La galleria Paradiso: riparazione e protezione della volta mediante applicazione di spritz beton impermeabile e con caratteristiche di autocicatrizzazione self-healing

Paradiso tunnel: the application of waterproof shotcrete with self-healing properties to repair and protect the vault

Michel DI TOMMASO [a]
Paolo TUDORI [b]
Enricomaria GASTALDO BRAC [c, *]

[a] Direttore generale Istituto Meccanica dei Materiali SA, Lugano, Svizzera.
[b] Responsabile settore calcestruzzi Istituto Meccanica dei Materiali SA, Lugano, Svizzera.
[c] Amministratore delegato Penetron Italia Srl, Collegno, Italia.
* corresponding author: direzione.tecnica@penetron.it

Sommario
Il fenomeno di auto-rigenerazione (in inglese, self-healing) delle fessure in strutture in calcestruzzo è una tematica ancora in fase di studio e che, al momento, trova ancora limitate applicazioni specialmente nell'ambito del tunnelling. Questo accade perché, da un lato, vi è una limitata conoscenza dei prodotti che promuovono questo fenomeno e degli effetti che questi potrebbero avere su altre proprietà peculiare del calcestruzzo quali, ad esempio, la resistenza a compressione e la resistenza alla migrazione di sostanze aggressive. Dall'altro, vi è una carenza normativa che non consente di testare il fenomeno in maniera standardizzata e, quindi, ripetibile. Scopo di questo articolo è introdurre a livello teorico il fenomeno del self-healing, proporre una metodologia sperimentale per lo studio di questo fenomeno e, infine, presentare il caso della Galleria Paradiso, dove l'additivo idrofillico Penetron Admix ® è stato aggiunto con successo ad una miscela di spritz beton per migliorarne l'impermeabilità ai fluidi aggressivi e garantire la capacità di autorigenerazione delle fessure della volta.

Abstract
The phenomenon of self-healing of cracks in concrete structures is a subject which is still being studied and which, at the moment, still has limited applications especially in the field of tunneling. This is because, on the one hand, there is a limited knowledge of the products that promote this phenomenon and the effects these may have on other peculiar properties of concrete such as, for example, compressive strength and resistance to migration of aggressive substances. On the other hand, there is a regulatory deficiency which does not allow the phenomenon to be tested in a standardized and, therefore, repeatable manner. The aim of this article is to introduce the phenomenon of self-healing on a theoretical level, to propose an experimental methodology for studying this phenomenon and, finally, to present the case of the Galleria Paradiso, where the hydrophilic admixture Penetron Admix® was successfully added to a mixture of Spritbeton to improve the impermeability to aggressive fluids and to guarantee the self-healing capacity of the cracks in the vault.

Parole chiave: Impermeabilizzazione, cristallizzazione, spritz-beton, self-healing, durabilità.
Keywords: Waterproofing system, crystalline admixture, shotcrete, self-healing, durability.

1. Cenni teorici sul fenomeno di self-healing

Il termine self-healing indica un processo fisico/chimico di auto-rigenerazione di un sistema cementizio fessurato.
Questa capacità è naturalmente presente nei calcestruzzi e sfrutta il fatto che una parte non trascurabile dell'idrossido di calcio - $Ca(OH)_2$ - che si forma durate l'idratazione del clinker resta inerte al termine dell'indurimento.
Se questo componente entra successivamente in contatto con acqua minerale (nel senso di acqua contenente minerali disciolti) reagisce con l'anidride carbonica (CO_2) disciolta in acqua e forma calcare che si deposita sotto forma di cristalli nelle fessure aperte [1].
La reazione descritta sopra è espressa come:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

In presenza di cemento Portland questa reazione avviene sempre, a dispetto dei casi in cui in aggiunta al cemento portland (detto

anche clinker puro) sono presenti pozzolane ad elevato contenuto di silice (SiO_2) quali ceneri, loppe, microsilice, ecc., poiché – in questo caso - subentra un'altra reazione aggiuntiva che combina la silice delle pozzolane e l'idrossido di calcio inerte a formare uno dei componenti minerali principali del calcestruzzo idratato, il silicato tricalcico, che gli conferisce molte delle sue proprietà meccaniche e fisiche finali.
Questa reazione è definita pozzolanica e si esprime come:

$$3Ca(OH)_2 + SiO_2 = 3CaO \cdot SiO_{2+} 3H_2O \qquad (2)$$

Il componente che si forma – $3CaO \cdot SiO_2$ – si chiama silicato tricalcico e si esprime in forma condensata come C3S.
Le reazioni sopra descritte contribuiscono a formare prodotti secondari di reazione in fessure di larghezza da capillare fino a massimo 0.15-0.20 mm, ma, come dimostrato sperimentalmente, non riescono a essere efficaci a chiudere fessure di larghezza maggiore soprattutto in presenza di acqua in pressione [1].
È proprio con larghezze di fessure superiori a questi valori, che si richiede quindi una capacità auto-rigenerante migliorata rispetto a quella naturale del calcestruzzo Questo viene fatto, nella tecnologia degli additivi idrofillici, aggiungendo prodotti i quali, specificamente, continuano a favorire, attraverso le reazioni di cui sopra, la produzione di di prodotti di reazione (calcite, C3S, portlandite, ecc.) i quali, sotto forma di cristalli coalescenti che germinano sulle pareti della fessura, la possono, eventualmente, chiudere se essa non supera i 0.40-0.50 mm.
Questi prodotti ricadono nella categoria degli additivi o aggiunte idrofilliche che necessitano di acqua per attivarsi e germinare. La nostra esperienza professionale nel campo delle prove sperimentali per il self-healing conferma quanto riportato nella letteratura specialistica, ovvero che, oltre la larghezza di 0.50 mm e/o con elevate pressioni, la sigillatura con componenti idrofillici è virtualmente impossibile nel calcestruzzo strutturale in generale.
Tuttavia, considerato che valori superiori a 0.40-0.50 mm sono inaccettabili per l'efficienza funzionale e la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, si presuppone che queste fessure, se si formano, debbano essere riparate con metodi idonei che seguano la EN 1504.
Nel caso specifico dello spritz-beton la fessurazione attesa, a causa della presenza di fibre, è solo tipo capillare e diffusa e quindi l'additivo proposto trova una sua applicazione ideale in cui si ottengono riduzioni di portata fino al 95% rispetto al valore iniziale (ovvero fino a livello di solo stillicidio)
Ad oggi, sebbene il tema sia stato sviscerato in modo esaustivo da uno studio completo sulla natura e caratteristiche del self-healing (sia esso prodotto da elementi chimici inorganici che da attività organica di tipo batterico), non esiste ancora una procedura normalizzata per verificare le capacità idrofilliche di un prodotto; tuttavia i metodi di prova riportati in letteratura ([1], [3]) indicano generalmente che:

- le prove con misurazione della portata in continuo attraverso una fessura di apertura nota ed a pressione maggiore di quella atmosferica simulano meglio il fenomeno;
- le prove in cui i campioni sono lasciati in continua saturazione d'acqua e sui quali, in modo discontinuo, si eseguono misure di portata sono falsate dal fatto che i campioni in saturazione (di solito carote o prismi di piccole dimensioni) espandono naturalmente saturandosi e quindi contribuiscono, con un fenomeno fisico che nulla ha a che vedere con il self-healing, a sigillare la fessura;
- il tempo per raggiungere la condizione di riduzione drastica del flusso fino anche all'annullamento non è fisso, ma ci si deve attendere che nel giro di qualche settimana o mese il fenomeno si sviluppi e completi;
- al termine delle prove deve essere prodotta l'evidenza sperimentale (analisi microscopica e/o SEM) che si sono formati prodotti di reazione sulle pareti della fessura.

2. Una breve descrizione del metodo di prova del self-healing

Non essendo, ad oggi, la prova di self-healing regolata da una Normativa internazionale (sebbene sul tema siano disponibili diversi articoli in letteratura scientifica), l'Istituto Meccanica dei Materiali SA ha sviluppato un proprio metodo di prova che si basa sui concetti elencati sopra [2].
La prova consiste nel sottoporre un campione avente diametro = altezza = 100 mm preventivamente fessurato, al flusso unidirezionale di acqua proveniente da un serbatoio sotto l'azione della sola gravità. Il flusso d'acqua attraverso la fessura viene misurato, in continuo, mediante flussimetri elettromagnetici digitali inseriti lungo la linea e collegati ad una centralina per l'acquisizione dei dati. L'acqua che attraversa la fessura viene poi raccolta in un recipiente e pompata nuovamente nel serbatoio. Per maggiore dettaglio, si veda la Figura 1.
La prova termina quando il flusso d'acqua attraverso la fessura raggiunge un valore compreso tra 0 e 0.5 litri/ora. Il flusso iniziale d'acqua è il valore massimo del flusso in litri/ora che una fessura

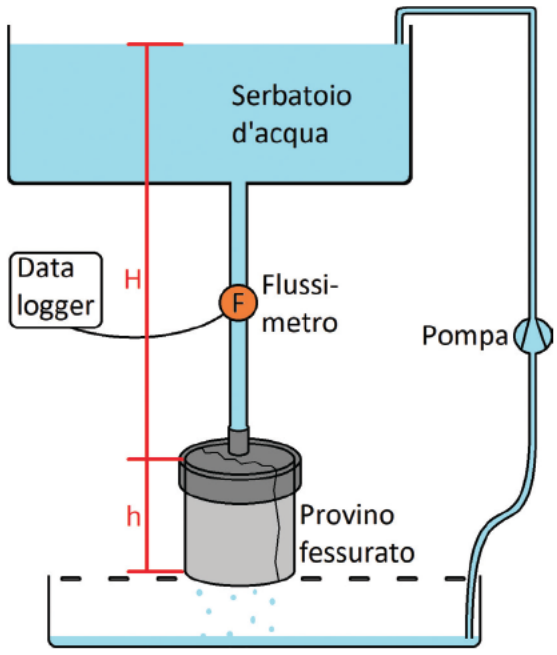

Figura 1. Schema dell'apparato di prova sviluppato dall' Istituto Meccanica dei Materiali SA.

Figura 2. Vista di una fessura prima della prova per il controllo della sua ampiezza.

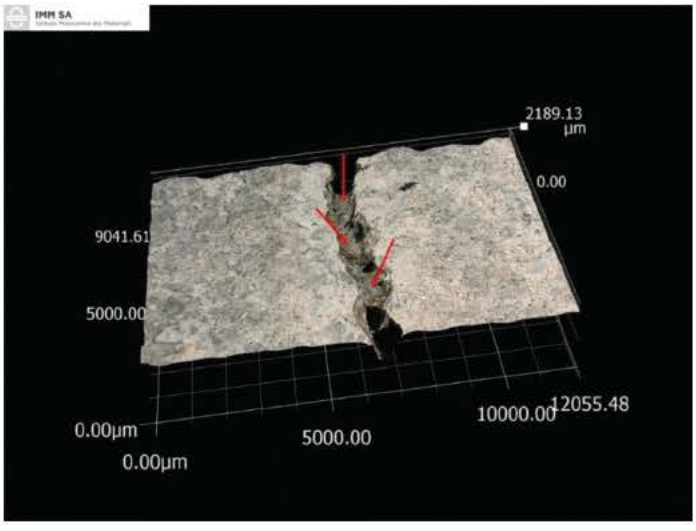

Figura 4. Formazione di prodotti di idratazione a cavallo della fessura.

con una larghezza W compresa tra 0.40 e 0.60 mm (valore obiettivo di 0.50 mm) può sopportare sulla faccia esposta al flusso. La differenza media tra l'altezza del livello dell'acqua nel serbatoio e l'ingresso al campione è di 3.5 m. Questo significa che ad un'altezza del campione di 0.1 m, corrisponde a un gradiente idraulico medio di 35 (m/m). Quanto sopra è riassunto nella seguente equazione:

$$qw = 740 \cdot I \cdot w_m^3 \cdot k \qquad (3)$$

Dove:

I – gradiente idraulico (m/m)

w_m - larghezza media della fessura sulla superficie

k - fattore di correzione per la temperatura dell'acqua (k=0.88 a 15 °C, k = 1 a 20 °C, k = 1.26 a 30 °C)

La temperatura dell'acqua in uscita dai flussimetri viene misurata automaticamente per tutta la durata del test e ha una media di 27 °C con dispersione trascurabile, da cui può essere interpolato un valore di k=1.18.

Per creare la fessura, i campioni vengono in primo luogo rotti in trazione indiretta. Successivamente, le due metà ottenute vengono ricomposte mediante metodo proprietario per ottenere l'ampiezza della fessura desiderata. Questa viene poi verificata mediante microscopio ottico KEYENCE Modello VHX-950F. Un esempio della verifica dell'ampiezza della fessura mediante microscopio ottico è riportato in Figura 2.

Al termine della prova, i campioni vengono nuovamente rotti in trazione indiretta e le facce esposte al flusso d'acqua sono analizzate al microscopio ottico per verificare la formazione di prodotti di idratazione generati dalla presenza dell'additivo idrofillico. Viene inoltre misurato il grado di ricoprimento della faccia da parte dei prodotti di idratazione. Alcuni esempi sono riportati nelle seguenti figure (Figure 3-5).

Figura 3. (sx) Cristalli di Penetron Admix ® sviluppatisi a cavallo della fessura, ingrandimento 150x; (dx) Cristalli di Penetron Admix ® sviluppatisi a cavallo della fessura, ingrandimento 800x.

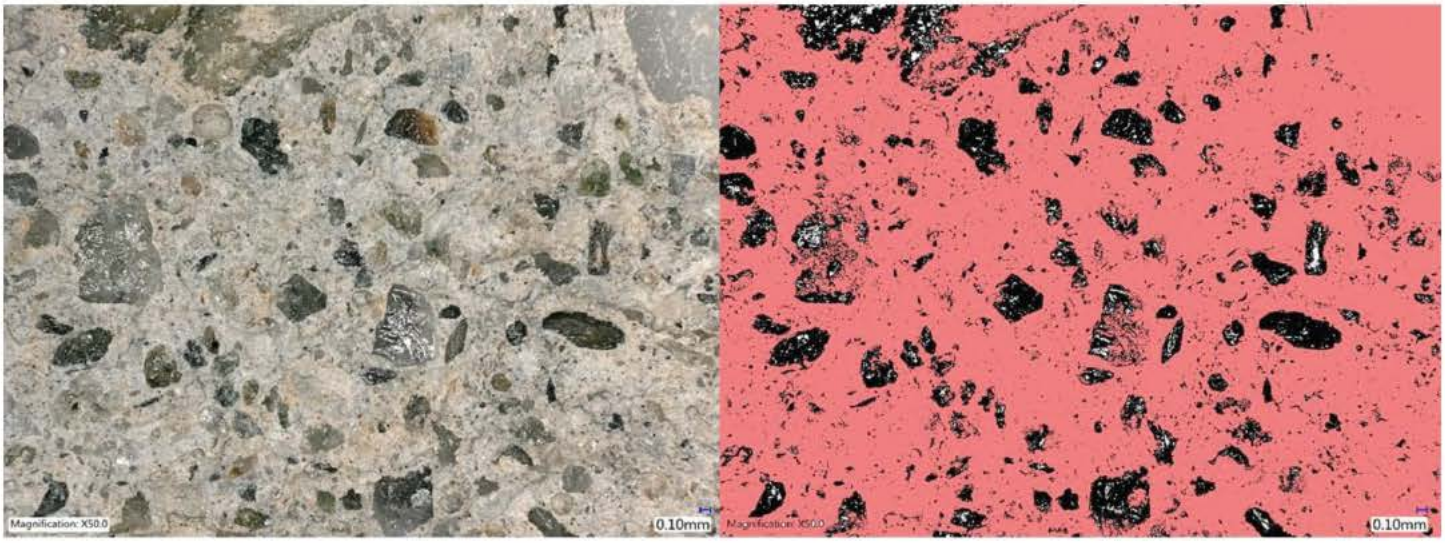

Figura 5. Grado di ricoprimento della superficie del campione esposta alla prova da parte dei cristalli di Penetron Admix®. In rosso le aree ricoperte dai cristalli.

3. Contesto della galleria Paradiso

La galleria Paradiso (lunghezza: 757 m), sita a cavallo dei comuni di Paradiso e di Lugano (Cantone Ticino, Svizzera), è una galleria ferroviaria a doppio binario in esercizio dal 1874 per il trasporto di merci su rotaia. Tuttavia, fino al 2018, essa non consentiva ai convogli merci il trasporto di container con altezza agli angoli fino a 4 m.

Nell'ambito del "Corridoio 4 metri", ovvero un progetto realizzato dalle Ferrovie Svizzere su mandato della Confederazione Svizzera che consiste nell'ampliamento delle gallerie esistenti a Sud delle Alpi per consentire il transito su ferrovia di container con un'altezza agli angoli di 4 m, anche la galleria Paradiso è stata oggetto di ampliamento.

I lavori sono iniziati a cavallo del terzo-quarto trimestre del 2018 e sono terminati nel terzo trimestre del 2020, prevedendo anche la realizzazione di una volta impermeabile in spritz-beton (Figura 1) al fine di evitare filtrazione di acqua da tergo.

A questo proposito, il Committente ha incaricato l'Istituto Meccanica dei Materiali SA – laboratorio di prove su materiali da costruzione accreditato secondo norma ISO CEI 17025 - di proporre delle migliorie alla ricetta tradizionale fornita dalla centrale di betonaggio al fine di aumentarne le caratteristiche di durabilità/impermeabilità e introdurre la proprietà di auto-sigillatura delle fessure (in inglese: self-healing), necessaria in quanto la condizione di impermeabilità deve rimanere tale anche in presenza di fessurazione capillare del calcestruzzo.

È stato quindi proposto di impiegare l'additivo idrofillico Penetron

Figura 6. (sx) applicazione di spritz beton impermeabile; (dx) vista di parte della volta in spritz-beton impermeabile.

Tabella 1. Il mix design (spritz-beton impermeabile C25/30 - XC4 - XF1).

Componente	Massa volumica (kg/dm^3)	Volume (dm^3)	Massa (kg/m^3)
CEM II/B-M (S-T) 42.5 R HS	3.03	141.9	430
Fumi di silice (slurry)	1.1	7.3	8
0/4 mm – sabbia alluvionale	2.66	91	242
0/8 mm – ghiaietto	2.66	508	1.351
Acqua libera	1	205	205
Aria	-	35	-
Superfluidificante	1.06	4.7	4.945
Fibre polimeriche	0.91	5.5	5
Penetron Admix®	2.2	2	4.3

Tabella 2. Le prove di permeabilità all'acqua in pressione secondo la EN 12390-8.

Miscela	Data di confezione	Data di prova	Profondità di penetrazione media (mm)
Senza Penetron Admix®	09.06.2020	07.07.2020	26
Con Penetron Admix®	03.08.2020	31.08.2020	17

Admix® in quanto i risultati di numerose campagne sperimentali ad hoc condotte nei nostri laboratori sia per il mercato svizzero che estero per la determinazione del potere cicatrizzante (come meglio evidenziato nel prosieguo) suggeriscono la validità del sistema in un contesto di galleria con forte presenza di umidità.
Nel seguito, si riportano: un breve cenno teorico sul self-healing, una breve spiegazione della metodologia impiegata per testare questa proprietà, il dettaglio della miscela di spritz- beton proposta e impiegata per il progetto, ed infine i risultati di prova ottenuti sulla miscela contenente Penetron Admix®. L'obiettivo è quello di di condividere questo approccio, poco conosciuto ma estremamente utile, nei casi in cui si vogliano contrastare i fenomeni di percolamento di acque a bassa pressione attraverso la rete di fessure capillari e da ritiro vincolato che si forma nel calcestruzzo spruzzato quando questo materiale sia usato come rivestimento definitivo, come è il caso in esame.

4. Il mix design per spritz-beton impermeabile

Il mix design impiegato per la volta della galleria Paradiso è riportato in Tabella 1: esso non include l'additivo accelerante che viene aggiunto in cantiere per assicurare la presa rapida dello spritz-beton ma che, in base alle prove eseguite in corso d'opera, non ha mostrato segni di alterazione delle proprietà ottenute in fase di qualifica.

5. I risultati di prova

Al fine di determinare le proprietà di impermeabilità della miscela, sono state eseguite le seguenti prove:
permeabilità all'acqua in pressione secondo EN 12390-8 su miscela con e senza Penetron Admix®, entrambe senza accelerante; self-healing su miscela contenente Penetron Admix® e accelerante e su miscela contente Penetron Admix® ma senza accelerante.
I risultati delle prove di permeabilità all'acqua in pressione sono riportati in Tabella 2.
Analizzando i dati esposti si evince che l'introduzione di Penetron Admix® alla miscela di spritz-beton ha comportato un miglioramento, anche al netto della riproducibilità della prova, della proprietà di impermeabilità all'acqua in pressione.
Per quanto riguarda le prove di self-healing, eseguite secondo la procedura interna descritta sopra, i risultati sono riepilogati in Tabella 3.
Dai risultati sopra esposti è possibile osservare come entrambi i campioni (con e senza accelerante) mostrino l'abilità di sigillare la fessura. Si nota, inoltre, come il campione contenente anche accelerante abbia sigillato la fessura in minor tempo sebbene le cause di questo siano al momento riferibili, riteniamo, a fattori geometrici di forma e scabrezza delle fessure.
Per maggiore dettaglio, si riporta in Figura 7 il grafico che mostra l'andamento del flusso di acqua attraverso i campioni in funzione del tempo di prova. La sigillatura della fessura corrisponde ad un flusso d'acqua passante attraverso il campione pari a zero (<1.0 litri/h).
Infine, le seguenti immagini (Figura 8) scattate al microscopio ottico con ingrandimento fino a 800x consentono di individuare i prodotti di reazione sviluppati da Penetron Admix®, che sono in ultimo i responsabili della sigillatura delle fessure. In Figura 9 è invece riportato il dettaglio della fessura prima e dopo la prova per il campione contenente additivo accelerante.
È importante notare che la formazione dei prodotti di reazione che appare ad occhio nudo come una massa amorfa continua che sigilla la fessura, è in realtà un'intricata rete di aciculi cristallini e globuli amorfi discontinua, la quale però reduce in modo drastico la sezione libera per il flusso di acqua che quindi viene rallentato

Tabella 3. I risultati delle prove di self-healing.

	11587 (Penetron Admix® senza accelerante)	10740 (Penetron Admix® con accelerante)
Giorno inizio/fine	13.07.2020 / 01.10.2020	18.09.2020 / 02.10.2020
Larghezza media della fessura misurata otticamente all'inizio della prova	0.45 ffi 0.17 mm	0.55 ffi 0.07 mm
Lettura finale del flusso in condizioni stazionarie (litri/ora)	0.0	0.0
Abbondante presenza di cristalli di neoformazione	Vero	Vero
Larghezza nominale residua della fessura calcolata alla fine della prova (mm)	0.0	0.0
Natura del prodotto precipitato sulla parete della fessura	Portlandite/calcite/silicati idrati indifferenziati	Portlandite/calcite/silicati idrati indifferenziati
Classificazione del self-healing	Chimico	Chimico
Valutazione	Superato. Esistono prove sufficienti per indicare che il deposito di cristalli di nuova formazione sulla superficie della fessura dia un contributo dominante al processo di self-healing: vero self healing	Superato. Esistono prove sufficienti per indicare che il deposito di cristalli di nuova formazione sulla superficie della fessura dia un contributo dominante al processo di self-healing: vero self healing

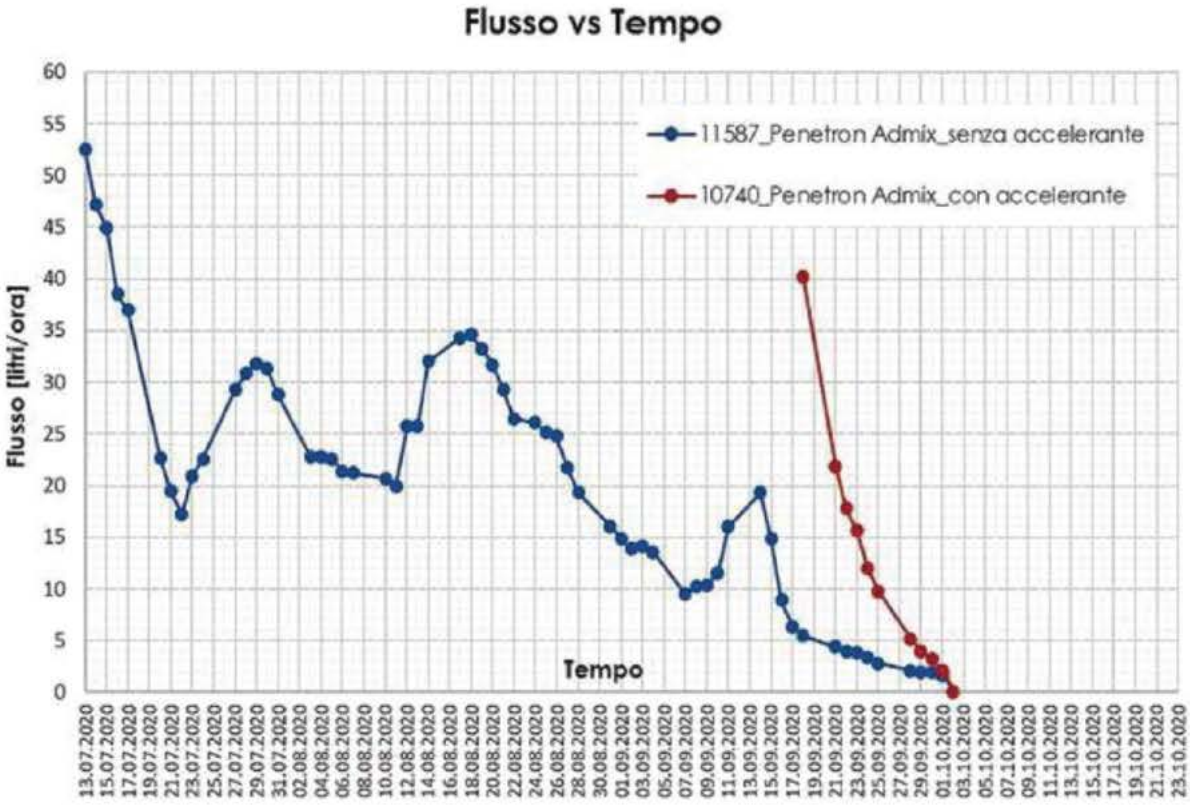

Figura 7. Le prove di self-healing in cui si nota l'andamento del flusso d'acqua nel tempo. Il flusso oscillante della curva blu mostra gli effetti di saturazione ed asciugatura periodica a cui abbiamo sottoposto i campioni ad intervalli regolari per evidenziare anche gli effetti non permanenti di espansione meccanica sotto saturazione. Se il campione che ha raggiunto una certa portata viene tolto al tempo t1 dal flusso e conservato in ambiente asciutto, la seconda volta che viene inserito nuovamente nel flusso continuo al tempo t2, la portata iniziale è maggiore di quella che si aveva in t1 ma è minore di quella ad inizio prova (tempo t0). L'isteresi osservata è appunto l'aliquota di self-healing chimico verso quello fisico che è causato dall'espansione meccanica ed è reversibile. Come si nota questo effetto decade nel tempo mostrando come, con il passare dei giorni/settimane, il fenomeno di sigillatura irreversibile di tipo chimico prevale su quello reversibile di natura fisica fino a diventare dominante/esclusivo.

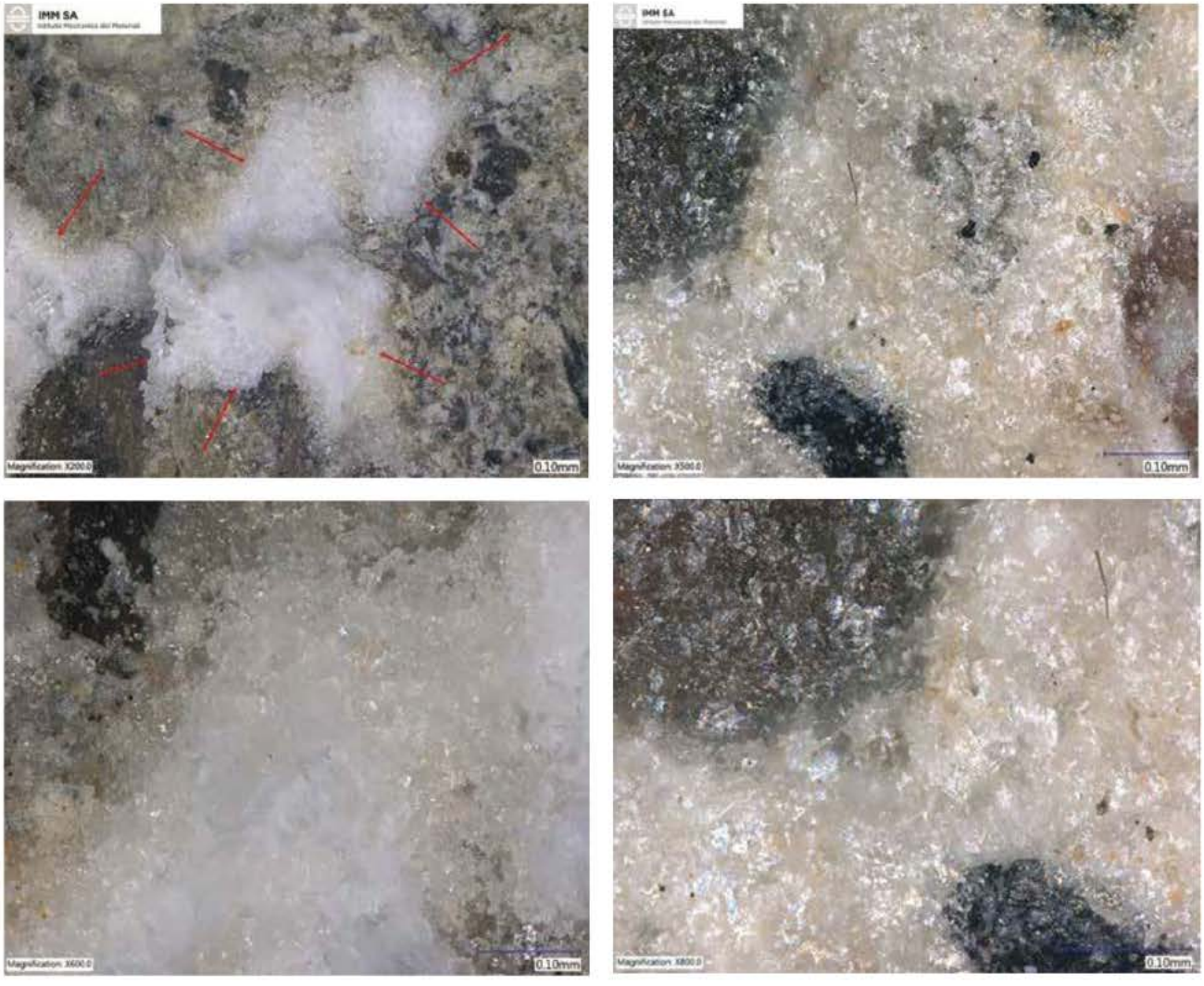

Figura 8. Dettaglio dei cristalli sviluppati dal campione con Penetron Admix® e senza accelerante con ingrandimento a 200x (in alto a sinistra), a 500x (in alto a destra), a 600x (in basso a sinistra) e 800x (in basso a destra).

Figura 9. (sx) Dettaglio della fessura prima della prova; (dx) dettaglio della fessura alla fine della prova.

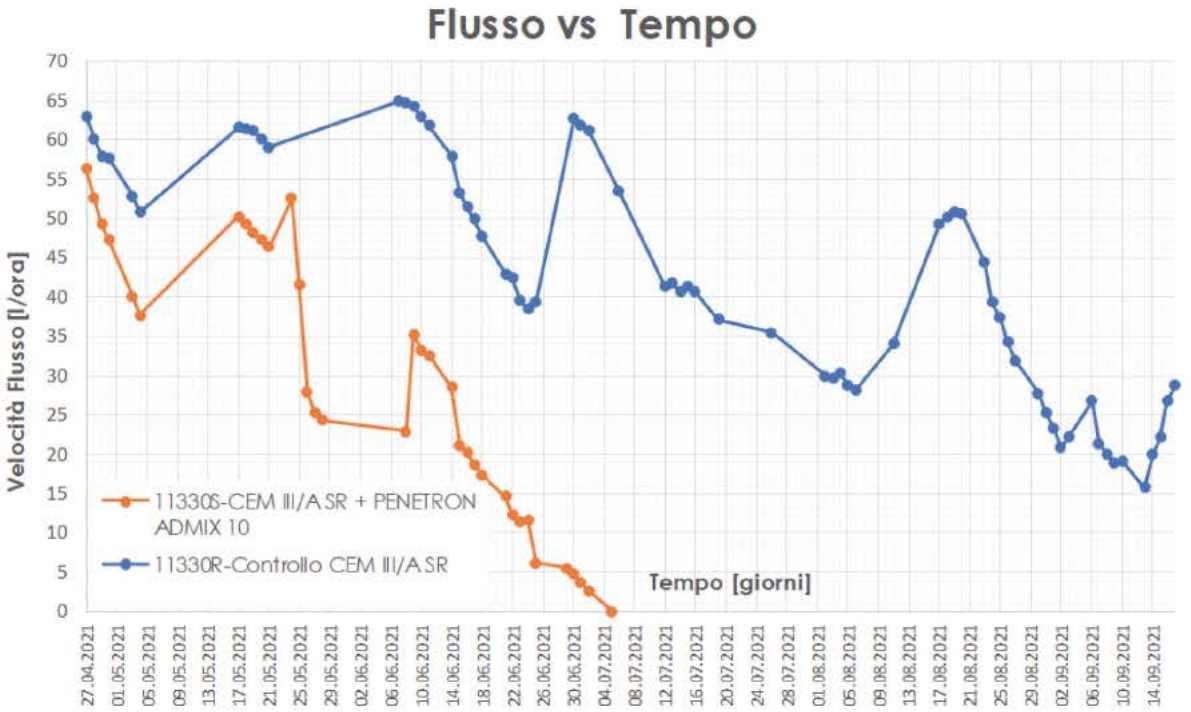

Figura 10. Risultati di prova relativi ad un altro progetto di ricerca da i quali si puo' evincer che il campione non additivato con Penetron Admix® non è in grado di sigillare la fessura. La riduzione del flusso nel campione di controllo è quindi ascrivibile ad un semplice contributo di espansione fisica e, quindi, reversibile.

progressivamente fino a ridursi virtualmente a zero. Il risultato finale è quindi quello di creare una rete di cristalli/globuli via via sempre più coalescenti che la tortuosità fino al punto di ridurre il flusso a solo stillicidio. Da qui la classificazione di "self-healing chimico", che indica l'irreversibile rigenerazione della fessura propri ad opera dei cristalli/globuli sopra citati. Ciò non accade invece per campioni non contenenti additivi idrofillici, sebbene questo non sia stato verificato in questo specifico caso di studio. Tuttavia, l'esperienza maturata dall'Istituto Meccanica dei Materiali SA, ha permesso di dimostrare che campioni privi di additivo idrofillico presentino esclusivamente fenomeni di rigenerazione delle fessure di tipo fisico (dovuto cioè all'espansione fisica dovuta all'assorbimento d'acqua) e, quindi, reversibile. A titolo di esempio, si riporta in Figura 10 il risultato di una prova di self-healing condotta su campioni con e senza Penetron Admix® nell'ambito di un altro progetto di ricerca.

6. Conclusioni

La metodologia di prova proposta dall'Istituto Meccanica dei Materiali SA si propone come metodo innovativo e di rilevanza cruciale al fine di studiare il fenomeno del self-healing in maniera quantitativa e, di conseguenza, ripetibile. La stessa, applicata al caso della Galleria Paradiso, ha permesso di dimostrare che:

- l'introduzione di Penetron Admix® ha, prima di tutto, comportato il miglioramento della proprietà di permeabilità all'acqua in pressione e di auto cicatrizzazione delle lesioni dello spritz-beton;
- l'aggiunta di Penetron Admix® ha consentito, in quanto ha passato i criteri sperimentali proposti, l'innesco di un processo di self-healing caratterizzato da attività chimica (irreversibile), con abbondante formazione di prodotti secondari, e non di espansione fisica (reversibile);
- quanto determinato in fase di qualifica è stato confermato anche in sito in fase di controllo di produzione.

Il programma sperimentale eseguito ha quindi confermato che l'aggiunta di Penetron Admix® alla miscela originale di spritz-beton abbia migliorato le proprietà della stessa in termini di permeabilità del materiale integro ed anche in presenza di fessure che altrimenti richiederebbero costosi interventi di riparazione. I riscontri ottenuti in fase di collaudo hanno dato conferma di quanto sopra.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Penetron Swiss SA e il Sig. Priamo Angioi per l'assistenza tecnica e commerciale fornita nelle fasi di prequalifica dei mix e di realizzazione dell'opera.

Bibliografia

[1] Edvardsen K. (1999) – Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete – ICE Publishing.

[2] Di Tommaso M. (2020) – Proposta di un metodo sperimentale per quantificare le prestazioni degli additivi idrofillici, Ingenio, Incalcestruzzo.

[3] Rilem Star - Technical Committee 221-SHC (2013) – Self-healing phenomena in cement-based materials.