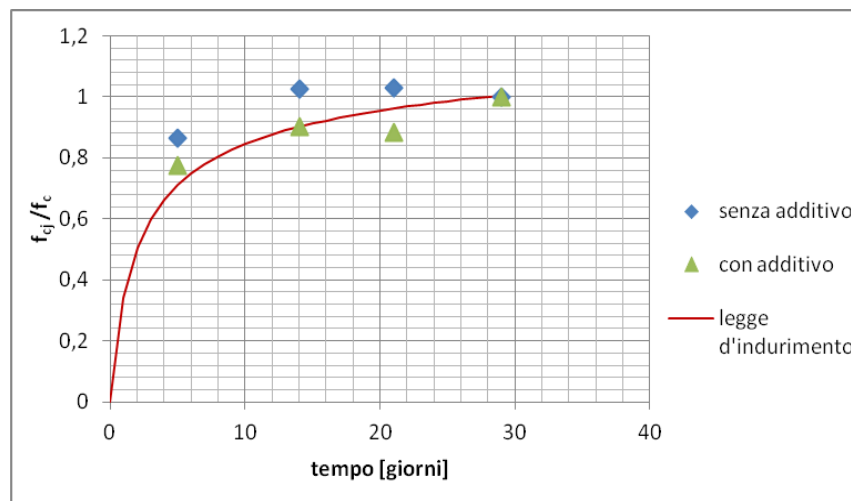


Figura 1. Sviluppo delle resistenze nel tempo e confronto con la legge da EC2



Figura 2. Set-up prova di flessione su tre punti

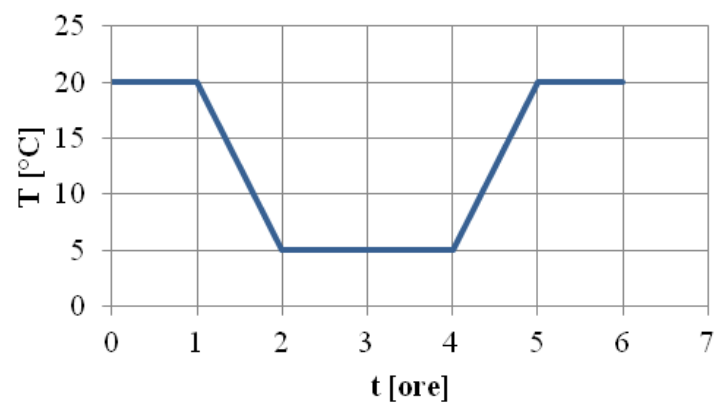


Figura 3. Ciclo termo-igrometrico in camera climatica

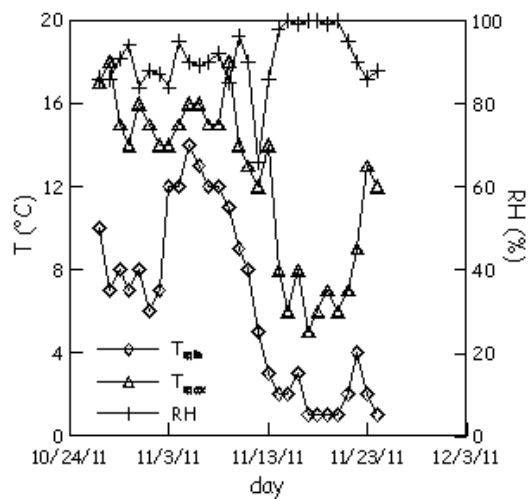


Figura 4. Temperatura e umidità registrate durante il mese di novembre 2011 a Milano

I provini hanno stazionato in camera climatica per una durata compresa fra 1 e 4 settimane, questo per simulare approssimativamente i 4 mesi della stagione. Dopo la fine della prima e della seconda settimana, un terzo di provini di ciascun gruppo (non fessurati, pre-fessurati alle aperture di fessura 130 μ e 270 μ , con e senza additivo) sono stati tolti dalla camera climatica, per essere poi sottoposti ad una prova di flessione su tre punti, sempre secondo quanto illustrato in Figura 2. Nella Figura 5 si propone una sinossi sulla distribuzione dei provini nei diversi gruppi, includendo anche due ulteriori gruppi di provini esposti all'aria ed immersi nell'acqua, per i quali l'indagine, estesa su tempi fino ad un anno, è tuttora in corso.

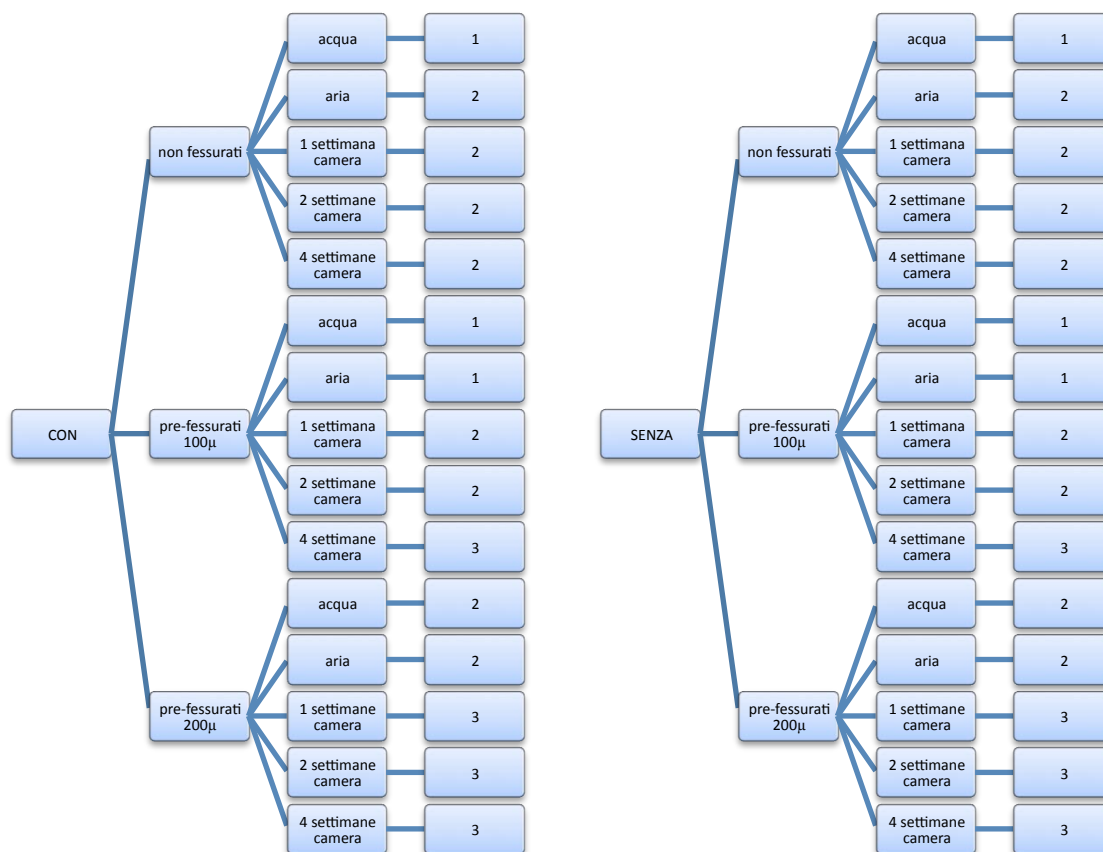


Figura 5. Sinossi del programma sperimentale

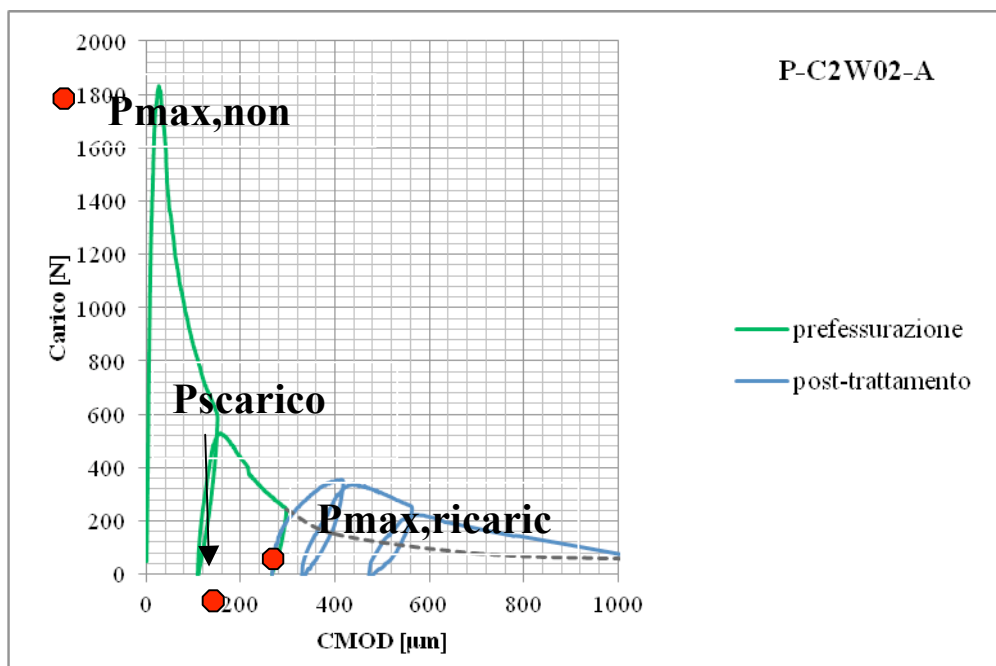


Figura 6. Esempio della curva Carico-Apertura di fessura (COD) ottenuta da una prova di flessione su 3 punti sullo stesso provino prima e dopo il “condizionamento termo-igrometrico”: evidenza del recupero della resistenza (a) dal confronto fra le due curve; proposta della procedura per valutare la ri-chiusura della fessura (b)

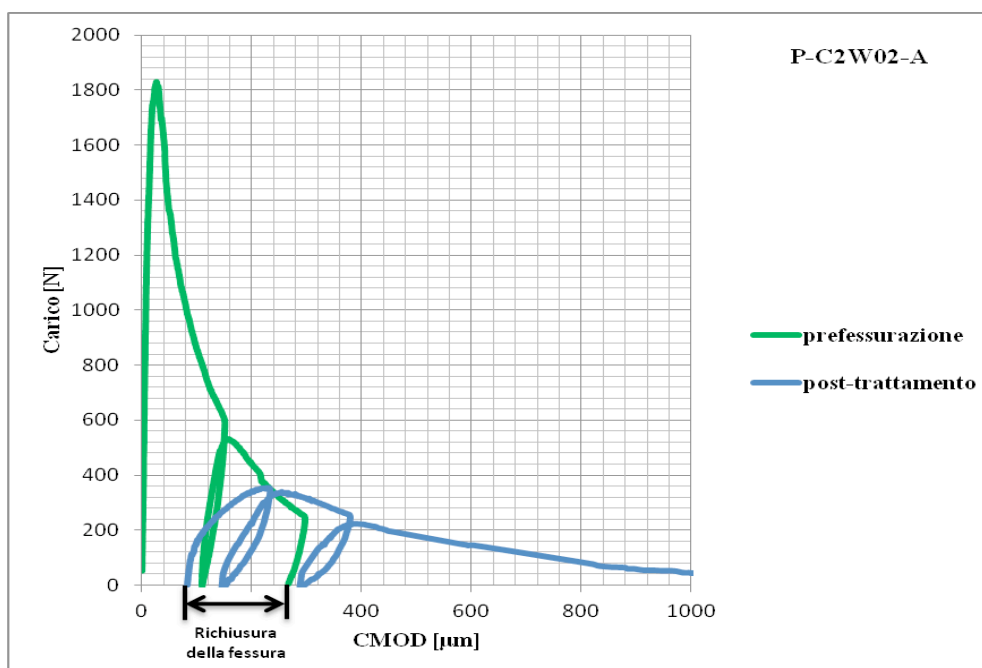


Figura 7. Influenza dell’esposizione nella camera climatica sulla resistenza a flessione dei provini prismatici non-fessurati

4. RISULTATI SPERIMENTALI

Nella Figura 6 si presenta un esempio di curve Carico-Apertura di Fessura, ottenute da una prova di flessione su tre punti eseguita sul medesimo provino, prima e dopo l'esposizione ai diversi cicli igro-termici nella camera climatica. Secondo la procedura di prova programmata, la curva ottenuta dalla prova eseguita dopo l'esposizione nella camera climatica, deve essere interpretata come un ricarico del provino, a seguito dello scarico, effettuato in corrispondenza della prevista apertura di fessura nella prova di prefessurazione e del successivo condizionamento termo igrometrico in camera climatica. È evidente, dalle curve esemplificative mostrate in Figura 6, che il provino manifesta un recupero di resistenza rispetto al livello di carico in corrispondenza del quale, nella prova di prima fase, era stato effettuato lo scarico, ed in corrispondenza del quale, per un ricarico contestualmente eseguito, il provino si sarebbe dovuto assestare, prima di seguire nuovamente il ramo di softening. È importante rilevare che tutti i campioni sottoposti a prova hanno evidenziato il sopradetto recupero della resistenza, certamente in funzione della presenza dell'additivo, della durata dell'esposizione al condizionamento termo igrometrico in camera climatica e della apertura di fessura, come verrà nel seguito illustrato.

Può essere verosimilmente ipotizzato che tale recupero della resistenza sia avvenuto grazie all'abilità del materiale di auto-ripararsi, che ha comportato la richiusura parziale della fessura realizzata precedentemente. Nella Figura 7 si può osservare un confronto, in termini di resistenza a flessione, tra i campioni provati alla fine del periodo di stagionatura, cioè prima di ogni tipo di esposizione o condizionamento igro-termico, ed i provini non-prefessurati e sottoposti invece al suddetto condizionamento: la assenza di sostanziali differenze mostra che lo sviluppo delle resistenze si è completato e che dunque il fenomeno del recupero di resistenza sopra osservato non possa essere in alcun modo imputato ad un prosieguo della idratazione stessa. Al contrario può essere credibilmente ipotizzato che a causa della fessurazione, il materiale non-idratato, comunque presente all'interno dei provini sia stato esposto, grazie alla fessurazione, all'umidità ambientale e che quest'ultima, grazie alla presenza dell'additivo aero-cristallizzante, abbia attivato le reazioni chimiche che caratterizzano il fenomeno dell'auto-riparazione.

Nel quantificare l'abilità dell'auto-ripararsi e gli effetti sottolineati in precedenza, è stata adottata la procedura descritta qui sotto. La curva Carico-Apertura di fessura ottenuta nella prova post-condizionamento termo igrometrico è stata traslata all'indietro lungo l'asse delle ascisse (Figura 7), finché il suo carico di picco interseca il ramo di softening della curva vergine. La ragionevole coincidenza dei due rami di softening, a seguito della suddetta traslazione, testimonia la affidabilità della procedura. È altresì opportuno richiamare ancora una volta che quanto sopra osservato, con riferimento al caso specifico illustrato in Figura 6b, è stato ottenuto per tutte le prove e per tutti i provini. La suddetta traslazione porta la curva carico-apertura di fessura "post-condizionamento" in una nuova origine, rispetto a quella originariamente assunta, pari alla apertura di fessura residua allo scarico misurata nella prova di pre-fessurazione del provino vergine. La entità di questa traslazione può essere utilizzata per quantificare la ri-chiusura della fessura, e il suo rapporto con il precedente

valore residuo della apertura di fessura può essere definito come Indice di Recupero (IR) o Indice di Auto-riparazione delle Fessure (Index of Crack Self Healing ICSH). I valori del suddetto Indice di Auto-riparazione delle Fessure, calcolati con riferimento ai diversi gruppi di provini oggetto di indagine, in funzione della presenza dell'additivo, dell'apertura di fessura e della durata dell'esposizione ai cicli di condizionamento termo igrometrico, sono sinteticamente illustrati nei grafici di Figura 8.

Valgono le seguenti considerazioni:

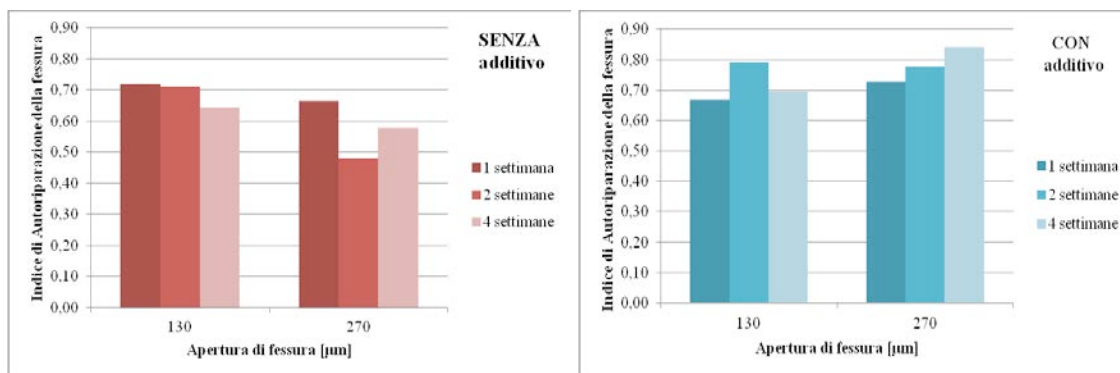
- un calcestruzzo di normale resistenza, anche con valore medio o alto del rapporto acqua/cemento, è in grado di sviluppare, dopo la convenzionale stagionatura dei 28 giorni, una capacità non trascurabile di auto-riparazione delle fessure; tale capacità è principalmente dovuta alla presenza di particelle di cemento non idratate sulle interfacce della fessura ed esposte all'acqua o all'umidità atmosferica, a seguito della formazione delle fessure stesse. In generale si osserva che la suddetta risulta essere abbastanza casuale e non influenzata, secondo una tendenza sistematica, dalla durata dell'esposizione ad elevati tassi di umidità; si osserva altresì che la suddetta capacità risulta, in termini relativi, inferiore per le maggiori aperture di fessura.
- l'aggiunta dell'additivo cristallizzante aumenta la suddetta capacità di auto-riparazione, che inoltre risulta chiaramente crescente all'aumentare della durata della esposizione ad elevati tassi di umidità ambientale, e, soprattutto, risulta essere non trascurabile anche per aperture di fessura significative, che possono, verosimilmente, esporre all'umidità atmosferica maggiori superficie di materiale anidro.

La consistenza e il significato dell'indice di recupero definito precedentemente sono chiaramente testimoniati dalla correlazione con altri parametri che possono rappresentativi del recupero delle caratteristiche meccaniche del materiale. Nella Figura 9 l'indice di recupero, ovvero di autoriparazione delle fessure, è stato assunto come variabile che governa il fenomeno di recupero della capacità portante, riferito alla resistenza residua sia del materiale vergine sia di quello pre-fessurato, e quantificato attraverso la definizione dei seguenti "Indici di recupero della capacità portante" (Indices of Load Recovery - ILR):

$$ILR1 = \frac{P_{\max, \text{ricarico}} - P_{\text{scarico}}}{P_{\text{ricarico}}} \quad (1a)$$

$$ILR2 = \frac{P_{\max, \text{ricarico}} - P_{\text{scarico}}}{P_{\max, \text{verGINE}}} \quad (1b)$$

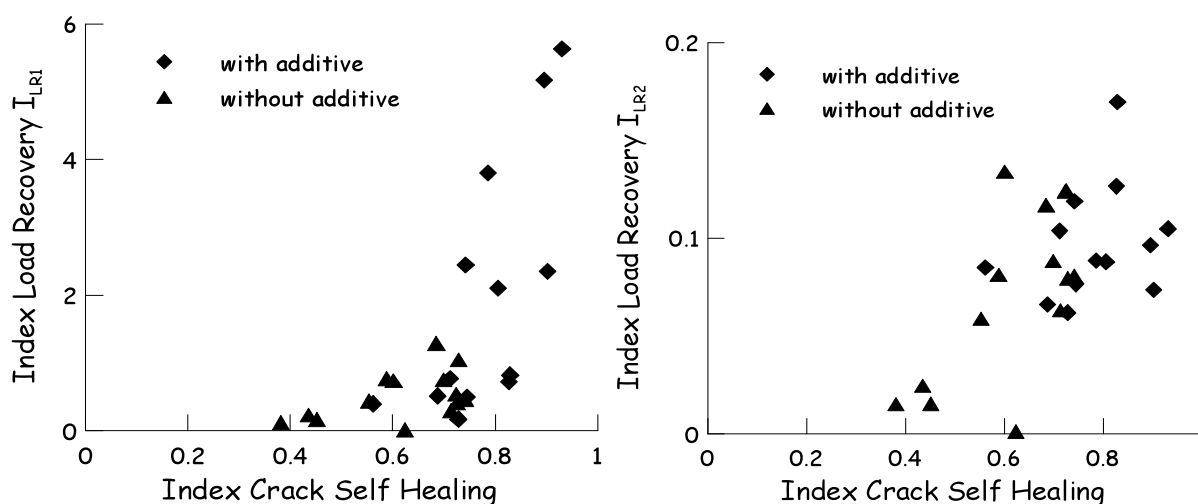
In entrambi i casi si osserva un significativo miglioramento nel recupero della capacità portante post-fessurativa grazie all'aggiunta dell'additivo; ciò è chiaramente attribuibile alla capacità dell'additivo di reagire con l'umidità atmosferica e con i prodotti di idratazione del cemento, formando quei prodotti di reazione in grado appunto di risigillare le fessure.



(a)

(b)

Figura 8. Indice di Autoriparazione delle fessure, per calcestruzzo con e senza (a-b) l'additivo cristallizzante, in funzione dell'apertura di fessura e durata dell'esposizione



(a)

(b)

Figura 9. Indici di recupero del Carico ILR1 (a) e ILR2 (b), definiti in Eq. (1), in funzione dell'Indice di Autoriparazione delle fessure

4. CONCLUSIONI

In questo studio si è indagata la capacità di autoriparazione di calcestruzzi con additivi cristallizzanti ed è stata proposta una metodologia per misurare e quantificare gli effetti dell'autoriparazione delle fessure sulle proprietà meccaniche del materiale. La metodologia consiste nel pre-fessurare inizialmente, mediante prove di flessione su tre punti, provini prismatici di calcestruzzo, fino a diversi livelli di apertura di fessura, ed esporli quindi condizioni ambientali reali od artificialmente ricreate per diverse durate temporali. Al termine dei suddetti periodi di esposizione i campioni vengono nuovamente provati fino a rottura, seguendo lo stesso procedimento usato nella pre-fessurazione. La capacità di autoriparazione è stata valutata ricercando l'adeguata intersezione delle curve carico-

apertura di fessura ottenute dai provini vergini e da quelli esposti alle diverse condizioni ambientali.

In quest'articolo sono stati presentati i risultati riferiti ad una esposizione corrispondente alle condizioni climatiche autunnali del nord dell'Italia, quale inizio di un più ampio programma di ricerca, tuttora in corso.

È stato mostrato che i compositi cementizi possiedono una intrinseca, se pur casuale, capacità di autoriparasi, entro certi limiti, dovuta principalmente alla continuazione del processo di idratazione di materiale anidro, favorita dalle giuste condizioni ambientali.

L'aggiunta di additivi cristallizzanti nel mix design del composito cementizio, migliora la suddetta capacità di auto-ripararsi, rendendola più affidabile e sistematica, fino a recuperare anche più dell'80% dell'apertura di fessura, grazie all'attivarsi, anche a seguito del completamento dell'idratazione del cemento, delle reazioni di cristallizzazione dei componenti dell'additivo stesso.

La metodologia proposta necessita di essere validata aumentando il numero delle variabili di indagine (diversi cicli igrotermici, esposizione naturale, immersione in acqua, cicli asciutto-bagnato in acqua salata o dolce etc.) ed attraverso la caratterizzazione microscopica delle interfacce della fessura per il riscontro dei prodotti delle reazioni di autoriparazione. Ciò contribuirà ad aumentare la conoscenza di un fenomeno di fondamentale importanza per la progettazione di strutture durevoli in calcestruzzo armato. Ciò altresì contribuisce ad introdurre una nuova valenza al concetto di sostenibilità delle costruzioni in calcestruzzo armato, grazie alla capacità del materiale, con una composizione opportunamente studiata e con l'utilizzo di specifici additivi, di recuperare, a seguito del fenomeno del self healing, pur parzialmente, gli originari livelli prestazionali, ciò riflettendosi in una estensione della vita utile della struttura.

BIBLIOGRAFIA

- [01] TURNER, L. "The autogenous healing of cement and concrete: its relation to vibrated concrete and cracked concrete", Proceedings of London Congress, International Association for Testing Materials, 1937, 344.
- [02] LAUER, K.R., SLATE, F.O. "Autogenous Healing of Cement Paste", ACI Journal 52 (6), 1956, pp.1083-1097.
- [03] HEARN, N., MORLEY, C.T. "Self-Sealing Property of Concrete - Experimental Evidence", Materials & Structures, 30 (8), 1997, pp. 404-411.
- [04] NEVILLE, A. "Autogenous Healing - A concrete miracle?", Concrete International, 24 (11), 2002, pp. 76-82.
- [05] DHIR, R.K., SANGHA, C.M., MUNDAY, J.G., "Strength and Deformation Properties of Autogenously Healed Mortars", ACI Journal. 70 (3), 1973, pp. 231-236.
- [06] NGAB, A.S., NILSON, A.S., SLATE, F.O., "Shrinkage and creep of high strength concrete", ACI Journal, 78 (3), 1981, pp. 225-261.
- [07] REINHARDT, H.W., JOOSS, M., "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width", Cement & Concrete Research, 33, 2003, pp. 981-985.

- [08] HEARN, N., "Self-Sealing, autogenous heal-ing and continued hydration: what is the differ-ence?", *Materials & Structures*, 31 (9), 1998, pp. 563-567.
- [09] EDVARSEN, C. "Water Permeability and Autogenous Healing of Crack in Concrete", *ACI Materials Journal*, 96 (4), 1999, pp. 448-454.
- [10] ALDEA, C.M., SONG, W.J., POPOVICS, J.S., "Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (2), 2000, pp. 92-96.
- [11] de BELIE, N., "Microorganisms vs. stony materials: a love-hate relationship", *Materials & Structures*, 43, 2010, pp. 1191-1202.
- [12] YANG, Y., LEPECH, M.L., TANG, E.H., LI, V.C., "Autogenous healing of Engineered Cementitious Composites under wet-dry cycles", *Cement & Concrete Research*, 39 (5), 2009, pp. 382-390.
- [13] ACI 212-3R-10, Report on chemical admixtures for concrete, ACI, 2010, 61pp.