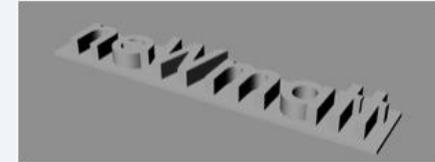




Caparol Italiana GmbH & Co. KG
20080 Vermezzo (MI) – Largo Caparol, 1
Tel. 02.9485521 – www.caparol.it

Gruppo di ricerca neWmatt
Dipartimento di Ingegneria Civile
Università degli Studi di Salerno.



Nuove Tecnologie per il Ripristino e la Protezione del c.a.
Convegno di Presentazione dei risultati di una Convenzione
di Ricerca Caparol - Dipartimento di Ingegneria Civile
dell'Università degli Studi di Salerno

- Sperimentazione in sito sulla protezione del calcestruzzo da carbonatazione.**

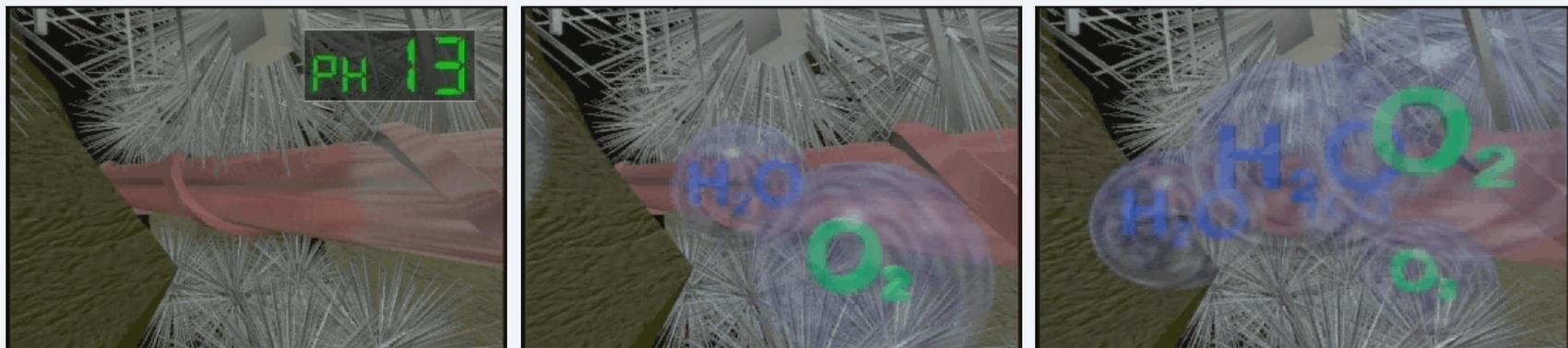
Salerno, 30 Ottobre 2012, ore 16:00 – Sala Convegni Hotel Dei Principati **** Best Western
Via Salvatore Allende – Loc. Sava – 84081 Baronissi (Salerno)

Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 1

Il calcestruzzo costituisce un elemento protettivo per i ferri di armatura in quanto la calce in esso presente è fortemente alcalina. Il pH della soluzione acquosa che permea la pasta di cemento è generalmente maggiore di 13.

In queste condizioni, la piccola quantità di ossigeno infiltrata attraverso la porosità capillare del calcestruzzo è sufficiente a consentire la formazione di un film passivante di ossido ferrico impenetrabile all'ossigeno e all'acqua.

Per le sue caratteristiche di aderenza e per l'assenza di microporosità, il film assicura un perfetto isolamento dell'armatura rispetto all'ambiente esterno, impedendo ogni fenomeno di corrosione che non sia dovuto a correnti vaganti.



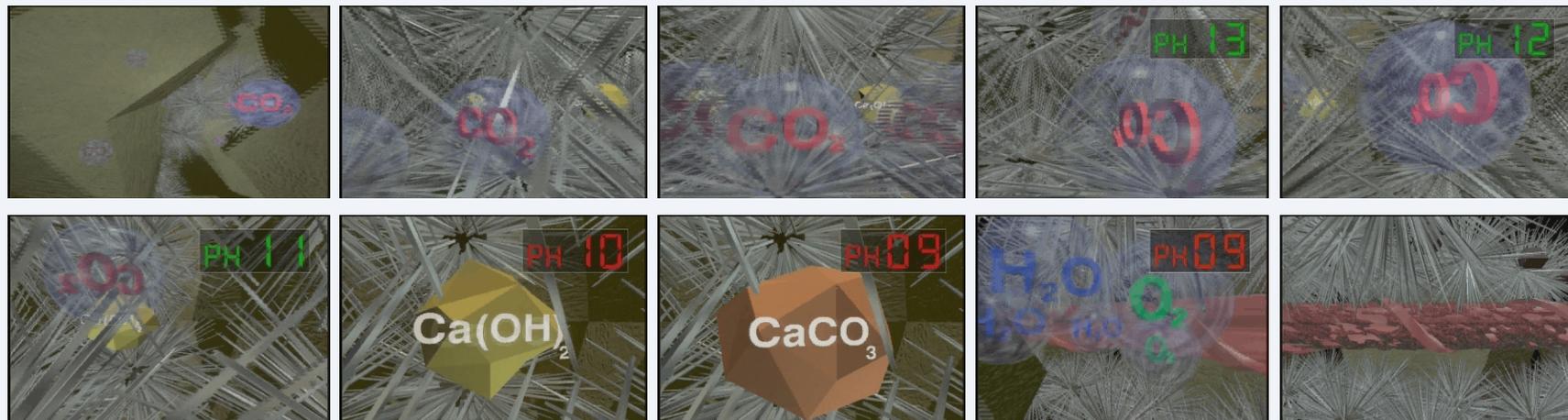
Riferimento: M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A., Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)*

Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 2

Queste condizioni di passività delle armature però sono alterate per effetto della *carbonatazione*. L'anidride carbonica atmosferica, infatti, penetrando gradualmente nei pori della pasta cementizia, si combina con la calce della soluzione permeante trasformandola in carbonato di calcio:



Il processo modifica le proprietà alcaline del conglomerato cementizio poiché la conseguente riduzione dell'idrossido di calcio determina un abbassamento del pH dell'ambiente sino a valori prossimi a 9. A questi livelli, il film che ricopre l'acciaio non è stabile e quindi si distrugge. Si ritiene che già un $\text{pH} < 11.5$ possa rendere il film non più passivante.



Riferimento: M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A., Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)*

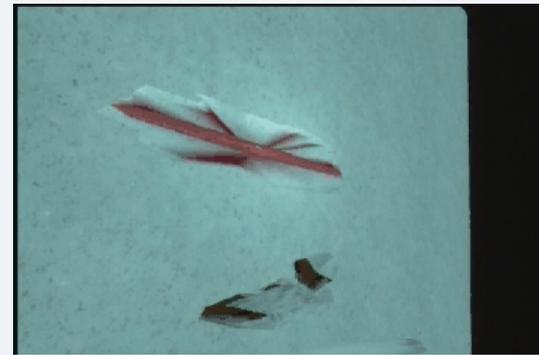
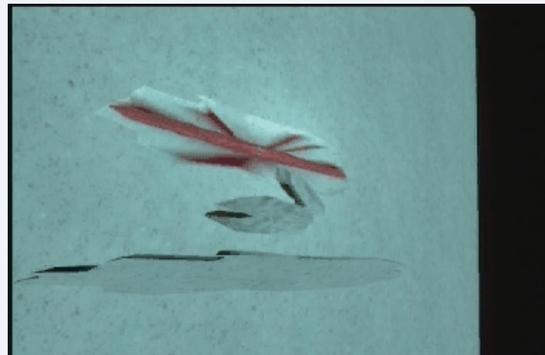
Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 3

La distruzione del film è la preconditione per il prodursi della corrosione delle armature che avviene in presenza combinata di ossigeno ed acqua e si manifesta con la comparsa di macchie di ruggine in corrispondenza delle fessure: $4 Fe + 3 O_2 + 2 H_2O \rightarrow 4 FeO(OH)$.

La trasformazione del ferro metallico in ruggine è un processo globale risultante dalla somma di due distinti processi elettrochimici:

- una reazione anodica di ossidazione ($4 Fe + 8 H_2O \rightarrow 4 FeO(OH) + 12 H^+ + 12 e^-$) con passaggio in soluzione di ioni ferrosi e liberazione di elettroni;
- una reazione catodica di riduzione ($3 O_2 + 6 H_2O + 12 e^- \rightarrow 12 OH^-$) con produzione di ioni ossidrili per combinazione degli elettroni messi in libertà all'anodo con l'ossigeno e l'acqua.

Gli ossidi e idrossidi di ferro derivanti dalla corrosione dell'acciaio occupano un volume circa 6 volte superiore a quello del metallo da cui hanno avuto origine. Questo incremento di volume esercita una potente pressione espansiva nel calcestruzzo che fa prima fessurare per poi rompere e distaccare il copriferro.



Riferimento: M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. *Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A., Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV)*

Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 4



Esempio di degrado dovuto alla carbonatazione del cls ed al successivo processo di corrosione delle armature.

Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 5

Le statistiche più recenti mostrano che i casi di ammaloramento più diffusi delle strutture in calcestruzzo sono dovuti all'azione chimica dell'anidride carbonica.



Carbonatazione con espulsione del copriferro per corrosione delle barre d'armatura.



Gli effetti della carbonatazione sul vecchio ponte dell'autostrada di Ripafratta (PI).

Degrado del calcestruzzo da carbonatazione / 6

Lo spessore di calcestruzzo carbonatato (x) aumenta nel tempo (t) con la seguente legge:

$$x = K \cdot t^{1/2} \quad (\text{Prima legge di diffusione di Fick})$$

in cui:

K è definito *coefficiente di carbonatazione*. Tale parametro, funzione delle caratteristiche del calcestruzzo e delle sue condizioni di esposizione, è un indice della velocità di penetrazione dell'anidride carbonica all'interno del copriferro.

t è il tempo di effettiva esposizione all'aria.

Le condizioni ambientali che favoriscono particolarmente l'avanzamento del fronte di carbonatazione sono caratterizzate da:

- valori di umidità relativa entro l'intervallo 50-80%;
- temperature superiori ai 15-20°C;
- contenuto di CO₂ nell'aria fino a tenori del 3-5%.

Risultati dell'indagine sperimentale Diciv - Caparol / 1

Presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi di Salerno sono stati preparati tre provini prismatici di dimensioni $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, con una resistenza unitaria media a compressione pari a circa $31 \div 32 \text{ MPa}$, utilizzando un rapporto a/c pari a 0.48.

Cemento: CEM IV/B 32.5R (UNI-EN 197-1). Granulometria: sabbia 0-4 mm, aggregato medio 4-10 mm; aggregato grosso 10-20 mm.

A maturazione avvenuta, uno di essi è stato trattato con la finitura acrilica Disbocret 515 Betonfarbe (*provino AC 515*, nella foto in alto); un secondo provino è stato trattato con il rivestimento cementizio Disbocret 519 PCC-Flex-Schlämme (*provino CM 519*, nella foto in basso), mentre un terzo provino non è stato sottoposto ad alcun trattamento protettivo (*provino Uncoated*, nella foto in alto).



Risultati dell'indagine sperimentale Diciv - Caparol / 2

Con riferimento al metodo di prova normalizzato, ai sensi della UNI EN 13295 i tre provini sono stati introdotti in una camera di carbonatazione accelerata ed esposti per 90 giorni ad un'atmosfera contenente l'1% di CO₂ ad una temperatura di 22°C e umidità relativa del 65%.



Cabina a tenuta per l'esposizione dei provini, dotata di raccordi di ingresso e uscita del gas tali da consentire il raggiungimento di un flusso uniforme di CO₂ in tutte le parti della cabina .

Risultati dell'indagine sperimentale Diciv - Caparol / 3

A 28 giorni di esposizione in camera climatica, non sono state rilevate profondità di carbonatazione apprezzabili sui tre provini analizzati.

Dopo 90 giorni di esposizione alla CO₂, dalle superfici laterali dei provini in questione sono state rimosse lastre dello spessore di 2 – 3 cm.



Immagini delle lastre rimosse dalle superfici laterali di un provino prismatico non protetto (a sinistra), un provino prismatico protetto con la finitura acrilica AC 515 (al centro) ed un provino prismatico protetto con il rivestimento cementizio CM 519 (a destra).

Risultati dell'indagine sperimentale Diciv - Caparol / 4



Ciascuna superficie di rottura fresca è stata trattata con una soluzione indicatrice a base di fenolftaleina che colora in rosa-violetto le zone non carbonatate e lascia incolori quelle carbonatate.



Per ciascuna faccia sono stati registrati i valori individuali della profondità di carbonatazione in corrispondenza di tre punti di misurazione opportunamente scelti.



Foto dei campioni sottoposti a test con fenolftaleina estratti rispettivamente dal provino UNC (in alto), dal provino AC 515 (al centro) e dal provino CM 519 (in basso), con dettaglio di una misurazione.

Conclusioni

Il provino protetto con Disbocret 515 Betonfarbe ha esibito una profondità di carbonatazione ridotta del 38% rispetto a quella esibita dal provino non protetto.

AC 515	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	5.21	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	6.08	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 5.30
	$p_{1,2} =$	6.26			
	$p_{1,3} =$	6.78			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	5.21	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	5.39	
	$p_{2,2} =$	5.21			
	$p_{2,3} =$	5.73			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	5.73	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	6.08	
	$p_{3,2} =$	6.26			
	$p_{3,3} =$	6.26			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.86	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	3.65	
	$p_{4,2} =$	1.04			
	$p_{4,3} =$	1.04			

UNCOATED	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	9.87	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	10.24	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 8.50
	$p_{1,2} =$	10.97			
	$p_{1,3} =$	9.87			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	7.13	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	6.76	
	$p_{2,2} =$	6.58			
	$p_{2,3} =$	6.58			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	7.13	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	7.68	
	$p_{3,2} =$	7.13			
	$p_{3,3} =$	8.77			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.77	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	9.32	
	$p_{4,2} =$	9.87			
	$p_{4,3} =$	9.32			



Conclusioni

Il provino trattato con Disbocret 519 ha esibito, invece, una profondità di carbonatazione ridotta di circa il 30%, sempre per confronto con il caso del provino non protetto.

CM 519	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	5.94	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	6.36	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 5.90
	$p_{1,2} =$	6.36			
	$p_{1,3} =$	6.78			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	6.36	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	6.64	
	$p_{2,2} =$	6.78			
	$p_{2,3} =$	6.78			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	5.51	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	5.65	
	$p_{3,2} =$	5.51			
	$p_{3,3} =$	5.94			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	4.66	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	4.95	
	$p_{4,2} =$	5.09			
	$p_{4,3} =$	5.09			

UNCOATED	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	9.87	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	10.24	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 8.50
	$p_{1,2} =$	10.97			
	$p_{1,3} =$	9.87			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	7.13	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	6.76	
	$p_{2,2} =$	6.58			
	$p_{2,3} =$	6.58			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	7.13	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	7.68	
	$p_{3,2} =$	7.13			
	$p_{3,3} =$	8.77			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.77	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	9.32	
	$p_{4,2} =$	9.87			
	$p_{4,3} =$	9.32			



Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 1

Lo e Lee (2002) hanno studiato la profondità di carbonatazione attraverso il test colorimetrico e infrarossi a trasformata di Fourier.

Rapporto a/c
"OPC", normale cemento Portland (kg)
Aggregato granitico di 20 mm (kg)
Aggregato granitico di 10 mm (kg)
Aggregati fini (kg)
Superfluidificante (ml)

UNCOATED	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm) $d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4})/4 =$ 8.5
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	9.87	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3})/3 =$	10.24	
	$p_{1,2} =$	10.97			
	$p_{1,3} =$	9.87			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	7.13	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3})/3 =$	6.76	
	$p_{2,2} =$	6.58			
	$p_{2,3} =$	6.58			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	7.13	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3})/3 =$	7.68	
	$p_{3,2} =$	7.13			
	$p_{3,3} =$	8.77			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.77	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3})/3 =$	9.32	
	$p_{4,2} =$	9.87			
	$p_{4,3} =$	9.32			

Mix (a/c)	Tipo di cura	Resistenza (Mpa)	Profondità di carbonatazione (mm)		
			Durata (mesi)		
A (0.38)	Aria	66	1	3.5	5
	Acqua	78	0.5	1.5	3
B (0.46)	Aria	44	1.5	4	
	Acqua	63	1	2.5	
C (0.54)	Aria	35	3	5.5	
	Acqua	54	1.5	4	

7 ÷ 10

Il gruppo scientifico impegnato nella ricerca per accelerare il processo di carbonatazione, presso il Laboratorio di Prove Materiali e Strutture dell'Università degli Studi di Salerno ha utilizzato per la preparazione dei provini un mix design con rapporto a/c pari a 0.48, una resistenza unitaria media pari a circa 31-32 MPa (310-320 kg/cm²) e la temperatura a circa 21°C. Trascorsi 28 giorni, i cubi sono stati schiacciati per testarne la resistenza alla compressione. I provini cilindrici, invece, sono stati portati via dalla camera a 30, 60 e 90 giorni per registrare la profondità di carbonatazione, misurata con un righello a 1 mm di passo; aggregato medio 4-10 mm; aggregato grosso 10-20 mm.

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 2

Un importante modello teorico - sperimentale per l'analisi del degrado del calcestruzzo da carbonatazione è presentato nell'articolo a firma di P.F. McGrath dal titolo "A Simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete".

Lo studio analizza i fattori che sono ritenuti più influenti sulla qualità di rivestimenti che riducano il tasso di carbonatazione del calcestruzzo, in particolare protezioni contenenti additivi a base di polimeri acrilici.

A tal proposito, 3 pannelli di calcestruzzo da 40 a 50 mm di spessore sono stati trattati con rivestimenti acrilici (A1, A2 e B di tipo liquido, C in polvere ridispersibile). Tutte le mescole hanno pari contenuto di polimeri, ad eccezione del tipo A2 per il quale si è scelto un contenuto di polimeri dimezzato.

Dopo un mese nella camera di prova accelerata, in cui sono stati condizionati in atmosfera a contenuto di CO₂ del 4% (per abbreviare il periodo di prova per esigenze di progetto), umidità relativa del 58 ÷ 62% e temperatura di 25°C, i campioni sono stati rimossi e segati in pezzi da 100 mm × 100 mm per creare due distinte letture di profondità di carbonatazione per ogni campione.

la letteratura / 3

o mostrato poca resistenza
tipi di trattamento.
imezzato, ha mostrato una

UNCOATED	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	9.87	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	10.24	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 8.50
	$p_{1,2} =$	10.97			
	$p_{1,3} =$	9.87			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	7.13	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	6.76	
	$p_{2,2} =$	6.58			
	$p_{2,3} =$	6.58			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	7.13	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	7.68	
	$p_{3,2} =$	7.13			
	$p_{3,3} =$	8.77			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.77	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	9.32	
	$p_{4,2} =$	9.87			
	$p_{4,3} =$	9.32			

Carbonatazione relativa al campione di controllo
1.00
0.99
0.58
0.83
0.96

polimerico ha sulla diffusione della CO₂.

Appare immediato cogliere le differenze tra le misure sperimentali proposte dalla letteratura e i risultati della presente indagine.

AC 515	Profondità di carbonatazione in ciascun punto (mm)		Profondità di carbonatazione media su ciascuna faccia del provino (mm)		Profondità di carbonatazione media per il provino (mm)
Superficie rasata 1	$p_{1,1} =$	5.21	$d_{k1} = (p_{1,1} + p_{1,2} + p_{1,3}) / 3 =$	6.08	$d_k = (d_{k1} + d_{k2} + d_{k3} + d_{k4}) / 4 =$ 5.30
	$p_{1,2} =$	6.26			
	$p_{1,3} =$	6.78			
Superficie rasata 2	$p_{2,1} =$	5.21	$d_{k2} = (p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3}) / 3 =$	5.39	
	$p_{2,2} =$	5.21			
	$p_{2,3} =$	5.73			
Superficie rasata 3	$p_{3,1} =$	5.73	$d_{k3} = (p_{3,1} + p_{3,2} + p_{3,3}) / 3 =$	6.08	
	$p_{3,2} =$	6.26			
	$p_{3,3} =$	6.26			
Superficie rasata 4	$p_{4,1} =$	8.86	$d_{k4} = (p_{4,1} + p_{4,2} + p_{4,3}) / 3 =$	3.65	
	$p_{4,2} =$	1.04			
	$p_{4,3} =$	1.04			

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura /4

Il complesso dei risultati sperimentali acquisiti in letteratura permette di seguire l'evoluzione nel tempo del danneggiamento del calcestruzzo da CO₂ al variare del rapporto acqua/cemento e del tempo di esposizione all'aria, offrendo interessanti spunti per la previsione della vita di servizio residua di una struttura, priva del rischio di corrosione da carbonatazione.

	1 anno	10 anni	30 anni	50 anni	100 anni
Spessori di carbonatazione (mm)	4 ÷ 8	5 ÷ 20	25	20 ÷ 40	30 ÷ 70

La Tabella riporta gli spessori di carbonatazione registrati a partire da un anno di esposizione all'aria fino a circa 100 anni per calcestruzzi aventi valori di R_{cm28} compresi tra 32 e 45 MPa, in condizioni di umidità relativa del 60% e temperatura di 20°C.

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 5

Per la preparazione dei provini di calcestruzzo utilizzati nei test di attacco chimico da anidride carbonica, completati presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno, si è assunto il seguente mix-design:

<i>Dosaggio teorico per 1 m³</i>	<i>[kg / m³]</i>
Sabbia	934
Aggregato medio N.1	187
Aggregato grosso N.2	747
Cemento	340
Acqua	165
SKY 524	2.4

Cemento: CEM IV/B 32.5R (UNI-EN 197-1).

Granulometria: sabbia 0 - 4mm, aggregato medio 4 - 10 mm; aggregato grosso 10 - 20 mm.

Tale miscela corrisponde ad una resistenza media a compressione pari a circa 31 \square 32 MPa (310 \square 320 kg/cm²), con un rapporto acqua / cemento (a/c) pari a 0.485.

Dall'analisi dei risultati esibiti da tale composizione (valori di resistenza meccanica, rapporto a/c, contenuto di cemento, attività pozzolanica) è possibile un confronto con le prestazioni meccaniche esibite dal tipo di calcestruzzo impiegato nella serie di sperimentazioni avviate da Collepari et al. (2006/a):

a/c	Rck (MPa)	K (mm/ $\sqrt{\text{anno}}$)	x (mm) carbonatato in 100 anni
0.5	35	7.0	70

CEM IIIA 32.5R (350 kg/m³)
+ cenere volante (110 kg/m³)

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 6

Il provino non trattato ha mostrato, a 90 giorni di esposizione in camera climatica all'1% di CO₂, una profondità di carbonatazione di 8.5 mm.

	1 anno	10 anni	30 anni	50 anni	100 anni
Spessori di carbonatazione (mm)	4 ÷ 8	5 ÷ 20	25	20 ÷ 40	30 ÷ 70

Assumendo dal confronto con il tipo di calcestruzzo testato da Collepari et al. (2006/a) un fronte di carbonatazione medio di 70 mm in 100 anni, si risolve la legge di Fick con K incognito:

$$K = x/\sqrt{t} = 70 \text{ mm} / \sqrt{(100\text{anni})} = 7 \text{ mm}/\sqrt{\text{anno}} \quad (\text{velocità di carbonatazione all'aria})$$

Si procede quindi al calcolo del tempo necessario per carbonatare all'aria uno spessore di calcestruzzo di 30 mm:

$$30 \text{ mm} = 7 \cdot \sqrt{t} \rightarrow t = (30 / 7)^2 \text{ anni} = 18.4 \text{ anni.}$$

Si tenga presente, sulla base dell'analisi presentata di seguito, che 90 giorni di esposizione all'1% di CO₂ corrispondono a 18 mesi circa di esposizione all'aria naturale:

$$x = K \cdot \sqrt{t} \rightarrow 8.5 \text{ mm} = 7 \cdot \sqrt{t} \rightarrow t = (8.5 / 7)^2 \text{ anni} = 1.47 \text{ anni} \quad \boxed{\text{W}} \quad 18 \text{ mesi.}$$

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 7

Il provino trattato con il rivestimento acrilico Disbocret 515 ha invece mostrato, a 90 giorni di esposizione, uno spessore carbonatato di 5.3 mm, corrispondente ad una velocità di carbonatazione K all'aria pari a:

$K = x / \sqrt{t} = 5.3 \text{ mm} / \sqrt{(1.47 \text{ anni})} = 4.37 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}}$,
quindi inferiore al $K = 7 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}}$ del provino non trattato.

In questo caso, il tempo necessario per carbonatare uno spessore di calcestruzzo di 30 mm è pari a:

$$30 \text{ mm} = 4.37 \cdot \sqrt{t} \rightarrow t = (30 / 4.37)^2 \text{ anni} = 47.1 \text{ anni.}$$

Si può dunque concludere che una struttura in calcestruzzo trattata con la finitura acrilica AC 515 presenta una vita efficace di circa 2.6 volte superiore a quella di una struttura in calcestruzzo non trattato.

Confronto con dati sperimentali tratti dalla letteratura / 8

Il provino trattato con il rivestimento cementizio bicomponente Disbocret 519 PCC-Flex-Schlämme ha mostrato a 90 giorni di esposizione all'1 % di CO₂ uno spessore carbonatato di 5.9 mm, corrispondente ad una velocità di carbonatazione K pari a:

$K = x / \sqrt{t} = 5.9 \text{ mm} / \sqrt{1.47 \text{ anni}} = 4.87 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}}$,
quindi ancora inferiore al $K = 7 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}}$ del provino non trattato.

In questo caso, il tempo necessario per carbonatare uno spessore di calcestruzzo di 30 mm è pari a:

$$30 \text{ mm} = 4.87 \cdot \sqrt{t} \rightarrow t = (30 / 4.87)^2 \text{ anni} = 38 \text{ anni.}$$

Si può dunque concludere che una struttura in calcestruzzo trattata con il rivestimento cementizio bicomponente Dibocret 519 PCC-Flex-Schlämme presenta una vita efficace di circa 2.1 volte superiore a quella di una struttura in calcestruzzo non trattato.

Indagine sperimentale in sito

Lo studio della carbonatazione si è svolto in parte su provini prismatici, ai sensi della UNI-EN 13295, ed in parte su elementi di calcestruzzo prelevati da strutture reali sottoposte a diversi trattamenti Caparol ed esposte ad ambienti aggressivi.

I prelievi per le prove di carbonatazione in sito sono stati eseguiti presso la struttura bar della spiaggia dell'Hotel Cetus nel Comune di Cetara (Salerno).



Cetara – Hotel Cetus: vista Spiaggia (SA)



Dettaglio dei prodotti protettivi analizzati

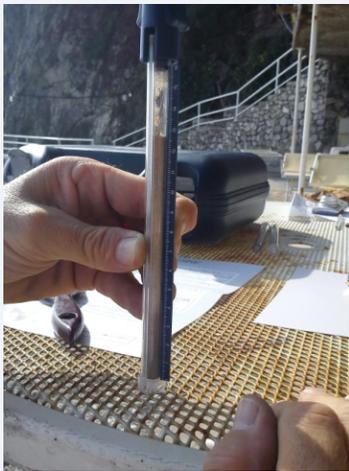


Tecnica di misurazione del fronte di carbonatazione in sito



Utilizzando un comune trapano a percussione con punta per muratura del diametro di 10 mm, sono state eseguite 6 perforazioni per ogni pannello del muretto sottoposto ai trattamenti di ripristino con i prodotti appena richiamati.

Sono stati effettuati due rilievi: la data di esecuzione del primo risale al 5/11/2011, la seconda diagnosi è stata effettuata in data 19/06/2012.



La polvere di perforazione è stata raccolta sul fondo di una provetta ed analizzata con la fenolftaleina, individuando così il punto di passaggio tra la polvere carbonatata e la polvere alcalina.

$$Prof.carb.reale = \frac{PF}{PP} \cdot CM$$

in cui:

PF è la profondità del foro [mm];

PP è la quantità di polvere in provetta [mm];

CM è la profondità di carbonatazione letta [mm].



La prova è terminata con la chiusura dei fori eseguiti per i prelievi utilizzando un apposito stucco per cemento ad asciugatura rapida.

Dettaglio di una misura sul pannello *Uncoated*

IDENTIFICAZIONE PROVA			
<i>Elemento Prova:</i>	Facciata	<i>Orientamento superficie</i>	N
<i>Ambiente:</i>	ESTERNO	<i>Tipo Esposizione</i>	XC4
<i>Stato del calcestruzzo:</i>		Non trattato	
<i>Individuazione del punto:</i>		In alto a destra del pannello	

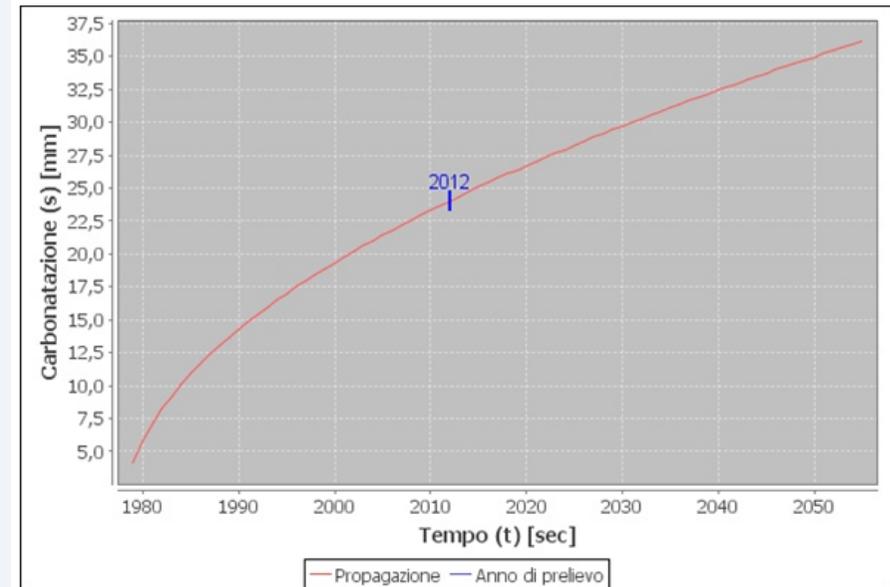


Foto 1.1 - Pannello Uncoated

ESITO PRELIEVO			
<i>Profondità del foro:</i>	84 mm	<i>Carbonatazione misurata:</i>	29 mm
<i>Quantità polvere in provetta:</i>	103 mm	<i>Rapporto di scala:</i>	0.82 mm
Profondità di Carbonatazione reale:		23.65 mm	

CRITERIO N°	1	Uncoated			
N° PRELIEVO	ELEMENTO	ESPOSIZ.	AMBIENTE	ORIENT.	CARBONATAZIONE [mm]
1	Facciata	XC4	ESTERNO	N	24
2	Facciata	XC4	ESTERNO	N	26
3	Facciata	XC4	ESTERNO	N	22

VALUTAZIONE DELLA PROFONDITA DI CARBONATAZIONE			
Edificio di 34 anni Coefficiente velocità di propagazione K = 4.12			
Min = 22.00mm	Med = 24.00mm	Max = 26.00mm	S.Q.M. = 1.63



Dettaglio di una misura sul pannello trattato con *Disbocret 515*

IDENTIFICAZIONE PROVA

<i>Elemento Prova:</i>	Facciata	<i>Orientamento superficie</i>	N
<i>Ambiente:</i>	ESTERNO	<i>Tipo Esposizione</i>	XC4

<i>Stato del calcestruzzo:</i>	Trattato con Disbocret 515
--------------------------------	----------------------------

<i>Individuazione del punto:</i>	In alto a destra del pannello
----------------------------------	-------------------------------



Foto 1.1 - Pannello Disbocret 515

ESITO PRELIEVO

<i>Profondità del foro:</i>	55 mm	<i>Carbonatazione misurata:</i>	40 mm
<i>Quantità polvere in provetta:</i>	100 mm	<i>Rapporto di scala:</i>	0.55 mm

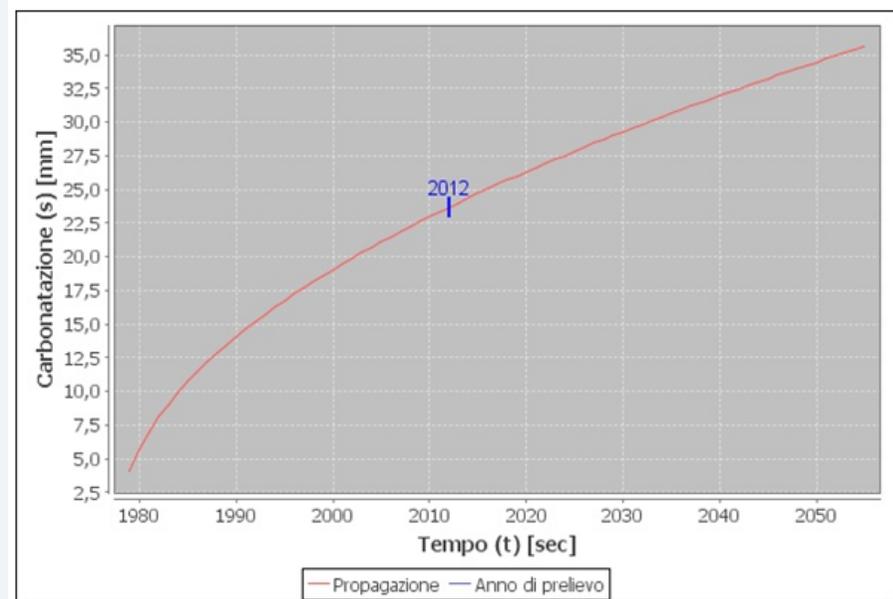
Profondità di Carbonatazione reale:	22 mm
--	--------------

CRITERIO N°	1	Disbocret 515			
N° PRELIEVO	ELEMENTO	ESPOSIZ.	AMBIENTE	ORIENT.	CARBONATAZIONE [mm]
1	Facciata	XC4	ESTERNO	N	22
2	Facciata	XC4	ESTERNO	N	26
3	Facciata	XC4	ESTERNO	N	23

VALUTAZIONE DELLA PROFONDITÀ DI CARBONATAZIONE

Edificio di 34 anni Coefficiente velocità di propagazione $K = 4.06$

Min = 22.00mm Med = 23.67mm Max = 26.00mm S.Q.M. = 1.70



Dettaglio di una misura sul pannello trattato con *Disbocret 519*

IDENTIFICAZIONE PROVA

<i>Elemento Prova:</i>	Facciata	<i>Orientamento superficie</i>	N
<i>Ambiente:</i>	ESTERNO	<i>Tipo Esposizione</i>	XC4

<i>Stato del calcestruzzo:</i>	Trattato con Disbocret 519
--------------------------------	----------------------------

<i>Individuazione del punto:</i>	In alto a destra del pannello
----------------------------------	-------------------------------



Foto 1.1 - Pannello Disbocret 519

ESITO PRELIEVO

<i>Profondità del foro:</i>	62 mm	<i>Carbonatazione misurata:</i>	52 mm
<i>Quantità polvere in provetta:</i>	96 mm	<i>Rapporto di scala:</i>	0.65 mm

Profondità di Carbonatazione reale:	33.58 mm
--	-----------------

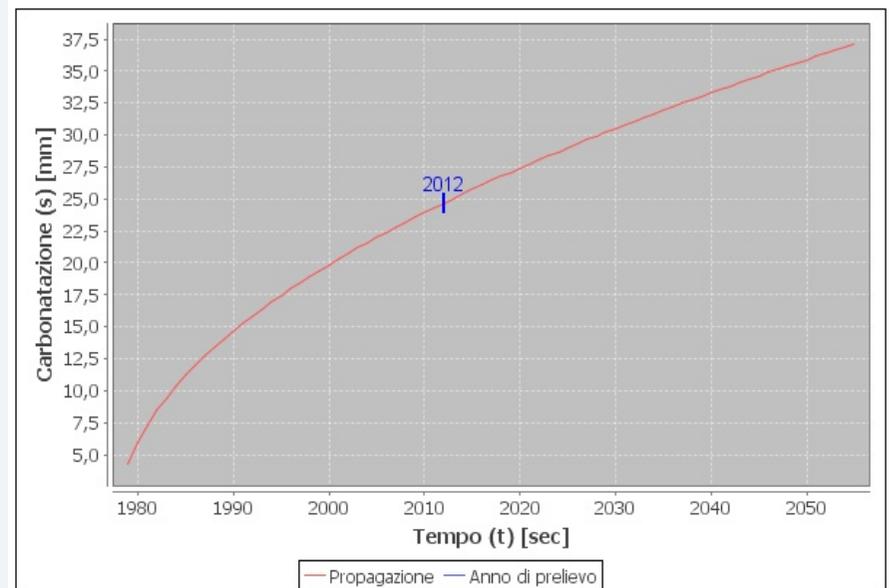
CRITERIO N°	1	Disbocret 519
--------------------	----------	----------------------

N° PRELIEVO	ELEMENTO	ESPOSIZ.	AMBIENTE	ORIENT.	CARBONATAZIONE [mm]
1	Facciata	XC4	ESTERNO	N	34
2	Facciata	XC4	ESTERNO	N	20
3	Facciata	XC4	ESTERNO	N	20

VALUTAZIONE DELLA PROFONDITA DI CARBONATAZIONE

Edificio di 34 anni Coefficiente velocità di propagazione $K = 4.23$

Min = 20.00mm	Med = 24.67mm	Max = 34.00mm	S.Q.M. = 6.60
----------------------	----------------------	----------------------	----------------------



QUADRO RIEPILOGATIVO: PROVE DI CARBONATAZIONE

In assenza di trattamento, la % di incremento di carbonatazione nel periodo di tempo che separa le due date di esecuzione dei test è pari a **1.06%**. La stessa si riduce al valore **0.48%** per il rivestimento acrilico *Disbocret 515* e **0.57%** per il rivestimento cementizio *Disbocret 519*.

L'esito dei rilievi concorda pienamente con quanto rilevato nelle precedenti esperienze, confermando una notevole azione protettiva del rivestimento acrilico *Disbocret 515* e cementizio *Disbocret 519* nei confronti dell'attacco da anidride carbonica.

Trattamento	Punto	05-nov-11					19-giu-12					% di incr. carb.
		PF [mm]	PP [mm]	CM [mm]	Carb. reale[mm]	Carb. media[mm]	PF [mm]	PP [mm]	CM [mm]	Carb. reale [mm]	Carb. media [mm]	
<i>Uncoated</i>	1	56	127	62	27,34	23,66	84	103	29	23,65	23,91	1,06
	2	59	147	53	21,27		69	105	39	25,63		
	3	46	107	52	22,36		54	77	32	22,44		
<i>Disbocret 515</i>	1	60	124	53	25,65	23,54	55	100	40	22,00	23,65	0,48
	2	60	135	47	20,89		59	81	36	26,22		
	3	65	108	40	24,07		47	91	44	22,73		
<i>Disbocret 518</i>	1	61	132	61	28,19	24,49	61	91	37	24,80	24,69	0,82
	2	65	129	46	23,18		65	109	45	26,83		
	3	56	114	45	22,11		62	105	38	22,44		
<i>Disbocret 519</i>	1	58	138	62	26,06	24,41	62	96	52	33,58	24,55	0,57
	2	56	125	52	23,30		46	102	44	19,84		
	3	47	128	65	23,87		53	118	45	20,21		
<i>Disbocret 535 trasp.</i>	1	61	158	54	20,85	35,25	56	98	59	33,71	35,49	0,68
	2	77	138	79	44,08		54	92	61	35,80		
	3	76	134	72	40,84		62	104	62	36,96		
<i>Disbocret 535 trasp. color.</i>	1	47	118	73	29,08	35,46	49	117	70	29,32	35,68	0,64
	2	50	118	118	50,00		71	110	71	45,83		
	3	58	136	64	27,29		66	151	73	31,91		
<i>Amphibolin</i>	1	43	104	104	43,00	35,70	72	116	53	32,90	35,92	0,62
	2	48	108	70	31,11		71	97	52	38,06		
	3	61	135	73	32,99		69	90	48	36,80		
<i>Solvente bianco 493</i>	1	63	147	70	30,00	30,50	41	67	37	22,64	30,70	0,68
	2	65	111	48	28,11		52	67	36	27,94		
	3	57	111	65	33,38		76	97	53	41,53		

Carbonat. media muretto = 29.12

Carbonat. media muretto = 29.32 0.69

Potere anticarbonatazione a barriera per Disbocret 515



Disbocret® 515 Betonfarbe

Rivestimento protettivo ad elevatissimo potere coprente, specifico per calcestruzzo

Descrizione del prodotto	
Scopo d'impiego	Rivestimento per la protezione contro la penetrazione di sostanze nocive e acqua su superfici di calcestruzzo e di acciaio nuove, vecchie e ripristinate.
Caratteristiche del materiale	<ul style="list-style-type: none"> facile applicazione resistente agli agenti atmosferici resistente agli alcali resistente ai raggi UV idoneo per copertura delle fessure e crepe superficiali < 0,1 mm aperto alla diffusione da vapore acqueo ridotta permeabilità a CO₂ e SO₂ buone caratteristiche riempitive e con buona distensione soddisfa i requisiti delle norme EN 1504-2 e DIN V 18026: sistemi di rivestimenti superficiali per calcestruzzo
Base materiale	dispersione a base di resina stirolo-acrilica
Imballaggio/grandezza confezioni	<ul style="list-style-type: none"> Standard: 15 l confezione di plastica ColorExpress: 12 l confezione
Colori	bianco Colori speciali su richiesta. Su impianti ColorExpress miscelabile nell'ambito del sistema 3 D per pitture edili.

Dati tecnici

■ Densità:	ca. 1,4 g/cm ³
■ Contenuto solido:	ca. 65 % in peso
■ Spessore a strato secco:	ca. 40-50 µm/100 ml/m ²
■ Coefficiente di resistenza alla diffusione µ (H ₂ O):	5.500
■ Coefficiente di resistenza alla diffusione µ (CO ₂):	2.300.000
■ Spessore dello strato d'aria equivalente alla diffusione s _d H ₂ O:	ca. 0,88 m (a 160 µm di strato secco)
■ Spessore dello strato d'aria equivalente alla diffusione s _d CO ₂ :	ca. 368 m (a 160 µm di strato secco)
■ Permeabilità all'acqua (valore w):	< 0,02 kg/(m ² • h ^{0,5}) classe w ₃ (basso) secondo DIN EN 1062

La resistenza al passaggio della CO₂ si esprime con lo spessore d'aria equivalente (Sd), misurato in metri, ovvero come lo spessore dello strato d'aria che offre la stessa resistenza al passaggio della CO₂ dello strato di vernice applicato.

$$Sd_{CO_2} = \mu_{CO_2} * \delta \quad (UNI EN 1062/6)$$

in cui:

μ = coefficiente di resistenza alla diffusione della CO₂;

δ = spessore del rivestimento.

La norma fissa uno spessore minimo da applicare sui provini per garantire loro un'adeguata copertura.

Limiti di accettazione: $Sd_{CO_2} > 50$ metri (UNI EN 1062-6).

Potere anticarbonatazione a barriera per Disbocret 515

La resistenza S_d alla diffusione della CO_2 è così definita (UNI EN 1062-6):

$$S_d = \mu \cdot \delta = D_{CO_2} \cdot D_r^{-1} \cdot \delta$$

in cui:

μ = coefficiente di resistenza alla diffusione della CO_2 ;

δ = spessore del rivestimento;

D_r = coefficiente di diffusione della CO_2 sul film di protettivo in esame;

D_{CO_2} = coefficiente di diffusione della CO_2 nell'aria, che viene ottenuto dalla relazione che segue:

$$D_{CO_2} = 1.395 \times 10^{-5} (T / 273.15)^{1.60} \quad (\text{con } T: \text{temperatura assoluta in gradi Kelvin})$$

→ Si ricava dunque il valore di D_r .

D'altra parte,

$$D_r = L R T / V_{CO_2}$$

in cui:

L è la permeabilità alla CO_2 propria del protettivo;

R è la costante universale dei gas ($R = 8.314472 \text{ m}^3\text{Pa K}^{-1}\text{mol}^{-1}$);

$V_{CO_2} = 22.4 \text{ litri/mol} = 0.0224 \text{ m}^3/\text{mol}$ è il volume molare dell'anidride carbonica in condizioni standard (STP).

→ Si ricava dunque il valore di L .

Potere anticarbonatazione a barriera per Disbocret 515

Assumendo $T = 23^{\circ}\text{C} = 296.15 \text{ K}$,

$$D_{\text{CO}_2} = 1.395 \times 10^{-5} (T / 273.15)^{1.60} = 1.5876 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$\mu = 2.300.000$ (come da scheda tecnica Caparol)

$$\rightarrow Dr = D_{\text{CO}_2} / \mu = 6.90277 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rightarrow L = Dr \times V_{\text{CO}_2} \times (RT)^{-1} = 6.2795 \times 10^{-17} \text{ m}^3_{\text{CO}_2} \text{ m m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$$

A questo punto, dal quadro riepilogativo delle prove eseguite all'Hotel Cetus risulta che, dal novembre 2011 al giugno 2012, gli incrementi di profondità di carbonatazione valgono:

$$\Delta x = 23.91 \text{ mm} - 23.66 \text{ mm} = 0.25 \text{ mm}$$

(per il pannello Uncoated)

$$\Delta x = 23.65 \text{ mm} - 23.54 \text{ mm} = 0.11 \text{ mm}$$

(per il pannello trattato con Disb.515)

Le rispettive velocità di carbonatazione nei 7 mesi sono dunque:

$$K_{\text{Unc.}} = 0.25 \text{ mm} / \sqrt{[(7 / 12)\text{anno}]} = 0.3273 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}} \quad (\text{per il pannello Uncoated})$$

$$K_{515} = 0.11 \text{ mm} / \sqrt{[(7 / 12)\text{anno}]} = 0.1440 \text{ mm} / \sqrt{\text{anno}} \quad (\text{per il pannello trattato con Disb. 515})$$

La riduzione % di velocità offerta da Disbocret 515 è:

$$\text{Riduzione \% di velocità} = [(K_{\text{Unc.}} - K_{515}) / K_{\text{Unc.}}] 100 = 56\%$$

Potere anti-carbonatazione a barriera per Disbocret 515

Dunque, la riduzione % di permeabilità alla CO_2 offerta da Disbocret 515 è ancora del 56%. E' possibile così ricavare la permeabilità alla CO_2 del pannello Uncoated di cui non si conosce il valore S_d :

$$\text{Riduzione \% permeabilità} = [(L_{Unc.} - L_{515}) / L_{unc}] 100 = 56 \%,$$

$$\text{equazione nella sola incognita } L_{unc} \quad \text{----} > \quad L_{unc} = 1.42716 \times 10^{-16} \text{ m}^3_{CO_2} \text{ m m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}.$$

Ora L_{Unc} esprime la *quantità in m^3 di CO_2 al secondo che attraversa la superficie di 1 m^2 con spessore di 1 metro, normale al flusso di CO_2 .*

Considerando lo spessore effettivo $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ di carbonatazione per il pannello non trattato, lo stoccaggio di CO_2 per l'Uncoated è così ottenuto:

$$1.42716 \times 10^{-16} : 1 \text{ metro} = CO_{2 \text{ Unc}} : 0.25 \times 10^{-3} \text{ metri}$$

$$CO_{2 \text{ Unc}} = 3.5679 \times 10^{-20} \text{ m}^3_{CO_2} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$$

Lo stoccaggio di CO_2 per Disbocret 515 risulta invece:

$$6.2795 \times 10^{-17} \times 10^{-16} : 1 \text{ metro} = CO_{2 \text{ Unc}} : 0.11 \times 10^{-3} \text{ metri}$$

$$CO_{2 \text{ 515}} = 6.90745 \times 10^{-21} \text{ m}^3_{CO_2} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$$

La riduzione % di CO_2 stoccata dal pannello rivestito con Disbocret 515 rispetto al pannello non trattato è :

$$\text{Riduzione \% } CO_2 \text{ stoccata} = [(CO_{2 \text{ Unc}} - CO_{2 \text{ 515}}) / CO_{2 \text{ Unc}}] 100 = 80.64 \%.$$

Bibliografia

- ✓ A. Borsoi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2008. Influenza della resistenza meccanica del calcestruzzo sulla carbonatazione, Enco Journal 42, 10-15.
- ✓ L. Coppola, M. Collepari, C. Pistolesi, P. Zaffaroni, 1994. Silani, pitture acriliche e rivestimenti elastici per la durabilità di strutture in calcestruzzo.
(<http://www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/degrado/37.pdf>).
- ✓ M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R. Troli, 2010. Diagnosi del Degrado e Restauro delle Strutture in C.A., Seconda Edizione, Enco S.r.l., Ponzano Veneto (TV).
- ✓ M. Collepari, S. Collepari, R. Troli, 2006/a. Calcestruzzi a durabilità secolare. Parte 1: strutture esposte all'aria, Enco Journal 34, Ponzano Veneto (TV).
- ✓ D.M. 14/01/2008 – Norme tecniche per le costruzioni (Gazzetta Ufficiale n.29 del 4 febbraio 2008 Suppl. Ordinario n. 30).
- ✓ UNI EN 197-1:2001 Cemento – Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 206 – 1:2006 – Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 1062 - 6:2003 – Pitture e vernici – Prodotti e cicli di verniciatura di opere murarie esterne e calcestruzzo – Determinazione della permeabilità all'anidride carbonica. Edizioni UNI, Milano.
- ✓ UNI EN 13295:2005 – Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo. Metodi di prova – Determinazione della resistenza alla carbonatazione. Edizioni UNI, Milano.

Grazie della cortese
attenzione!