

IL CASO DELLA GALLERIA PARADISO

UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DI UNA MISCELA DI SPRITZ-BETON ADDITIVATA CON L'ADDITIVO IDROFILICO PENETRON ADMIX® PER MIGLIORARE L'IMPERMEABILITÀ AI FLUIDI AGGRESSIVI E GARANTIRE LA CAPACITÀ DI AUTORIGENERAZIONE DELLE FESSURE DELLA VOLTA

L'applicazione dello spritz-beton impermeabile in cantiere

La galleria Paradiso (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

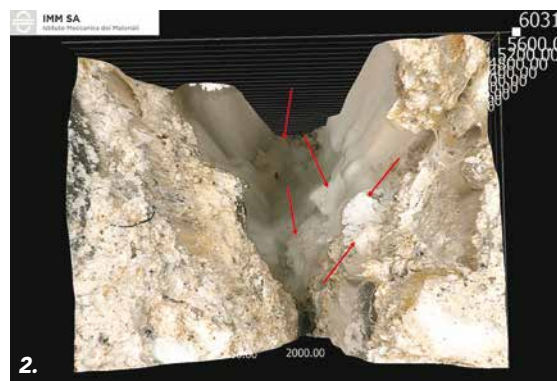
consentiva ai convogli merci il trasporto di container con altezza agli angoli fino a 4 m.

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 (Figure 1 e 2) al fine di evitare filtrazione di acqua da tergo.



1. Vista di parte della volta in spritz-beton impermeabile



2.

A questo proposito, il Committente ha incaricato il nostro Istituto 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 (Ing. 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 idrofilico Penetron Admix® in quanto, per quanto riguarda la nostra esperienza diretta sperimentale, possiamo affermare che questo prodotto è stato sottoposto, nel laboratorio IMM SA, ad una estensiva campagna di analisi sia per il mercato svizzero che estero con prove di self-healing con misura della portata in continuo e con osservazione microscopica dei prodotti, e al contempo sono state eseguite prove comparative con e senza prodotto per verificare l'influsso del materiale sulle caratteristiche di resistenza e di durabilità (prove secondo Norma SIA 262/1), trovando che l'aggiunta del prodotto, oltre a garantire sigillatura fino a 0,50 mm, lascia invariate alcune proprietà quali la resistenza meccanica e può migliorare il coefficiente di diffusione ai cloruri sul lungo termine nonché, in condizioni di prova ciclicamente asciutte/bagnate, il coefficiente di carbonatazione.

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®.

CENNI TEORICI SUL FENOMENO DI SELF-HEALING

Il termine self-healing indica un processo fisico/chimico di autorigenerazione 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 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - che si forma durante 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.

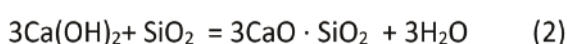
La reazione descritta sopra è espressa come:



Questa reazione avviene sempre in presenza di cemento Portland.

Quando, in aggiunta al cemento Portland (detto anche clinker puro), sono presenti pozzolane ad elevato contenuto di silice (SiO_2) quali ceneri, loppe, microsilice, ecc. 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 e che gli conferisce molte delle sue proprietà meccaniche e fisiche.

Questa reazione è definita pozzolanica e si esprime come:



Il componente che si forma $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 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 con acqua in pressione.

È proprio a questo punto, quando si richiede capacità autorigenerante migliorata rispetto a quella naturale del calcestruzzo, che è necessario aggiungere materiali che, specificamente, continuano a lavorare sulle reazioni di cui sopra a formare un volume maggiore di prodotti di reazione (calcite, C3S, portlandite, ecc.) il quale, sotto forma di cristalli coalescenti che germinano sulle pareti della fessura, la può, eventualmente, chiudere.

Questi prodotti cadono 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 con pressioni superiori a quella atmosferica, la sigillatura con componenti idrofillici è impossibile.

Tuttavia, considerato che 0,50 mm implica di per sé un danno strutturale che non solo ha ripercussioni sulla durabilità ma anche, spesso, sulla statica, tali fessure si presume debbano essere comunque riparate per ripristinare continuità meccanica.

Nella fattispecie dello spritz-beton la fessurazione attesa, a causa della presenza di fibre, è proprio di tipo capillare fino al limite di sigillatura definito sopra e quindi l'additivo idrofillico può garantire la riduzione della filtrazione.

In conclusione, un prodotto idrofillico in grado di ridurre la portata attraverso una fessura di larghezza pre-definita fino a decadere di almeno il 90-95% rispetto alla portata iniziale a fessura aperta, e per il quale si possa dimostrare in modo quantitativo la formazione di nuovi prodotti di reazione coalescenti sulle pareti della fessura, può essere identificato come tale.

Ad oggi, salvo uno studio comprensivo pubblicato da RILEM sul tema, non esiste una procedura normalizzata per verificare le capacità idrofilliche di un prodotto; tuttavia, l'esperienza professionale e la letteratura specialistica recente indicano 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 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.

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), IMM SA ha sviluppato un proprio metodo di prova.

In sintesi, la portata in ingresso in condizioni stazionarie di un campione cilindrico di diametro 100 mm (di cui circa 70 mm è la lunghezza netta di fessura visibile sulla superficie esposta al flusso) opportunamente preparato e pre-fessurato con metodi proprietari è misurata in continuo con flussimetri elettronici che trasmettono i dati a una centralina di raccolta dati con intervallo di acquisizione di 15'. Il gradiente idraulico applicato è pari a 35. La prova termina quando il flusso in uscita dalla fessura è pari a zero. A seguire, i campioni vengono analizzati al microscopio ottico per individuare la presenza e la natura dei prodotti di idratazione formati a cavallo della fessura.

IL MIX DESIGN PER SPRITZ-BETON IMPERMEABILE

Il mix design proposto e impiegato per la volta della galleria Paradiso è riportato in Figura 3: esso non include l'additivo accelerante che viene aggiunto in cantiere per assicurare la presa rapida dello spritz-beton.

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 contenente Penetron Admix® ma senza accelerante;

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

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

	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
1. Larghezza media della fessura misurata otticamente all'inizio della prova	0,45±0,17 mm	0,55±0,07 mm
2. Lettura finale del flusso in condizioni stazionarie (litri/ora)	0.0	0.0
3. Abbondante presenza di cristalli di neoformazione	Vero	Vero
4. Larghezza nominale residua della fessura calcolata alla fine della prova (mm)	0.0	0.0
7. Natura del prodotto precipitato sulla parete della fessura	Portlandite/calcite/silicati idrati indifferenziati	Portlandite/calcite/silicati idrati indifferenziati
8. Classificazione del self-healing	Chimico	Chimico
Valutazione	Superato	Superato

5. I risultati delle prove di self-healing

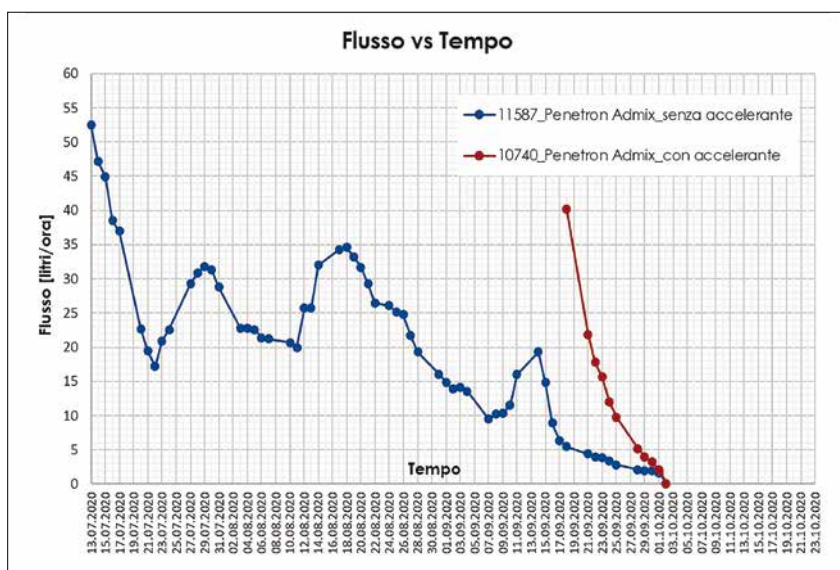
I risultati delle prove di permeabilità all'acqua in pressione sono riportati in Figura 4.

Dai risultati esposti in Figura 3 si evince che l'introduzione di Penetron Admix® alla miscela di spritz-beton ha comportato un buon miglioramento della proprietà di permeabilità all'acqua in pressione.

Per quanto riguarda le prove di self-healing, eseguite secondo procedura interna di IMM SA, i risultati sono riepilogati in Figura 5.

COMPONENTE	DENSITÀ (kg/dm³)	VOLUME (dm³)	MASSA (kg/m³)
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	2,66	91	242
0/8	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

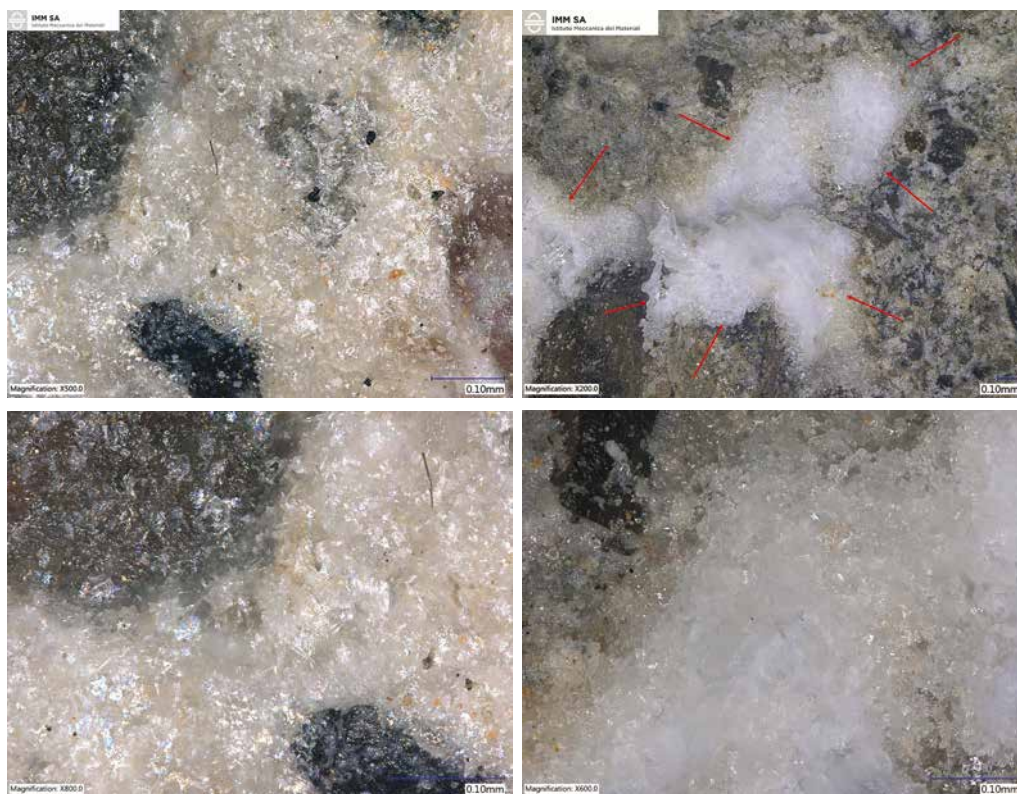
3. Il mix design (spritz-beton impermeabile C25/30 - XC4 - XF1)



6. Le prove di self-healing in cui si nota l'andamento del flusso d'acqua nel tempo

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, considerando anche che l'ampiezza della stessa era maggiore (0,55 mm contro 0,45 mm).

Per maggiore dettaglio, si riporta in Figura 1 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



7A, 7B, 7C e 7D. Dettaglio dei cristalli sviluppati dal campione con Penetrone Admix® e senza accelerante con ingrandimento a 500x (7A), a 800x (7B), a 200x (7C) e 600x (7D)

qua passante attraverso il campione pari a zero. Infine, nelle seguenti figure, si riportano le immagini al microscopio ottico (ingrandimento fino a 1.000x) che consentono di individuare i prodotti di reazione sviluppati da Penetrone Admix®, che sono in ultimo i responsabili della sigillatura delle fessure.

CONCLUSIONI

Sulla base di quanto sopra, è possibile concludere quanto segue:

- l'introduzione di Penetrone Admix® ha comportato un buon miglioramento della permeabilità dello spritz-beton all'acqua in pressione;
- l'aggiunta di Penetrone Admix® ha conferito allo spritz-beton la proprietà di self-healing, ovvero la capacità dello stesso di autoriparare fessure di apertura fino a 0,5 mm (è da notare come questa proprietà sia peculiare dei soli prodotti idrofilici). Questo risulta evidente dai

risultati delle prove di portata d'acqua attraverso la fessura in funzione del tempo. Inoltre, dall'analisi al microscopio ottico dei prodotti di reazione, è stato possibile determinare che gli stessi sono costituiti da portlandite/calcite/silicati idrati indifferenziati che rimangono stabili a seguito dell'interruzione del flusso d'acqua, rendendo pertanto il fenomeno di sigillatura irreversibile.

Il programma sperimentale eseguito ha quindi confermato che l'aggiunta di Penetrone Admix® alla miscela originale di spritz-beton abbia migliorato le proprietà della stessa in termini di durabilità e permeabilità del materiale integro, e anche in presenza di fessure che altrimenti richiederebbero costosi interventi di riparazione. ■

(1) Direttore Generale Istituto Meccanica dei Materiali SA (Lugano-CH, laboratorio accreditato ISO/CEI 17025 e società di consulenza nell'ambito della tecnologia dei materiali da costruzione)

(2) Ingegnere, Responsabile settore calcestruzzi Istituto Meccanica dei Materiali SA (Lugano-CH, laboratorio accreditato ISO/CEI 17025 e società di consulenza nell'ambito della tecnologia dei materiali da costruzione)

(3) Amministratore Delegato di Penetrone Swiss Sa