

Experimental evaluation of the contribution of coatings to the durability of concrete

Valutazione sperimentale del contributo di rivestimenti alla durabilità del calcestruzzo

M. Nicoletta, C. Scognamiglio, A. Ceparano

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli studi di Napoli Federico II, Naples, Italy

ABSTRACT: As part of the studies on the life cycle of building components and durability of concrete, an experimentation was conducted to evaluate the role of the coatings in painted plaster, in reference to carbonation of concrete structures in regard to real estate of the post-war period, in which this technical solution is mainly the only protection from atmospheric agents. The experimentation was conducted by comparing four types of prismatic samples (70x70x160mm) in ordinary concrete both uncoated, and coated with three different solutions (UNI EN-13295). Accelerated carbonation tests were carried out, in a thermostatic cell, exposing the samples to an atmosphere with 1% CO₂, and measuring the depth of carbonation at three significant steps. The results show which are the coating solutions with the best performance in relation to carbonation. Therefore, they may be a useful indicator for the maintenance interventions to carry out on the buildings in which – for their original features – the reinforced concrete structures are more subjected to the aggression by atmosphere. Nell'ambito degli studi sul ciclo di vita dei componenti edilizi e della durabilità del calcestruzzo, è stata condotta una sperimentazione per valutare il ruolo dei rivestimenti costituiti da intonaci tinteggiati, rispetto alla carbonatazione delle strutture in c.a., con riguardo al patrimonio edilizio del dopoguerra, in cui questa soluzione tecnica rappresenta in prevalenza l'unica protezione dagli agenti atmosferici. La sperimentazione è stata comparativamente condotta su quattro tipi di provini prismatici (70x70x160mm) in calcestruzzo ordinario non rivestito e rivestito con tre differenti soluzioni (UNI EN-13295). Sono state eseguite prove di carbonatazione accelerata, in cella termostatica, esponendo i campioni ad un'atmosfera con 1% di CO₂ e misurando le profondità di carbonatazione a tre step significativi. I risultati mostrano le soluzioni di rivestimento con migliori prestazioni nei confronti della carbonatazione. Dunque possono costituire un'utile indicazione per gli interventi manutentivi da eseguire agli edifici che per caratteristiche originarie hanno strutture in c.a. maggiormente sottoposte all'aggressione dell'atmosfera.

KEYWORDS: life cycle; durability; carbonation depth; facade coatings / ciclo di vita; durabilità; profondità di carbonatazione; rivestimenti di facciata

1 INTRODUZIONE

Gli anni '90 hanno mostrato con chiarezza che anche il calcestruzzo, che era stato considerato nell'immediato dopoguerra un materiale capace di sfidare il tempo, ha un ciclo di vita alquanto chiaro e riconoscibile, una fenomenologia di degrado chiara e identificabile, ma anche – fortunatamente – possibilità di tornare ad assolvere alle prestazioni di progetto con i giusti interventi manutentivi.

Il vero problema, tuttavia, è costituito dalla varietà tipologica dei conglomerati di quel periodo, il cui mix design era spesso demandato alla estemporaneità, tanto che nello stesso edificio poteva presentare caratteristiche anche estremamente differenti. Conseguenza di questa ingovernabile situazione è che oggi ci si trova sempre più spesso ad assistere a fenomeni di crisi locale di elementi strutturali deter-

minate da episodi sporadici dell'epoca della costruzione, come ad esempio un getto di fine giornata caratterizzato da scarsità di cemento, da copriferro quasi nulli a causa della fretta di realizzare, da inerti di provenienza decisamente scongiabile.

Se, poi, ci si sofferma su quelle che oggi sono le riconosciute possibilità di progettare strutture in grado di resistere adeguatamente alle azioni dell'ambiente (cosiddette "durabili"), non si può non rimarcare come gli elementi in c.a. del dopoguerra erano protetti in maniera indubbiamente insufficiente:

- i copriferro erano quasi sempre inferiori ai 2 cm., che costituivano il *benchmark* empirico dell'epoca;
- travi e pilastri esterni erano ricoperti a malapena da un intonaco di malta comune di 1,5 – 2 cm. e da una tinteggiatura sintetica, con la conseguenza di costituire sistematicamente ponti termici;

- i balconi non erano affatto protetti da strato impermeabile;
- i solai di copertura erano privi di strato coibente, e ricoperti da uno strato di asfalto minerale che ha mostrato una vita utile media di circa 20-25 anni.

In Italia infatti - diversamente da Stati Uniti, Canada e molti altri paesi in cui esistono già da tempo raccomandazioni e norme per la realizzazione di strutture in calcestruzzo armato capaci di resistere alle aggressioni degli agenti atmosferici - solo da pochi anni, grazie all'entrata in vigore del D.M. 14/02/92 prima e delle NTC-08 dopo, si fa riferimento a norme (UNI 9858, UNI EN 206-1) precise ed univoche su come progettare strutture in conglomerato cementizio armato ordinario e precompresso caratterizzate da una ben definita composizione della miscela al fine di garantire un'adeguata durabilità.

Prima ancora dell'entrata in vigore del D.M. del 14/02/92, le raccomandazioni tecniche contenute nei precedenti decreti fornivano alcuni suggerimenti per la durabilità del conglomerato (ad esempio quello del 16 Novembre 1939 art. 38): *“in presenza di salssedine marina o di emanazioni gassose nocive alla costruzione, la distanza minima delle superfici metalliche dalle facce esterne del conglomerato dev'essere almeno di cm. 3,5 e lo strato esterno del conglomerato rivestente i ferri dev'essere impermeabile”* oppure (D.M. del 27 luglio 1985 punto 2.1.8): *“Al fine di garantire la durabilità del conglomerato particolarmente in ambiente aggressivo, così come in presenza di cicli di gelo e disgelo, è necessario studiarne adeguatamente la composizione”*. È allora evidente la notevole aleatorietà che caratterizza le suddette raccomandazioni: esse di fatto risultano poco utilizzabili in quanto non stabiliscono affatto i criteri per la definizione del grado di aggressività ambientale, né tantomeno forniscono specifiche raccomandazioni

La mancanza di norme ben definite sulla durabilità ha fatto sì che la scelta del conglomerato avvenisse solo sulla base delle esigenze statiche richieste per il calcestruzzo. Da una nota statistica degli anni '70 sul degrado delle strutture in c.a. eseguita su un campione di 139 edifici, risultò che l'errata progettazione del calcestruzzo è responsabile nel 42% dei casi del degrado delle strutture. Esistono ad oggi, quindi, numerose opere in c.a. risalenti ai primi decenni del '900, realizzate con conglomerati confezionati in maniera “standard” senza tener conto delle specifiche azioni ambientali aggressive, protette semplicemente da uno strato di intonaco tinteggiato e sulle quali intervenire mediante interventi manutentivi finalizzati ad impedire che l'aggressione ambientale possa provocare danni irreparabili.

Al di là dei casi in cui l'adeguamento energetico con cappotto termico consegue - involontariamente - anche un grado di protezione elevatissimo per gli elementi strutturali esterni, è allora interessante

comprendere se, all'atto di interventi di manutenzione ordinaria delle facciate e del rifacimento degli intonaci, sia possibile conferire agli elementi di rivestimento un ruolo di protettivo del calcestruzzo e, in caso affermativo, quali siano i materiali più idonei.

Il presente lavoro sperimentale ha per l'appunto lo scopo di valutare il contributo di rivestimenti costituiti da intonaci esterni (malta cementizia, malta bastarda e malta di calce) alla durabilità del calcestruzzo con particolare riguardo alla resistenza nei confronti della penetrazione di CO₂, mediante valutazione comparativa di provini di c.a. rivestiti con diversi tipi di malta, sottoposti in laboratorio a carbonatazione accelerata.

2 STATO DELL'ARTE

Il tema dell'influenza dei rivestimenti sulla durabilità del calcestruzzo è stata affrontata da diversi ricercatori.

Sperimentazioni antecedenti al 2004, anno di pubblicazione della norma UNI EN 13295 utilizzata nella valutazione sperimentale del presente lavoro, si possono ritrovare tra i numerosi studi realizzati negli anni '90 da Coppola, Collepari, Pistolesi, Zaffaroni e Borsoi, con utilizzo della stessa metodologia nella realizzazione dei campioni e nell'esecuzione della prova di carbonatazione accelerata. Sono stati realizzati provini di calcestruzzo di qualità scadente (rapporto a/c = 0,80; Rck = 15 Mpa) rivestiti, nelle diverse sperimentazioni, con vari prodotti di finitura (tra le più indagate si annoverano le pitture acriliche e i rivestimenti elastici in polimero-cemento) e le prestazioni in termini di durabilità di tali calcestruzzi rivestiti sono state confrontate con quelle dello stesso calcestruzzo non rivestito e con quelle di un calcestruzzo definito “top-quality” (a/c = 0,45; Rck = 50 Mpa).

Effettuata l'applicazione dei rivestimenti scelti sulla superficie del calcestruzzo da esaminare, i provini, rivestiti e non, sono stati esposti all'ambiente aggressivo di laboratorio (atmosfera arricchita al 30% di CO₂). La penetrazione all'anidride carbonica è stata successivamente misurata a intervalli regolari utilizzando le metodologie descritte nella norma UNI 9944.

Più recentemente, è stata analizzata la riduzione del tasso di carbonatazione del calcestruzzo rivestito da protezioni contenenti additivi a base di polimeri acrilici. Per il controllo dell'umidità sono stati utilizzati recipienti contenenti soluzioni saline sature, mentre, per il controllo della temperatura sono state utilizzate lampade da 250 W.

Nella camera di prova accelerata, i campioni sono stati investiti con un flusso d'aria costante caratterizzato da un contenuto di anidride carbonica del 4% (per abbreviare il periodo di prova, rispetto a quanto suggerito dalla norma EN 13295, per esigenze di

progetto), umidità relativa tra il 58-62% e temperatura di 25°C.

A partire dai risultati ottenuti da McGrath sulla penetrazione all'anidride carbonica per i calcestruzzi protetti dai rivestimenti indagati, si sono sviluppati ulteriori studi, questa volta su provini di calcestruzzo protetti non solo con finiture acriliche ma anche con rivestimenti cementizi.

In tale sperimentazione, i provini in calcestruzzo sono stati confezionati utilizzando un rapporto a/c pari a 0,48. A maturazione avvenuta, dei tre provini in calcestruzzo realizzati, 2 sono stati trattati superficialmente, mentre il terzo provino non è stato sottoposto ad alcun trattamento protettivo. L'intera prova d'invecchiamento accelerato è stata eseguita utilizzando le procedure descritte nella norma UNI EN 13295 esponendo i tre provini per 90 giorni ad una atmosfera contenente l'1% di CO₂, temperatura di 25°C ed umidità relativa del 65%.

In tutte le sperimentazioni sopra ricordate, si è indagato sul contributo anti-carbonatazione di rivestimenti di piccolo spessore, quali pitture acriliche, silani e rivestimenti in polimero-cemento.

Tali tecnologie sono, dal punto di vista delle reali possibilità di impiego nel settore delle costruzioni civili, utilizzabili per la protezione di manufatti "faccia-vista" o che in genere sono a contatto con agenti aggressivi o potenzialmente tali, se non protetti.

Nella presente sperimentazione si indaga, invece, su rivestimenti di spessore di circa 2 cm., che usualmente proteggono edifici con struttura in c.a., ovvero intonaci, prescindendo – per il momento – dal contributo delle pitture.

3 MATERIALI E METODI

I sedici provini realizzati per la presente sperimentazione ed utilizzati per effettuare la prova di carbonatazione accelerata, in accordo con quanto definito dalla norma UNI EN 13295, sono indicati in (Table 1).

Per il confezionamento del calcestruzzo ordinario di prova, data la forte variabilità delle caratteristiche del materiale al variare della sua composizione, dalle principali prescrizioni legislative D.L. 16/11/1939, R. D.L. 29/07/1933, che regolamentavano all'epoca l'esecuzione di opere in calcestruzzo armato, è stato possibile definire una composizione-tipo di miscela, considerata dalle stesse "dosaggio normale" e che ancora oggi viene definita in letteratura come composizione media di un m³ di calcestruzzo (Table 2).

Table 2. Average composition of a cubic meter of concrete / Composizione media di un metro cubo di calcestruzzo

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

L'assortimento granulometrico (Figure 1) è stato scelto in maniera tale da soddisfare il fuso granulometrico proposto dal Decreto Legge del 16/11/1939 "Norme per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato".

Table 1. Characteristics of the samples / Caratteristiche dei provini

Sigla	Descrizione	dimensione (cm)
CR	calcestruzzo di riferimento	10 x 10 x 40
CO	calcestruzzo ORDINARIO di prova	10 x 10 x 40
MC	malta cementizia	4 x 4 x 16
MB	malta bastarda	4 x 4 x 16
MCI	malta di calce idraulica	4 x 4 x 16
CO-MC	calcestruzzo ORDINARIO di prova ed intonaco di malta cementizia	7 x 7 x 16
CO-MB	calcestruzzo ORDINARIO di prova ed intonaco di malta bastarda	7 x 7 x 16
CO-MCI	calcestruzzo ORDINARIO di prova ed intonaco di malta di calce idraulica	7 x 7 x 16

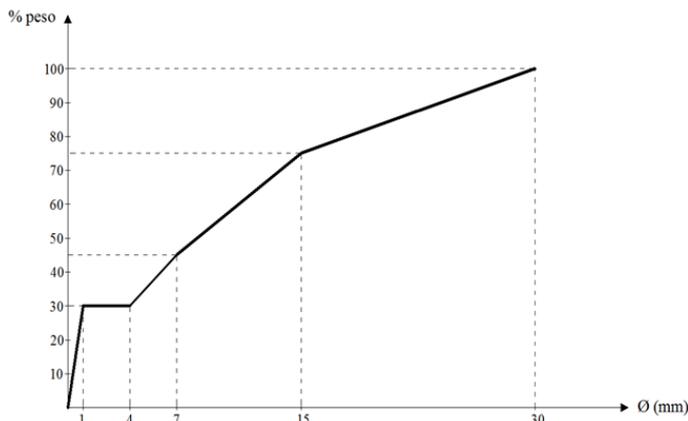


Figure 1: Granulometric curve of the aggregates used for the “ordinary” concrete / Curva granulometrica per gli aggregati utilizzati nel confezionamento del cls ordinario di prova

Per quanto riguarda il confezionamento del calcestruzzo “di riferimento”, la norma UNI EN 13295 specifica sia il dosaggio (cemento 360 kg/m^3 ; rapporto a/c 0,45) che l’assortimento granulometrico degli inerti (Figure 2). Gli intonaci utilizzati sia per i provini di sola malta che per i rivestimenti al calcestruzzo ordinario di prova (spessore medio del rivestimento pari a 15,00 mm), sono stati realizzati adoperando i 3 tipi più comuni di malte: malta cementizia, malta bastarda e malta di calce idraulica, denominati nel prosieguo rispettivamente “MC”, “MB” e “MCI”

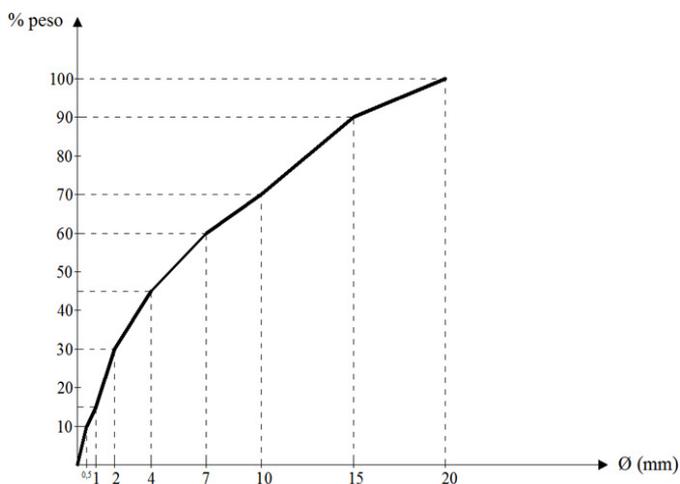


Figure 2: Granulometric curve of the aggregates used for the “reference” concrete / Curva granulometrica per gli aggregati utilizzati nel confezionamento del cls di riferimento

Al fine di consentire la riproducibilità dei calcestruzzi utilizzati nel presente lavoro, sia per il calcestruzzo di riferimento che per quello ordinario di prova, il confezionamento dei provini nonché la stagionatura e lo stoccaggio degli stessi è stato eseguito in accordo con quanto prescritto dalla UNI EN 1766. La norma, oltre a definire la composizione e le caratteristiche dei calcestruzzi di riferimento da utilizzarsi nei metodi di prova, stabilisce un procedimento di preparazione e di stagionatura dei provini garantendo in questo modo la produzione di un calcestruzzo riproducibile.

Per quanto riguarda la preparazione dell’impasto, si è proceduto a versare tutti gli aggregati secchi nel contenitore del miscelatore, aggiungendo metà della dose d’acqua e mescolando per 2 min. Durante la fase di miscelazione è stata aggiunta la quantità di cemento prevista e l’altra metà d’acqua nel corso del minuto successivo. A mescolazione avvenuta (tempo max di miscelazione pari a 5 minuti), il calcestruzzo è stato compattato a fondo negli stampi in legno realizzati per ottenere le dimensioni desiderate dei provini, mediante tavola vibrante e rimuovendo il calcestruzzo in eccesso avendo cura di livellare poi la superficie al bordo dello stampo.

Per quanto, poi, concerne la stagionatura dei provini, sono stati conservati negli stampi per 24 h dopo il getto a $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, sformati e successivamente conservati per altri 27 giorni sott’acqua a $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$. Dopo il periodo di stagionatura, i provini sono stati stoccati in ambiente di laboratorio ad una temperatura di $(21 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ed U.R. $(60 \pm 10)\%$ fino a quando la variazione di peso dei campioni è risultata inferiore dello 0.2% in peso in un periodo di 24 ore (sette giorni).

Sulla scorta di quanto esposto fino ad ora e in accordo con la norma UNI EN 13295, l’apparecchiatura utilizzata ai fini del presente lavoro è una cella termostatica capace di fornire un flusso uniforme di CO_2 mediante valvole elettromagnetiche per la regolazione dell’estrazione e dell’immissione. Per il controllo della temperatura, l’apparecchiatura presenta un sistema di riscaldamento ottenuto con resistenze poste all’esterno della camera, mentre, per il controllo dell’umidità relativa, non essendo dotata di un sistema di regolazione di

Table 3. Testing program steps / Fasi del programma di prova

Step	Descrizione
1°	Inizio stagionatura dei campioni (rif. norma EN 13295:2004)
2°	Inizio conservazione in ambiente di laboratorio:
3°	Inizio esposizione in camera di prova:
4°	1 ^a misurazione della profondità di carbonatazione (a 15 gg) (rif. norma EN 13295:2004 per il metodo della fenolftaleina, e norma EN 14630).
5°	2 ^a misurazione della profondità di carbonatazione (a 30 gg).
6°	3 ^a misurazione della profondità di carbonatazione (a 45 gg).

tale parametro ambientale, si è provveduto in alternativa – avendo fissato la temperatura – ad utilizzare soluzioni saline sature contenute in appositi recipienti all'interno della cella. La presenza di un igrometro ha permesso, inoltre, un controllo visivo di quest'ultimo parametro.

La (Table 3) riporta il programma di prova attraverso il quale è stato possibile fissare, da un punto di vista cronologico, le attività di laboratorio.

4 RISULTATI

La tabella sotto riportata (Table 4) riepiloga i risultati ottenuti, per tutti i campioni esaminati, delle misurazioni della profondità di carbonatazione effettuate alle varie scadenze prefissate. In accordo con le procedure stabilite dalla norma UNI EN 13295, per ogni superficie del campione, a turno, si è proceduto alla valutazione delle misurazioni per ogni lato. La media dei quattro valori calcolati per ogni lato rappresenta la profondità di carbonatazione (d_k) per il campione.

E' di particolare interesse e sarà oggetto di futuri approfondimenti, il comportamento contraddittorio delle malte quanto sono assolute e quando fungono

da protezione al calcestruzzo: la malta di calce idraulica ad esempio, che da sola si carbonata più lentamente, quando è chiamata a fare da rivestimento espone velocità di carbonatazione più che doppie rispetto alla malta bastarda e più che triple rispetto alla malta cementizia.

5 CONCLUSIONS

The first information that emerge by table 4, show the results of the carbonation depth for the mortar specimens, (M.C., M.B., M.C.I.). From these values it is observed that the specimens in the hydraulic lime mortar M.C.I. and those in lime-cement mortar M.B., while exhibiting a smaller depth of total carbonation (that is to say roughly constant within the cross section to the survey of the progression, on average equal to 4.16 mm and 1.19 mm, respectively) compared to that exhibited by specimens of cement mortar M.C. (on average equal to 5.58 mm), however, are also characterized by a non-negligible partial carbonation (that in to say disuniform within the cross section to the survey of the progression, on average respectively equal to 2.93 mm and 10.65 mm) probably due to hardening of lime as binder present

Table 4. Survey results of carbonation depth / Risultati del rilievo della profondità di carbonatazione

SERIE CAMPIONI	DESCRIZIONE CAMPIONI	PROFONDITÀ DI CARBONATAZIONE MEDIA (d_k)		
		15 gg. (mm)	30 gg. (mm)	45 gg. (mm)
M.C.	Malta cementizia	5,34	C_{tot}	-
		5,82	C_{tot}	-
M.B.	Malta bastarda	1,04 (10,19)	C_{tot}	-
		1,34 (11,10)	C_{tot}	-
M.C.I.	Malta di calce idraulica	3,77 (2,65)	C_{tot}	-
		4,54 (3,20)	C_{tot}	-
C.O.-M.C.	Calcestruzzo ordinario e malta cementizia	15,00* + 0,00	15,00* + 0,00	15,00* + 0,18
		15,00* + 0,00	15,00* + 0,00	15,00* + 0,13
C.O.-M.B.	Calcestruzzo ordinario e malta bastarda	15,00* + 0,00	15,00* + 0,18	15,00* + 0,28
		15,00* + 0,00	15,00* + 0,23	15,00* + 0,31
C.O.-M.C.I.	Calcestruzzo. ordinario e malta di calce idraulica	15,00* + 0,00	15,00* + 0,30	15,00* + 0,67
		15,00* + 0,00	15,00* + 0,37	15,00* + 0,62
C.O.	Calcestruzzo ordinario	0,00	0,55	0,80
		0,00	0,32	1,07
C.R.	Calcestruzzo di riferimento	0,00	0,55	0,66
		0,00	0,35	0,61
LEGENDA (_ , _) valore che indica il fronte del provino carbonatato parzialmente. Presente solo per malta bastarda e calce idraulica; C_{tot} provino interamente carbonatato; * tale valore si riferisce al solo rivestimento d'intonaco che a sua volta ha esibito una completa carbonatazione avendo esso uno spessore proprio di 15,00 mm; + _ , _ _ tale valore si riferisce alla profondità di carbonatazione del solo nucleo di calcestruzzo (relativamente ai provini della serie C.O.-M _).				

in the matrix of both series of specimens.

By focusing on the results obtained from testing at 30 days of exposure in the test chamber, it appears that samples of C.O. series (ordinary concrete) have exhibited an average depth of carbonation equal to 0.32 mm for the C.O.-1 sample and 0.55 mm for the C.O.-2 sample (0.44 mm average between the two). For samples of the C.O.-M.B series, the same ordinary concrete, coated with a plaster of cement mortar, has not exhibited any appreciable depth of carbonation at 30 days of exposure, whereas, the samples of the series C.O.-M.B. of ordinary concrete coated with plaster of lime-cement mortar have exhibited, relatively to the only concrete core, a average depth of carbonation equal to 0.20 mm (average of the values obtained for the two specimens). Finally, the samples of C.O.-M.C.I. series, ordinary concrete coated with a plaster of hydraulic lime mortar has exhibited a average depth of carbonation equal to 0.34 mm (average of the values obtained for the two specimens).

From the foregoing, it is evident that all three examined mortars, at 30 days of exposure in the aggressive environment with 1% CO₂ in air, have reduced the depth of carbonation for ordinary concrete examined, confirming in this way their protective function relatively to the penetration of CO₂. In the specific case, among the examined mortars, the cement one has had the most satisfactory behavior because, at 30 days of exposure, did not allow CO₂ to penetrate significantly into concrete core. Then comes the lime-cement mortar registering a depth of carbonation into ordinary concrete core, of about half compared to that of uncoated specimens; finally, among the three studied mortars, the hydraulic lime mortar has had the worst behavior, although confirming its protective function against the concrete, as it has recorded a reduction in the depth of carbonation barely visually noticeable.

The results are confirmed on exposed at 45 days: it is still the cement mortar to provide the best protection to concrete against CO₂ registering an average depth of carbonation in the ordinary concrete core equal to 0.15 mm compared to 0.94 mm exhibited by concrete specimens of C.O. series devoid of coating. Then it follows the cement-lime mortar with - only for ordinary concrete - an average depth of carbonation equal to 0.30 mm (the double of that recorded by concrete specimens coated with plaster of cement mortar). Finally, it is confirmed as the worst among the mortars examined the hydraulic lime mortar because, always with reference to the only concrete core, exhibits an average depth of carbonation equal to 0.65 mm.

It's important to note that the values of carbonation at 45 days of exposure can be considered - on the basis of the observations made on-site for many sample buildings - comparable to those of about 50 years of service life of a building in average condi-

tions of exposure in Naples (city environment , with a distance from the sea of some hundreds of meters), with the same technological characteristics of the components investigated in this research.

This comparison is possible ad a result of the experimental surveys that were carried out on 48 sample buildings in the 1988-2000 period. Its results led to one of the methodologies for the evaluation of the life cycle of building components, introduced in UNI 11156:3 code, in accordance with the approach suggested by ISO 15686:8 code.

It appears, therefore, possible for designers of maintenance interventions for facades, to choose the materials to be used as facade coatings also on the basis of considerations relating to the ability of them to defend the concrete elements from the aggression of the environment, also having as reference the data of re-scaling between the results obtained in the laboratory and the behavior of buildings on-site.

Le prime informazioni che emergono in tabella 4, riportano i risultati della profondità di carbonatazione per i provini realizzati in sola malta (provini M.C., M.B., M.C.I.). Da tali valori si osserva che i provini in malta di calce idraulica M.C.I. e quelli in malta bastarda M.B., pur esibendo una minore profondità di carbonatazione totale (ovvero all'incirca costante rispetto alla sezione trasversale di rilevazione dell'avanzamento, in media pari rispettivamente a 4,16 mm e 1,19 mm) rispetto a quella esibita dai provini di malta cementizia M.C. (in media pari a 5,58 mm), sono però anche caratterizzati da una non trascurabile carbonatazione parziale (ovvero disuniforme rispetto alla sezione trasversale di rilevazione dell'avanzamento, rispettivamente in media pari a 2,93 mm e 10,65 mm) dovuta presumibilmente all'indurimento della calce come legante presente nella matrice di entrambe le serie di provini.

Focalizzando l'attenzione sui risultati ottenuti dalla sperimentazione a 30 giorni di esposizione in camera di prova, emerge che i campioni della serie C.O. realizzati in solo calcestruzzo ordinario hanno esibito una profondità di carbonatazione media pari a 0,32 mm per il campione C.O.-1 e 0,55 mm per il campione C.O.-2 (0,44 mm la media tra le due). Per i campioni della serie C.O.-M.C, lo stesso calcestruzzo ordinario, rivestito con uno strato di intonaco di malta cementizia, non ha esibito nessuna profondità di carbonatazione apprezzabile a 30 giorni di esposizione, mentre, i campioni della serie C.O.-M.B. in calcestruzzo ordinario rivestito con intonaco di malta bastarda hanno esibito, relativamente per il solo nucleo in calcestruzzo, una profondità di carbonatazione media pari a 0,20 mm (media dei valori ottenuti per i due provini). Infine, per i campioni della serie C.O.-M.C.I., il calcestruzzo ordinario rivestito con uno strato di intonaco di malta di calce idraulica ha esibito una profondità di carbonatazione

media pari a 0,34 mm (media dei valori ottenuti per i due provini).

Da quanto esposto, è evidente che tutte e tre le malte esaminate, a 30 giorni di esposizione in ambiente aggressivo con 1% di CO₂ in aria, hanno ridotto la profondità di carbonatazione per il calcestruzzo ordinario esaminato, confermando in questo modo la loro funzione protettiva relativamente alla penetrazione di CO₂. Nel caso specifico, tra le malte esaminate, quella che ha avuto il comportamento più soddisfacente è stata la malta cementizia che, a 30 giorni di esposizione, non ha permesso all'anidride carbonica di penetrare in maniera significativa nella massa di calcestruzzo. Segue poi la malta bastarda facendo registrare una profondità di carbonatazione nel nucleo in calcestruzzo ordinario più bassa di circa la metà rispetto a quella dei provini non rivestiti; infine, tra le tre malte studiate, quella che ha avuto il peggior comportamento, pur confermando la sua funzione di protezione nei confronti del calcestruzzo, è stata la malta di calce idraulica in quanto ha fatto registrare una riduzione della profondità di carbonatazione appena evidente ad occhio nudo.

I su esposti risultati sono confermati a 45 giorni di esposizione: è ancora la malta cementizia a fornire la migliore protezione al calcestruzzo nei confronti dell'anidride carbonica facendo registrare una profondità di carbonatazione nel nucleo in calcestruzzo ordinario pari in media a 0,15 mm rispetto ai 0,94 mm esibiti in media dai provini di calcestruzzo della serie C.O. privi di rivestimento. Segue poi la malta bastarda facendo registrare, per i soli calcestruzzi ordinari, una profondità di carbonatazione in media pari a 0,30 mm (il doppio di quella registrata dai provini in calcestruzzo rivestiti con intonaco di malta cementizia). Infine, si conferma come peggiore tra le malte esaminate la malta di calce idraulica, in quanto, sempre con riferimento al solo nucleo in calcestruzzo, esibisce una profondità di carbonatazione in media pari a 0,65 mm.

E' importante sottolineare che i valori di carbonatazione a 45 giorni di esposizione possono essere considerati – sulla scorta di rilevazioni fatte in sito su molti edifici campione - paragonabili a quelli di circa 50 anni di vita utile di un edificio in condizioni di esposizione medie della città di Napoli (ambiente cittadino, con una distanza dal mare di alcune centinaia di metri), con le stesse caratteristiche tecnologiche dei componenti indagati nel corso della presente sperimentazione.

Tale comparazione è possibile a seguito delle rilevazioni sperimentali condotte su 48 edifici campione nel periodo 1988-2000, i cui risultati hanno condotto ad una delle metodologie proposte nella norma UNI 11156:3, prendendo spunto dall'approccio suggerito dalla norma ISO 15686:8.

Appare, dunque, possibile per i progettisti di interventi di manutenzione delle facciate, scegliere i materiali da utilizzare come rivestimenti di facciata

anche sulla base di considerazioni riguardanti la capacità di essi di difendere gli elementi di calcestruzzo dall'aggressione degli agenti atmosferici, avendo anche come riferimento il dato di *re-scaling* fra i risultati ottenuti in laboratorio ed il comportamento degli edifici in sito.

REFERENCES

- Coppola L., Collepari M., Pistolesi C., Zaffaroni P. 1994. Silani, Rivestimenti Acrilici ed Elastici per la Durabilità di Strutture in Calcestruzzo. *Atti del 10° Convegno CTE "Nuova Tecnologia Edilizia per l'Europa"*, Vol. 2, pp. 423-428, Milano.
- Coppola L., Pistolesi C., Zaffaroni P., Collepari M. 1997. Rivestimenti Elastici in Polimero-Cemento per la Protezione delle Strutture in Calcestruzzo, *Atti delle Giornate AICAP "L'Innovazione e la Realtà delle Opere di Calcestruzzo Strutturale"*, Roma, pp. 85-92.
- Coppola L., Pistolesi C., Zaffaroni P., Borsoi A. 1996. Protezione del Calcestruzzo con Rivestimenti Elastici in Polimero-Cemento, *Atti del 3° Convegno AIMAT*, Vol. 1, pp. 307-316, Napoli.
- Fraternali F., Spadea S., Chechile R., Farina I., Sessa E., Vetrале F., Rendina I. 2012. Durability and Mechanical Properties of Hi-Tech Products for the Protection and the Reinforcement of Concrete Structures, *Caparol Italiana GmbH & Co. KG - Dipartimento di Ingegneria Civile Università di Salerno*.
- McGrath, P.F. 2005. A simple Test Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete, *Proceedings of ConMat'05 3rd International Conference on Construction Materials, Vancouver, BC*.
- Olazabel W.C., Traversa L. 1977. *FIP Notes.*, 13.
- ACI 201.2R. 1980. Guide to Durable Concrete. ACI publication, 201.
- D.L. 16/11/1939. Norme per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato.
- D.M. 14/02/92. Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- D.M. 14/01/2008. Norme tecniche per le costruzioni.
- D.M. 27/07/1985. Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- R.D. 29/07/1933. Norme per l'accettazione dei leganti idraulici e per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio.
- UNI 9858:1991. Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità.
- UNI 9944:1992. Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo.
- UNI EN 206 -1:2006. Calcestruzzo – Parte 1 – Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- 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.
- 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.
- 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 fenoltaleina.