

inCONCRETO.net | PAVIMENTI-WEB.it INGENIO YOUTUBE | FACEBOOK | TWITTER ISSN 2307-8928

# ingenio

Informazione tecnica e progettuale

## Straus7<sup>®</sup> CORSI TEMATICI GENNAIO-MARZO 2018

VETRO STRUTTURALE - PUSHOVER CON EASYOVER - FEM E FATICA  
SCAFFALATURE INDUSTRIALI - PROGETTAZIONE ANTINCENDIO

COSA È INGENIO ▾ COMITATO SCIENTIFICO CLUB ▾ AREE TEMATICHE NEWSLETTER ▾ MAGAZINE LIBRERIA ▾ PUBBLICITÀ CONTATTI CERCA PROFILO ▾

2<sup>a</sup> Edizione **gic** **GIORNATE ITALIANE DEL CALCESTRUZZO** **ITALIAN CONCRETE DAYS** **gic** 2<sup>nd</sup> Edition  
www.gic-expo.it 8-10 Novembre 2018 Piacenza, Italy



Home

### Influenza degli elementi di rivestimento sulla carbonatazione del calcestruzzo

Maurizio Nicoletta - Professore Associato - Università di Napoli "Federico II" Claudio Scognamiglio - Ingegnere 19/02/2018 618

L'evoluzione della carbonatazione calcestruzzo e gli effetti connessi alla variazione del pH sono probabilmente fra gli aspetti di maggiore interesse nello studio del degrado di questo materiale. È possibile individuare che tipo di influenza hanno gli strati di rivestimento su tale fenomeno, e – in caso affermativo – quali sono le soluzioni tecniche che garantiscono il miglior risultato in termini di protezione?

Il lavoro in oggetto propone una valutazione comparativa – condotta mediante sperimentazioni di laboratorio – fra le diverse soluzioni che un'indagine preliminare ha rivelato essere le più diffuse su una certa parte del territorio (la città di Napoli), non trascurando i dovuti approfondimenti sulle specifiche caratteristiche dei materiali.

### Il Magazine

Sfoggia la rivista online

Soluzione in laterizio ideale per il risparmio energetico

I Cookie ci aiutano a fornire i nostri servizi, continuando la navigazione del sito autorizzi l'uso dei cookie, per saperne di più consulta la sezione [Privacy](#) **Accetto**

Influenza-elementi...pdf Questo tipo di file può danneggiare il computer. Conservare comunque Re\_Crispi\_119\_...eml?    X

19:57 19/02/2018

# Influenza degli elementi di rivestimento sulla carbonatazione del calcestruzzo

---

AUTORE: *Maurizio Nicoletta, Professore Associato; Claudio Scognamillo, Ingegnere*

## INTRODUZIONE

La valutazione della durata dei componenti edilizi rappresenta da ormai alcuni decenni un argomento di significativo interesse per la comunità scientifica internazionale, ma è diventato di notevole rilevanza anche per il settore della produzione edilizia, anche a seguito di un quadro normativo che chiama alcuni degli stakeholders del processo edilizio a proporre stime sul ciclo di vita: basti pensare al piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti introdotto dalla legge 109/94, al piano di manutenzione delle strutture introdotto dalle N.T.C. 2008, al Life Cycle Costing introdotto dal D. Lgs. 50/2016, ma anche da analisi Life Cycle Assessment che hanno negli ultimi anni assunto un ruolo molto importante, evidentemente sotto la spinta che deriva dai temi della sostenibilità e dell'economia circolare, che campeggiano a pieno titolo nei focus del Piano Nazionale di Industria 4.0.

La necessità di procedere alla determinazione della durata dei componenti edilizi necessita di un attento studio delle variabili che influiscono sul loro comportamento nel tempo. Lo sviluppo e la continua immissione sul mercato di materiali e di tecnologie esecutive di nuova concezione, determinano, in particolare, l'esigenza di apprezzarne le aspettative di durata nel tempo. Gli studi effettuati in questo settore di ricerca hanno finora affrontato la questione in maniera compiuta relativamente ad un vasto panorama di componenti edilizi e di sistemi, primi fra i quali quelli strutturali, ed in particolare il calcestruzzo.

L'evoluzione del fenomeno della carbonatazione e gli effetti connessi alla variazione del pH sono probabilmente fra gli aspetti di maggiore interesse nello studio del degrado di questo materiale.

Dall'analisi dello stato dell'arte, con specifica attenzione a tale fenomeno, emerge che è opportuno, in particolare, approfondire gli studi relativi alla durabilità degli elementi strutturali in calcestruzzo armato sottoposti a interventi di consolidamento con tecnologie e materiali innovativi, quali ad esempio l'incamiciatura con calcestruzzo autocompattante (conosciuto anche con l'acronimo inglese SCC), stante la carenza di studi scientifici mirati a questo particolare aspetto.

Nel panorama degli studi e delle sperimentazioni condotte, poi, molte volte sono state proposte trattazioni del comportamento del tempo di calcestruzzi protetti da strati di pittura, ma tale soluzione non è certamente quella che si riscontra nella maggior parte degli edifici (soprattutto quelli realizzati nel periodo fra il dopoguerra e gli anni '70), che invece presentano uno strato di intonaco fra l'elemento strutturale e quello di finitura.

È possibile individuare se esiste un contributo degli strati di rivestimento alla durabilità del calcestruzzo, e – in caso affermativo – quali sono le soluzioni tecniche che garantiscono il miglior risultato?

L'approccio che si è adottato per fornire risposta alle problematiche evidenziate è stato quello di proporre una valutazione comparativa – condotta mediante sperimentazioni di laboratorio – fra le diverse soluzioni che una indagine preliminare ha rivelato essere le più diffuse su una certa parte del territorio (la città di Napoli), non trascurando i dovuti approfondimenti sulle specifiche caratteristiche dei materiali.

La fase di realizzazione delle prove di laboratorio, preceduta dalla definizione dei modelli di simulazione e dalle caratteristiche dei provini, nonché dalla definizione delle sollecitazioni a cui sottoporli, è consistito in cicli di carbonatazione accelerata, completati dalle necessarie prove per la lettura e per l'analisi dei risultati ottenuti.

## **STATO DELL'ARTE**

Il progressivo invecchiamento delle strutture in calcestruzzo armato rappresenta, in questi anni, un fenomeno di particolare interesse, soprattutto se si considera che fino ad oggi tale tipologia di strutture è stata realizzata senza particolari accorgimenti per garantirne la durata. Le conseguenze dal punto di vista economico e della sicurezza non sono certo trascurabili: risulta fondamentale quindi concentrare l'attenzione e gli sforzi delle ricerche sul campo della prevenzione del deterioramento delle strutture.

Come noto, il degrado del calcestruzzo armato può progredire fino ad arrivare a provocare una situazione di pericolo per la stabilità della struttura, innanzitutto per effetto della corrosione delle armature. Questa a sua volta è soprattutto conseguenza dell'insufficiente protezione che ha il calcestruzzo (e che a sua volta offre alle armature) nei confronti degli agenti responsabili dei diversi fenomeni di degrado, in particolar modo della carbonatazione.

Se da un lato, quindi, il patrimonio edilizio in c.a. esistente è sempre più frequentemente interessato da situazioni di forte degrado, tali da richiedere importanti interventi di consolidamento, spesso con cerchiatura a mezzo di SCC al fine di migliorarne le prestazioni meccaniche, dall'altro assume notevole interesse la comprensione del contributo fornito dai rivestimenti alla protezione delle armature, in quanto esistono (e forse esisteranno ancora per un tempo non trascurabile) molti edifici per i quali fra la superficie esterna del calcestruzzo e gli agenti sollecitanti, sono proprio questo tipo di rivestimenti l'unico ostacolo che può contrastare l'avanzamento della carbonatazione.

In entrambi i casi è possibile affrontare la questione del degrado degli elementi in calcestruzzo armato e delle interazioni fra questi ultimi e gli elementi protettivi che a diverso titolo operano un'azione di confinamento dei manufatti stessi, quantificando i benefici prodotti.

Alcuni studi (cfr. infra) hanno evidenziato l'efficacia delle vernici a base acrilica e silossanica, in cui la componente acrilica ha la funzione aggregante, ricollegando particelle minerali ancora slegate, mentre quella silossanica, a contatto con l'ossigeno atmosferico e in ambiente alcalino, si trasforma in composti silicici costituenti uno strato secco impermeabile ma di elevata traspirabilità. Il loro impiego, comunque, sia per la degradabilità propria delle verniciature, sia per le difficoltà di un controllo prolungato, va inteso come operazione finale di un sistema di prevenzione basato su interventi diretti sui componenti fondamentali del calcestruzzo armato, ed in ogni caso occorre tenere in debito conto che l'interazione più frequente non è fra pittura e calcestruzzo, esistendo per la gran parte dei casi la "mediazione" degli intonaci.

## **Attività di ricerca antecedenti alla UNI EN 13295**

Significative sperimentazioni antecedenti al 2005 (anno di pubblicazione della norma UNI EN 13295 (*"Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della resistenza alla carbonatazione"*)) si possono ritrovare tra i numerosi lavori da considerare di grande interesse [4][5][6]: in ognuno di essi è stata utilizzata la stessa metodologia nella realizzazione dei campioni e nell'esecuzione della prova di carbonatazione accelerata.

La penetrazione all'anidride carbonica è stata misurata a intervalli regolari utilizzando le metodologie descritte nella norma UNI 9944:1992 [7] dal titolo *"Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo"*.

*Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo”.*

## **Attività di ricerca recenti**

Lo stato dell’arte di seguito riportato si riferisce ad attività di ricerca che prevedono la valutazione, per successivo confronto, del contributo alla durabilità del calcestruzzo da parte degli elementi di rivestimento. La conoscenza di tali esperienze è di fondamentale importanza per due motivi:

1. per poter indirizzare l’attività di ricerca partendo da una base costituita proprio dalle metodologie e dai risultati di tali sperimentazioni;
2. per avere informazioni metodologiche e riferimenti normativi necessari per una corretta definizione del programma sperimentale.

L’influenza dei rivestimenti sulla durabilità del calcestruzzo è stata affrontata da diversi autori fra quali un importante modello sperimentale è presentato in *“A Simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete”* [1].

Lo studio ha analizzato i fattori che sono ritenuti maggiormente influenti sulla qualità di rivestimenti che riducono il tasso di carbonatazione del calcestruzzo, in particolare, protezioni contenenti additivi a base di polimeri acrilici. Esso ha fornito, inoltre, utili informazioni per la realizzazione di una camera di prova accelerata necessaria per la valutazione della profondità di carbonatazione del campione esaminato.

Sulla base dei risultati ottenuti, si sono sviluppati, tra gli altri, alcuni studi su provini di calcestruzzo, protetti non solo con finiture acriliche ma anche con rivestimenti cementizi di finitura [2].

A maturazione avvenuta, dei tre provini in calcestruzzo realizzati, uno è stato trattato con la finitura acrilica; il secondo provino è stato trattato con il rivestimento cementizio, mentre il terzo provino non è stato sottoposto ad alcun trattamento protettivo.

Con riferimento al metodo di prova normalizzato, ai sensi della UNI EN 13295:2005 [3], i tre provini sono stati introdotti in una camera di carbonatazione accelerata ed esposti per 90 giorni ad una atmosfera contenente l’1% di CO<sub>2</sub>, una temperatura di 25°C ed umidità relativa del 65%.

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 CO<sub>2</sub>, dalle superfici laterali dei provini in questione sono state rimosse lastre dello spessore di 2-3 cm.

Ciascuna superficie di rottura fresca è stata trattata con una soluzione indicatrice a base di fenolftaleina all’1% in alcool e per ciascuna faccia sono stati registrati i valori individuali della profondità di carbonatazione.

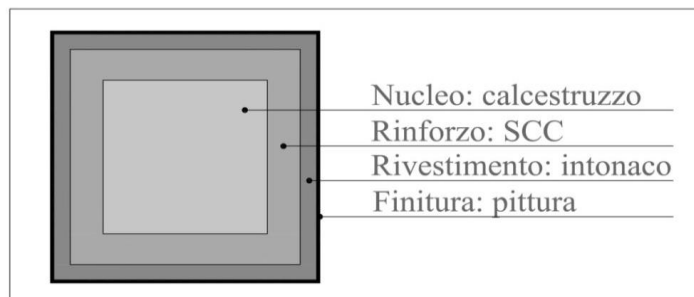
Anche l’analisi dello stato dell’arte del periodo più recente ha messo in luce la necessità di eseguire test su campioni che riproducano l’effettiva stratificazione dei materiali in opera, e che prendano altresì in considerazione quegli interventi – di più recente concezione – che determinano una nuova situazione di confinamento degli elementi strutturali in calcestruzzo, con la realizzazione di “gusci” che sempre più spesso si tende ad eseguire in SCC, proprio per le qualità intrinseche di questo materiale.

## **MATERIALI E METODI**

La ricerca si è concentrata sull’analisi degli edifici con struttura portante in calcestruzzo armato, indipendentemente dalla tipologia di tamponatura presente, con lo specifico obiettivo di studiare il comportamento nel tempo degli elementi strutturali (travi e pilastri), appartenenti all’involucro esterno dell’edificio, e sottoposti ad interventi di consolidamento mediante incamiciatura con calcestruzzo autocompattante. In tale contesto, è chiaro che alla realizzazione di tali interventi conseguono le opere di

completamento con la realizzazione del rivestimento e della finitura. Si è giunti, pertanto, all'individuazione di una stratigrafia ricorrente da analizzare a seguito degli interventi su citati.

Per quanto sopra esposto, gli elementi costituenti la stratigrafia sono costituiti dal nucleo (calcestruzzo ordinario originario), dallo strato di rinforzo (calcestruzzo autocompattante), dallo strato di rivestimento (intonaco) e dallo strato di finitura (pittura) (fig.1).



**Figura 1** - Schema della stratigrafia oggetto di studio

## Materiali

Lo specifico obiettivo di valutare sperimentalmente le prestazioni di una determinata stratigrafia in opera, ha richiesto un approfondimento della questione relativa alla composizione del materiale di supporto, nel caso specifico del calcestruzzo.

Nello studio in oggetto, pur esistendo una specifica normativa di riferimento (UNI EN 1766:2001) [8], si è ritenuto opportuno individuare, oltre alla composizione prescritta dalla suddetta norma (denominato "calcestruzzo di riferimento"), un'ulteriore tipologia di calcestruzzo (denominato "calcestruzzo ordinario di prova") la cui composizione si avvicina maggiormente a quella dei calcestruzzi confezionati per gli edifici risalenti alla prima metà del secolo scorso. In quest'ultimo caso il riferimento legislativo è costituito dalle prescrizioni del D.L. 16/11/1939 [9], R. D.L. 29/07/1933 [10].

### ***Nucleo: calcestruzzo di riferimento***

In accordo con quanto esposto, per la definizione di composizione e caratteristiche del calcestruzzo di riferimento da utilizzarsi per i campioni da sottoporre alle prove di laboratorio, sono state seguite le indicazioni dalla norma UNI EN 1766 [8].

Nella fattispecie i campioni di riferimento sono di tipo C (0,45), per cui, secondo la norma, l'impasto deve contenere  $360 \text{ kg/m}^3$  di cemento ed avere un rapporto A/C di 0,45. Gli impasti, inoltre, devono presentare una resistenza alla compressione media a 28 giorni di  $50 \pm 5 \text{ MPa}$  nel caso di provini cubici. Per quanto riguarda l'assortimento granulometrico, la norma propone un fuso di riferimento all'interno del quale deve essere contenuta la curva granulometrica degli aggregati adottati nel confezionamento (fig. 2). Per il caso in esame, la curva granulometrica adottata è quella illustrata in fig. 3<sup>1</sup>. Dopo il confezionamento i provini sono stati sformati il giorno seguente (24 ore) e successivamente fatti stagionare per 27 giorni in acqua ad una temperatura di  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

<sup>1</sup> N.B. La diversa forma assunta dalla curva rispetto al fuso granulometrico di riferimento è dovuta ad una differente scala grafica assunta per l'ascissa.

Legenda

- 1 Percentuale per massa
- 2 Distribuzione granulometrica (mm)

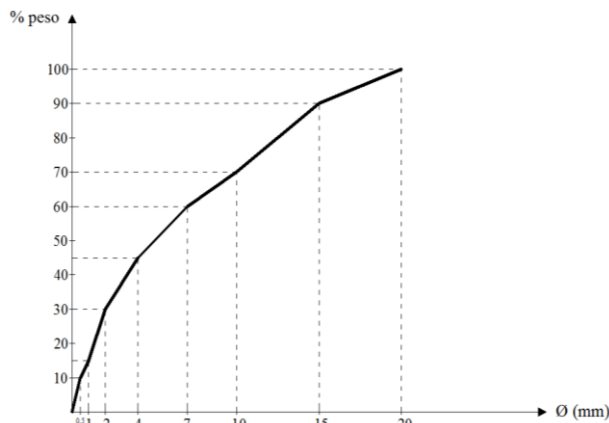
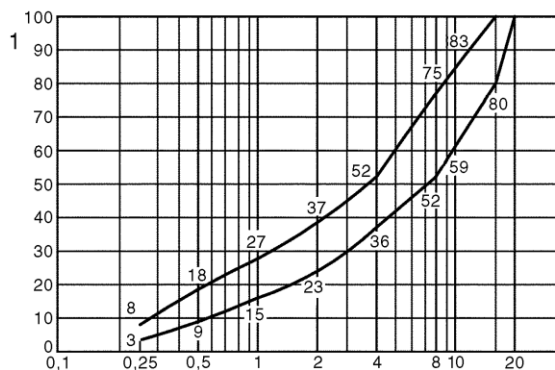


Figura 2 - Fuso granulometrico degli aggregati per il confezionamento del calcestruzzo di riferimento

Figura 3 - Curva granulometrica per gli aggregati utilizzati nel confezionamento del calcestruzzo di riferimento

### Nucleo: calcestruzzo ordinario di prova

Per il confezionamento del calcestruzzo ordinario di prova, data la forte variabilità delle caratteristiche del materiale al variare della sua composizione, in base alle principali prescrizioni legislative (R. Decreto Legge del 29/07/1933; D.L. del 16/11/1939) che regolamentavano l'esecuzione di opere in calcestruzzo armato, è stata definita una composizione tipo, considerata dalle stesse norme "dosaggio normale", e che ancora oggi viene definita in letteratura come composizione media di un m<sup>3</sup> di calcestruzzo (fig. 4).

Dosaggio per un m <sup>3</sup> di calcestruzzo	
CEMENTO	300 kg
PIETRISCO > 7 mm	0,8 m <sup>3</sup>
SABBIA ≤ 4 mm	0,4 m <sup>3</sup>
ACQUA	150 l

Figura 4 – Dosaggio per m<sup>3</sup> di calcestruzzo

A tale miscela corrisponde una resistenza media a compressione pari a circa 25-30 Mpa. L'assortimento granulometrico è stato scelto in maniera tale da soddisfare il fuso granulometrico proposto dal D.L. 16/11/1939 [9]. Si riporta di seguito il fuso granulometrico di riferimento (fig. 5) e la curva granulometrica per il confezionamento dei campioni (fig. 6). Anche in questo caso, dopo il confezionamento, i campioni sono stati sformati dopo 24 h e fatti stagionare per 27 giorni in acqua ad una T di (21±2) °C.

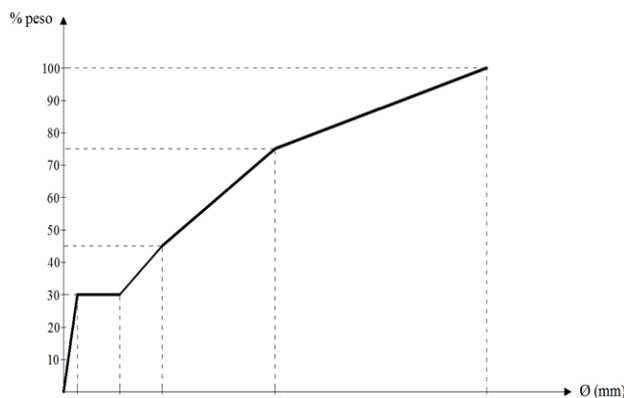
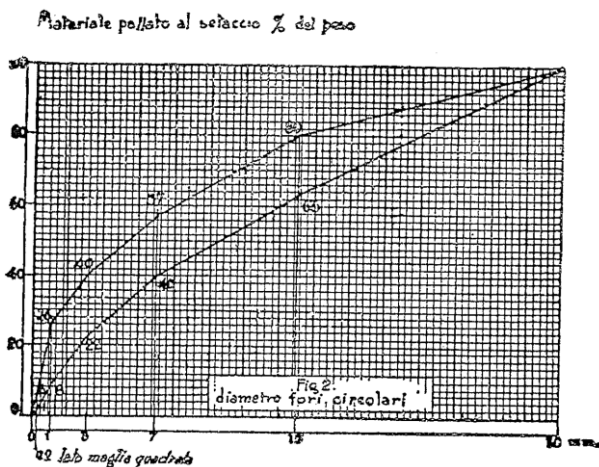


Figura 5 - Fuso granulometrico per gli inerti proposto dal D.L. del 16/11/1939

Figura 6 - Curva granulometrica per gli aggregati utilizzata nel confezionamento dei campioni

### Rinforzo: calcestruzzo autocompattante



In accordo con le Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante [11], la tipologia scelta per la realizzazione dello strato che costituisce l'elemento di rinforzo strutturale, per semplicità operativa, è un calcestruzzo composto da una miscela preconfezionata e rappresenta uno dei prodotti più impiegati per l'esecuzione degli interventi in oggetto. Si tratta del SCC Betonfluid Vaga, le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella che segue (fig. 7):



DATI TECNICI		DATI OTTENUTI IN CONDIZIONI STANDARD DI LABORATORIO	
Nome commerciale	BEtonFLuid		
Composizione	Cemento Aggregato siliceo 0/8 Superfluidificante acrilico		
Massa volumica	> 2300 Kg/m <sup>3</sup>		
Flow Test	classe SF2		
V-Funnel	Classe VF1		
L-box	Classe PL2		
Classi di esposizione	Corrosione indotta da carbonatazione: XC4 Corrosione indotta da cloruri (non provenienti da acqua di mare): XD2 Corrosione indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare: XS1 Attacco dei cicli gelo/disgelo: classe XF1 Attacco chimico: XA2		
Resistenza media a compressione	> 43,5 N/mm <sup>2</sup>		
Classe di resistenza a compressione	C 32/40		
Resistenza caratteristica (Rck)	40 N/mm <sup>2</sup>		
Rapporto acqua/cemento	≤ 0,45		

**Figura 7 - Estratto scheda tecnica SCC premiscelato Betonfluid Vaga**

### Elementi di rivestimento

Per la valutazione sperimentale del contributo fornito dagli strati di rivestimento alla durabilità degli elementi in calcestruzzo armato ordinario, le scelte sulla tipologia e spessore da prendere in considerazione per l'esecuzione delle prove di laboratorio sono state effettuate sulla base dell'osservazione delle soluzioni ricorrenti intonaco-pittura relative al patrimonio edilizio della città di Napoli<sup>2</sup>.

Dagli studi effettuati è derivato che la soluzione ricorrente è evidentemente quella costituita dall'intonaco civile liscio ed in particolare i 2 tipi di malte più comunemente adoperate: malta cementizia e malta bastarda, denominati nel prosieguo rispettivamente "MC" e "MB".

#### 1. Malta cementizia (MC)

L'intonaco di malta cementizia realizzato è costituito da cemento Portland, sabbia normale ed acqua nelle seguenti proporzioni in peso: una parte di cemento Portland, tre parti di sabbia perfettamente secca e mezza parte d'acqua.

#### 2. Malta Bastarda (MB)

La malta bastarda utilizzata per la preparazione dei campioni è stata confezionata secondo le seguenti proporzioni: 0,3 m<sup>3</sup> di grassello di calce, 150 kg di cemento Portland, 1 m<sup>3</sup> di sabbia e 170 l di acqua.

### Elementi di finitura

<sup>2</sup> In particolare le informazioni sono state desunte da una banca dati costituite da circa 500 edifici, fornita dalla società SI.RE.NA. Città Storica.

Per la realizzazione dell'elemento di finitura dei provini sono state utilizzate le tipologie di pitture più comunemente impiegate per le finiture esterne degli edifici con struttura portante in calcestruzzo armato:

#### 1. Pittura al quarzo (PQ)

È una pittura plastica caratterizzata da un buon potere riempitivo e dall'aspetto opaco mascherante. È un legante stirolo acrilico in dispersione acquosa pigmentato esclusivamente con ossidi resistenti alla luce; può essere utilizzata per decorazione e protezione dalle intemperie di facciate. Di aspetto uniforme matto, è particolarmente indicata per applicazioni sui muri con superficie irregolare in quanto non evidenzia le superfici non perfettamente piane.

#### 2. Pittura silossanica (PS)

Di più recente sviluppo, è impiegata per la tinteggiatura dei prospetti esterni di edifici moderni. Contiene composti organo-silicici ed ha il vantaggio, rispetto ai prodotti organici tradizionali a base di sole resine polimeriche, di possedere una maggiore permeabilità al vapore ed una migliore idrorepellenza dovuta all'incremento della tensione superficiale nell'interfaccia fra la pittura e le gocce d'acqua.

## Metodi

Le sperimentazioni sono state condotte sottoponendo i campioni a prove di carbonatazione accelerata eseguite presso il laboratorio Tecnolab s.r.l. di Napoli. Successivamente sono state eseguite una serie di indagini, di seguito meglio specificate, finalizzate alla determinazione di altrettante caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche.

### ***Numero, forma e dimensione dei provini***

Tutti i provini, costituiti da una matrice in calcestruzzo ordinario di prova o di riferimento, sono stati rifiniti su tutte le facce dall'elemento in SCC e dagli strati di intonaco e pittura nelle combinazioni che si vedranno di seguito. Lo spessore di questi ultimi è stato stabilito nel modo seguente:

- analizzando l'intervento di incamiciatura "tipo", e lo spessore dello strato usualmente realizzato per il ringrosso della sezione degli elementi strutturali, si è osservato che in media tale spessore può essere considerato circa 1/6 del lato dell'elemento stesso. Si è ritenuto opportuno mantenere nella sperimentazione le stesse proporzioni dimensionali esistenti nella realtà.
- analogamente, applicando lo stesso criterio allo strato di intonaco, si è osservato che in media tale spessore può essere considerato circa 1/15 del lato dell'elemento. Ne consegue che mantenendo le proporzioni di cui sopra, è stato adottato uno spessore di circa 7 mm.

Per l'esecuzione delle prove, orientate alla valutazione dell'influenza degli strati esterni sulla carbonatazione del calcestruzzo, si è scelto di seguire la strada proposta dalla norma EN 13295:2005 [3], secondo la quale la prova deve essere eseguita su due campioni di prodotto da esaminare e confrontati con altrettanti campioni di riferimento.

Per quanto riguarda le dimensioni, la norma specifica che per un conglomerato avente caratteristiche analoghe a quelle del calcestruzzo oggetto della sperimentazione, il campione da realizzare deve avere forma prismatica con dimensioni minime di 40x40x160 mm. Per i motivi illustrati in precedenza, è stato adottato uno spessore di circa 7 mm per lo strato di calcestruzzo autocompattante e 3 mm per lo strato di intonaco, mentre lo spessore adottato per la finitura, costituito da rasante e pittura, è vincolato da esigenze operative ad essere di 2 mm.

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo indicante sigla, composizione, numero, forma e dimensioni, dei campioni che sono stati confezionati per le prove di carbonatazione accelerata:



Sigla	Composizione	N. campioni	Forma	Dimensioni nucleo	Spessore elemento di rinforzo SCC	Spessore rivestimento MC o MB	Spessore finitura Ras + PQ o PS	Dimensioni provino
C.CP.1	Cls prova (anni '60)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CP.2	Cls prova (anni '60)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CP.3.d	Cls prova (anni '60)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CR.1	Cls riferimento (UNI EN 1766)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CR.2	Cls riferimento (UNI EN 1766)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CR.3.d	Cls riferimento (UNI EN 1766)	2	Prisma	40x40x160	0	0	0	40x40x160
C.CP.SCC.1	Cls prova + scc	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CP.SCC.2	Cls prova + scc	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CR.SCC.1	Cls rif. + scc	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CR.SCC.2	Cls rif. + scc	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CP.SCC.MC.PQ.1	Cls prova + scc + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MC.PQ.2	Cls prova + scc + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MB.PS.1	Cls prova + scc + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MB.PS.2	Cls prova + scc + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MC.PQ.1	Cls rif. + scc + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MC.PQ.2	Cls rif. + scc + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MB.PS.1	Cls rif. + scc + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MB.PS.2	Cls rif. + scc + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
<b>TOTALE CAMPIONI</b>		<b>36</b>						

Figura 8 - Caratteristiche dei campioni per la carbonatazione accelerata

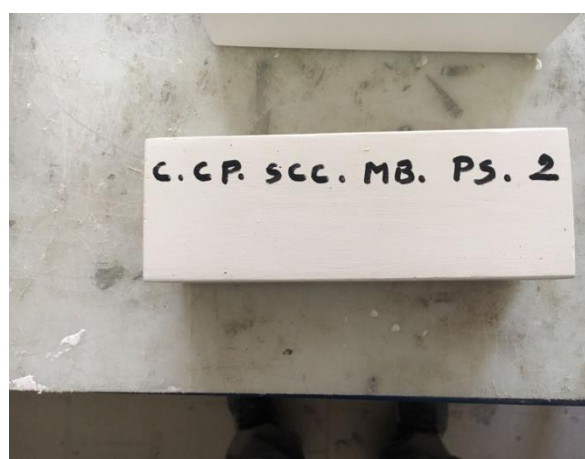


Figura 9 - Provini nella loro configurazione definitiva

**Re-scaling**

Osservando le tabelle esposte, si può notare che il numero di campioni confezionati per ciascuna tipologia individuata è di 2. Il duplice confezionamento si è ritenuto opportuno al fine di confrontarsi con la problematica del re-scaling, che consiste nella difficoltà di confrontare i risultati ottenuti in laboratorio con le reali esposizioni in opera. Per questo motivo lo stesso numero di elementi confezionati per le prove di laboratorio, è stato confezionato ed esposto in esterno alle condizioni ambientali e climatiche della città di Napoli, in particolare in un contesto tale da poter prendere in considerazione sia il fenomeno della carbonatazione che quello dell'attacco da cloruri.

Inoltre, sempre con l'obiettivo di affrontare la questione del re-scaling, sono state effettuate, e sono tuttora in corso di esecuzione, con riferimento alla norma ISO15686-7, delle osservazioni in sito di una serie di edifici che presentano caratteristiche costruttive e condizioni di esposizione confrontabili con quelle simulate in laboratorio.

### **Programma di prove**

La norma UNI EN 13295:2005 [3], in merito all'esecuzione della prova di carbonatazione accelerata, definisce che i provini da indagare devono essere esposti ad una atmosfera contenente 1% di CO<sub>2</sub><sup>3</sup>, ad una temperatura di (21±2)°C e umidità relativa (U.R.) di (60±10)%. Dopo la stagionatura, ed una successiva fase di "condizionamento", inseriti i campioni nella camera, ad intervalli regolari, è stata misurata la profondità di carbonatazione<sup>4</sup> secondo la procedura indicata nella norma EN 14630:2003 [13] par. 4.2.

Il programma ha previsto 6 step, attraverso l'esposizione alle condizioni illustrate (fig. 10):

Step	Descrizione
1°	<u>Inizio stagionatura dei campioni:</u> secondo quanto stabilito dall'allegato A della norma EN 13295:2004, dopo 24 h dal confezionamento i provini sono stati sformati e fatti stagionare per 27 giorni in acqua ad una T di (21± 2)°C.
2°	<u>Inizio conservazione in ambiente di laboratorio:</u> a fine stagionatura i campioni sono stati conservati ad una T di (21± 2)°C e ad una umidità relativa di U.R. (60± 10)% fino a quando la variazione di peso dei campioni è risultata inferiore dello 0.2% in peso in un periodo di 24h.
3°	<u>Inizio esposizione in camera di prova:</u> terminato il periodo di conservazione, i provini sono stati alloggiati all'interno della camera di prova ed esposti ad un'atmosfera costituita dall'1% di CO <sub>2</sub> , ad una temperatura di (21± 2)°C e ad una umidità relativa di U.R. (60± 10)%.
4°	<u>1ª misurazione della profondità di carbonatazione (a 15 gg):</u> al 15° giorno di esposizione in ambiente aggressivo, tutti i provini sono stati prelevati dalla camera di prova per effettuare la misurazione della profondità di carbonatazione applicando il metodo della fenolftaleina proposto dalla norma EN 13295:2004. Il metodo consiste nell'applicare su un pezzo appena rotto di campione, una soluzione indicatrice seguendo la procedura di cui al punto 4.2 della EN 14630 [13].
5°	<u>2ª misurazione della profondità di carbonatazione (a 30 gg)</u>
6°	<u>3ª misurazione della profondità di carbonatazione (a 45 gg)</u>

**Figura 10** - Programma di prove per i campioni sottoposti a carbonatazione accelerata

## **RISULTATI E CONCLUSIONI**

<sup>3</sup> La concentrazione di 1% di CO<sub>2</sub> in aria sviluppa gli stessi prodotti di reazione con il cemento come in una normale atmosfera al 0,03% di CO<sub>2</sub>.

<sup>4</sup> La profondità di carbonatazione in un qualsiasi punto è la distanza dalla superficie esterna del calcestruzzo (o del rivestimento) al confine della regione colorata di rosso-violaceo. Si definisce profondità di carbonatazione per il campione la media su tutti e quattro i lati della media delle misurazioni per ogni lato. Essa è misurata come definito al paragrafo 7.2. della norma UNI EN 13295 "Procedure di misurazione standard".

I provini, come sopra descritti, sono stati esposti secondo la programmazione illustrata nei paragrafi precedenti, e alle cadenze temporali prefissate sono stati sottoposti alle operazioni di taglio e misurazione della profondità di carbonatazione applicando il metodo della fenolftaleina.



Figura 11 - Taglio dei provini con sega circolare

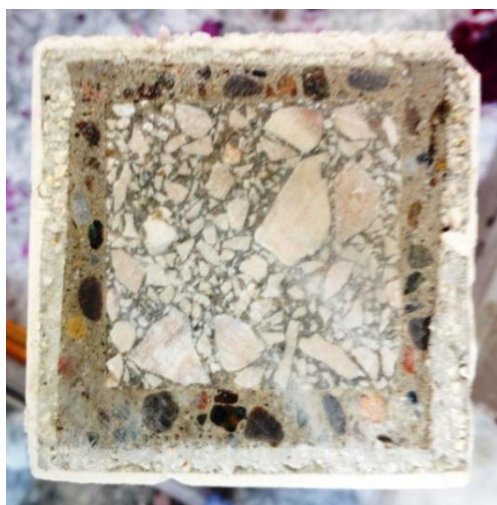


Figura 12 - Provino appena tagliato

I grafici che seguono illustrano sinteticamente i risultati ottenuti dalle misurazioni delle profondità di carbonatazione effettuate secondo le modalità operative illustrate dalla norma UNI EN 14630:2007 di cui sopra:

- 1) In questa prima rappresentazione (fig. 13) si è confrontato la profondità di carbonatazione riscontrata sui provini prismatici costituiti da solo calcestruzzo, nelle due varianti "di riferimento" e "di prova", al fine di apprezzarne gli eventuali differenti comportamenti.

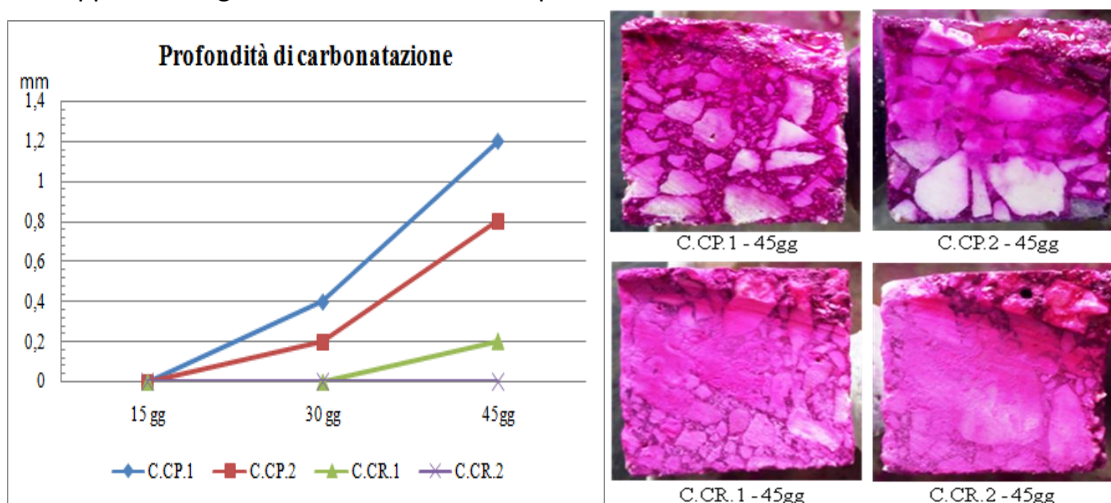


Figura 13 - Provini costituiti da calcestruzzo "di prova" e "di riferimento"

Analizzando le curve ottenute, si rileva che:

- in valore assoluto, la profondità del fronte di carbonatazione ha raggiunto per entrambe le formulazioni valori limitati (massimo 1,2 mm a 45 gg registrato per il cls di prova).
- l'approfondimento del fronte di carbonatazione misurato nei due provini in calcestruzzo di prova è risultato più ridotto rispetto a quello registrato per i provini in calcestruzzo di riferimento.

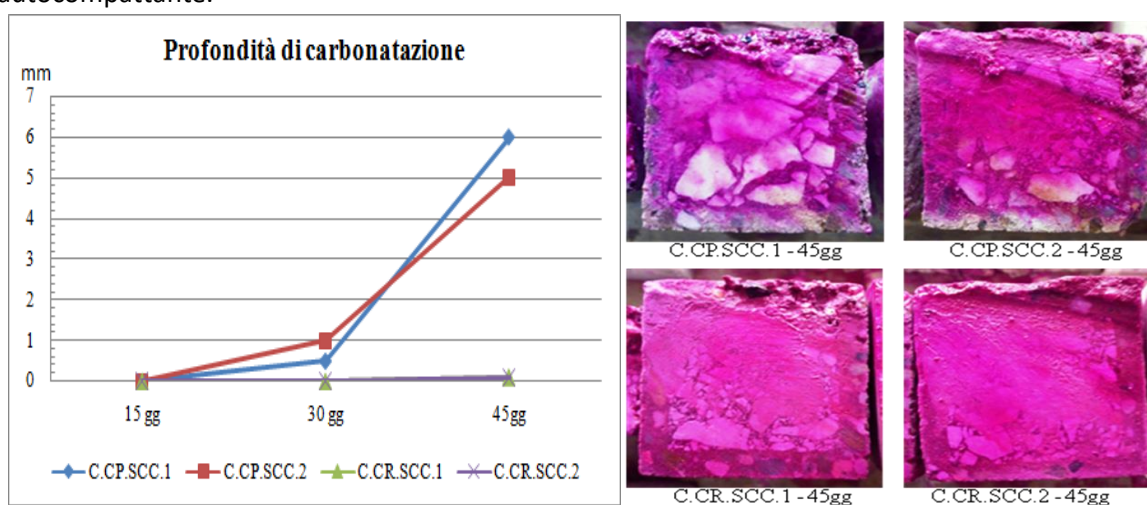
Ne consegue che la composizione delle due diverse tipologie di calcestruzzo confezionato incide sulla capacità di opporre resistenza al fenomeno della carbonatazione, in particolare si osserva che il calcestruzzo di prova risulta essere più vulnerabile a questa tipologia di attacchi. Con molta probabilità, il motivo del diverso comportamento è riconducibile al differente rapporto A/C adottato, che è 0,45 per il

calcestruzzo di riferimento e 0,50 per il calcestruzzo di prova; questo, come noto, si traduce in una differente porosità del conglomerato una volta indurito.

Tale aspetto costituisce una conferma rispetto agli studi presenti in letteratura, esso dimostra, infatti, come il fenomeno della carbonatazione del calcestruzzo sia favorito dalla porosità del materiale; conseguenza quest'ultima di elevato rapporto A/C.

In merito alla tipologia di edificio oggetto del presente studio (struttura intelaiata degli anni '60), si osserva che nella realtà di cantiere del periodo in esame, il rapporto A/C adottato veniva spesso incrementato ulteriormente al fine di ottenere una maggiore lavorabilità dell'impasto. Circostanza, quest'ultima, che pone i componenti in calcestruzzo armato degli edifici in oggetto in una condizione di vulnerabilità ancora maggiore.

- 2) Nel secondo grafico (fig. 14) si è confrontato la profondità di carbonatazione riscontrata sui provini costituiti da calcestruzzo, nelle due varianti "di riferimento" e "di prova", rivestiti di calcestruzzo autocompattante.



**Figura 14** - Provini costituiti da calcestruzzo "di prova" e "di riferimento" e rinforzo in SCC

Analizzando le curve ottenute, si rileva che:

- La profondità del fronte di carbonatazione riscontrata nei due provini con nucleo costituito da calcestruzzo di riferimento a 45 gg risulta nulla. Questa costituisce una condizione che, in base agli studi presenti in letteratura, è facilmente comprensibile, in quanto il calcestruzzo autocompattante ha dimostrato un'ottima resistenza alla penetrazione di anidride carbonica, dovuta soprattutto ad una ridotta porosità superficiale.
- La profondità del fronte di carbonatazione nei provini con nucleo costituito da calcestruzzo di prova, a 45 gg è risultata essere di 5-6 mm.

Rilevato che la composizione del SCC di rinforzo è la medesima, così come le modalità di confezionamento ed i tempi di esecuzione, e che l'unica differenza fra le due tipologie di provini sta nel differente nucleo, tale fenomeno risulta di non agevole spiegazione. Tuttavia da un'attenta riflessione si ritiene opportuno chiedersi:

- è possibile che il supporto influenzi, con le sue caratteristiche, le prestazioni dell'elemento di rinforzo in SCC?
- è possibile che le condizioni del supporto (ad esempio in termini di porosità superficiale) in fase di posa in opera dell'elemento di rinforzo in qualche modo siano in grado di condizionare lo sviluppo delle caratteristiche del SCC in termini di compattezza?

Per dare risposta a questi quesiti è da valutare la possibilità di avviare nuove sperimentazioni finalizzate al prosieguo dello studio del fenomeno su diverse formulazioni della stratigrafia di riferimento.



3) Nel terzo grafico (fig. 15) si è confrontata la profondità di carbonatazione riscontrata sui provini con nucleo in calcestruzzo “di prova”, rivestiti di calcestruzzo autocompattante e delle due diverse combinazioni di intonaco-pittura definite.

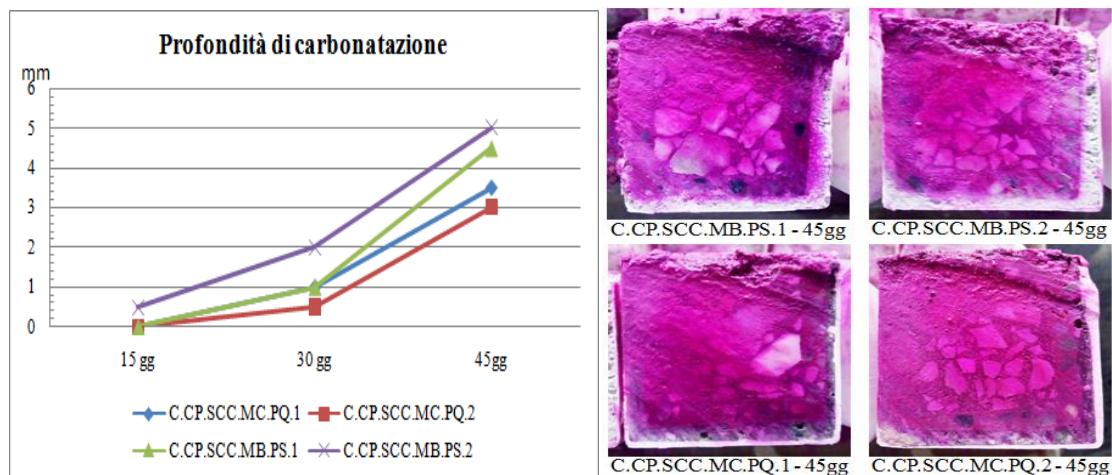


Figura 15 - Provini costituiti da cls “di prova”, rinforzo in SCC, intonaco e pittura nelle combinazioni definite

Analizzando le curve ottenute, si rileva che:

- in linea generale, nel periodo osservato, il fenomeno della carbonatazione ha interessato gli strati superficiali di finitura penetrando anche lo strato di intonaco, fino a giungere in alcuni casi all’interfaccia con il SCC (5mm), ma fermandosi in corrispondenza di quest’ultimo.
- confrontando gli andamenti delle diverse curve, si nota che i provini confezionati con finitura costituita da pittura al quarzo hanno presentato una profondità di carbonatazione a 45 gg inferiore rispetto a quelli con finitura costituita da pittura silossaniche.

Quest’ultima condizione, in particolare, sembrerebbe dimostrare una migliore capacità, da parte della pittura al quarzo, di opporsi alla penetrazione del fronte di carbonatazione. Ciò rappresenta comunque un aspetto che troverebbe conferma nella caratteristica, posseduta dalla pittura al quarzo, di avere una bassa permeabilità al vapore, e di costituire un film superficiale per il supporto sul quale viene posto in opera. Diversamente da quanto accade, invece, per le pitture silossaniche, per le quali il fenomeno sarebbe ostacolato in maniera più ridotta a causa dell’elevata permeabilità del materiale.

4) Nel quarto grafico (fig. 16) si è confrontato la profondità di carbonatazione riscontrata sui provini con nucleo in calcestruzzo “di riferimento”, rivestiti di calcestruzzo autocompattante e delle due diverse combinazioni di intonaco-pittura definite.

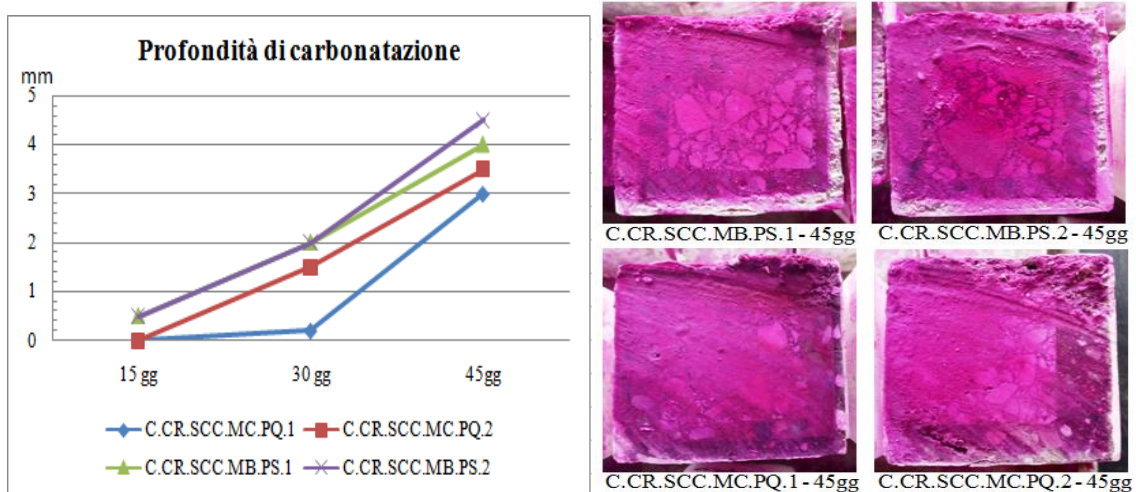


Figura 16 - Provini costituiti da cls “di riferimento”, rinforzo in SCC, intonaco e pittura nelle combinazioni definite

Analizzando le curve ottenute, si rileva che, in analogia evidentemente con quanto riportato per i provini con nucleo in calcestruzzo di prova, anche in questo caso risulta abbastanza evidente la più efficace opposizione proposta dalle pitture al quarzo nei confronti dell'aggressione da parte dell'anidride carbonica. Il fenomeno della carbonatazione, infatti, anche in questi casi è arrivata a 45 gg a superare i 4 mm solo nei provini con finitura e pittura ai silossani.

5) Negli schemi grafici figura 17 e 18, si è riportato, con riferimento alla profondità del fronte di carbonatazione rilevata ai diversi step temporali (15-30-45 gg) il contributo offerto da parte degli elementi che costituiscono la stratigrafia oggetto di studio, nelle diverse combinazioni più significative.

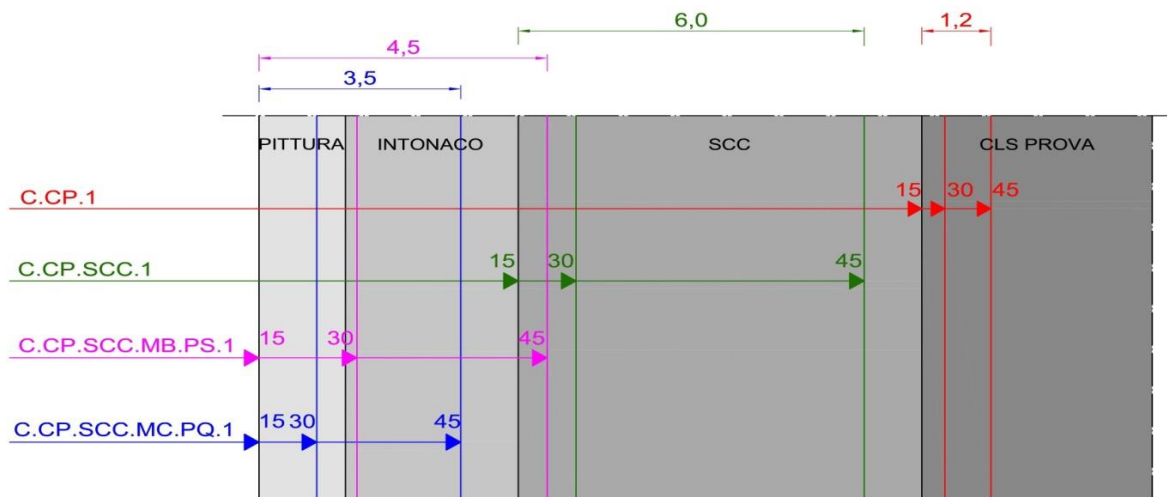


Figura 17 - Confronto delle profondità di carbonatazione in provino con nucleo in cls di prova

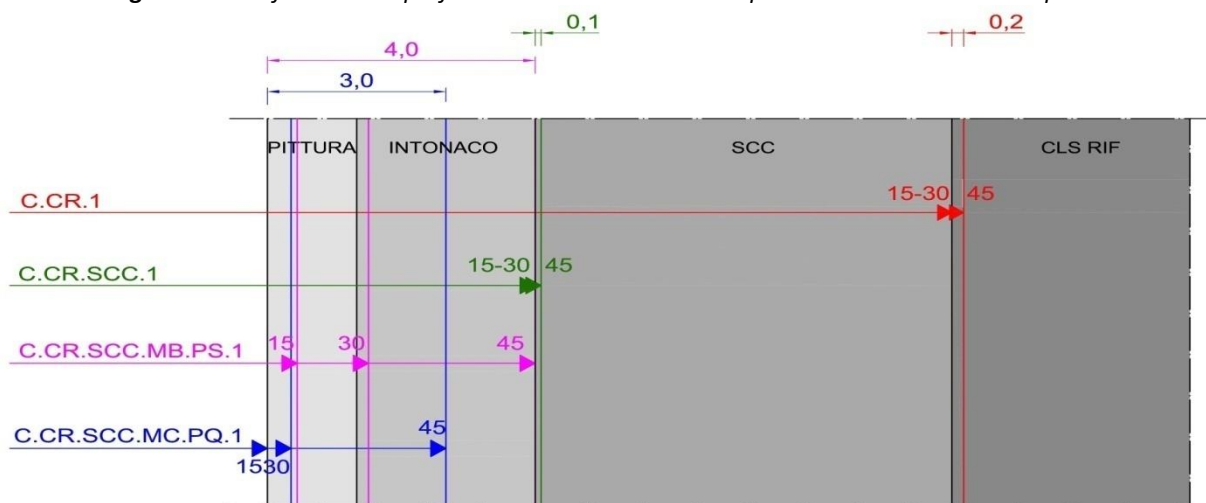


Figura 18 - Confronto delle profondità di carbonatazione in provino con nucleo in cls di riferimento

Da una valutazione di tipo comparativo, delle diverse condizioni studiate, è emerso, specie per quanto riguarda la fig.18 (stratigrafia con nucleo in cls di riferimento in cui non si è riscontrata la carbonatazione del SCC rilevata nel primo caso), che il SCC offre un contributo notevole di protezione alla penetrazione dell'anidride carbonica; condizione quest'ultima facilmente riscontrabile osservando la difficoltà trovata dal "vettore" C.CR.SCC.1 nell'aggredire lo spessore di SCC.

Inoltre, confrontando il contributo aggiuntivo offerto dalla coppia rivestimento intonaco di malta bastarda e pittura ai silossani, con la coppia rivestimento intonaco cementizio e pittura al quarzo, si osserva che quest'ultima è in grado di proteggere in misura più consistente gli strati sottostanti; ancora si osserva che nel primo caso (C.CR.SCC.MB.PQ.1) a 45 gg di esposizione è stato superato completamente lo strato di intonaco di malta bastarda.



## BIBLIOGRAFIA

### Riferimenti specifici

- [1] P.F. McGrath, *“A simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete”*, McGath Engineering Ltd, Canada;
- [2] Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università degli Studi di Salerno, (2012) *“Sperimentazione in sito sulla protezione del calcestruzzo da carbonatazione”*, Convegno di presentazione dei risultati di una Convenzione di ricerca Caparol, Salerno;
- [3] 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”*;
- [4] L. Coppola, M. Collepari, C. Pistolesi, P. Zaffaroni, (1994) *“Silani, pitture acriliche e rivestimenti elastici per la durabilità di strutture in calcestruzzo”*, Mapei, Milano;
- [5] L. Coppola, M. Collepari, C. Pistolesi, P. Zaffaroni, (1997), *“Rivestimenti elastici in polimero-cemento per la protezione delle strutture in calcestruzzo”*, Mapei, Milano;
- [6] L. Coppola, M. Collepari, C. Pistolesi, P. Zaffaroni, A. Borsoi, (1996), *“Protezione del calcestruzzo con rivestimenti elastici in polimero-cemento”*, Atti III Convegno AIMAT, Napoli;
- [7] UNI 9944, (1994), *“Corrosione e protezione dell’armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo”*;
- [8] UNI EN 1766, (2001), *“Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Calcestruzzi di riferimento per prove”*;
- [9] R.D.L. n.2229 del 16/11/1939, *“Norme per l’esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato”*;
- [10] R.D.L. n.1213 del 29/07/1933, *“Norme per l’accettazione dei leganti e per l’esecuzione delle opere in conglomerato cementizio”*;
- [11] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC, (2005), *“Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante”*;
- [12] UNI EN 12390-1, (2012), *“Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme”*;
- [13] UNI EN 14630, (2007), *“Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina”*;
- [14] BS 7543, (2015), *“Guide to durability of building elements, products and components”*;
- [15] RILEM TC 205-DSC Report 38, (2007), *“Durability of self-compacting concrete”*, State of the art report;

### Riferimenti generali

- [16] M. Collepari, R. Fratesi, G. Moriconi, C. Branca, S. Simoncini, (1989), *“Influenza della carbonatazione sulla corrosione dei ferri nel calcestruzzo armato”*, Giornate AICAP, Napoli;
- [17] P.N.Maggi, (2001), *“La valutazione della durabilità”*, Epitesto, Milano;
- [18] A.M. Neville, (1975), *“Properties of concrete”*, Pitman paperback, Londra;
- [19] M. Collepari; (2011), *“Dizionario enciclopedico del calcestruzzo”*, Tintoretto, Villorba (TV);
- [20] M. Collepari, S. Collepari, L. Troli, (2009), *“Il nuovo calcestruzzo”*, Tintoretto, Villorba (TV);
- [21] A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, O.S.B. Al-Almoudi, (2003), *“Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability”*, Cement and concrete composites, Elsevier;
- [22] P. Pedferri, L. Bertolini, (2000), *“La durabilità del calcestruzzo armato”* Mc Graw-Hill, New York;
- [23] A. Ghersi A., (2010), *“Il cemento armato”*, Dario Flaccovio Editore, Palermo;

- [24] K.K. Sideris, (2006), *“Durability of self-compacting concretes different strength categories”*, Internale report, Laboratory of building materials, Democritus, University of Thrace, Greek;
- [25] S. Assiè, (2004), *“Durabilité des bétons autoplacants”*, PhD thesis INSA de Toulouse, France;
- [26] 9DBMC, (2002), International Conference on Durability of Building Materials and Components, Brisbane - Australia;
- [27] 10DBMC, (2005), International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon - France;
- [28] 11DBCM, (2008), International Conference on Durability of Building Materials and Components, Istanbul - Turkey;
- [29] 12DBCM, (2011) International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto - Portugal;
- [30] 13DBCM, (2014) International Conference on Durability of Building Materials and Components, Sao Paulo - Brazil;