

# Impermeabilizzazione del calcestruzzo integro e fessurato mediante additivi cristallizzanti

Enrico Maria Gastaldo Brac<sup>1</sup> e Liberato Ferrara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Penetron Italia s.r.l.

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

## 1. Introduzione

È ben noto che la struttura porosa del conglomerato è responsabile dei fenomeni di degrado del materiale: pur essendo generalmente accettato che un calcestruzzo la cui composizione sia stata adeguatamente progettata, con un rapporto acqua/cemento limitato, e per la cui maturazione siano state poste in essere tutte i necessari accorgimenti possa essere caratterizzato da una buona durabilità, è altrettanto evidente che nessun calcestruzzo sia completamente impermeabile.

L'acqua può penetrare nel calcestruzzo, attraverso i suoi pori e le eventuali microfessure esistenti, sia per assorbimento capillare sia per effetto di una pressione idrostatica. Nel primo caso il movimento dell'acqua attraverso le microporosità del materiale avviene in assenza di qualsiasi gradiente di pressione, quale risultato della interazione fra l'acqua e le pareti dei pori. Nel secondo caso, ossia in presenza di un gradiente idraulico, il meccanismo che governa l'ingresso ed il trasporto di acqua attraverso il calcestruzzo viene definito *permeabilità*. In generale tuttavia con il termine di *permeabilità* si intende la resistenza del calcestruzzo alla penetrazione e/o al passaggio dell'acqua nelle effettive condizioni di servizio, che includono anche lo stadio fessurato.

In tale ottica, la necessità di ridurre la permeabilità del calcestruzzo ha portato, da un lato, all'utilizzo, sempre più diffuso ed accettato, di materiali sostitutivi del cemento (supplementary cementitious materials SCMs), e, dall'altro, allo sviluppo di una intera categoria di additivi noti come Additivi riduttori di permeabilità – Permeability Reducing Admixtures (PRAs).

Secondo **ACI 212-3R-10** tali additivi vengono classificati nella maniera seguente:

- *additivi idrofobi*, a base di saponi o catene lunghe di derivati degli acidi grassi, oli vegetali e petrolio, che garantiscono una azione idro-repellente lungo le pareti delle porosità aperte, lasciandole comunque tali;
- *additivi in polvere*, sia inerti sia chimicamente attivi (fra i quali possono essere inclusi i materiali sostitutivi del cemento), che agiscono quali “densificanti” della struttura porosa del calcestruzzo, limitando in tal modo l'ingresso ed il movimento dell'acqua;

- **additivi cristallini**, composti da materiali inorganici veicolati da una miscela di cemento e sabbia, che, a motivo della loro natura altamente idrofila, reagiscono con l'acqua e con i prodotti di idratazione del cemento per formare cristalli di idrosilicati di calcio, che vanno ad aumentare la densità della relativa fase, ed altri precipitati in grado di depositarsi nelle porosità e nelle micro fessure esistenti richiudendole. I meccanismi di reazione di tali additivi sono i medesimi che governano la idratazione del cemento e dunque la formazione degli idrosilicati di calcio: ciò fa sì che i prodotti di tali reazioni possano integralmente legarsi con la struttura della pasta cementizia idratata, contribuendo in maniera significativa ad aumentare la resistenza del conglomerato alla penetrazione dell'acqua, anche sotto significativo gradiente idraulico.

Tale effetto impermeabilizzante può conseguirsi sia mescolando l'additivo in polvere direttamente alla miscela dei componenti del calcestruzzo sia utilizzando l'additivo stesso per il confezionamento di una "boiaccia", da applicarsi quindi agli elementi in calcestruzzo come un "convenzionale" trattamento idrorepellente che ha caratteristiche di adesione e fusione con il supporto estremamente interessanti.

In questo lavoro si passeranno in rassegna alcuni risultati sperimentali volti a verificare la efficacia di un tale trattamento, realizzato con un additivo cristallino secondo quanto descritto nel seguito.

## **2. Campagna sperimentale**

Al fine di verificare la efficacia del trattamento di impermeabilizzazione effettuato mediante la applicazione superficiale, in ragione di  $1 \text{ kg/m}^2$ , di una miscela prodotta con additivo cristallizzante in polvere (Penetron standard ©) e acqua (nella proporzione di 1 parte di additivo e 2 parti di acqua) è stata realizzata una apposita campagna sperimentale così articolata:

- verifica della tensione di adesione del trattamento con un substrato in calcestruzzo, in diverse condizioni di maturazione;
- verifica della tensione di adesione del trattamento con un substrato in calcestruzzo in condizioni di attacco chimico, in ambiente acido (pH 2-3) e basico (pH 11-12);
- verifica della resistenza alla penetrazione dell'acqua sotto pressione, in presenza ed in assenza di trattamento e tanto in regime di spinta quanto in regime di controspinta, per calcestruzzo integro e fessurato.

In particolare le prove di permeabilità all'acqua in pressione sono mirate a verificare sperimentalmente la estensione della penetrazione del processo di cristallizzazione catalizzato dall'additivo all'interno della massa di calcestruzzo e la conseguente efficacia in termini di miglioramento del grado di impermeabilità del manufatto.

## **2.1 Prove di adesione**

Le prove di adesione su substrato in calcestruzzo confezionato con rapporto acqua/cemento pari a 0.4 e dimensione massima dell'aggregato pari ad 8 mm, sono state svolte in conformità con le norme UNI EN 13578, per quanto riguarda la efficacia della adesione del trattamento nelle condizioni di maturazione in acqua (verifica di compatibilità con il calcestruzzo umido) e EN 1766, per quanto riguarda la resistenza all'attacco chimico. Le superfici sulle quali applicare il trattamento impermeabilizzante sono state tutte previamente trattate mediante sabbiatura.

### *2.1.1 Compatibilità con il calcestruzzo umido (UNI EN 13578)*

Nel primo caso, onde verificare la compatibilità con il calcestruzzo umido, sono stati realizzate quattro lastre quadrate di lato 300 mm e spesse 60 mm, maturate per 14 giorni in condizioni normalizzate ( $T = 21^{\circ}\text{C}$ , RH 60%); quindi due di esse sono state conservate per ulteriori 7 giorni sott'acqua alla temperatura di  $5^{\circ}\text{C}$ , indicata come temperatura di applicazione minima del trattamento, e, prima della applicazione del trattamento, rimosse dall'acqua, asciugate con carta assorbente, e mantenute per 2,5 ore in un ambiente con temperatura pari a  $5^{\circ}\text{C}$  e umidità relativa pari al 75%, collocati in un bagno di acqua su supporti che mantenessero la superficie da rivestire ad una altezza di 10 mm sopra la superficie dell'acqua. Per confronto due ulteriori lastre, da intendersi come provini di riferimento, sono state conservate, dopo il 14 giorni di maturazione nelle condizioni standard sopra indicate, per ulteriori 5 giorni nelle medesime condizioni e quindi, per gli ultimi due giorni precedenti alla applicazione del trattamento, nel medesimo ambiente con temperatura pari a  $5^{\circ}\text{C}$  ed umidità relativa pari al 75%.

In entrambi i casi il trattamento è stato effettuato con la "boiacca" realizzata con l'additivo cristallizzante, secondo le proporzioni indicate nel paragrafo precedente, avendo avuto cura di pre-condizionare i provini per 48 ore nel medesimo ultimo ambiente di cura.

Successivamente alla applicazione del trattamento i provini stagionati in acqua sono stati conservati su supporti all'interno di un bagno di acqua alla temperatura di  $5^{\circ}\text{C}$ , in modo tale che il livello dell'acqua rimanesse 10 mm al di sotto dell'interfaccia fra il substrato ed il rivestimento; i provini di riferimento sono stati conservati alla temperatura di  $5^{\circ}\text{C}$  ed umidità relativa del 75%.

La resistenza di adesione del trattamento al substrato è stata determinata mediante prove di "strappo" (pull-off) alle scadenze dei 7, 14, 28 e 56 giorni (due prove per ciascuna scadenza).

### *2.1.2 Resistenza all'attacco chimico (EN 1766)*

Per la verifica di resistenza all'attacco chimico, il trattamento è stato applicato sulle lastre in calcestruzzo di riferimento dopo 7 giorni di stagionatura nelle condizioni normalizzate di cui sopra;

i provini sono stati quindi ricoperti, dopo 48 ore di asciugatura del trattamento, con un battente di 20 mm con soluzioni acide, rispettivamente a pH 2 e pH3, realizzate mediante diluizione di HCl concentrato, e basiche, rispettivamente a pH 11 e pH 12, realizzate mediante diluizione di NaOH. La tensione di adesione è stata misurata allo scadere dei 28 e dei 90 giorni dopo l'inizio del "condizionamento"

## 2.2 Prove di permeabilità

Per la verifica della resistenza alla penetrazione dell'acqua in pressione sono stati confezionati provini cubici di lato 150 mm con un calcestruzzo la cui composizione è sintetizzata in Tabella 1. Allo scadere dei 28 giorni la resistenza cubica misurata è risultata pari a 31.4 N/mm<sup>2</sup>.

<b>Componente</b>	<b>Dosaggio (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cemento CEM II/A-LL 32.5 R	340
Acqua	205 w/c = 0.6
Sabbia granitica 0/4 mm	991
Pietrisco 3/8 mm	175
Ghiaia 8/15 mm	582
Superfluidificante acrilico	1,7 (lt/m <sup>3</sup> ) 0.5% in peso cemento

Tabella 1. Mix design calcestruzzo per prove di resistenza alla penetrazione dell'acqua in pressione

I provini sono stati maturati in acqua alla temperatura di 20°C per 28 giorni e, dopo la esecuzione del trattamento impermeabilizzante, come sopra descritto, fatto asciugare all'aria per 24 ore, sono stati riposti in acqua per ulteriori 60 giorni, al termine dei quali si è effettuata la prova di penetrazione dell'acqua in pressione, secondo la norma UNI EN 12390-7 (con acqua alla pressione di 5 Bar per 72 ore). La prova è stata eseguita:

- su una tripletta di provini di riferimento non trattati;
- su provini sottoposti al trattamento impermeabilizzante, ponendo a contatto con l'acqua:
  - la faccia trattata (regime di spinta; 1 gruppo di tre provini);
  - la faccia non trattata opposta a quella trattata (regime di controspinta; 1 gruppo di tre provini), onde verificare la migrazione all'interno del calcestruzzo dei processi di cristallizzazione sviluppati dall'additivo e la efficacia di tale migrazione sulla impermeabilizzazione del materiale;
  - la faccia trattata (regime di spinta; 1 gruppo di tre provini), previa rimozione del trattamento impermeabilizzante, al fine di determinare la profondità di migrazione dei processi di cristallizzazione.



Fessura indotta non passante



Allargamento fessura



Riempimento fessura con Penetron Standard



Incamiciatura con malta strutturale



Rimozione dell'eccesso di Penetron mediante fresatura



Applicazione strato definito di Penetron Standard

Figura 1. Sequenze delle operazioni di preparazione per la prova di penetrazione dell'acqua in pressione su campioni prefessurati.

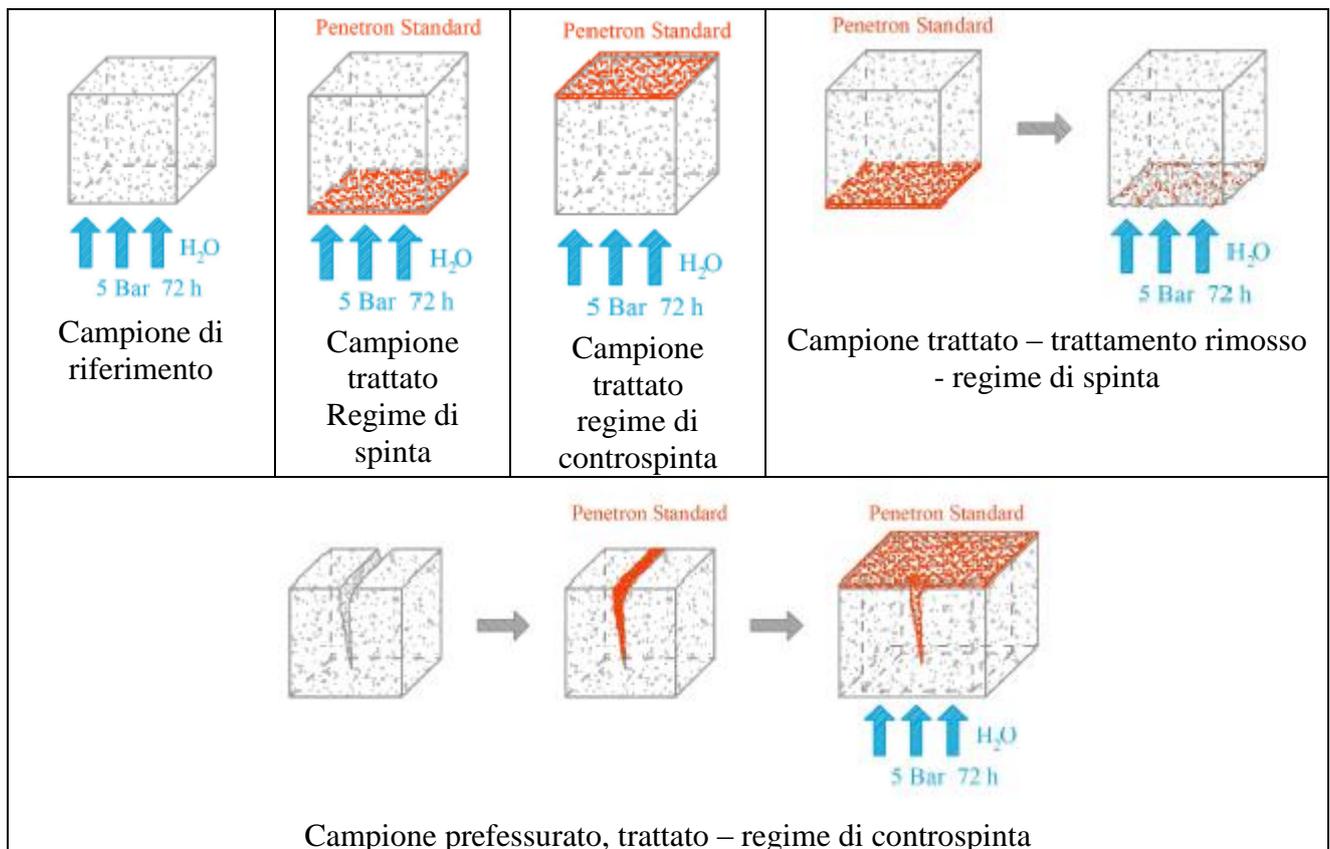


Tabella 2. Sintesi della sperimentazione eseguita per verificare la resistenza alla penetrazione dell'acqua in pressione.

Accanto ai gruppi di provini integri, un ulteriore gruppo di tre campioni è stato preventivamente, dopo 7 giorni di maturazione in acqua, fessurato mediante una prova di splitting, fino ad una apertura di fessura di 0.5 mm; la fessura è stata quindi riempita mediante la boiaccia preparata con additivo ed acqua ed il provino “incamiciato” mediante malta strutturale; dopo 24 ore di asciugatura e di pulizia della superficie, è stato eseguito il trattamento impermeabilizzante “tradizionale” ed i provini sottoposti ad una ulteriore stagionatura in acqua per 60 giorni, al termine dei quali è stata comunque eseguita la prova di penetrazione dell’acqua in pressione, in regime di controspinta, secondo le modalità sopra descritte. La figura 1 illustra la sequenza delle operazioni, mentre in Tabella 2 si riporta una “sintesi grafica” della sperimentazione eseguita e delle relative modalità.

### 3. Risultati sperimentali: analisi e discussione

#### 3.1 Prove di adesione

La rottura è avvenuta sempre per frattura coesiva nell’impermeabilizzante, indicando che la effettiva forza di adesione fra il trattamento impermeabilizzante ed il substrato è maggiore del valore misurato. I risultati, in Figura 2, mostrano chiaramente lo sviluppo nel tempo della tensione di adesione, che sviluppa i più significativi incrementi nei primi 7/14 giorni di maturazione, successivamente stabilizzandosi. La maturazione in acqua, pur comportando valori inferiori di circa il 20% in media rispetto a quelli raggiunti dai provini stagionati in aria, consente comunque di raggiungere valori di tensione di adesione, dell’ordine dei 3 N/mm<sup>2</sup>.

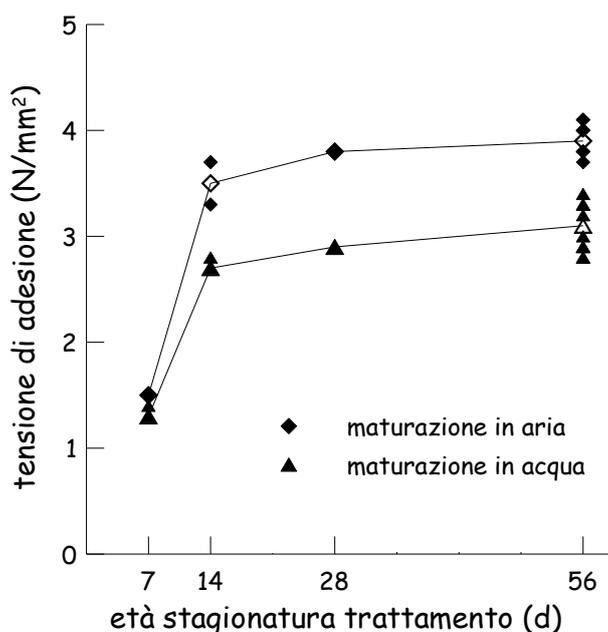


Figura 2. Effetto della maturazione in aria/acqua sullo sviluppo della tensione di adesione del trattamento impermeabilizzante al substrato

In Figura 3 si mostrano invece gli effetti dell'attacco chimico, in ambienti acidi e basici, sullo sviluppo della tensione di adesione, anche su tempi lunghi; in confronto con i valori maturati in acqua mostra un decadimento, quantificabile nell'ordine del 20% per ambienti basici e per ambiente mediamente acidi, e più significativo, dell'ordine del 40%, per gli ambiente fortemente acidi. In ogni caso i valori di tensione di adesione, comunque superiori a  $2 \text{ N/mm}^2$ , ovvero a  $1.5 \text{ N/mm}^2$ , nei casi più sfavorevoli, risultano essere compatibili con quanto atteso nelle condizioni di esercizio nelle previste applicazioni ingegneristiche dei trattamenti impermeabilizzanti.

È altresì da rilevare che la ispezione visiva dei campioni non ha, in alcun caso, mostrato segni di rigonfiamenti, distacchi per "scaling" e sbollamenti, ad ulteriore testimonianza della efficacia della adesione del trattamento, anche in condizioni di forte aggressività chimica, quali quelle provate.

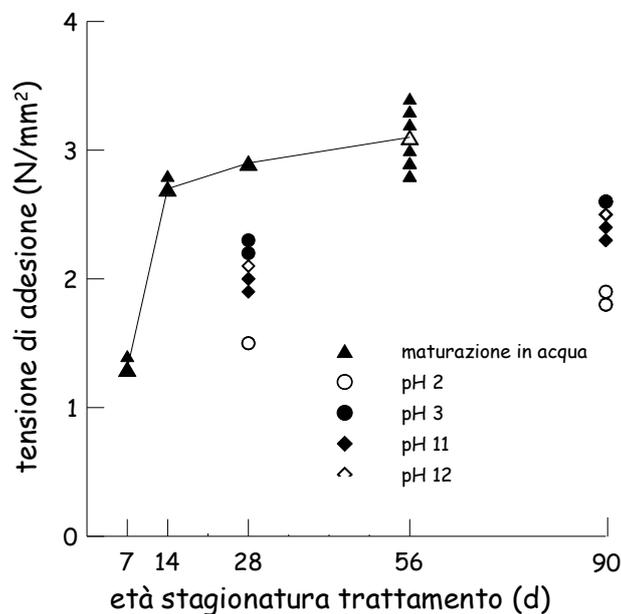


Figura 3. Influenza dell'attacco chimico (ambiente acido/basico) sullo sviluppo della tensione di adesione del trattamento impermeabilizzante al substrato

## 2.1 Prove di permeabilità

L'istogramma di Figura 4 illustra i dati raccolti mediante le misurazioni di profondità di penetrazione dell'acqua in pressione, quale visivamente rilevata dopo la esecuzione della relativa prova, previa rottura dei campioni mediante prova Brasiliana (si vedano alcune immagini in Figura 5). Si osserva come, a fronte di una profondità di penetrazione dell'acqua media di circa 60 mm per i campioni di riferimento, il trattamento impermeabilizzante sia in grado di ridurre di oltre l'80% il suddetto valore, che nel caso della prova in regime di spinta si attesta sui 10 mm, e di circa la metà in regime di contropinta, ossia quando l'acqua viene fatta penetrare dalla faccia non trattata opposta a quella sulla quale è stato eseguito il trattamento, a conferma della efficace penetrazione

dei fenomeni di cristallizzazione catalizzati dall'additivo. Ciò viene confermato anche dai valori misurati sui campioni sottoposti a prova, in regime di spinta, a seguito della rimozione mediante fresatura dello strato superficiale di trattamento, per i quali la profondità di penetrazione dell'acqua si è mediamente assestata sui 20 mm. È altresì interessante osservare come per i campioni prefessurati e trattati i valori di penetrazione dell'acqua rilevati siano di poco superiori a quelli osservati per i provini integri non trattati, a conferma della efficacia dei fenomeni di cristallizzazione, propri dell'additivo, nel ripristinare, anche in presenza di significativi danneggiamenti, le condizioni originarie proprie di un calcestruzzo poroso in assenza di trattamento.

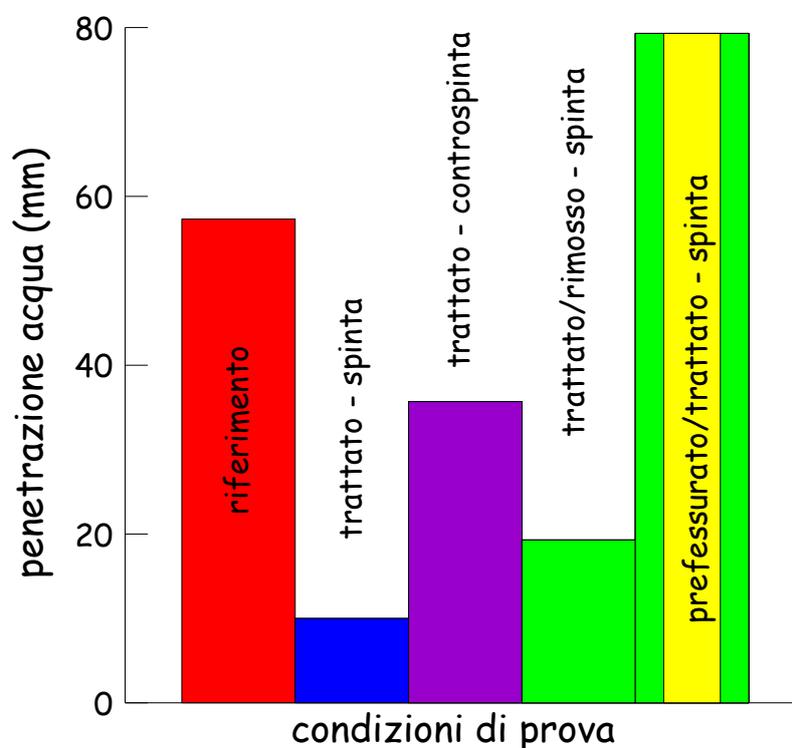
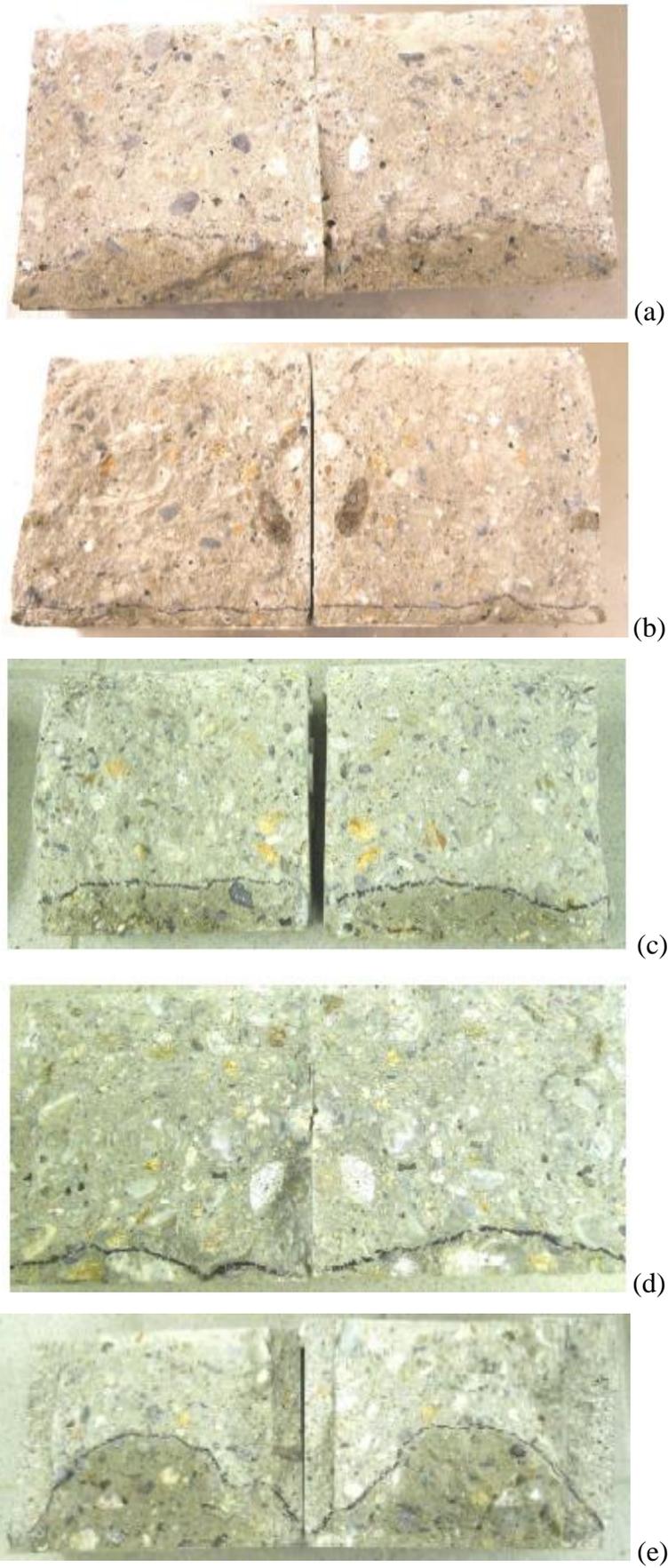


Figura 4. Penetrazione dell'acqua in pressione (5 bar) – media dei valori misurati su tre campioni per ciascuna condizione di prova

## Conclusioni

I risultati della sperimentazione illustrati in questo lavoro confermano l'efficacia del trattamento impermeabilizzante, realizzato mediante applicazione superficiale di una boiaccia confezionata con additivo cristallino, sia in termini di adesione al substrato esistente, in diverse condizioni di maturazione, ed anche in presenza di attacco chimico, sia in termini di resistenza alla penetrazione dell'acqua in pressione, in regime di spinta e controspinta, in stadio integro e fessurato.



*Figura 5. Immagini della penetrazione dell'acqua in provini: non fessurati e non trattati (a); non fessurati e trattati: regime di spinta (b); regime di contropinta (c); regime di spinta previa rimozione del trattamento (d); fessurati e trattati-regime di contropinta (e)*