

# **Capacità di auto-riparazione delle fessure in malte cementizie con additivi cristallini esposte ad ambienti ricchi di cloruri**

Ruben P. Borg<sup>1</sup>, Maddalena Zammit<sup>1</sup>, Daniel Giovio<sup>1,2</sup>, Estefanía Cuenca<sup>2</sup>, Enrico Maria Gastaldo Brac<sup>3</sup>, Liberato Ferrara<sup>2</sup>

1 University of Malta

2 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

3 Penetron Italia, srl.

## **SOMMARIO**

### **1. Introduzione**

Le strutture in calcestruzzo armato (CA) esposte ad attacchi marini e chimici presentano diversi problemi di durabilità dipendenti dal tempo, come l'invecchiamento e la corrosione, che richiedono interventi di riparazione precoci e spesso continui. L'analisi di un caso di studio fornito dal progetto CON-REP-NET ha dimostrato che il 50% delle strutture di calcestruzzo riparate ha mostrato necessità di una seconda riparazione, il 25% nei primi 5 anni, il 75% entro 10 anni e il 95% entro i successivi 25 anni. Questo è solo un esempio della urgente necessità di un profondo ripensamento dell'approccio concettuale alla progettazione delle strutture in CA nuove e riparate in ambienti aggressivi in considerazione delle esigenze di costo-efficacia.

Negli attuali approcci di progettazione, la durabilità della vita è definita da un valore obiettivo di riferimento che, attraverso un "concetto di classe strutturale" e in funzione della classe di esposizione, si traduce in una serie di prescrizioni ritenute adatte a garantire il livello di durabilità richiesto. Queste prescrizioni riguardano il quantitativo minimo di cemento ed il massimo rapporto acqua/cemento da impiegare per il confezionamento delle miscele, nonché lo spessore minimo di copriferro ovvero l'utilizzo di armature resistenti alla corrosione (ad esempio acciaio inossidabile, acciaio zincato o polimeri). Tutto ciò può portare ad una progettazione strutturale non ottimale, poiché le dimensioni complessive della struttura e l'efficienza strutturale del materiale sono compromesse dall'alto spessore del copriferro.

In questo contesto, la disponibilità di tecnologie di auto-riparazione del calcestruzzo potrebbe, da un lato, impedire la "diffusione dei fattori base per il deterioramento", estendendo così la vita utile della struttura e, dall'altro, anche fornire un recupero parziale di proprietà ingegneristiche rilevanti per l'applicazione in essere [1,2].

La capacità di autoriparazione dei conglomerati cementizi, così come di altri leganti idraulici come lime, è nota, per via "euristica" da circa due secoli.

La suddetta capacità, in funzione dell'età e della apertura della fessura, nonché di una presenza significativa, se non continua, di acqua, è stata considerata come una sorta di bonus, in grado di contrastare, nel caso, gli inconvenienti di fessurazione precoce, dovuta al ritiro del calcestruzzo, in alcuni tipi di strutture, quali ad esempio i serbatoi, che evidentemente godono di condizioni favorevoli di esposizione.

Sebbene siano stati condotti studi più sistematici per tutta la seconda metà del secolo scorso, l'argomento sta acquisendo notevole interesse in questi ultimi anni. Ciò è dovuto, da un lato, alla drammatica importanza che la durabilità delle strutture in CA esistenti sta acquistando, non solo

nella comunità scientifica e tecnica, ma anche in riferimento alla consapevolezza e alla sensibilità dell'opinione pubblica. D'altra parte, l'interesse per i materiali da costruzione basati sul cemento auto-riparante è guidato dall'impegno di sostenibilità che la domanda crescente di costruzioni, strutture e infrastrutture richiede in tutto il mondo al settore dell'ingegneria civile ed all'industria delle costruzioni.

È noto che, tra tutte le condizioni ambientali, le esposizioni concentrate di cloruri come gli ambienti marini sono uno dei più gravi e aggressivi (Li, 2011; Tsinker, 1995, Maes, 2014a). Finora la grande maggioranza degli studi sulla permeabilità dei calcestruzzi autoriparanti, in stadio fessurato, si è concentrata su acqua dolce (Edvarsen et al., 1999; Yang et al., 2009; Aldea et al., 2000; Roig-Flores et al., 2016). Solo un ridotto numero di studi ha riguardato la autoriparazione delle fessure in calcestruzzi esposti ad ambiente marino, secondo quanto qui di seguito sintetizzato.

Jacobsen (1996) ha osservato che il tasso di migrazione di cloruro nei calcestruzzi auto-riparati immersi nell'acqua per 3 mesi è stato ridotto del 28-35% e il tempo di penetrazione dei cloruri è aumentato rispetto ai calcestruzzi appena fessurati. Sahmaran (2007) ha osservato una significativa auto-guarigione per fessure con ampiezze minori di 50 $\mu$ m, in provini di malta dopo 30 giorni di esposizione ad una soluzione di NaCl. La formazione di prodotti di guarigione all'interno delle fessure di calcestruzzo ha rallentato il processo di trasporto dei cloruri, diminuendone il tasso di penetrazione e riducendo il valore del coefficiente di diffusione. Ismail (2008) ha anch'egli dimostrato che il fenomeno di autoriparazione delle fessure può impedire la diffusione di cloruro attraverso le stesse. Per ampiezze di fessura superiori a 60 $\mu$ m l'età della prefessurazione non influisce sulla capacità di auto-riparazione per prevenire la diffusione di cloruro. Al contrario, per fessure con ampiezze inferiori a 60 $\mu$ m, l'età della prefessurazione ha un effetto significativo. Li (2011) ha osservato che le microfessure in compositi cementizi (ECC) ingegnerizzati, immersi in una soluzione a 3% di NaCl per 30 giorni o più, risultano completamente sigillati a seguito della autoriparazione. Questi risultati hanno confermato che anche i campioni ECC microfessurati rimangono resistenti nonostante le esposizioni in ambiente marino. Maes (2014b) ha rilevato che ampiezze di fessura di 100 $\mu$ m e 300 $\mu$ m sono state guarite autonomamente, ove esposte in ambienti ricchi di cloruri, rispettivamente nel 67% e nel 33% dei casi. Palin (2016) ha scoperto che i trattamenti a base di batteri possono avere un grande potenziale per lo sviluppo della auto-guarigione del calcestruzzo in ambienti marini a bassa temperatura. Savija (2016) ha riscontrato che fessure inferiori a 60 $\mu$ m hanno completamente recuperato la loro resistenza alla penetrazione dei cloruri (completa guarigione della fessura), mentre le fessure più ampie hanno solo ripristinato la loro capacità di resistere all'ingresso di cloruro. Maes (2016) ha mostrato che le fessure in malte cementizie esposte a ambienti marini sono in grado di guarire e stabilizzare la penetrazione di cloruro per aperture fino a 100 $\mu$ m.

Dong (2017) ha calcolato il coefficiente di diffusione ai cloruri è diminuito da 8,15 a 6,53 ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>) a seguito di un processo di autoriparazione delle fessure protratto per 28 giorni. Ling (2017) ha mostrato che trattamenti microbici per la autoriparazione delle fessure possono avere efficacia anche nell'impedire l'ingresso di cloruri. Van Belleghem (2017) ha dimostrato che l'uso di calcestruzzo auto-riparante può ridurre la concentrazione di cloruro in una zona fessurata di almeno il 75%.

Per una sintesi delle metodologie di prova relative alla valutazione della capacità di autoriparazione dei calcestruzzi in ambienti ricchi di cloruro si vedano Cuenca e Ferrara (2017), Muhammad (2016) e Yao (2017).

Gli attuali codici di progettazione (Eurocodice 2, ACI 224R, 2001) prescrivono limiti di apertura piuttosto severi in condizioni ambientali aggressive, quali l'esposizione ad ambienti

marini. L'auto-riparazione, come già sottolineato, può estendere la vita utile delle strutture in calcestruzzo creando una barriera protettiva contro l'ingresso di cloruri (Maes, 2016; Van de Heede; 2016a; Van de Heede, 2016b; Van Belleghem, 2017). Diversi studi hanno altresì dimostrato che se una parte del cemento viene sostituita da ceneri di combustibile, ovvero con loppe granulate di altoforno, il calcestruzzo ottenuto presenta una maggiore resistenza alla penetrazione del cloruro (Chalee, 2009; Boga, 2012; Darquennes, 2016; Maers, 2016; Van den Heede, 2017). Inoltre, i test di permeabilità dell'acqua hanno mostrato una maggiore capacità di guarigione per le miscele con scorie di altoforno, a causa dell'idratazione continua all'interno delle fessure (Darquennes, 2016).

Van den Heede et al. (2016a) ha valutato la durabilità del calcestruzzo utilizzando i modelli di previsione per la depassivazione indotta da cloruro delle barre di acciaio inserite in calcestruzzo. L'input per il modello di vita utile è stato ottenuto da risultati sperimentali sui profili di penetrazione degli ioni cloruro. Ciò ha permesso una buona previsione del periodo di depassivazione dell'acciaio indotto dal cloruro per il calcestruzzo con il 15% di ceneri di combustibile: nello stato non fessurato e nello stato fessurato. Nel caso di calcestruzzo auto-riparante, contenente resine poliuretatiche incapsulate, è stata ottenuta un'efficienza del 48-76%, estendendo il periodo di inizio della corrosione a 36-68 anni. Una struttura in calcestruzzo con poliuretano incapsulato richiederebbe meno riparazioni e quindi l'impatto ambientale risulterebbe di circa l'80% inferiore rispetto al calcestruzzo tradizionale (fessurato). Van Belleghem et al. (2017) ha osservato che una piastra di calcestruzzo auto-riparante, con armatura convenzionale ed esposta a un ambiente marino, potrebbe avere una vita utile di servizio di 60-94 anni rispetto ai 7 anni di calcestruzzo tradizionale fessurato incorporando un precursore in poliuretano incapsulato come agente di autoriparazione nel calcestruzzo.

In questo articolo vengono presentati i primi risultati di uno studio svolto in collaborazione dal gruppo di ricerca degli autori per valutare la capacità di sigillatura delle miscele di diversi tipi di malte, quando sono esposte a ambienti con cloruri. Oltre ad una malta di riferimento, sono state considerate altre tre categorie di miscela, al fine di promuovere la sigillatura della fessura mediante sostituti del cemento (ceneri di combustibile polverizzate e fumi di silice) o mediante additivi cristallini, la cui efficacia come promotori di auto-guarigione, è già stata documentata con riferimento a miscele di calcestruzzo armato e fibrorinforzato (Ferrara et al., 2014, 2016a).

Per ogni aggiunta, sono stati presi in considerazione diversi contenuti onde selezionare la miscela con migliori prestazioni, anche con riferimento considerazioni economiche, da utilizzarsi per il presente studio.

## **2. Programma sperimentale**

Come appena detto, è stato studiato l'effetto di diversi sostituti di cemento e additivi sulla capacità di auto-riparazione delle malte in ambienti ricchi di cloruro. In dettaglio:

- Ceneri di combustibile polverizzate, impiegate come sostituzione di cemento in rapporti di massa diversi, pari a 0.10, 0.20, 0.30 e 0.40;
- Fumo di silice, impiegato come sostituzione di cemento in rapporti di massa diversi, pari a 0.05, 0.10 e 0.15;
- Additivi cristallini impiegati in percentuali pari allo 0.5%, all'1% e all'1.5% del peso del cemento.

Le proporzioni delle miscele sono riassunte nella Tabella 1.

Si può osservare che il rapporto acqua/polvere (A/P) è sempre stato mantenuto costante a 0.55. Ciò è stato riferito all'acqua libera aggiunta, che è stata ulteriormente corretta per la capacità di assorbimento degli aggregati impiegati. Vale la pena notare che questo rapporto (A/P) può sembrare alto se si riferisce al valore massimo raccomandato dai codici di progettazione correnti per l'esposizione al cloruro (0.45 - vedi EN 1992-1-1).

Comunque, la scelta è stata motivata per riprodurre la pratica indesiderata ma spesso presente in diversi siti di costruzione consistente nell'aggiunta di acqua, ad esempio in autobetoniera, poco prima del getto del calcestruzzo per compensare le perdite di lavorabilità in caso di tempi lunghi o ritardi.

Per quanto riguarda il materiale:

- È stato impiegato cemento CEM II 42.5 R;
- La cenere di carbone polverizzato (PFA) è stata raccolta dalla vecchia centrale elettrica di Marsa, Malta, alimentata a carbone. Il PFA è un sottoprodotto dalla combustione del carbone e circa 50.000 tonnellate di PFA sono state scaricate in una cava non utilizzata a Bnghajsa e lasciate a rifiuto. In questo modo, l'utilizzo di tali materiali, polveri tossiche molto fini, presenta evidenti benefici ecologici. In questo lavoro la polvere è stata vagliata con un setaccio da 0.32 micron prima del getto, in quanto ricoperta da uno strato di sedimenti alla cava.
- Fumo di silice (FS): è stato utilizzato Sikacrete® 950 DP, in questo caso fornito da Polidano Brothers.
- Additivo cristallino (AC): è stata impiegata la miscela Penetron Admix® fornita da Penetron Italia; per una descrizione completa del prodotto si faccia riferimento a Ferrara et al. (2014).
- Aggregato fine: è stata utilizzata una sabbia calcarea con un diametro massimo di 4 mm, ottenuta da una cava in WiedFilep, limiti di Naxxar, Malta, fornita da Ballut Blocks Ltd. I test di assorbimento dell'acqua, eseguiti su diversi campioni, hanno portato a misurare un valore di assorbimento abbastanza elevato, pari al 10%, confermato ulteriormente dal fornitore, e dovuto alle caratteristiche geologiche della formazione della roccia della cava.
- Acqua: è stata utilizzata acqua potabile dell'acquedotto di Malta.

Sono stati prodotti dei campioni cilindrici di 200 mm di altezza e di diametro pari a 100 mm, tagliati ulteriormente in due metà di 100 mm di altezza. I campioni sono stati curati per 21 giorni in acqua a temperatura controllata (20 °C). Alla fine del periodo di cura, i campioni sono stati pre-fessurati a trazione mediante prova brasiliana (splitting test), eseguita in controllo di spostamento e misurando l'apertura della fessura del diametro mediante un LVDT. Sono stati indotti tre diversi valori di apertura della fessura:

- fessure poco ampie, nell'intervallo 0.10-0.15 mm, le variazioni dovute al diverso recupero elastico dei provini al momento della rimozione dei carichi di prefessurazione;
- fessure medie, nell'intervallo da 0.2 a 0.3 mm;
- fessure grosse, con ampiezze maggiori di 0.3 mm, che rappresentano un vero e proprio danneggiamento strutturale che, anche se evitato nel calcolo progettuale, può verificarsi a causa di eventi accidentali imprevedibili.

Dopo la prefessurazione, i campioni sono stati esposti ai seguenti sei diversi ambienti per un periodo di 84 giorni (circa tre mesi):

- esposizione all'aria aperta nel cortile dell'Università di Malta;
- immersione continua in acqua distillata a 20 °C;

- esposizione a cicli asciutto/bagnato alternando 12 ore di essiccazione in laboratorio e 12 ore di immersione in acqua distillata;
- immersione continua in una soluzione di cloruro di sodio, con concentrazione pari a 33 g/litro, simulando l'acqua del mare;
- esposizione a cicli asciutto/bagnato alternando 12 ore di essiccazione in ambiente di laboratorio e 12 ore di immersione in soluzione di cloruro di sodio ad una concentrazione pari a 33 g/litro;
- esposizione a cicli asciutto/bagnato alternando 12 ore di essiccazione in ambiente di laboratorio e 12 ore di immersione in soluzione di cloruro di sodio a una concentrazione pari a 165 g/litro; come sperimentato in strutture dove vengono utilizzati sali disgelanti.

La apertura di fessura in tutti i campioni è stata misurata dopo la prefessurazione, prima di iniziare con il periodo di condizionamento, acquisendo un panorama completo della fessura mediante un microscopio digitale Dynolite. Sette micrografie sono state prese per ciascun campione e successivamente assemblate per coprire completamente l'intera fessura, secondo la procedura descritta in Roig Flores et al. (2015). La apertura della fessura è stata misurata mediante l'analisi di immagini digitali a sette punti lungo la sua lunghezza e la ampiezza media è stata considerata come riferimento. La procedura, come da precedenti esperienze (vedi anche Ferrara et al., 2016) ha ben dimostrato di fornire risultati stabili e affidabili.

Dopo 21, 56 e 84 giorni di esposizione nei suddetti ambienti, l'apertura della fessura è stata nuovamente misurata secondo la procedura appena descritta e la sigillatura della fessura è stata valutata visivamente e quantificata come verrà descritto più avanti.

La matrice nella Tabella 2 fornisce una sinossi del programma sperimentale nel suo complesso. Per ogni caso sono stati testati tre esemplari identici.

Inoltre, per tutte le miscele di malte impiegate, le prestazioni in stato fresco sono state misurate mediante la prova di spandimento (flow-table test), impiegando il cono di mini-slump. Lo sviluppo della resistenza alla compressione è stato sperimentalmente misurato in età diverse, fino a 84 giorni, su cubi di 150x150x150mm, gettati insieme ai cilindri come indicato sopra.

### **3. Risultati sperimentali**

#### *3.1. Prestazioni allo stato fresco*

Nella Tabella 3 sono riportati i risultati delle prove di spandimento (diametro medio) delle malte oggetto di indagine. Come previsto, mantenendo costante il rapporto (A/P), un aumento del contenuto di ceneri di combustibile e fumo di silice determina una riduzione della fluidità, a causa della maggiore finezza, superficie specifica e assorbimento dell'acqua dei sostituti del cemento impiegati. Gli additivi cristallini influenzano in modo trascurabile la fluidità. Comunque, tranne nel caso del rapporto di sostituzione del PFA / cemento del 40%, tutte le malte hanno avuto una buona fluidità.

#### *3.2. Resistenza alla compressione*

Per quanto riguarda la resistenza a compressione e il suo sviluppo nel tempo, i risultati mostrati nella Figura 1 a-c, confermano la conoscenza ben consolidata sugli effetti delle aggiunte pozzolaniche e degli additivi cristallini. È interessante notare che a 28 giorni la maggior parte delle malte ha una resistenza a compressione pari a circa 25 MPa, che è coerente con riferimento al rapporto (A/P) impiegato.

#### *3.3. Sigillatura delle fessure*

Dopo la valutazione preliminare degli effetti della sostituzione del cemento e dell'aggiunta di additivo cristallino sullo stato fresco e indurito delle diverse miscele, è stato deciso di concentrare la ricerca sulla guarigione solo sulle seguenti miscele:

- Con il 20% di massa di cemento sostituito da ceneri di combustibile
- Con il 15% di massa di cemento sostituito da fumo di silice
- Con 1% di massa di cemento sostituito da additivo cristallino

Mentre la scelta del dosaggio di fumo di silice può essere giustificata dalle migliori prestazioni anche se un tale dosaggio elevato potrebbe essere difficilmente utilizzato nella pratica per ragioni di costo, quella con riferimento alle ceneri di combustibile può essere spiegato come segue.

La capacità di auto-sigillatura in questo caso è dovuta all'attività pozzolanica delle ceneri di combustibile, che comunque ha bisogno di idrossido di calcio, quest'ultimo viene prodotto dalle reazioni di idratazione del cemento. Con un elevato rapporto di sostituzione PFA/cemento, la quantità di cemento reattivo è minore e quindi l'attività pozzolanica delle ceneri è anche rallentata e ridotta.

Lo stesso motivo può essere chiamato a giustificare la scelta del dosaggio di additivo cristallino, per il quale si è osservata una sorta di saturazione della capacità di autoriparazione per quantità superiori all'1% del peso del cemento. Infatti, le particelle altamente idrofile dell'additivo cristallino reagiscono con l'acqua e i prodotti di idratazione del cemento per produrre idrosilicato di calcio idrato, la reattività essendo governata dalla disponibilità di prodotti di idratazione in cemento e dalla cinetica dell'idratazione.

### 3.3.1 Indice di sigillatura delle fessure

L'efficacia della capacità di sigillatura delle fessure è stata valutata, a partire dalle misurazioni della apertura della fessura raccolte come sopra descritto, calcolando per ciascuna delle situazioni sperimentate, l'Indice di Sigillatura delle Fessure (ICS – Index of Crack Sealing in inglese), definito come segue:

$$ICS = 1 - \frac{w(t_i)}{w_0} \quad (1)$$

dove  $w(t_i)$  e  $w_0$  sono la apertura della fessura nel tempo  $i$  (tempi di condizionamento diversi, come sopra indicato) e immediatamente dopo la prefessurazione (tempo di condizionamento zero).

### 3.3.2 Influenza della composizione della miscela - esposizione continua all'immersione

I risultati mostrano la evoluzione dell'Indice di Sigillatura della Fessura nel tempo, separatamente per le tre diverse gamme di aperture di apertura considerate e per le diverse condizioni di esposizione studiate. In prima analisi si è fatto riferimento alle due condizioni di immersione continua in acqua, sia distillata sia contenente 33 g/litro di cloruro di sodio.

Con riferimento all'immersione in acqua distillata, per ampiezze di fessura sia piccole sia intermedie, tutte le miscele raggiungono, dopo 84 giorni e in alcuni casi anche prima, la completa chiusura della fessura (Figura 2a-c). Ciò può essere osservato anche dalle immagini in Figura 3. La cinetica della chiusura della fessura misurata è diversa: mentre per le piccole aperture di fessura la miscela di riferimento e quella con PFA presentano la sigillatura più veloce, per le aperture di fessura intermedie la miscela contenente additivo cristallino subisce la sigillatura più rapida della fessura. Ciò è coerente con i risultati ottenuti da Ferrara et al. (2014)

per simili intervalli di apertura della fessura ed è stato spiegato considerando che fessure più ampie espongono all'acqua maggiori quantità di materiale idrofilo e reattivo. L'effetto globale è dunque una combinazione sinergica della reattività dell'aggiunta stessa con prodotti di idratazione dell'acqua e del cemento (idrossido di calcio) e della sua azione catalitica per un'ulteriore idratazione del cemento. Per altre miscele, basandosi sull'idratazione ritardata del cemento o sulla reazione pozzolanica dei sostituti del cemento, fessure più grandi corrispondono a una cinetica di sigillatura più lenta. Coerentemente con questa ipotesi, per le grandi ampiezze di fessura, l'additivo cristallino, nonostante un inizio iniziale più lento, presenta la velocità di sigillatura più elevata alla fine del periodo di osservazione di 84 giorni.

Con riferimento all'immersione in soluzione di cloruro di sodio (Figura 4a-c), si può osservare innanzitutto che, indipendentemente dall'apertura di fessura iniziale, la cinetica della sigillatura è più lenta; comunque tutte le miscele raggiungono la sigillatura completa di piccole fessure e, ad eccezione della miscela di riferimento, anche per ampiezze di fessura comprese nell'intervallo intermedio (0.15-0.3 mm). Per aperture di fessura più grandi, la sigillatura è risultata più lenta e meno efficace che in acqua distillata per tutte le miscele, quella con additivo cristallino comunque presentando le migliori prestazioni. È interessante notare che la miscela di riferimento, per ampiezze di fessura intermedie mostra, dopo una prima chiusura piuttosto veloce, una sostanziale stabilizzazione del fenomeno. Si potrebbe ragionevolmente argomentare che insieme alle reazioni di idratazione ritardate si sono verificate anche alcune reazioni cosiddette di chloride binding che hanno saturato rapidamente la reattività delle particelle di cemento non idratate. Per ragioni analoghe si può giustificare la simile tendenza rilevata per la miscela con fumo di silice per fessure più grandi, che, consentendo una maggiore penetrazione dell'acqua e quindi una più rapida insorgenza delle reazioni, comunque consumano anche piuttosto rapidamente i componenti reattivi disponibili.

Comunque, le caratteristiche tridimensionali casuali delle fessure, qui rappresentate solo attraverso la apertura sulla sua superficie (Figure 3 e 5), possono anche influenzare i dati puntuali e quindi le affermazioni di cui sopra sono significative solo come indicatori di tendenza.

### 3.3.3 Influenza della composizione della miscela - esposizione ai cicli asciutto/bagnato

La esposizione ai cicli asciutto e bagnato, sia in acqua distillata sia in soluzioni di cloruro di sodio con due diverse concentrazioni di sale, rivela ulteriori dati interessanti che possono supportare la ipotesi relativa alle reazioni di chloride binding che partecipano alla sigillatura delle fessure.

Dai grafici in Figura 6 a-c appare chiaro che le prestazioni della fessura sigillata sotto cicli asciutto/bagnato in acqua distillata è sempre inferiore che non in immersione continua. Le stesse considerazioni sopra esposte valgono anche in questo caso per quanto riguarda l'efficacia dei diversi attivatori della sigillatura della fessura. È interessante notare che, la miscela con fumo di silice continua a mantenere una capacità di sigillatura della fessura apprezzabile anche per grandi fessure causa sia della elevata quantità impiegata sia della finezza delle sue particelle, in grado di assorbire una quantità significativa di acqua durante le fasi di bagnatura dei cicli. Comunque, in nessun caso viene raggiunta la completa sigillatura della fessura anche dopo tre mesi di esposizione.

D'altra parte, i campioni condizionati ai cicli asciutto/bagnato in soluzioni di cloruro di sodio mostrano, nella maggioranza dei casi, una completa chiusura della fessura, anche per aperture intermedie, in corrispondenza del periodo più lungo di condizionamento (Figura 7 a-c). Inoltre, il fatto che i campioni condizionati in soluzioni di concentrazione superiori hanno mostrato le migliori prestazioni di sigillatura delle fessure (Figura 8 a-c) potrebbero essere una conferma

della ipotesi relativa alle reazioni di chloride binding. È interessante notare che la miscela contenente fumo di silice e la miscela con additivo cristallino hanno mostrato le migliori prestazioni sia in termini di cinetica che di efficacia finale della sigillatura.

#### 3.3.4 Influenza della composizione della miscela - esposizione all'aria

Le miscele con additivo cristallino hanno avuto un comportamento abbastanza buono per l'esposizione all'aria aperta, essendo in grado di sigillare completamente le fessure inferiori a 0.15mm e garantendo una capacità di sigillatura della fessura di circa 75% anche per aperture di fessura intermedia. È interessante notare che anche miscele con altri sostituti del cemento hanno fornito delle buone prestazioni per aperture di fessura strette e intermedie.

Tale risultato è estremamente interessante in quanto può garantire la durabilità non solo alle strutture o parti di una struttura completamente sommersa (classe di esposizione XS1 secondo EN 206) o esposta alla zona degli spruzzi, delle onde e delle maree (classe di esposizione XS2 secondo EN 206) ma anche alla parte aerea di una struttura offshore così come alle strutture costiere (classe di esposizione XS3 secondo EN 206).

#### 3.3.5 Effetti delle condizioni di esposizione

I risultati analizzati in precedenza sono mostrati, per ogni composizione della miscela e per le diverse aperture di fessura analizzate, in funzione delle condizioni di esposizione (Figura 13).

Appartiene chiaramente, per tutte le miscele e con riferimento alla maggior parte degli intervalli d'apertura di fessura studiati, che oltre alla completa immersione in acqua, anche l'esposizione a cicli asciutto/bagnato nelle soluzioni di cloruro di sodio producono buoni risultati, maggiore è il contenuto di NaCl più veloce e migliore è la sigillatura della fessura. Ciò conferma la congruità della ipotesi sopra esposta che, oltre alle tipiche reazioni di idratazione ritardata e/o di carbonatazione responsabili della sigillatura autogena della fessura, nel caso in cui si aggiungano aggiunte diverse, anche le reazioni di chloride binding, portando alla formazione di prodotti che precipitano nelle superfici di fessura, contribuiscano anche alla chiusura della fessura. L'additivo cristallino e il fumo di silice, a causa della loro alta reattività e, in minor misura, le ceneri di combustibile, potenziano questa reazione.

#### 3.3.6 Effetti dell'apertura della fessura

Gli stessi risultati compilati e commentati sopra possono anche essere analizzati per valutare l'effetto dell'apertura della fessura per le diverse miscele e le condizioni di esposizione. Valgono le seguenti affermazioni:

- Per la miscela di riferimento, la capacità di guarigione si riduce generalmente aumentando la apertura della fessura; un'eccezione è rappresentata dall'esposizione all'aria aperta e ai cicli in acqua distillata, in cui la fessura più grande può probabilmente esporre all'acqua/umidità una percentuale più consistente di agglomerati di particelle reattive di legante non idratato (o non carbonatato nel caso delle fasi di essiccazione dei cicli asciutto/bagnato).
- Lo stesso vale anche per la miscela contenente ceneri di combustibile.
- Le miscele contenenti fumo di silice e additivo cristallino presentano una significativa diminuzione della capacità di sigillatura delle fessure solo per larghezze di fessura molto grandi e/o per condizioni in cui è inferiore la disponibilità dell'acqua. Significativamente, alcune miscele con fumo di silice e additivo cristallino hanno mostrato completa richiusura delle fessure dopo 84 giorni anche per fessure fino a 0,3 mm di apertura sotto immersione in acqua, sia distillata sia in soluzione di cloruro, e per cicli asciutto/bagnato in soluzioni ad alta concentrazione di cloruri. La miscela con

additivo cristallino è in grado di sigillare completamente le fessure anche quando è esposto a cicli asciutto/bagnato in soluzione di contenuto basso di cloruri e in aria per aperture di fessura intermedie.

### 3. Conclusioni

In questo lavoro sono stati presentati i risultati preliminari di una ricerca avente lo scopo di valutare l'efficacia della capacità di auto-sigillatura delle fessure in ambienti ricchi di cloruri per calcestruzzi contenenti diversi agenti promotori della auto-riparazione, tra cui la cenere di combustibile polverizzata, i fumi di silice e gli additivi cristallini. I dosaggi ottimali sono stati determinati innanzitutto mediante indagini preliminari, considerando il comportamento del calcestruzzo allo stato fresco e la resistenza a compressione. Per quanto riguarda le condizioni di esposizione, per indagare la sigillatura delle fessure, sono stati considerati l'immersione continua e la esposizione a cicli asciutto/bagnato in soluzione di cloruro di 33 g/litro e cicli asciutto/bagnato in soluzioni di cloruro di 165 g/litro. Per motivi di confronto sono stati considerati la immersione e la esposizione a cicli asciutto/bagnato in acqua distillata insieme all'esposizione all'aria aperta. Trattandosi di una ricerca preliminare, la auto-sigillatura della fessura è stata solo monitorata visivamente; sono in corso ulteriori lavori per indagare le reazioni chimiche che si verificano nelle condizioni selezionate.

Sulla base di quanto esposto si possono trarre le seguenti conclusioni:

- La capacità di auto-sigillatura delle fessure in calcestruzzi immersi in acqua di mare (con riferimento sia all'immersione continua sia all'esposizione ai cicli asciutto/bagnato) è confermata e può essere anche migliore di quella nell'acqua distillata; in diversi casi, maggiore è il contenuto di cloruri, migliore e più veloce l'auto-riparazione, probabilmente a causa di un effetto di sinergia tra reazioni di auto-sigillatura (idratazione ritardata e/o carbonatazione) e chloride binding; in generale la capacità della fessura di richiudersi diminuisce con l'apertura della fessura mentre continua ad esposizione prolungata.
- Il calcestruzzo di riferimento è stato in grado di auto-sigillare completamente fessure di piccola ampiezza ( $< 0.15$  mm) sotto immersione continua in acqua e soluzioni di cloruri dopo circa tre mesi; è stata ottenuta anche una completa auto-sigillatura per cicli asciutto/bagnato in soluzioni saline ad alta concentrazione.
- Le aggiunte di cenere di combustibile polverizzata aumentano la capacità di autoriparazione sopra indicata, con riferimento ad un rapporto di sostituzione in massa pari al 20% in peso di cemento, e solo con riferimento a aperture di fessura piccole e anche intermedie (0.15-0,3 mm); gli effetti delle condizioni di esposizione sono gli stessi che per il calcestruzzo di riferimento.
- Miscele contenenti un'elevata aggiunta di fumi di silice (15% in massa di cemento) aumentano anche la capacità di auto-sigillatura della fessura in immersione continua e sotto cicli asciutto/bagnato, sia in acqua dolce sia in soluzioni di cloruro, e fino ad aperture intermedie delle fessure (0.15-0.3 mm).
- L'elevata attività idrofila degli additivi cristallini rende promuovere superiori prestazioni in quasi tutte le condizioni di esposizione studiate e anche per le fessure aperte fino a 0.3mm.
- Prestazioni paragonabili alle miscele con additivi cristallini (solo per alcuni casi), sono stati osservati nel caso dalla miscela con il 15% di sostituzione di cemento per fumo di silice. Miscele con PFA e miscele di riferimento seguono in ordine di prestazione.

La buona prestazione di miscele con additivo cristallino anche sotto l'esposizione all'aria aperta, nonché delle altre miscele esaminate in questo lavoro, con riferimento alle diverse aperture di fessura e condizioni di esposizione, apre la strada a rivedere il significato di un parametro di

progettazione dello stato limite di servizio quale è la massima apertura di fessura consentita in funzione dell'esposizione, sulla base del concetto di massima apertura di fessura "autoriparabile".

Questa indagine deve essere intesa come preliminare per aprire la strada ad attività di ricerca in corso, alle quali gli autori stanno attualmente lavorando, concentrandosi sul miglioramento della resistenza di penetrazione di cloruro attraverso la auto-sigillatura delle fessure e valutando i risultati di questo sulla corrosione dell'armatura e il decadimento/recupero dell'aderenza e il comportamento strutturale.

### **Bibliografia**

ACI Committee 224 (2001) Control of Cracking in Concrete Structures - ACI 224R-01. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 45 pp.

Aldea C, Song W, Popovics JS, Shah SP (2000) Extent of healing of cracked normal strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 12: 92–96.

Boga AR, Topçu IB (2012) Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. *Construction and Building Materials* 31: 258–264.

Chalee W, Jaturapitakkul C, Chindaprasirt P (2009) Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater. *Marine Structures* 22: 341–353.

Cuenca E, Ferrara L (2017) Self-healing Capacity of Fiber Reinforced Cementitious Composites. State of the Art and Perspectives. *KSCE Journal of Civil Engineering* 1-13, doi:10.1007/s12205-017-0939-5.

Darquennes A, Olivier K, Benboudjema F, Gagné R (2016) Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. *Construction and Building Materials* 113: 1017-1028.

Dong B, Fang G, Wang Y, Liu Y, Hong S, Zhang J, Lin S, Xing F (2017) Performance recovery concerning the permeability of concrete by means of a microcapsule based self-healing system. *Cement and Concrete Composites* 78: 84-96.

Dossche C, Boel V, De Corte W, Van den Heede P, De Belie N (2016) A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. *Cement and Concrete Composites* 73: 192-202.

Edvardsen C (1999) Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal* 96(4): 448-454.

Ismail M, Toumi A, François R, Gagné R (2008) Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples. *Cement and concrete research* 38(8): 1106-1111.

Jacobsen S, Marchand J, Boisvert L (1996) Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete. *Cement and Concrete Research* 26(6): 869-881.

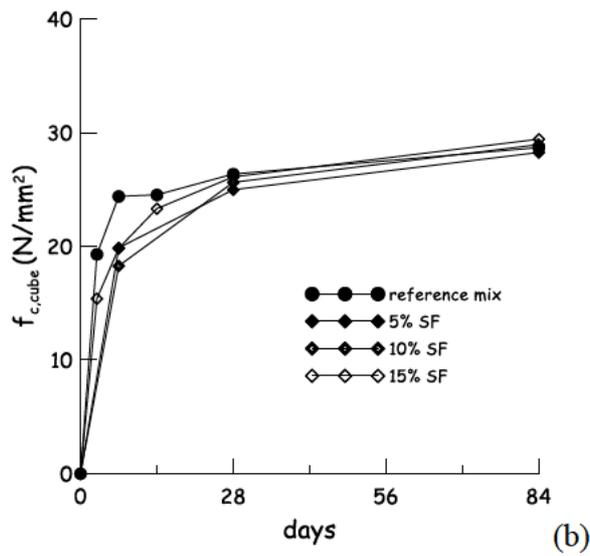
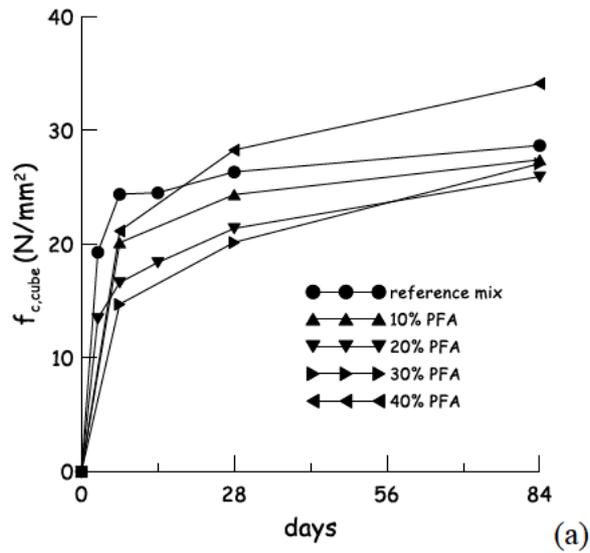
Li M, Li VC (2011) Cracking and Healing of Engineered Cementitious Composites under Chloride Environment. *ACI Materials Journal* 108(3): 333-340.

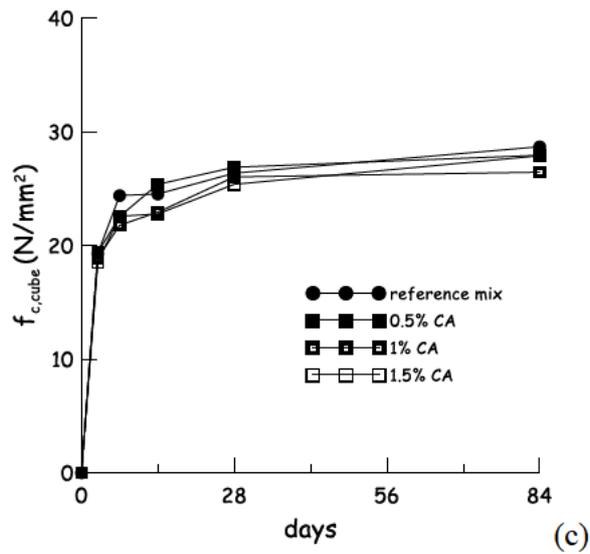
Li VC, Herbert E (2012) Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology* 10: 207-218.

Ling H, Qian C (2017) Effects of self-healing cracks in bacterial concrete on the transmission of chloride during electromigration. *Construction and Building Materials* 144: 406-411.

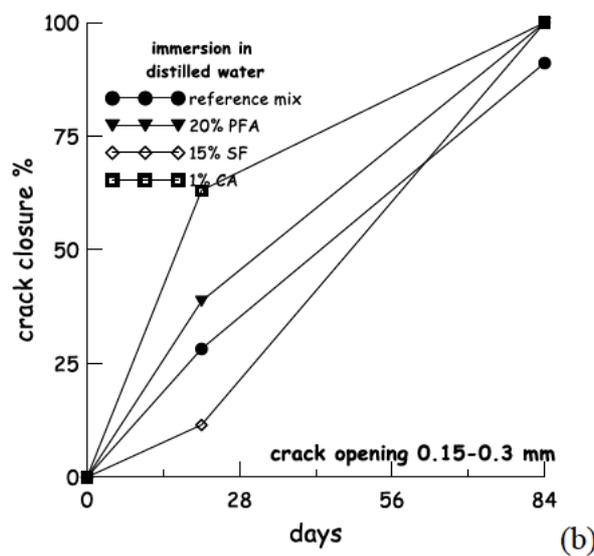
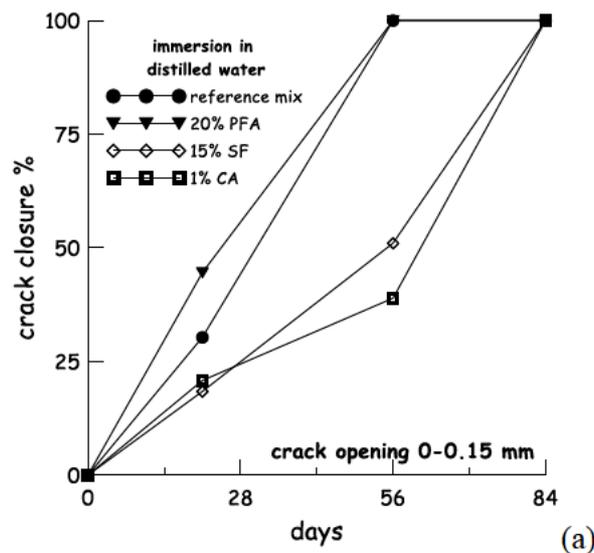
- Maes M, De Belie N (2014a) Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. *Cement and Concrete Composites* 53: 59–72.
- Maes M, Snoeck D, De Belie N (2016) Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. *Construction and Building Materials* 115: 114-124.
- Maes M, Van Tittelboom K, De Belie N (2014b) The efficiency of self-healing cementitious materials by means of encapsulated polyurethane in chloride containing environments. *Construction and Building Materials* 71: 528–537.
- Muhammad NZ, Shafaghat A, Keyvanfar A, Majid MZA, Ghoshal SK, Yasouj SEM, Ganiyu AA, Kouchaksaraei MS, Kamyab H, Taheri MM, Shirdar MR, McCaffer R (2016) Test and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: A review. *Construction and Building Materials* 112: 1123-1132.
- Pacheco J, Polder R (2012) Corrosion initiation and propagation in cracked concrete—a literature review. In *Advances in Modeling Concrete Service Life* (pp. 85-93). Springer Netherlands.
- Palin D, Wiktor V, Jonkers HM (2015) Autogenous healing of marine exposed concrete: characterization and quantification through visual crack closure. *Cement and Concrete Research* 73: 17–24.
- Palin D, Wiktor V, Jonkers HM (2016) A bacteria-based bead for possible self-healing marine concrete applications. *Smart Materials and Structures* 25: 1-6.
- Roig-Flores M, Pirritano F, Serna P, Ferrara L (2016) Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials* 114: 447–457.
- Şahmaran M (2007) Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar. *Journal of Materials Science* 42(22): 9131-9136.
- Savija B, Schlangen E (2016) Autogenous healing and chloride ingress in cracked concrete. *HERON* 61(1): 15-32.
- Tsinker G P (1995) *Marine Structures Engineering: Specialized Applications*, 548 pp.
- Van Belleghem B, Van den Heede P, Van Tittelboom K, De Belie N (2017) Quantification of the Service Life Extension and Environmental Benefit of Chloride Exposed Self-Healing Concrete. *Materials* 10(5): 1-22.
- Van den Heede P, De Keersmaecker M, Elia A, Adriaens A, De Belie N (2017) Service life and global warming potential of chloride exposed concrete with high volumes of fly ash. *Cement and Concrete Composites* 80: 210-223.
- Van den Heede P, Van Belleghem B, De Keersmaecker M, Adriaens A, De Belie N (2016a) Sustainability Effects of Including Concrete Cracking and Healing in Service Life Prediction for Marine Environments. In: *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies SMCT4*, Las Vegas, USA.
- Van den Heede P, Van Belleghem B, De Belie N (2016b) The cost and environmental impact of service life extending self-healing engineered materials for sustainable steel reinforced concrete. In: *Expanding Boundaries: Systems Thinking for the Built Environment. Sustainable Built Environment (SBE) Regional Conference*. Zurich.
- Yang Y, Lepech MD, Yang EH, Li VC (2009) Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. *Cement and Concrete Research* 39(5): 382-390.

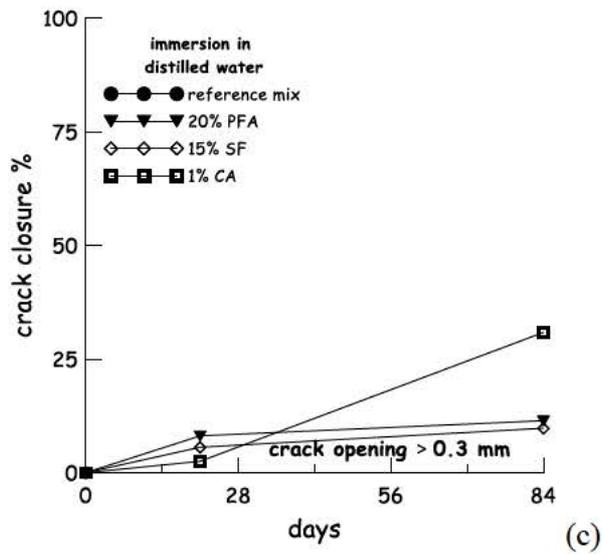
Yao Y, Wang L, Wittmann FH, De Belie N, Schlangen E, Gehlen C, Wang Z, Egüez-Álava H, Cao Y, Yunus BMD, Li J (2017) Recommendation of RILEM TC 246-TDC: test methods to determine durability of concrete under combined environmental actions and mechanical load. *Materials and Structures* 50:155.



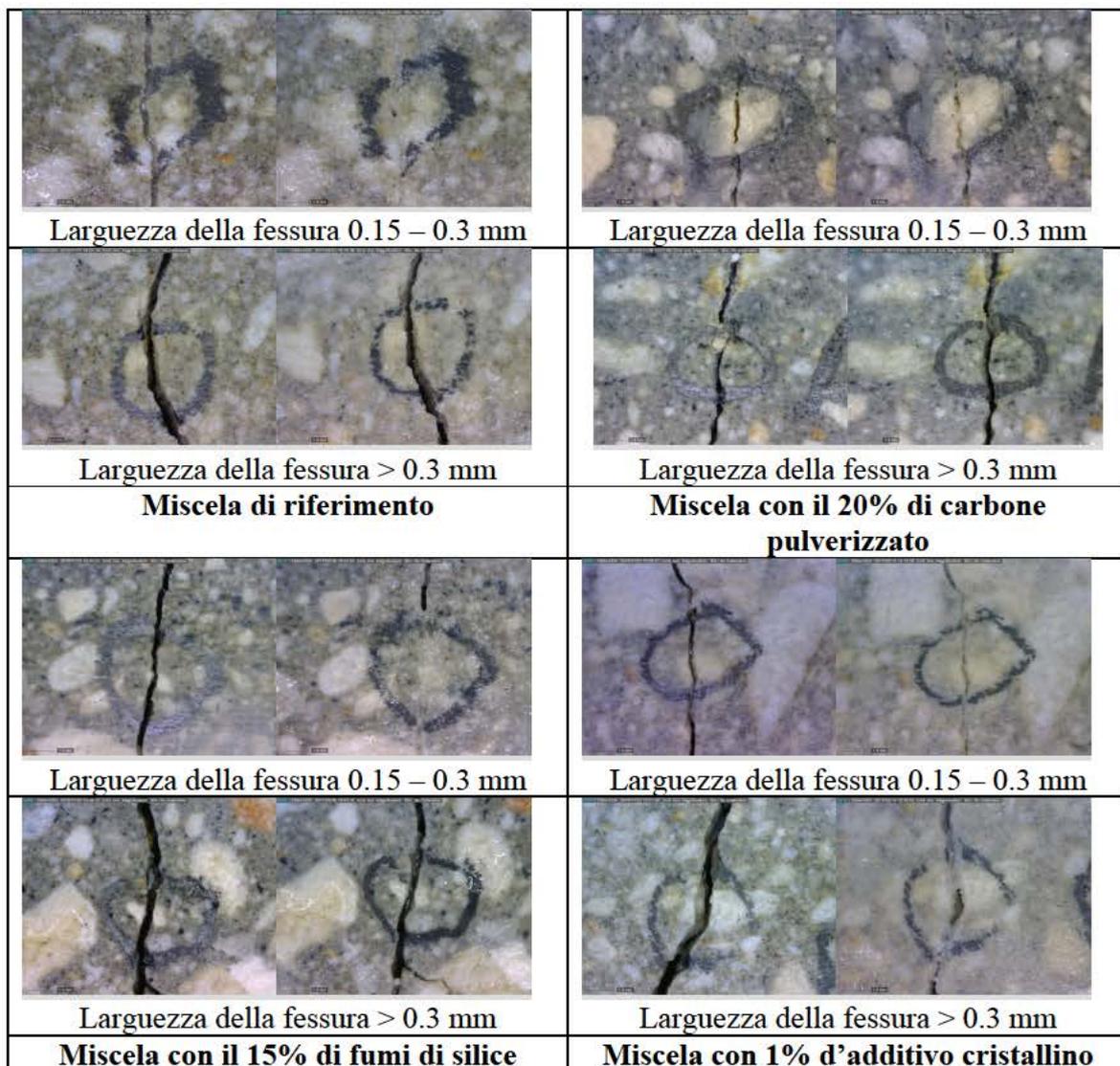


**Figura 1:** Effetto sulla resistenza cubica a compressione della sostituzione del cemento con ceneti di combustibile PFA (a), fumi di silice SF (b) e aggiunta di additivi cristallini CA (c).

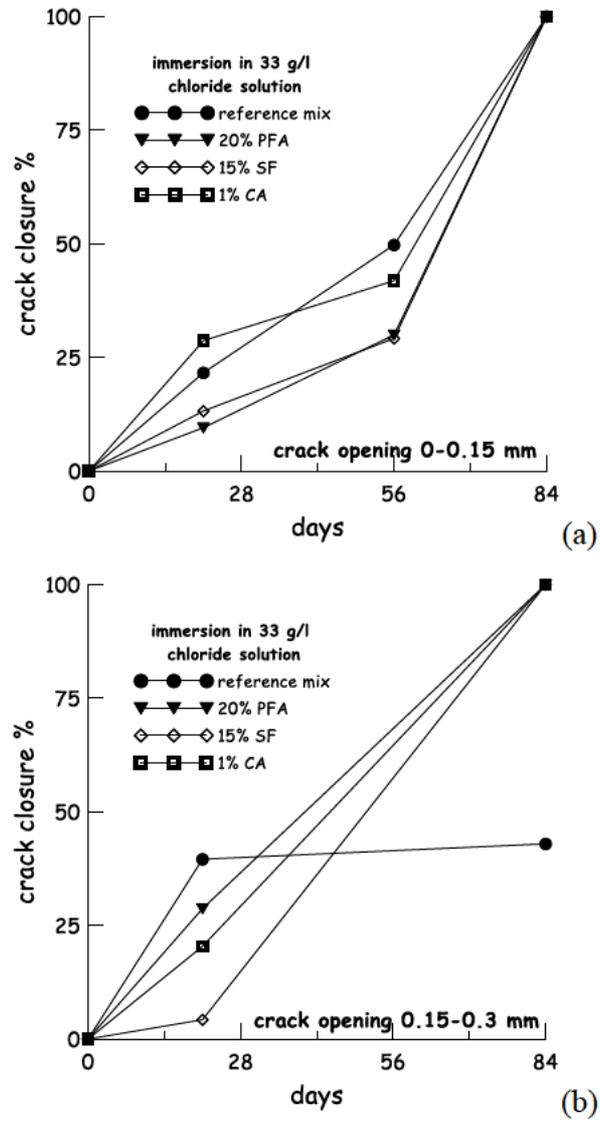


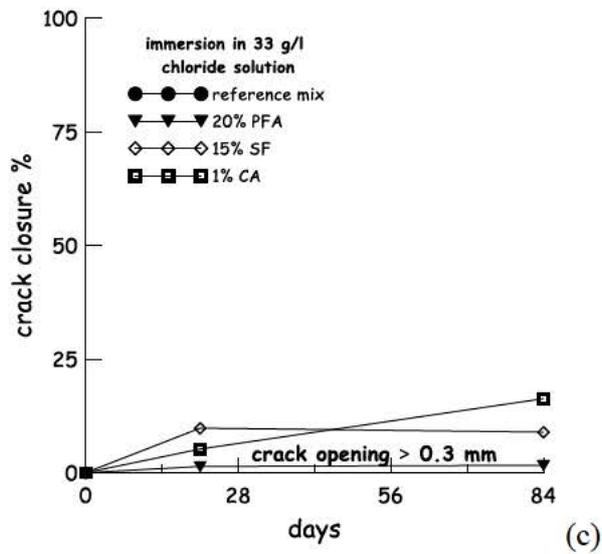


**Figura 2:** Effetti della composizione della miscela sulla sigillatura della fessura in immersione continua in acqua distillata per aperture di fessura piccole (a), intermedie (b) e grandi (c).

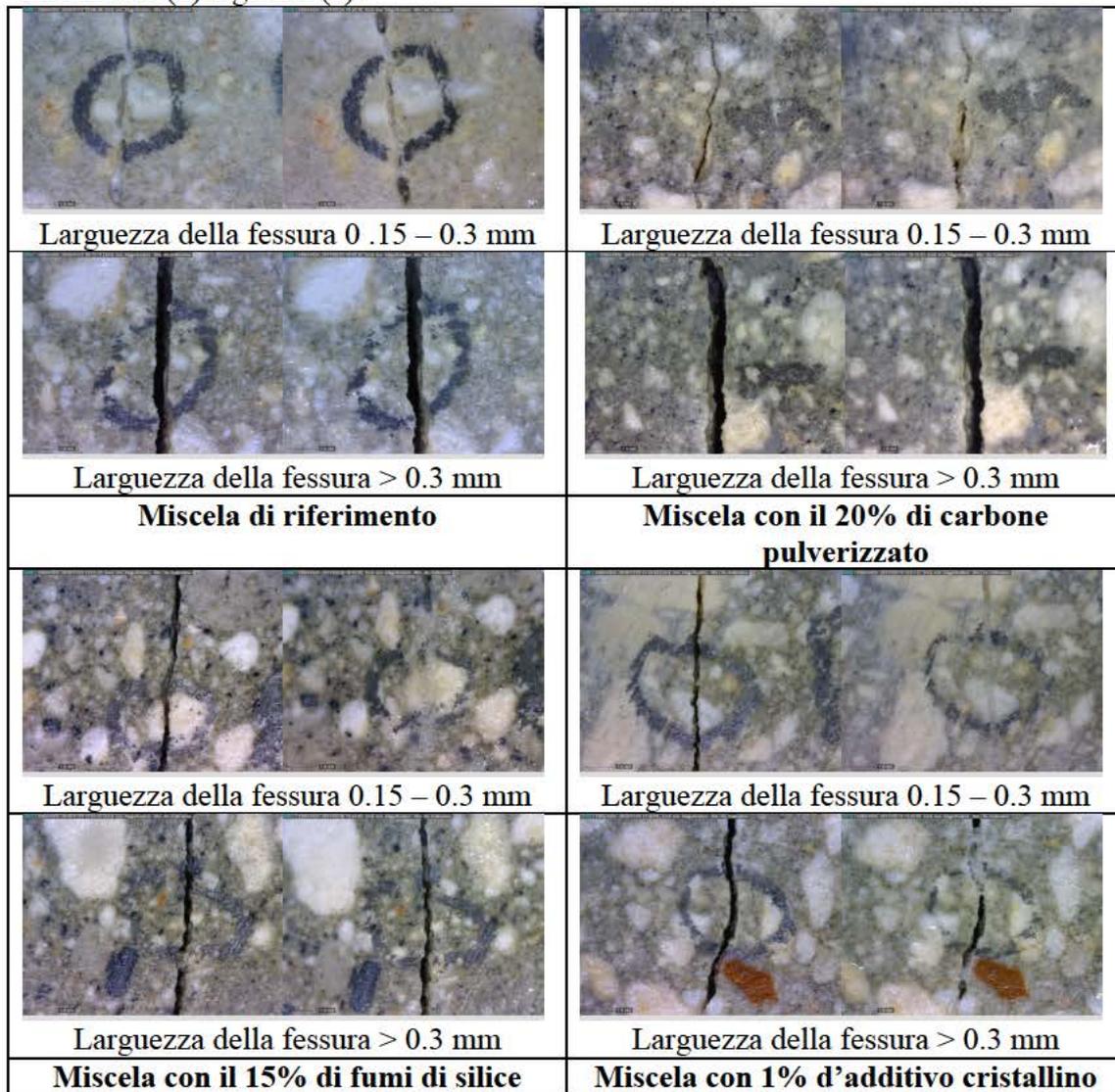


**Figura 3:** Immagini visive della sigillatura della crepa dopo 3 mesi di immersione continua in acqua distillata.

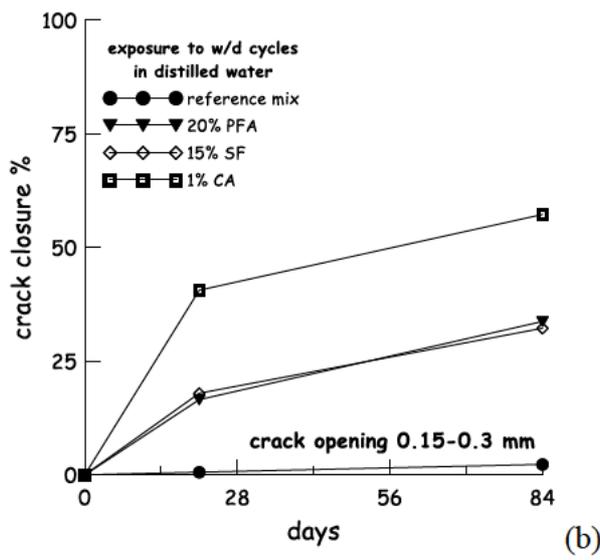
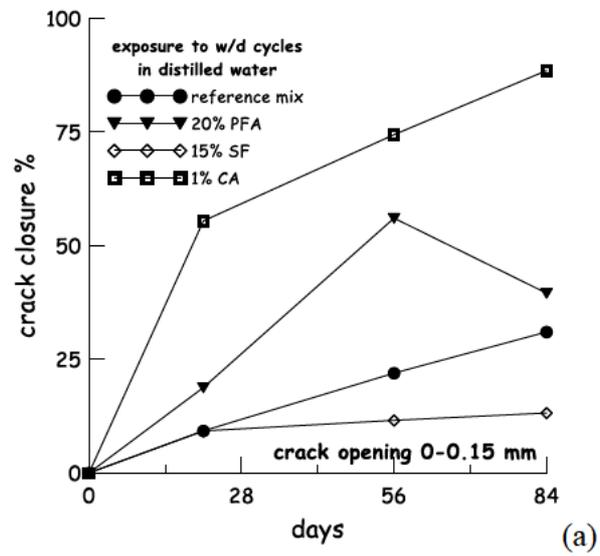


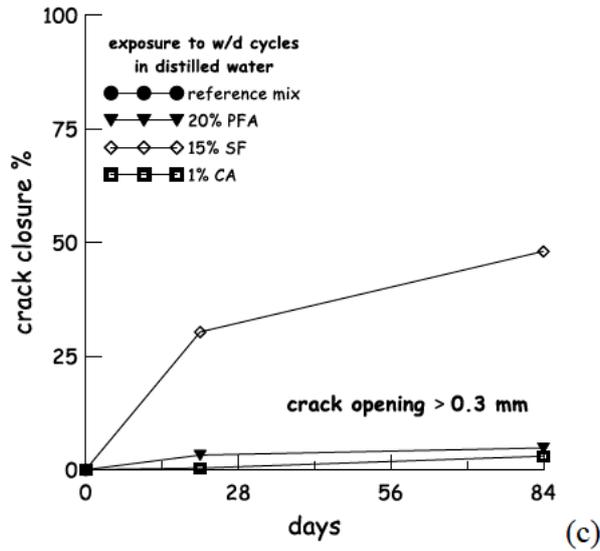


**Figura 4:** Effetti della composizione della miscela sulla sigillatura della fessura in immersione continua in soluzione NaCl per aperture di apertura di fessura piccole (a), intermedie (b) e grandi (c).

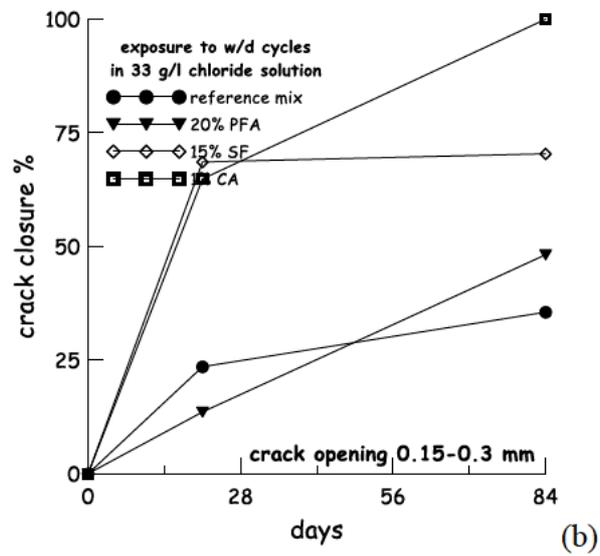
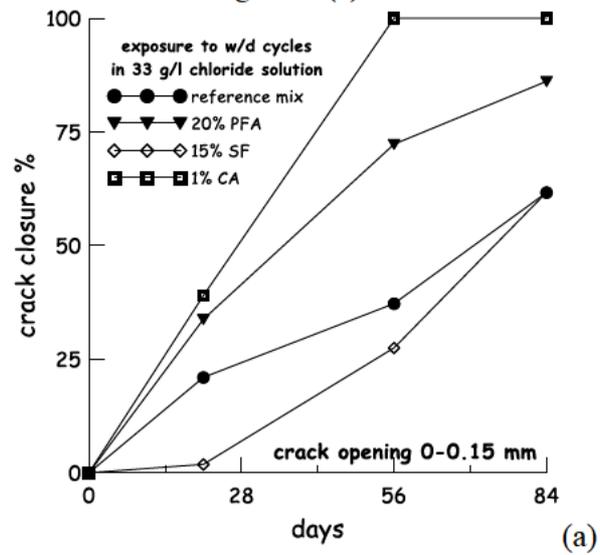


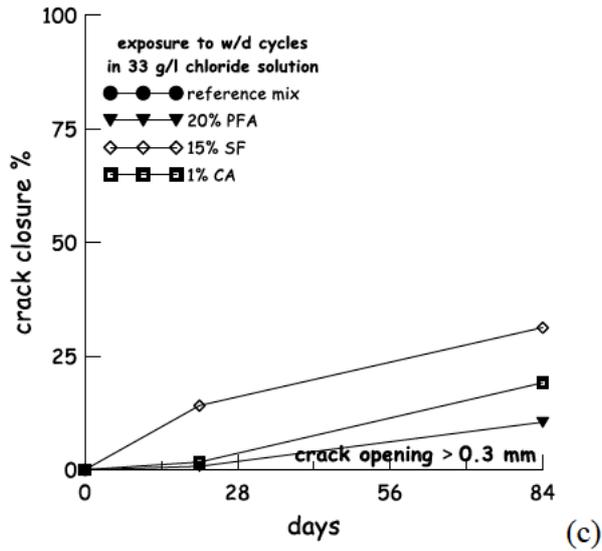
**Figura 5:** Immagini visive della sigillatura della crepa dopo 3 mesi di immersione continua in soluzione NaCl da 33 g / l.



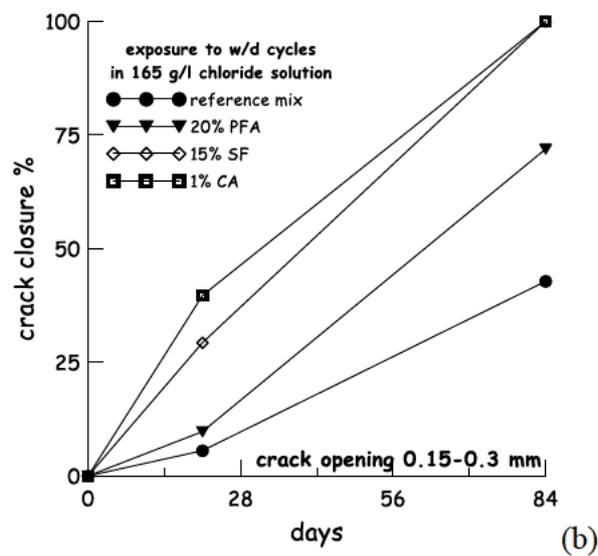
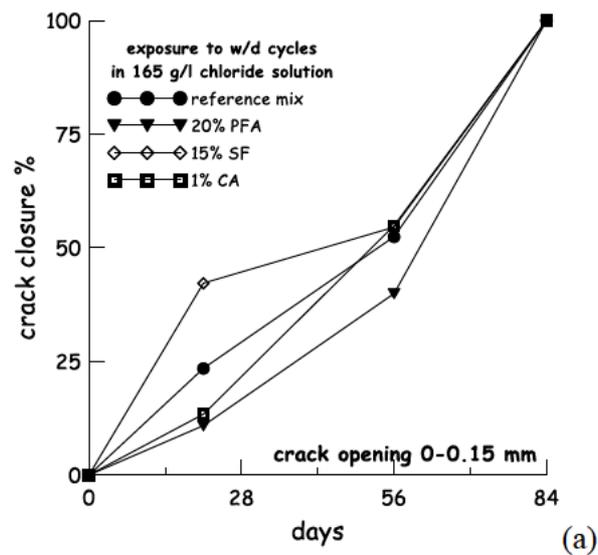


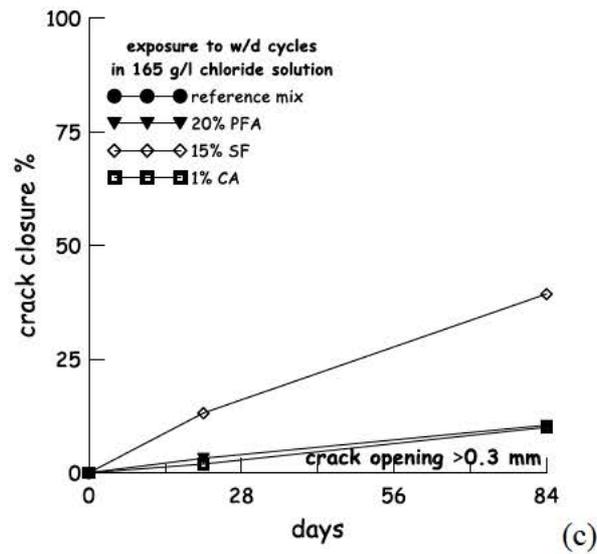
**Figura 6:** Effetti della composizione della miscela sulla sigillatura della fessura in cicli asciutto/bagnato in acqua distillata per aperture di fessura piccole (a), intermedie (b) e grandi (c).



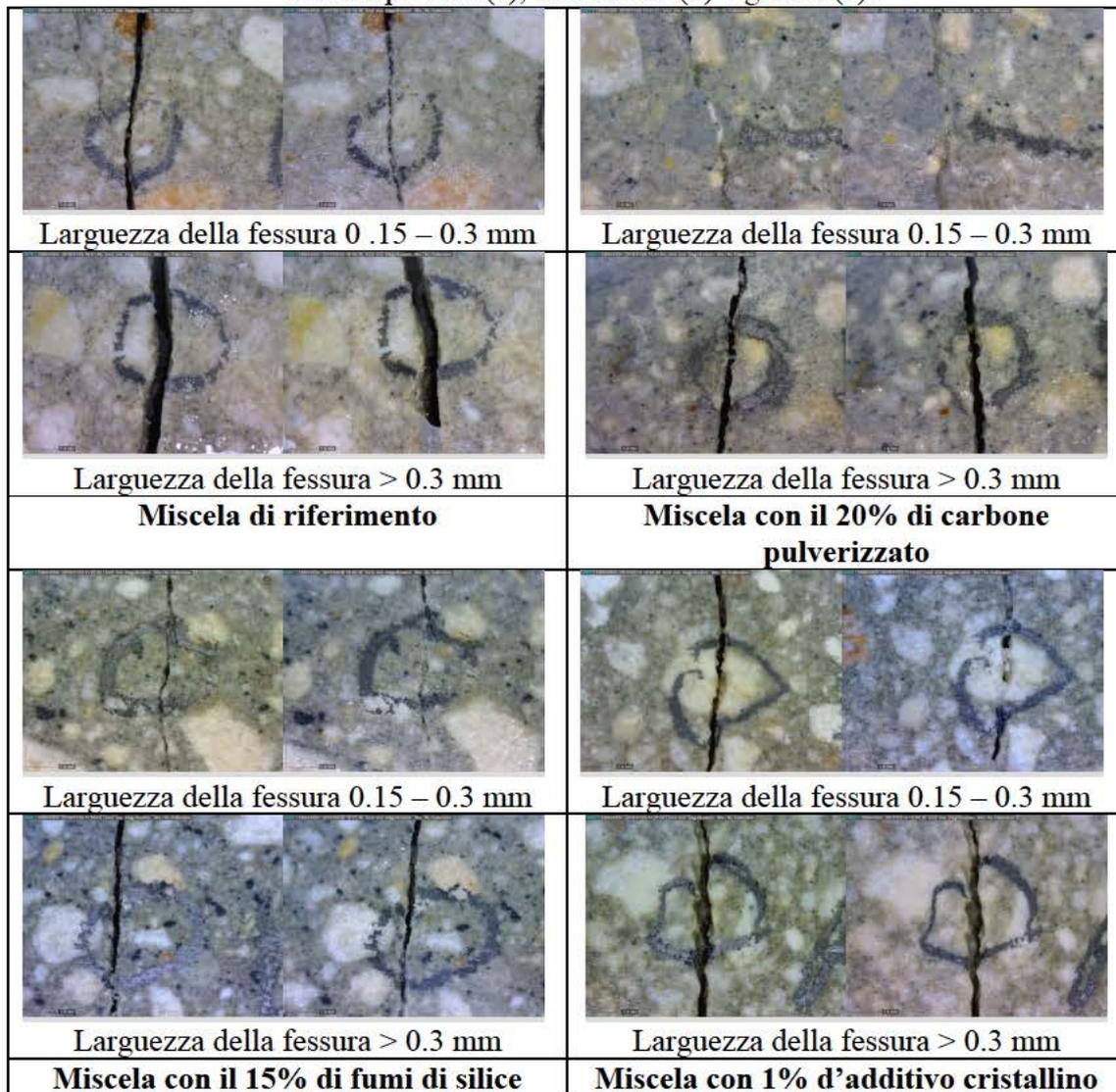


**Figura 7:** Effetti della composizione di miscelazione sulla sigillatura delle fessure in cicli asciutto/bagnato in soluzione di cloruro di sodio da 33 g / l per aperture di fessura piccole (a), intermedie (b) e grandi (c).

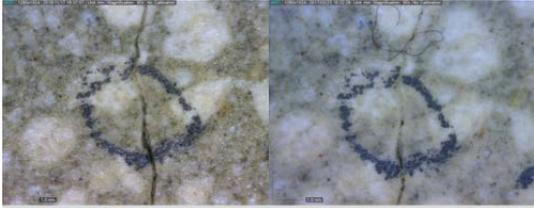
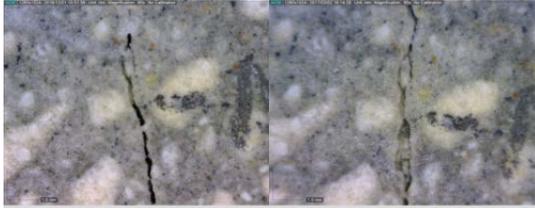
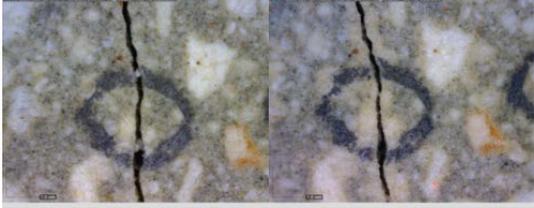
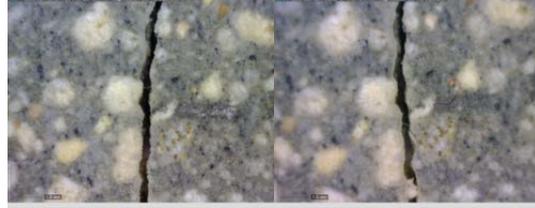
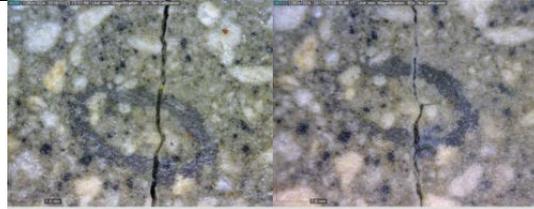
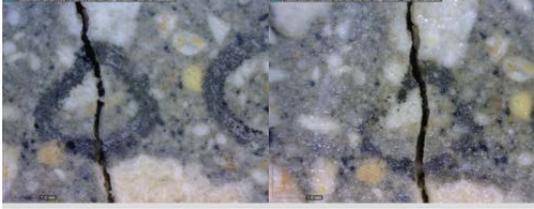
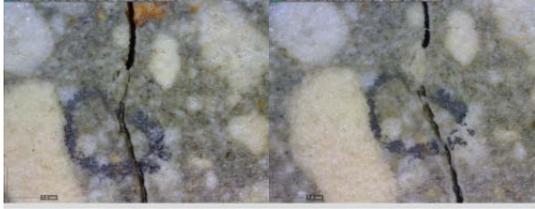




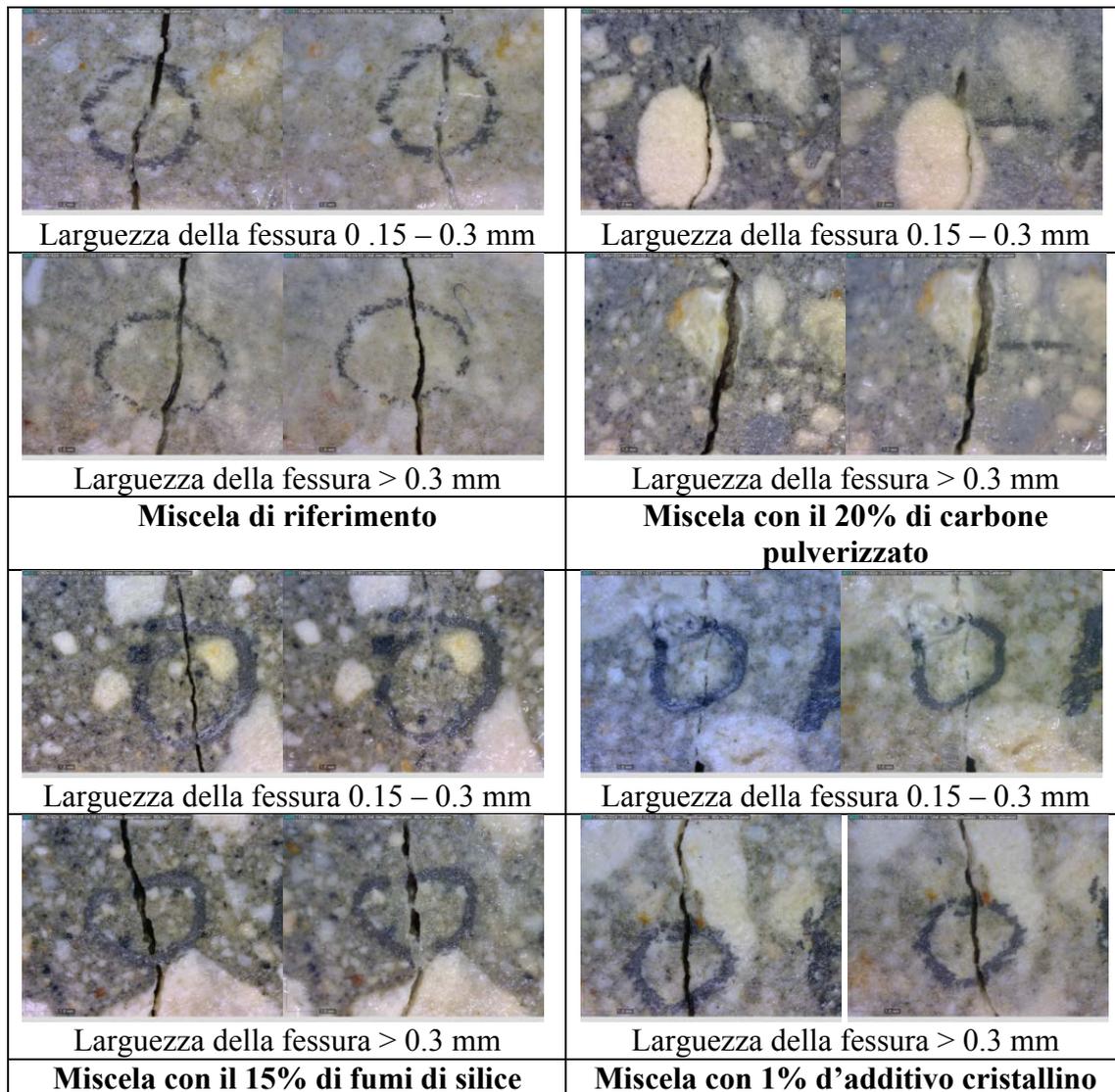
**Figura 8:** Effetti della composizione della miscela sulla sigillatura delle fessure in cicli asciutto.bagnato in soluzione di cloruro di sodio da 165 g / l per aperture di aperture di fessura piccola (a), intermedie (b) e grandi (c).



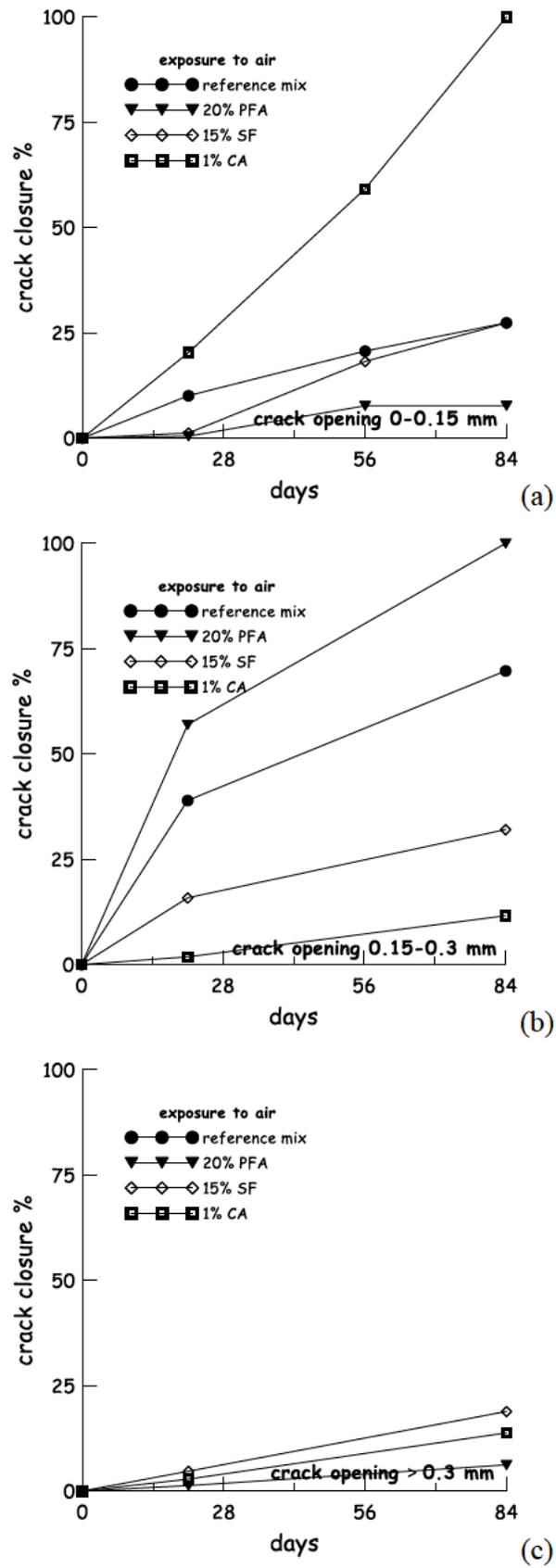
**Figura 9:** Immagini visive della sigillatura della crepa dopo 3 mesi di esposizione a cicli asciutto/bagnato in acqua distillata.

	
Larghezza della fessura 0.15 – 0.3 mm	Larghezza della fessura 0.15 – 0.3 mm
	
Larghezza della fessura > 0.3 mm	Larghezza della fessura > 0.3 mm
<b>Miscela di riferimento</b>	<b>Miscela con il 20% di carbone pulverizzato</b>
	
Larghezza della fessura 0.15 – 0.3 mm	Larghezza della fessura 0.15 – 0.3 mm
	
Larghezza della fessura > 0.3 mm	Larghezza della fessura > 0.3 mm
<b>Miscela con il 15% di fumi di silice</b>	<b>Miscela con 1% d'additivo cristallino</b>

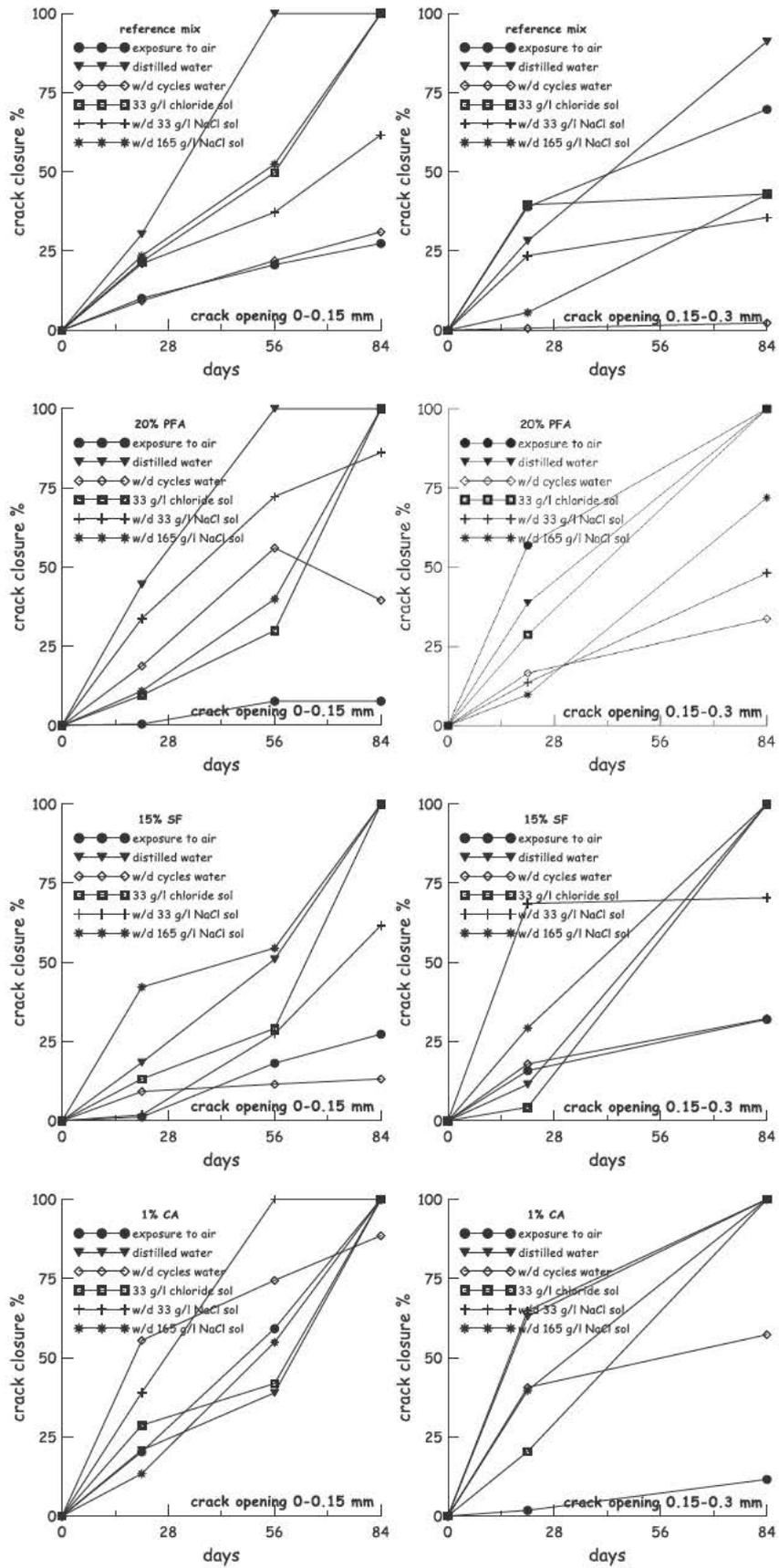
**Figura 10:** Immagini visive della sigillatura della crepa dopo 3 mesi di esposizione a cicli asciutto/bagnato in soluzione di cloruro di sodio da 33 g / l.



**Figura 11:** Immagini visive della sigillatura della crema dopo 3 mesi di esposizione a cicli asciutto/bagnato in soluzione di cloruro di sodio da 165 g / l.



**Figura 12:** Effetti della composizione della miscela sulla sigillatura delle fessure in esposizione all'aria per aperture di fessura piccole (a), intermedie (b) e grandi (c).



**Figura 13:** Effetti delle condizioni di esposizione sulla sigillatura delle fessure per differenti composizioni delle miscele (aperture di apertura piccole e intermedie).