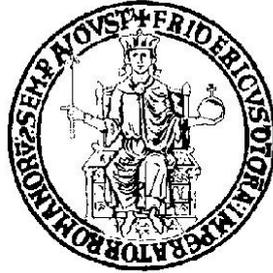


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI**

**FEDERICO II**

**Scuola Politecnica e delle Scienze di Base**



Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Dottorato di Ricerca in **Ingegneria dei Sistemi Civili**

XXX ciclo

**Claudio Scognamillo**

**VALUTAZIONE SPERIMENTALE DEL CONTRIBUTO  
DI ELEMENTI DI RIVESTIMENTO  
ALLA DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO**

**Coordinatore di dottorato:**

Prof. Ing. Andrea Papola

**Tutor:**

Prof. Ing. Maurizio Nicolella

## INDICE

INTRODUZIONE.....	6
<b>PARTE 1<sup>a</sup> – Cenni sull’evoluzione storica dei materiali</b>	
INTRODUZIONE .....	9
<b>Capitolo 1 – IL CALCESTRUZZO ARMATO.....</b>	<b>11</b>
1.1 Il calcestruzzo nell’antichità.....	11
1.2 Il calcestruzzo nell’era moderna .....	17
1.3 Il calcestruzzo armato e la sua evoluzione nella prima parte del ‘900: <i>principali prescrizioni normative per il confezionamento di un impasto tipo</i> .....	22
1.3.1 Premessa.....	22
1.3.2 Il decreto legge del 10 gennaio 1907 .....	23
1.3.3 Il R. Decreto legge del 29 luglio 1933 .....	24
1.3.4 Il Decreto legge del 16 novembre 1939 .....	28
<b>Capitolo 2 – IL CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE.....</b>	<b>32</b>
2.1 Generalità .....	32
2.2 Dagli anni ‘80 ad oggi.....	34
2.3 Le ragioni dello sviluppo.....	35
<b>Capitolo 3 – L’INTONACO .....</b>	<b>37</b>
3.1 Introduzione .....	37
3.2 Le origini.....	38
3.3 Il periodo Romano.....	38
3.4 L’età Rinascimentale .....	40
3.5 L’età Moderna e Contemporanea.....	40
<b>Capitolo 4 – LA PITTURA MURALE.....</b>	<b>42</b>
4.1 Introduzione .....	42
4.2 Le origini.....	42
4.3 Il periodo Romano.....	43
4.4 L’età Rinascimentale .....	45
4.5 L’età Moderna e Contemporanea.....	47
4.6 Gli elementi costituenti oggi .....	48
<b>PARTE 2<sup>a</sup> – Comportamento nel tempo dei componenti edilizi</b>	
INTRODUZIONE .....	52
<b>Capitolo 5 – DURABILITÀ DEI COMPONENTI EDILIZI .....</b>	<b>53</b>
5.1 Generalità .....	53
5.2 Valutazione della durabilità di un organismo edilizio .....	54

5.3	Valutazione della durabilità dei componenti edilizi: La UNI 11156 .....	55
5.3.1	Valutazione della vita utile in condizioni di riferimento – RSL.....	58
5.3.2	Valutazione della vita utile in condizioni di progetto – ESL.....	62
5.3.3	Valutazione della vita utile sulla base di dati da edifici campione.....	63
5.4	Metodologie di invecchiamento per la valutazione della vita utile .....	66
5.4.1	Esposizione all'esterno.....	67
5.4.2	Esposizione in laboratorio .....	68
<b>Capitolo 6</b>	<b>– DURABILITÀ E DEGRADO DEL CALCESTRUZZO ARMATO .....</b>	<b>70</b>
6.1	Brevi cenni sui principali componenti del calcestruzzo .....	70
6.1.1	Il cemento .....	70
6.1.2	L'acqua d'impasto .....	72
6.1.3	Gli aggregati .....	72
6.1.4	Gli additivi .....	74
6.2	Durabilità del calcestruzzo .....	75
6.3	Principali cause di degrado del calcestruzzo armato .....	75
6.3.1	Corrosione dell'armatura.....	77
6.3.2	Attacco solfatico .....	79
6.3.3	Cicli di gelo e disgelo .....	80
<b>Capitolo 7</b>	<b>– CORROSIONE DELLE ARMATURE PER CARBONATAZIONE ....</b>	<b>82</b>
7.1	Descrizione delle fasi del fenomeno corrosivo .....	82
7.2	Avanzamento della carbonatazione.....	85
7.3	Avanzamento della corrosione.....	89
7.4	Effetti della corrosione sul calcestruzzo.....	92
<b>Capitolo 8</b>	<b>– CARATTERISTICHE E DEGRADO DEGLI ELEMENTI DI RIVESTIMENTO.....</b>	<b>95</b>
8.1	Introduzione .....	95
8.2	Il calcestruzzo autocompattante .....	95
8.2.1	Normativa di riferimento .....	95
8.2.2	Durabilità del calcestruzzo autocompattante .....	96
8.3	Intonaci maggiormente impiegati in edilizia .....	98
8.3.1	Intonaco di malta cementizia .....	99
8.3.2	Intonaco di malta di calce.....	100
8.3.3	Intonaco di malta bastarda .....	102
8.4	Degrado degli intonaci e principali cause .....	102
8.5	Pitture maggiormente impiegate in edilizia .....	106
8.6	Degrado delle pitture e principali cause .....	109
<b>PARTE 3<sup>a</sup> – Sperimentazione –</b>		
INTRODUZIONE	.....	112
<b>Capitolo 9</b>	<b>– STATO DELL'ARTE: Contributo dei rivestimenti alla durabilità del calcestruzzo .....</b>	<b>113</b>
9.1	Principali tecniche di prevenzione del degrado nel calcestruzzo armato .....	113

9.1.1 Generalità .....	113
9.1.2 Protezione delle armature .....	113
9.1.3 Impermeabilizzazione del calcestruzzo .....	115
9.2 Prevenzione mediante interventi sulla superficie esterna: <i>stato dell'arte della ricerca</i> .....	117
9.2.1 Generalità .....	117
9.2.2 Attività di ricerca recenti .....	118
9.2.3 Attività di ricerca antecedenti alla EN 13295.....	122
9.3 Considerazioni conclusive.....	124
<b>Capitolo 10 – MATERIALI: caratteristiche dei campioni.....</b>	<b>125</b>
10.1 Generalità .....	125
10.2 Materiali impiegati nel confezionamento dei campioni .....	126
10.2.1 Nucleo: calcestruzzo di riferimento .....	126
10.2.2 Nucleo: calcestruzzo ordinario di prova .....	128
10.2.3 Rinforzo: calcestruzzo autocompattante .....	131
10.2.4 Rivestimento: intonaco .....	131
10.2.5 Finitura: Pittura .....	131
10.3 Numero, forma e dimensioni dei campioni .....	134
10.3.1 Invecchiamento accelerato.....	134
10.3.2 Carbonatazione accelerata .....	137
<b>Capitolo 11 – METODI: invecchiamento e carbonatazione accelerati .....</b>	<b>141</b>
11.1 Generalità .....	141
11.2 Invecchiamento accelerato .....	141
11.2.1 Riferimenti normativi .....	142
11.2.2 Definizione del programma di prova .....	142
11.2.3 Attrezzature utilizzate .....	144
11.3 Carbonatazione accelerata.....	148
11.3.1 Riferimenti normativi .....	148
11.3.2 Definizione del programma di prova .....	150
11.3.3 Attrezzatura utilizzata .....	151
11.4 Il rescaling .....	151
<b>Capitolo 12 – RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE.....</b>	<b>154</b>
12.1 Introduzione .....	154
12.2 Prove di invecchiamento accelerato .....	154
12.2.1 Analisi delle rilevazioni termografiche .....	156
12.2.2 Analisi delle rilevazioni spettrofotometriche .....	158
12.3 Prove di carbonatazione accelerata .....	163
12.3.1 Rilevazione della profondità del fronte di carbonatazione .....	165
12.3.2 Analisi dei risultati.....	167
12.3.3 Analisi della variazione di resistenza e duttilità.....	176
<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....</b>	<b>181</b>

Appendice .....	188
Fonti delle illustrazioni .....	199
Riferimenti bibliografici.....	201

## **INTRODUZIONE**

La valutazione della durata dei componenti edilizi rappresenta un argomento di significativo interesse per la comunità scientifica internazionale nell'ambito del settore della produzione edilizia. La necessità di procedere alla determinazione della durata, per gli elementi costituenti un edificio, induce ad effettuare uno studio attento delle variabili che influiscono sul loro comportamento nel tempo. In quest'ottica, la stima della durata costituisce un aspetto rilevante, così come lo è il complesso insieme di attività, sperimentali e non, necessarie a determinarne il valore.

Lo sviluppo e la continua immissione sul mercato di prodotti da costruzione di nuova concezione, determinano, in particolare, l'esigenza di apprezzarne le aspettative di durata nel tempo. Gli studi effettuati in questo settore di ricerca finora hanno affrontato la questione in maniera compiuta relativamente ad un vasto panorama di componenti edilizi e di sistemi, non ultimi i materiali per impieghi strutturali, quali il calcestruzzo.

Già da molti anni, in altri paesi (Stati Uniti, Canada, Germania) esistono raccomandazioni e norme [27] per la realizzazione di strutture in calcestruzzo armato e precompresso capaci di resistere alle aggressioni di tipo chimico (solfati, sali) e fisico (gelo e disgelo) dell'ambiente in cui l'opera è situata. In Italia, invece, solo da pochi anni – grazie all'entrata in vigore del D.M. 14/02/92 prima, delle NTC-08 dopo, ed ancora più recentemente delle NTC-2018 – esistono norme precise e univoche su come progettare la durabilità delle strutture in calcestruzzo.

Sia la norma UNI 9858 [28] a cui fa riferimento il D.M. 14/02/92 al punto 4.1. che successivamente la norma UNI EN 206 a cui fanno riferimento le NTC-08 al punto 11.2.11 e le NTC-2018, infatti, stabiliscono il grado di aggressione ambientale attraverso la definizione di “classi di esposizione” e i corrispondenti provvedimenti da adottare circa il rapporto a/c (massimo), il dosaggio di cemento (minimo) ecc, perché il calcestruzzo sia durevole alla classe di esposizione individuata per la struttura.

Prima ancora dell'entrata in vigore del D.M. del 14/02/92, però, le raccomandazioni tecniche contenute nei precedenti decreti (ad esempio quello del

16 Novembre 1939) prevedevano per la durabilità del conglomerato (art. 38): “ *in presenza di salsedine marina o di emanazioni gassose nocive alla costruzione, la distanza minima delle superfici metalliche dalle facce esterne del conglomerato deve essere almeno di cm. 3,5 e lo strato esterno del conglomerato rivestente i ferri deve essere impermeabile*”. È inutile sottolineare la grande aleatorietà che caratterizza suddetta raccomandazione; essa di fatto risulta poco utilizzabile in quanto non stabilisce affatto i criteri per la definizione del grado di aggressività ambientale, né entra nello specifico nel definire le relative contromisure da adottare.

Dal punto di vista dello stato dell'arte nell'ambito della ricerca, a seguito di un'attenta analisi è emersa una carenza di studi scientifici specifici 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. Ne deriva che risulta opportuno pertanto studiare le interazioni fra i calcestruzzi di nuova generazione impiegati per il consolidamento dei componenti edilizi in calcestruzzo ordinario, e lo stesso calcestruzzo oggetto di consolidamento.

Inoltre, posto che l'esecuzione degli interventi di rinforzo strutturale con incamiciatura in SCC è di consueto seguita dalla realizzazione dello strato di intonaco e dalla successiva tinteggiatura, particolare attenzione è stata posta anche allo studio dell'invecchiamento dei livelli più superficiali.

L'approccio che si è adottato per fornire risposta alle problematiche evidenziate ha visto uno studio del panorama delle soluzioni tecnologiche esistenti con l'individuazione di quelle maggiormente utilizzate, e l'applicazione ai casi in oggetto delle esperienze di sperimentazione maturate, mediante una fase di indagini in laboratorio per la simulazione delle condizioni di esercizio. Tale approccio ha chiaramente reso necessaria l'acquisizione di una serie di informazioni relative alla contestualizzazione degli elementi costruttivi, sia dal punto di vista della collocazione geografica che della composizione.

La successiva fase di realizzazione delle prove di laboratorio è stata inoltre preceduta dalla riproduzione materiale degli elementi che costituiscono l'oggetto della sperimentazione, dalla definizione dei modelli di simulazione, nonché dalla definizione delle condizioni di esposizione da adottare e dei cicli di sollecitazione

da applicare. Nello specifico, i programmi di prova sono costituiti da cicli di invecchiamento accelerato e di carbonatazione accelerata, completati dalle necessarie prove chimiche (misurazione della profondità del fronte di carbonatazione con fenolftaleina), termografiche e spettrofotometriche, per la lettura e per l'analisi dei risultati ottenuti.

I risultati ottenuti sono costituiti da una caratterizzazione delle diverse modalità di invecchiamento degli elementi costituenti la stratigrafia testata e dalla conoscenza delle caratteristiche di propagazione della carbonatazione in funzione delle diverse composizioni dei campioni individuati.

## **PARTE 1<sup>a</sup> - Cenni sull'evoluzione storica dei materiali**

### ***Introduzione***

I contenuti relativi alla 1<sup>a</sup> parte riguardano principalmente le tappe fondamentali dell'evoluzione storica dei componenti edilizi oggetto del presente lavoro di ricerca (calcestruzzo, calcestruzzo autocompattante, intonaci e pitture per esterni).

La conoscenza dell'evoluzione storica dei materiali è di fondamentale importanza per una completa comprensione dell'oggetto di studio. Infatti, cogliendo le principali differenze tra le pratiche costruttive contemporanee e quelle del passato, è possibile ricavare informazioni importanti che possono essere molto utili per l'attività di ricerca.

Relativamente al calcestruzzo, lo studio inizia partendo dalla genesi del primo conglomerato e proseguendo con l'avvento dei primi leganti idraulici, fino ad arrivare al conglomerato cementizio armato correntemente inteso. Il passo successivo è stato quello di definire, mediante l'analisi dei primi regolamenti italiani sul calcestruzzo moderno, una miscela tipo, comunemente riconosciuta dagli operatori del settore, in base a cui far riferimento ai fini dello studio di tesi data la forte variabilità delle caratteristiche del materiale al variare della sua composizione.

Relativamente al calcestruzzo autocompattante, è noto che si tratta di una tipologia di conglomerato dalla diffusione relativamente recente. Ciononostante sono stati sottolineati i passaggi fondamentali concernenti il suo sviluppo a partire dagli anni '80, nonché le peculiarità che ne hanno favorito appunto lo sviluppo.

Relativamente all'intonaco esterno, lo studio riguarda una descrizione sintetica che parte dagli intonaci della Magna Grecia per poi proseguire con gli intonaci del periodo Romano fino ad arrivare ai moderni intonaci dell'età contemporanea. Da questo studio emerge in maniera evidente che gli intonaci contemporanei, a differenza di quelli del periodo Romano, a causa delle crescenti pratiche "sbrigative" legate al boom economico, sono più fragili e caratterizzati da una minor durabilità alle azioni esterne.

Relativamente alle pitture murali esterne, analogamente agli intonaci, l'attenzione è stata posta sullo sviluppo delle tecniche realizzative nel corso dei secoli, sottolineando il modo in cui per un lungo periodo il fresco su fresco abbia rappresentato la tecnica impiegata in maniera dominante, prima dell'evoluzione verso tecniche a secco o su fondo asciutto, genitrici delle moderne metodologie.

## Capitolo 1

# IL CALCESTRUZZO ARMATO

### 1.1 Il calcestruzzo nell'antichità [1]

In origine il calcestruzzo<sup>1</sup> era formato da una miscela di calce e di frantumi di mattoni, oppure da una miscela di calce e di sabbia vulcanica, estratta principalmente dalle cave della zona di Pozzuoli (NA).

L'*homo faber* ha sempre cercato di migliorare i materiali che aveva a disposizione per ottenere prodotti sempre più durevoli nel tempo; si riscontra un continuo sforzo per migliorarne le caratteristiche di resistenza associando anche più materiali, come nel caso dei mattoni impastati con fibre organiche. Il Libro dell'Esodo testimonia che la paglia veniva aggiunta nell'impasto di argilla per ottenere mattoni crudi più resistenti.

Anche se nell'immaginario collettivo gli antichi schiavi trainavano grossi blocchi di pietra per costruire le piramidi, una moderna ricerca condotta da una equipe di scienziati franco-statunitensi confermerebbe la teoria, avanzata intorno al 1970, dal ricercatore francese Joseph Davidovits, secondo la quale gli Egiziani utilizzavano una sorta di calcestruzzo per riempire i blocchi di pietra che venivano scavati all'interno, prima di essere portati in cima alla costruzione. Era così possibile alleggerire possenti e maestosi blocchi di pietra.



Fig. 1 - Piramide di Chephren, una delle piramidi della Valle di Giza

---

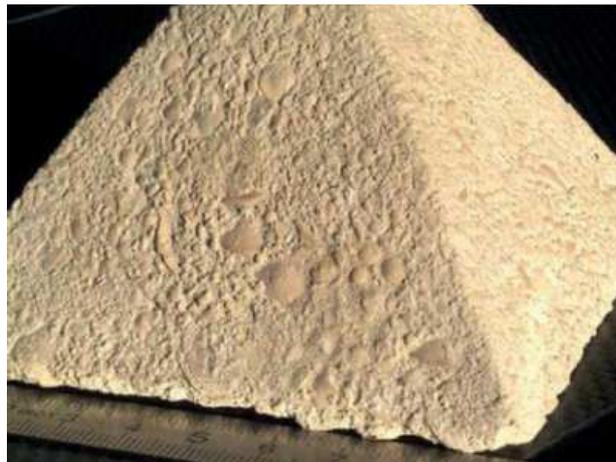
<sup>1</sup> Il termine calcestruzzo deriva dal latino *calcis structio*, che significa struttura a base di calce.

Secondo i professori Gilles Hug, dell’Agenzia di ricerca aerospaziale francese, e Michel Barsoum, dell’Università di Philadelphia, non tutte le pietre presentavano questo riempimento. In particolare, il calcestruzzo di riempimento risulta utilizzato principalmente per i blocchi lapidei destinati ai livelli più alti, come nel caso delle piramidi di Giza (fig. 1), mentre la rimanente parte doveva essere formata da rocce calcaree naturali.

Da questo studio, emerge che gli Egiziani, per realizzare il calcestruzzo di alleggerimento avrebbero utilizzato calcare tenero impastato con acqua del Nilo e arricchito, poi, con cenere.

Secondo Davidovits ci potremmo trovare davanti ad ottime imitazioni di rocce, costruite con una tecnologia di non difficile ripetibilità per chi antichi egiziani. Davidovits è riuscito a riprodurre fedelmente rocce calcaree partendo dai loro costituenti base. Osservando, poi, le proprietà disgreganti degli acidi facilmente reperibili anche presso le antiche dinastie egiziane, Davidovits ha proposto un modello chimico che ha ottenuto ampio successo nel mondo della ricerca e della chimica. Alcuni acidi, quali il formico e l’acetico, sono in grado di disciogliere letteralmente una pietra fino a farla diventare una sostanza fangosa.

Questa sostanza se *ri*-arricchita con sabbia di granito, insieme ad alcuni estratti vegetali, riassume, solidificandosi, l’aspetto di un blocco di granito naturale (fig. 2).



**Fig. 2** - Costruzione piramidale di Davidovits

Secondo Davidovits, quindi, gli enormi blocchi delle piramidi, alti dai due ai tre metri e pesanti fino a 500 tonnellate, sarebbero stati costruiti in loco e dovevano essere composti per un 90-95% da materiale di tipo calcareo e per un 5-10% da

leganti geologici naturali. I costruttori egiziani avrebbero utilizzato una tecnologia simile a quella del nostro calcestruzzo utilizzando la soda caustica, ottenuta dal carbonato di sodio (che si trova in Egitto allo stato naturale) e i silicati idrati (che gli Egiziani estraevano dalle miniere dei Sinai), in sostituzione del nostro cemento d'altoforno.

Nel merito dell'unione di più materiali, sappiamo che sia i greci che i romani associarono soprattutto il ferro alla pietra realizzando cuciture degli elementi lapidei che garantivano una resistenza a trazione. Questa tecnologia dei rinforzi metallici doveva essere molto nota ai costruttori romani come testimoniano le grappe che collegano i blocchi di travertino del Colosseo (fig. 3).



Fig. 3 - Il Colosseo

L'impiego del calcestruzzo si trova documentato a Roma già intorno al III secolo a.C., come ad esempio nell'acquedotto Appio, ed allora i costruttori romani hanno fatto un largo uso del calcestruzzo, ossia della miscela di pozzolana, ghiaia, calce e acqua, con capacità di sviluppare resistenze meccaniche anche in ambiente umido.

Vitruvio, per primo, utilizza il termine *calcestruzzo* per definire un composto, molto simile al conglomerato cementizio che impieghiamo oggi, che chiama *opus caementicium*, formato da pietre, o rottami di mattone, mescolati con calce, sabbia e acqua.

In merito alla qualità della calce, Vitruvio, nel Libro Settimo del *De Architectura* al capo II, scriveva:

*“A macerazione<sup>2</sup> ultimata e dopo aver tutto scrupolosamente predisposto per la messa in opera, si prenda una cazzuola e allo stesso modo con cui si taglia il legname con l’ascia, si tagli con quella la calce. Se si troveranno dei grumi vorrà dire che la calce non è pronta; se la cazzuola uscirà asciutta e pulita vorrà dire che la calce è fiacca e arida, mentre per essere grassa e ben macerata dovrà restare attaccata come colla al ferro della cazzuola.”<sup>3</sup>*

In merito alla qualità della sabbia, inoltre, Vitruvio nel Libro Secondo al capo IV del suo Trattato, scriveva:

*“Nelle costruzioni in calcestruzzo bisogna in primo luogo trovare la sabbia adatta non mista a terra, per impastare la malta. Le varietà di sabbia da cava sono: nera, bianca, rossa e rossa scura. Ottima è quella che sfregata tra le dita produce un leggero crepitio. Quella mischiata a terra, invece, non presenta caratteristiche di ruvidezza. Altrettanto buona di qualità si rileva quella che gettata su lenzuolo bianco non lascerà tracce di terra né di sporco dopo essere stata scossa via.*

*In assenza di cave si potrà ricavare la sabbia dai fiumi, dalla ghiaia o anche dalla rena del mare. Questo tipo presenta però degli inconvenienti nelle costruzioni: fa fatica ad asciugarsi e di conseguenza per non appesantire la struttura muraria occorre ad intervalli farla riposare (...).”<sup>4</sup>*

Vitruvio insegnava che per le opere idrauliche, e per quelle esposte all’azione dell’acqua piovana, la sabbia doveva essere sostituita tutta o in parte, con la pozzolana, detta *pulvis puteolana*, oppure con il coccio pesto. Il rottame di pietra, da usare per confezionare il calcestruzzo, doveva essere *non più grosso di una mano* ed era chiamato *caementum*, dal latino *caedo* che significa *tagliare in pezzi*.

Dall’opera di Vitruvio è possibile anche desumere quali dovevano essere i rapporti delle sabbie con la calce suggeriti per formare le malte da utilizzare per unire i mattoni nelle murature, per gli intonaci, per la formazione del calcestruzzo

---

<sup>2</sup> Per macerazione deve intendersi lo spegnimento della calce.

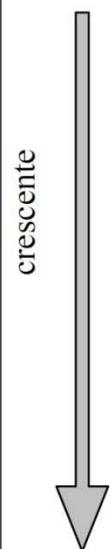
<sup>3</sup> Traduzione di Luciano Migotto.

<sup>4</sup> Traduzione di Luciano Migotto.

da aggiungere ai *caementi*, cioè ai frantumi di pietre, marmi, tufo e mattoni (Libro Secondo, capo V):

“La calce ... una volta raffreddata la si mescola con la sabbia nel rapporto di uno a tre se questa è di cava, uno a due se invece è di fiume; così si ottiene un dosaggio bene equilibrato. Ma il risultato sarà ancora migliore se alla sabbia di fiume o di mare si aggiungerà la terza parte di frammenti di coccio pestato e setacciato.”<sup>5</sup> (fig. 4).

Per il buon risultato dell’opera si faceva affidamento sulla battitura o costipamento, sia per le malte da intonaco che per i calcestruzzi (trattamenti che ancora oggi sono alla base della tecnica di confezione dei migliori calcestruzzi).

Resistenza	Legante	INERTE FINO	INERTE GROSSO
	1 parte di calce	3 parti di sabbia di cava	
	1 parte di calce	1 parti di sabbia di cava + 2 parti di sabbia di fiume	
	1 parte di calce	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)
	1 parte di calce + 2 parti di pozzolana	2 parti di sabbia di fiume	1 parte di mattone frantumato e vagliato (dimensione massima contenibile in una mano)

**Fig. 4** - Composizione delle malte secondo Vitruvio

Prima dell’affermazione del calcestruzzo tutte le grandi costruzioni richiedevano molti anni per la loro realizzazione, a causa delle difficoltà che i costruttori incontravano per movimentare le enormi pietre utilizzate. Ad esempio, per realizzare il Tempio di Apollo a Didima<sup>6</sup>, tra l’altro incompiuto, con la tecnica della costruzione in *saxum quadratum* occorsero 462 anni (dal 332 a.C. al 130 d.C.

<sup>5</sup> Traduzione di Luciano Migotto.

<sup>6</sup> Didima era una delle più importanti città della Ionia Antica.

circa); di contro per costruire il Pantheon, con la tecnica dell'*opus caementicium*, si impiegarono solo sette anni (dal 118 d.C. al 125 d.C.).

Tuttavia la rapidità di esecuzione delle murature fu soprattutto dovuta all'uso della pozzolana nell'*opus caementicium*; infatti la calce, non avendo proprietà idrauliche, avrebbe impiegato molto tempo a fare presa in quanto, come è noto, si idrata solo a contatto con l'anidrite carbonica contenuta nell'aria, che avrebbe avuto difficoltà a permeare attraverso i giunti delle fodere in mattoni pieni che svolgevano il ruolo di casseforme.

I costruttori romani usavano la malta di pozzolana anche per impedire le infiltrazioni di umidità. Con la malta di pozzolana, infatti, rivestivano le superfici interne dei canali, delle fogne, delle cisterne e degli acquedotti; intonacavano i muri esposti alle intemperie e quindi all'umidità.

Le tecniche costruttive romane anticipano, inoltre, l'idea del materiale cemento armato dei nostri giorni, allorché introducono rinforzi di legno o di metallo, all'interno dei possenti getti del loro calcestruzzo.

Con la caduta dell'Impero Romano si riscontra un declino della qualità delle costruzioni in calcestruzzo, causato principalmente dal mancato rispetto delle regole vitruviane: le fornaci per la produzione della calce, in età romane molto curate nei particolari costruttivi, furono sostituite da forni di campagna; le materie di base furono scelte con sempre più scarsa attenzione; la sabbia sporca ed argillosa venne usata sempre più frequentemente; l'uso della pozzolana e del coccio pesto fu abbandonato; gli impasti furono confezionati sempre più spesso con elevato contenuto d'acqua e messi in opera senza alcuna pistonatura.

Nel tardo Medioevo la parola *cemento* venne usata, in principio, per indicare il rottame di pietra, poi per indicare il calcestruzzo, sinonimo di conglomerato, e soltanto nel diciottesimo secolo indicò il legante idraulico per eccellenza.

Pur tuttavia, a partire dal Medioevo e fino all'Ottocento, il calcestruzzo non scomparve del tutto dall'arte del costruire. Esso, infatti, anche se di modesta qualità in quanto composto da calce, sabbia, ghiaio e frammenti di materiale lapidei, fu regolarmente utilizzato per il riempimento dei muri a sacco, per il livellamento del terreno di fondazione, per la realizzazione dei basamenti di piani terreni.

In età Umanistica si ha la riscoperta dei trattati di Vitruvio che, nel 1511, furono tradotti in italiano; in Francia, furono addirittura condotti studi sperimentali sui leganti utilizzati per confezionare i calcestruzzi *romani*.

Nel Cinquecento Philibert Delorme, anche noto come Philibert De L'Orme<sup>7</sup>, fu uno dei principali sostenitori dell'impiego del calcestruzzo di calce per la costruzione delle fondazioni.

Bisogna aspettare però il 1750 circa, quando, ad opera dell'inglese John Smeaton, si ebbe la rivoluzionaria scoperta della calce idraulica che permise di abbandonare le miscele a base di calce e pozzolana.

## 1.2 Il calcestruzzo nell'era moderna [1]

Il notevole sviluppo tecnologico che ha caratterizzato l'Ottocento ha portato all'affermazione dell'uso del cemento armato nelle costruzioni. Le tappe più significative per l'affermazione del nuovo materiale da costruzione possono essere considerate le seguenti:

- il 1824, quando Aspidin brevetta il sistema di produzione del cemento portland;
- il 1845, quando inizia la produzione industriale del cemento;
- il 1847, quando Coignet progetta la prima copertura a terrazza in cemento armato a Saint Denis;
- il 1848, quando Lambot progetta un'imbarcazione in ferro e cemento;
- il 1861, quando Coignet progetta i primi elementi costruttivi in cemento armato;
- il 1867, quando Monier costruisce le prime cassette da fiori in conglomerato armato con rete metallica;
- il 1868, quando viene realizzato un serbatoio in cemento armato a Fontainebleau;
- il 1880, quando Hennbique studia i primi solai in conglomerato cementizio armato con tondini metallici;

---

<sup>7</sup> Philibert Delorme, architetto e trattatista francese del XVI secolo.

- il 1887, quando Wayss perfeziona i brevetti di Monier.

Ma prima, nel 1818, Luigi Giuseppe Vicat formulò una teoria per spiegare il fenomeno della idraulicità, cioè della capacità del legante di far presa anche in assenza di aria, grazie all'argilla aggiunta al calcare. A lui si deve l'invenzione del noto 'Ago del Vicat', ancora oggi utilizzato per la misura del tempo di presa della pasta cementizia.

Le sperimentazioni sulla cottura di calcari ed impasti a base di calce idraulica portarono, in pochi anni, all'invenzione del cemento portland, segnando definitivamente la fine del calcestruzzo antico e la nascita di quello moderno.

L'era moderna del cemento ha iniziato ufficialmente il 21 ottobre 1824 quando in Inghilterra il muratore Joseph Aspdin, con la cottura ad alta temperatura della pietra calcarea miscelata con argilla, inventa il primo legante idraulico artificiale, il cemento portland, che per la somiglianza ai colori delle rocce di Portland, isola della contea di Dorsent, ne prese il nome.

Il primo uso documentato del cemento portland si ha nel 1850, quando fu impiegato per la riparazione dei nuovi Docks portuali di Londra.

Il nuovo materiale anche se presentava una serie di ottime qualità, quali la facilità di confezionamento, la capacità di assumere qualsiasi forma, la buona resistenza a compressione e i ridotti tempi di posa in opera, raggiunse il vero successo nel campo delle costruzioni solo quando l'inserimento di barre d'acciaio nelle zone tese della struttura consentì di compensare la bassa resistenza a trazione del cemento.

Il connubio tra i due materiali diede origine ad un materiale da costruzione, il cemento armato, che, nel bene o nel male, ha caratterizzato la nostra epoca tecnologica.

La prima opera in cemento armato viene considerata la piccola imbarcazione realizzata da Lambot nel 1850 (fig. 5).

La nuova tecnologia si diffuse in tutta l'Europa centrale e fu oggetto di molti studi:

- in Austria lavorarono sul cemento armato Empergher, Neumann e Melan, al quale si devono le 'CentineMelan' per la costruzione dei ponti;

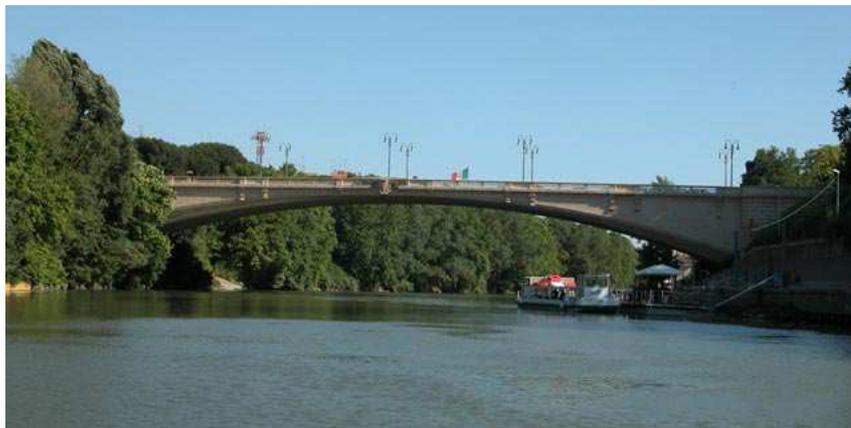


**Fig. 5** - La barca in ferro-cemento di Lambot

- in Svizzera si occuparono di cemento armato Schüle e Rchter, al quale si deve il ‘Metodo di Rchter’ per la soluzione delle strutture reticolari isostatiche;
- negli Stati Uniti si affermarono i nuovi sistemi costruttivi Ransome e Wilson.

Ma è l’ingegnere belga Francesco Hennebique che merita una maggiore attenzione fra i pionieri del cemento armato. Hennebique, dotato di grande intuito statico e supportato da un’ampia conoscenza della tecnica delle costruzioni, dopo aver brevettato i primi solai in cemento armato, progettò e realizzò grandi archi che, ancora oggi, stupiscono per arditezza e durabilità.

Una significativa testimonianza della genialità di Hennebique è certamente il Ponte del Risorgimento a Roma realizzato nel 1910 (fig. 6).



**Fig. 6** - Ponte del Risorgimento sul fiume Tevere a Roma

Il ponte, di oltre 100 m di luce, ebbe una risonanza mondiale per la sua audace composizione ma fu anche oggetto di molte polemiche per il diffuso e consistente quadro fessurativo che si manifestò poco tempo dopo la sua inaugurazione.

Ancora oggi, dopo circa un secolo, il ponte è in buone condizioni di conservazione.

Probabilmente la disposizione, data forse dallo stesso Hennebique, di disarmare l'opera dopo solo due giorni dal completamento dei getti, da un lato, determinò l'insorgere del quadro fessurativo, dall'altro, favorì una nuova configurazione statica del sistema con una più favorevole redistribuzione degli effetti indotti dalle azioni che agiscono sulla struttura, che ha permesso al ponte di giungere fino a noi pressoché intatto.

La struttura di calcestruzzo, però, anche se moderna ed elegante nelle sue linee, fu rivestita con intonaco riprodotto lastre di pietra, lesene e fregi. Il rivestimento con intonaco, in effetti, conferma due posizioni contrastanti tra loro: la prima posizione, di rifiuto, è che il nuovo materiale cemento armato, così diverso dal colore e dal calore della pietra, e quindi accettato con diffidenza dal gusto corrente, viene mascherato con l'intonaco; la seconda posizione, favorevole, è che il rivestimento di intonaco ha protetto la struttura dalla carbonatazione del calcestruzzo e dalla ossidazione delle armature metalliche migliorando la durabilità della struttura.

I primi esempi di struttura portante interamente in cemento armato compaiono nel primo decennio del Novecento, nonostante la diffusa avversione dell'accademia ufficiale. In Francia August Perret realizza nel 1903 il primo edificio per abitazioni con struttura realizzata in cemento armato e nel 1923 la chiesa Notre Dame a La Raincy.

In ambito italiano l'impiego di strutture portanti intelaiate in cemento armato si diffonde durante il ventennio fascista. In molti casi, però, l'edificio conserva l'organizzazione formale dell'edilizia tradizionale in muratura anche se impiega tutti i nuovi contenuti tecnologici del cemento armato.

A Napoli, così come a Salerno, sarà Camillo Guerra a sperimentare in modo continuo l'impiego del cemento armato in architettura. Nel 1923 progetta il Palazzo

dei Telefoni di via Depretis ed adotta una soluzione costruttiva particolare: la muratura di tufo dell'involucro esterno svolge la duplice funzione di elemento di separazione dello spazio architettonico dall'ambiente esterno e cassaforma per il getto dei pilastri in cemento armato. Ancora negli anni venti progetta un altro Palazzo dei Telefoni, quello di Porta Nolana, dove la struttura è costituita da una intelaiatura completamente in cemento armato, anche se le facciate sono rifinite con classiche cornici e stucchi (fig. 7).

Nel 1937 progetta a Salerno la Casa del Mutilato, dove la struttura in cemento armato è in vista e qualifica l'architettura.

Nel 1957, sempre a Napoli, progetta la Casa dell'Ordine dei Medici che presenta una caratteristica organizzazione strutturale: muratura portante lungo il perimetro dell'edificio e struttura in cemento armato all'interno dello spazio architettonico. Questa soluzione tecnica è stata impiegata nel napoletano per lungo tempo per edifici a uno o due piani, fino a quando (negli anni ottanta) anche la provincia di Napoli è stata dichiarata zona sismica.



**Fig. 7** - Camillo Guerra, Palazzo dei Telefoni di Porta Nolana, Napoli  
cartoncino, china e matita colorata

Nel frattempo, sotto la spinta dei progressi scientifici in altre discipline quale l'analisi matematica, la tecnica costruttiva è interessata da ulteriori evoluzioni che hanno portato prima alla prefabbricazione di elementi in cemento armato e dopo alla tecnica del precompresso.

### **1.3 Il calcestruzzo armato e la sua evoluzione nella prima parte del ‘900: principali prescrizioni normative per il confezionamento di un impasto tipo**

#### **1.3.1 Premessa**

Agli inizi del ‘900 il calcestruzzo era confezionato secondo regole dettate dall’esperienza. Non era stato sviluppato ancora un modello previsionale basato su risultati sperimentali (mix-design).

Gli unici strumenti a disposizione dei progettisti che fornivano indicazioni per il confezionamento e la corretta esecuzione di un calcestruzzo di buona qualità sono stati i primi regolamenti italiani tra cui:

- Decreto legge del 10 gennaio 1907;
- R. Decreto legge del 29 luglio 1933;
- Decreto legge del 16 novembre 1939

Insieme, questi tre regolamenti forniscono la ricetta di una dosatura classica, basata sull’esperienza, dei vari componenti che entrano nella miscela di un metro cubo di calcestruzzo destinato alla realizzazione di strutture ordinarie:

- **Ghiaia**        **0,8 mc/mc;**
- **Sabbia**        **0,4 mc/mc;**
- **Acqua**         **120 – 180 l/mc;**
- **Cemento**      **300 kg/mc**

Non deve stupire il fatto che la somma dei volumi “sciolti” dei vari componenti superi il valore di 1 mc.: la diversa granulometria degli aggregati e la presenza di acqua fanno sì che gli elementi di diametro più piccolo vadano ad occupare i vuoti lasciati dagli altri elementi di pezzatura più grossa, definendo alla fine un volume minore di quello iniziale.

Tale miscela tipo, nata inizialmente come una “guida” da fornire ai progettisti per sopperire alla bassa conoscenza di un materiale praticamente nuovo e dalle caratteristiche meccaniche all’epoca sorprendenti, è diventata, nel corso degli anni, la *dosatura standard* ancora oggi utilizzata per confezionare un calcestruzzo di media resistenza e di buona qualità. Si riportano nei paragrafi successivi alcuni passi originali delle normative sopra elencate.

### 1.3.2 Il Decreto legge del 10 gennaio 1907 [2]

In Italia il cemento armato ebbe uno sviluppo agli inizi molto lento. Secondo i libri tecnici dell'epoca, nel 1877 era ancora poco conosciuto: il calcestruzzo era consigliato solo per la costruzione di fondazioni, opere idrauliche o massi artificiali. Il primo regolamento italiano arriva agli inizi del 1907.

Di seguito si riportano in estratto alcuni passi originali della prima normativa italiana per le costruzioni in cemento armato.

#### Art. 3 - Obbligo di specifica dei materiali

*Nel progetto saranno indicate con precisione le qualità e proprietà dei materiali da impiegarsi, le dosature del conglomerato, le modalità di costruzione, del disarmo e del collaudo.*

#### Art. 7 - Dosaggio e resistenza del conglomerato

*La dosatura normale del conglomerato sarà di kg 300 di cemento, mc 0,400 di sabbia asciutta e non compressa e mc 0,800 di ghiaietta ... omissis ... La resistenza allo schiacciamento del conglomerato di dosatura normale, a 28 giorni di maturazione avvenuta in ambiente umido, sperimentata su cubi di 10 – 15 cm di lato secondo la grandezza degli elementi, non dovrà risultare inferiore a 150 kg/cmq. Per impasti d'altra dosatura la resistenza allo schiacciamento, sperimentata come si è detto, non dovrà essere inferiore a cinque volte il carico di sicurezza adottato nei calcoli*

*... omissis ...*

#### Art. 8 - Caratteristiche del ferro

*Per le armature del conglomerato sarà preferibilmente da impiegarsi il ferro colato o ferro omogeneo ottenuto col procedimento basico Siemens-Martin. La resistenza alla rottura ... omissis ... sarà compresa fra 26 e 46 kg/mm<sup>2</sup>.*

#### Art. 12 - Regole di posa in opera

*Il conglomerato verrà messo in opera, subito dopo eseguito l'impasto, a strati di piccola altezza, ben battuti con pestelli di appropriata forma e peso fino a che l'acqua affiori dalla superficie. Il conglomerato dovrà avvolgere completamente i*

*ferri, ed a tale scopo si farà attorno ad essi una scialbatura di cemento immediatamente prima del getto. Nelle riprese di conglomerato ancora fresco si bagnerà la superficie con acqua, in quelle di conglomerato che già ha fatto la presa, si raschierà la superficie e si umetterà con scialbo di cemento in modo da assicurare la continuità della struttura. Si farà anche la lavatura se la ripresa è di vecchia data.*

#### Art. 14 - Prescrizioni in caso di gelo

*È assolutamente vietato di mettere in opera il conglomerato a temperatura inferiore a zero gradi: salvo che, in casi eccezionali, si adottino provvedimenti speciali da approvarsi dalla Direzione dei Lavori.*

#### Art. 23 - Resistenza del ferro

*Non si farà assegnamento alla resistenza del conglomerato alla tensione ed al taglio, ritenendo che tali sollecitazioni vengono sopportate esclusivamente dall'armatura metallica. Il ferro omogeneo non sarà assoggettato a sforzo di tensione o di compressione semplice superiore a 1000 kg/cmq e ad 800 kg/cmq per la sollecitazione a taglio.*

In sintesi, la norma, contiene l'indicazione di un impasto standard denominato *dosatura normale* (cfr. Regolamento del 1907 art. 7) e propone delle tabelle con schemi risolti di travi continue a due, a tre ed a quattro campate. Queste indicazioni devono però essere percepite come delle carenze formative dei progettisti. Infatti, la cultura del cemento armato era ancora poco diffusa e questo spinse il legislatore ad indicare sia un impasto tipo, la cui resistenza a compressione era mediamente superiore ai 15 Mpa, sia tabellare le sollecitazioni per semplificare il compito dei tecnici.

### **1.3.3 Il R. Decreto legge del 29 luglio 1933 [3]**

A seguito del primo regolamento italiano sul calcestruzzo del 1907 ne viene emanato un secondo nel 1933 che pone una maggiore attenzione sui metodi di prova dei leganti idraulici, sulle modalità di fornitura e condizioni di accettazione ma soprattutto sulle norme di costruzione. Riguardo il dosaggio normale del calcestruzzo (impasto standard), già introdotto dal precedente regolamento (cfr.

Regolamento del 1907 art. 7), si conferma la dosatura del cemento e degli inerti, mentre, maggiori indicazioni vengono fornite per quanto riguarda la quantità di acqua da impiegare negli impasti al variare della consistenza richiesta.

Di seguito si riportano in estratto alcuni passi originali delle principali innovazioni introdotte dal R. Decreto legge del 29 luglio 1933, rispetto al precedente decreto, in merito alla qualità del calcestruzzo armato e delle opere in c.a.:

Parte II – Capitolo I: Prescrizioni generali

– art.2

*Le qualità e le proprietà dei materiali impiegati nella costruzione di ogni opera sono comprovate durante il corso dei lavori da certificati rilasciati da laboratori ufficiali.*

Parte II – Capitolo II: Qualità dei materiali

– art.5

*Il cemento da impiegarsi deve essere esclusivamente a lenta presa ... omissis ...*

– art.6

*La sabbia naturale od artificiale deve risultare bene assortita in grossezza e costituita di grani resistenti non provenienti da rocce decomposte o gessose ... omissis ...*

– art.7

*La ghiaietta deve essere ben assortita, formata da elementi resistenti e non gelivi ... omissis ... Le dimensioni dei grani della ghiaietta sono stabilite dai capitoli speciali in relazione alla natura di ciascuna opera. Trattandosi di strutture in cemento armato, le dette dimensioni non debbono di norma superare 3 cm, salvo il caso di strutture a grande sezione con ferri assai distanziati, per le quali può essere tollerata al massimo la dimensione di 5 cm ... omissis ...*

– art.9

**La dosatura normale del conglomerato deve essere di kg. 300 di cemento, m<sup>3</sup>. 0,400 di sabbia e m<sup>3</sup>. 0,800 di ghiaietta o di pietrisco ... omissis ...**

– art.10

*L'acqua per gli impasti deve essere limpida e dolce, non contenere cloruri e solfati in percentuale che possa riuscire dannosa.*

– art.11

**Il conglomerato a seconda della sua consistenza dipendente dalla percentuale di acqua impiegata nella sua confezione, si distingue in:**

**a) Conglomerato a consistenza di terra appena umida (acqua d'impasto circa il 12%<sup>8</sup> del volume del conglomerato in opera).**

*... omissis ...*

**b) Conglomerato plastico (acqua d'impasto circa il 15% del volume come sopra).**

*... omissis ...*

**c) Conglomerato fluido o colato (acqua d'impasto circa il 18% del volume come sopra).**

*... omissis ...*

– art.12

*Aumentando la quantità di acqua rispetto a quella occorrente per il conglomerato del tipo a), si deve aumentare la dosatura del cemento almeno del 10% per conglomerato b) e almeno del 20% per conglomerato c).*

– art.13

*Il conglomerato prelevato in cantiere dagli impasti impiegati nell'esecuzione dell'opera, deve presentare, a 28 giorni di stagionatura, una resistenza a pressione almeno quadrupla del carico di sicurezza adottato nei calcoli per le membrature sollecitate a semplice pressione, o quella maggiore richiesta dalle prescrizioni dei capitoli speciali.*

---

<sup>8</sup> La percentuale si riferisce ad ingredienti perfettamente asciutti.

... omissis ...

– art.15

*L'armatura del conglomerato è normalmente costituita con ferro colato od omogeneo (acciaio extradolce) in barre prive di difetti, di screpolature, bruciature e di altre soluzioni di continuità.*

– art.16

*La resistenza alla rottura per trazione del ferro suddetto viene determinata, quando sia possibile, sui tondini stessi destinati all'armatura, ... omissis ...*

*Debbono ottenersi i seguenti risultati:*

*Resistenza a tensione compresa fra 38 e 50 Kg per mmq.;*

*Allungamento di rottura non inferiore rispettivamente a 27 e 21 %.*

... omissis ...

#### Parte II – Capitolo VI : Norme di esecuzione

– art.34

*Nella formazione degli impasti i vari ingredienti debbono riuscire intimamente mescolati ed uniformemente distribuiti nella massa; gli impasti debbono essere preparati nella sola quantità necessaria per l'impiego immediato, cioè prima dell'inizio della presa. ... omissis ...*

– art.35

*Qualunque sia il mezzo d'impasto, si mescolano a secco ripetutamente, prima il cemento con la sabbia finché la miscela assuma colore uniforme, poi questa mescolanza con la ghiaietta o con il pietrisco, ed in seguito si aggiunge l'acqua con ripetute aspersioni continuando a rimescolare l'impasto fino ad ottenere la consistenza voluta ed indicata all'art. 11.*

– art.36

*Costruiti i casseri per il getto del conglomerato, si dispongono, con la massima cura, le armature metalliche nella posizione progettata, legandole agli incroci con il filo di ferro e tenendole in posto mediante puntelli e sostegni provvisori.*

... omissis ...

– art.37

*In presenza di salsedine marina e di emanazioni gassose nocive alla costruzione, è opportuno che la distanza minima delle superfici metalliche dalle facce esterne del conglomerato sia almeno di cm 3,5 e che lo strato esterno del conglomerato rivestente i ferri sia impermeabile.*

... omissis ...

– art.40

*Il conglomerato del tipo a) e b) viene messo in opera subito dopo eseguito l'impasto, a strati di spessore non maggiore di cm 15; deve essere ben battuto con pestelli di appropriata forma e peso, fino a che l'acqua trasudi od affiori alla superficie del getto.*

... omissis ...

– art.41

*È vietato mettere in opera il conglomerato a temperature inferiori a 0 gradi centigradi.*

... omissis ...

– art.47

*Non si procede ad alcun disarmo prima di aver accertato che il conglomerato abbia raggiunto un grado sufficiente di maturazione.*

... omissis ...

### **1.3.4 Il Decreto legge del 16 novembre 1939 [4]**

Tale decreto emanato solo dopo 6 anni da quello del 29 luglio del 1933, non introduce nessuna innovazione riguardo le modalità di esecuzione ribadendo quanto già detto dal precedente decreto. Le principali innovazioni introdotte riguardano sostanzialmente la riduzione del coefficiente di sicurezza adottato nei calcoli e una maggiore attenzione per la qualità dei materiali e in particolare per l'assortimento degli inerti nel confezionamento del calcestruzzo.

Di seguito si riportano in estratto alcuni passi originali delle principali innovazioni introdotte dal Decreto legge del 16 novembre 1939, rispetto ai decreti precedenti, in merito alla qualità del calcestruzzo armato e delle opere in calcestruzzo armato:

Capo II: Qualità dei materiali

– art.5

*Il cemento deve essere esclusivamente a lenta presa e rispondere ai requisiti di accettazione prescritti nelle norme per i leganti idraulici in vigore all’inizio della costruzione.*

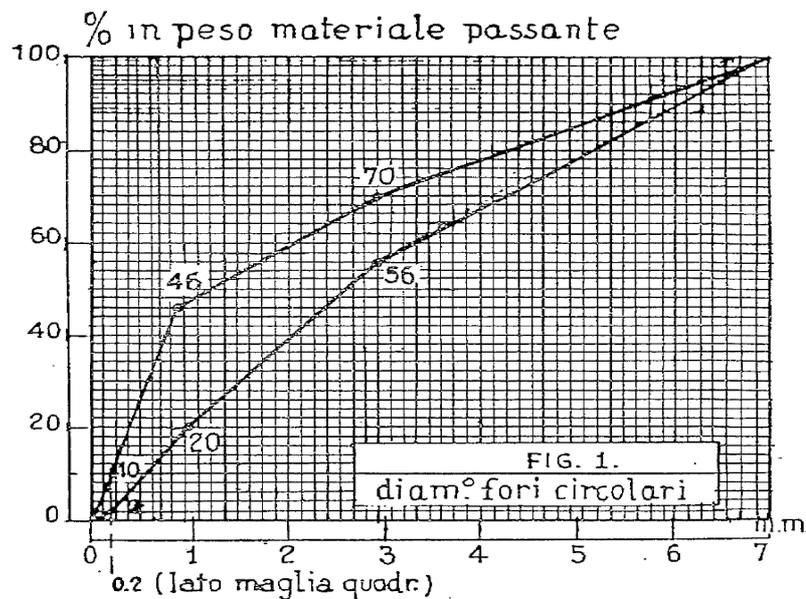
... omissis ...

– art.6

*La sabbia naturale o artificiale deve risultare bene assortita in grossezza e costituita di grani resistenti, non provenienti da roccia decomposta o gessosa.*

... omissis ...

*Di regola si deve adoperare sabbia, la cui composizione granulometrica corrisponda ad una curva compresa fra le curve limite della (fig. 8).*

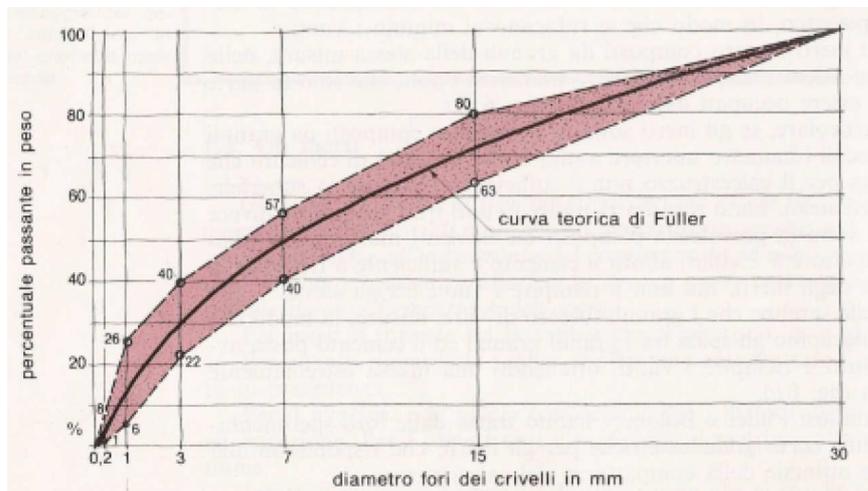


– art.7

*La ghiaietta deve essere ben assortita, formata da elementi resistenti e non gelivi ... omissis ...*

*Le dimensioni degli elementi della ghiaia per strutture di conglomerato armato non devono di regola superare cm. 3; per strutture a grande sezione, con ferri convenientemente distanziati, può essere tollerata la presenza di elementi di dimensioni maggiori, ma non superiori a cm. 7.*

***Di regola si deve adoperare ghiaia, che mescolata alla sabbia presenti composizione granulometrica corrispondente ad una curva compresa fra le curve limite della figura sottostante (fig. 9).***



**Fig. 9**

– art.8

*Qualora invece della ghiaia si adoperi pietrisco questo deve provenire dalla frantumazione di roccia compatta, non gessosa né geliva, non deve contenere impurità né materiali polverulenti, deve essere costituito da elementi, le cui dimensioni soddisfacciano alle condizioni sopra indicate per la ghiaia.*

*... omissis ...*

– art.9

*La dosatura di cemento per getti armati deve essere non inferiore a 300 kg. per m<sup>3</sup>. di miscuglio secco di materiale inerte (sabbia e ghiaia o pietrisco); ... omissis ...*

*In ogni caso occorre proporzionare il miscuglio di cemento e materie inerti in modo da ottenere la massima compattezza.*

*... omissis ...*

*– art.10*

*L'acqua per gli impasti deve essere limpida e dolce e non deve contenere cloruri e solfati in percentuale dannosa.*

*– art.11*

*La quantità d'acqua d'impasto è determinata in base alla plasticità occorrente per la buona lavorazione dei getti. È necessario che la dosatura di cemento venga aumentata col crescere della fluidità dell'impasto ... omissis ...*

## Capitolo 2

### IL CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE

#### 2.1 Generalità

I calcestruzzi autocompattanti (Self Compacting Concrete, SCC) sono conglomerati caratterizzati da un'elevata lavorabilità, superiore a quella caratteristica della classe di consistenza S5 dei calcestruzzi ordinari e da una buona coesione che previene la segregazione dell'impasto. Il calcestruzzo è in grado di fluire durante il getto nelle casseforme per effetto del solo peso proprio e di mantenere una composizione omogenea. È inoltre in grado di riempire completamente gli spazi tra le armature e nelle casseforme e di espellere l'aria intrappolata, senza la necessità di vibrazione.



**Fig. 10** - Calcestruzzo autocompattante

Un calcestruzzo autocompattante, allo stato fresco, è quindi caratterizzato da:

- elevata *deformabilità*, intesa come la capacità di modificare la sua forma sotto la sola azione del peso proprio, per adattarsi a quella del cassero in cui la miscela viene introdotta;
- elevata *mobilità in spazi ristretti*, che permetta al conglomerato di scorrere in presenza di restringimenti di sezione, dove normalmente è probabile l'arresto del flusso di calcestruzzo a causa dell'aumento delle collisioni tra le particelle di aggregato grosso;

- elevata *resistenza alla segregazione*, che permette di conservare una distribuzione uniforme dei costituenti durante la lavorazione del calcestruzzo fresco.

Il comportamento autocompattante può essere raggiunto attraverso un opportuno proporzionamento dei costituenti della miscela, che si basa essenzialmente sull'utilizzo di:

- elevati dosaggi di *additivi superfluidificanti*, in grado di aumentare la fluidità della miscela diminuendo il limite di scorrimento; d'altra parte tali additivi riducono anche la viscosità plastica e quindi favoriscono la segregabilità dell'impasto;
- un elevato volume di *materiali fini* (polveri), con particelle di dimensione inferiore a 100  $\mu\text{m}$  (ovvero cemento, filler, aggiunte minerali ed eventuali frazioni finissime dell'aggregato), che aumenta la coesione dell'impasto e ne contrasta la segregazione; le quantità richieste di polveri raggiungono valori di 500-600  $\text{kg/m}^3$  che non possono essere garantiti dal solo cemento; per questo motivo si impiegano altri tipi di aggiunte che possono essere dei filler inerti (come il calcare macinato finemente) oppure materiali con caratteristiche pozzolaniche o idrauliche (cenere volante, loppa d'altoforno, etc.); queste ultime, grazie alla reazione pozzolanica, migliorano anche la resistenza meccanica e la durabilità del calcestruzzo indurito;



**Fig. 11** - Fase di getto di un calcestruzzo autocompattante

- *additivi modificatori di viscosità (VMA)*, appositamente sviluppati per i calcestruzzi autocompattanti che, analogamente alle polveri, aumentano la coesione dell'impasto, rendendolo più stabile e più resistente alla segregazione;
- una ridotta *dimensione dell'aggregato* (16-20 mm) e un modesto contenuto di aggregati grossi che possono bloccare il flusso di calcestruzzo in prossimità di restringimenti di sezione o di zone con armature fitte.

## 2.2 Dagli anni '80 ad oggi

Alcuni tipi di miscele che possono essere considerati i precursori del calcestruzzo autocompattante (SCC) sono conosciute da tempo. Oltre 70 anni fa, infatti, negli USA, si mettevano in opera calcestruzzi molto fluidi denominati: “calcestruzzi colati”. Essi avevano delle buone caratteristiche auto compattanti e autolivellanti. La loro buona fluidità, tuttavia, andava a scapito della durezza, in quanto questi calcestruzzi potevano essere confezionati solo con rapporti A/C molto elevati. I calcestruzzi che oggi sono classificati come SCC, comunemente attribuiti all'invenzione del Prof. Okamura, sono stati impiegati, con la denominazione “Self Compacting” a partire dal 1988 in Giappone e Canada. Solo nel 1990 sono stati però eseguiti i primi grandi progetti in Giappone. L'introduzione in Europa (Francia, Svezia) è ancora più recente e risale al 1996.

Un prototipo di SCC fu sperimentato per la prima volta nel 1988 e realizzato utilizzando materiali facilmente reperibili sul mercato. Ebbe la denominazione di “High Performance Concrete”, quasi nello stesso periodo però questo nome fu dato, da Altcin e altri, ad un tipo di calcestruzzo a basso rapporto A/C ed elevata durabilità. Il nome del calcestruzzo di cui trattiamo fu allora cambiato in quello odierno di “Self Compacting Concrete”.

Un primo documento sul calcestruzzo autocompattante fu presentato da Ozawa all'EASEC-2, la seconda East-Asia and Pacific Conference in Structural Engineering and Construction, nel Gennaio 1989. Successivamente, sempre per merito del Prof. Ozawa, ci fu la presentazione dell'SCC al CAMMET & ACI

International Conference di Istanbul nel maggio del 1992; seguì l'ACI workshop nel novembre del 1994 a Bangkok, sponsorizzato dal Prof. Zia, attraverso il quale l'SCC diventò conosciuto fra i ricercatori e gli ingegneri di tutto il mondo interessati alla durabilità del calcestruzzo ed alla razionalizzazione delle metodologie di costruzione.

Nel novembre del 1996 il Prof. Okamura realizza il Ferguson Lecture at ACI Fall Convention a New Orleans, che diffonde la conoscenza dell'SCC fra i ricercatori in America; nel gennaio del 1997 venne fondato il comitato del Rilem che tratta di calcestruzzo autocompattante; nell'agosto del 1998, a Kochi, in Giappone, si realizza il primo workshop dedicato al Self Compacting Concrete e per finire, nel settembre del 1999, il First International Rilem Symposium di Stoccolma, getta le basi per una collaborazione ed un confronto a livello mondiale su questo tema così importante.

Attualmente è attivo un gruppo di studio su scala internazionale nella ricerca e nella standardizzazione di test legati all'SCC atti a stabilire e misurare, nella fase di miscelazione e di getto, le caratteristiche di auto compattazione.

### **2.3 Le ragioni dello sviluppo**

Il calcestruzzo autocompattante è ormai considerato da tutti gli esperti mondiali il calcestruzzo del futuro. Committenti, progettisti ed imprese, possono guardare avanti con rinnovata fiducia alle loro opere nel rispetto delle esigenze di qualità, design architettonico e costi di costruzione.

Le nuove tecniche costruttive e l'attenzione dei committenti al "costo globale" delle opere, che include anche i costi di manutenzione del periodo di vita in servizio, richiedono una sempre maggiore attenzione alla durabilità delle strutture.

La mancanza sempre più sentita di personale qualificato e ben preparato al getto ed alla costipazione del calcestruzzo porta le imprese ad affrontare una serie di problematiche che incidono sia sui costi di esecuzione dei lavori che nella qualità dell'opera.

L'obiettivo primario per il futuro delle costruzioni, rimane, pertanto, il miglioramento della produttività: il calcestruzzo autocompattante in questa ottica contribuisce in modo sostanziale al raggiungimento di questo risultato riducendo drasticamente i costi di produzione.

## Capitolo 3

### L'INTONACO

#### 3.1 Introduzione [5]

Gli organismi architettonici in ogni tempo e nelle diverse aree geografiche sono di norma costituiti da un nucleo strutturale con funzione statica e da un rivestimento destinato a proteggere e a decorare la struttura portante dell'edificio.

Il rivestimento architettonico costituisce, quindi, l'interfaccia tra l'organismo architettonico (avente funzioni strutturali) e l'ambiente esterno, nei cui confronti assume una funzione passiva di protezione dagli agenti di degrado e al tempo stesso attiva di completamento cromatico e decorativo. Esso è realizzato con materiali naturali, quali i marmi e le pietre, o artificiali, come i laterizi, le maioliche, il mosaico.

Per quanto riguarda il colore delle superfici intonacate, esso è scelto mediante criteri funzionali e/o decorativi: dall'imitazione di un materiale pregiato alla finalità igienico - funzionale, fino ai criteri più propriamente decorativi della rappresentazione puramente pittorica, illusionistica e simbolica.

Dovunque e in tutti i tempi, gli intonaci sono costituiti da un materiale legante, usato da solo o mescolato a delle cariche. Si realizza così una malta, cioè un impasto a consistenza plastica che ha la capacità di far presa, solidificarsi e indurire. I materiali leganti sono principalmente tre: le terre argillose, il gesso e la calce. Le cariche hanno la funzione di fornire all'impasto un'armatura di sostegno e uno scheletro rigido che, riducendo la quantità di legante, ne diminuisce il ritiro. Esse possono essere di natura inorganica oppure organica. Alcune cariche hanno una funzione solo meccanica e si dicono perciò "inerti"; altre invece possono reagire con il materiale legante modificandone le caratteristiche.

I meccanismi di indurimento delle malte variano in funzione del legante usato; esso può avvenire per perdita d'acqua (terre argillose), per presa d'acqua che cristallizza insieme al materiale (gesso), per reazione chimica (calce).

### 3.2 Le origini [6]

Fin dall'antichità gli intonaci hanno rappresentato il rivestimento di superficie più diffuso. Le ragioni della notevole diffusione possono ricercarsi nella loro leggerezza, facilità di applicazione ed economicità che ne permettono un rinnovo frequente a compenso di una durabilità limitata.

Le origini dell'intonaco si perdono nella notte dei tempi. Alcune testimonianze del V secolo *a.c.* ci provengono dalla Mesopotamia dove tra le rovine di Hassuna è stata ritrovata una tettoia "intonacata" a gesso. Nella stessa Mesopotamia, inoltre, dall'analisi di alcuni siti è stato rilevato come con lo stesso impasto usato per la produzione dei mattoni, reso più fluido con l'aggiunta di acqua, si otteneva la malta utilizzata per intonacare le pareti sia interne che esterne dei muri.

L'usanza di stendere l'intonaco sulla superficie delle pareti realizzate in mattoni crudi era diffusa anche in Egitto. L'impasto era generalmente costituito da limo misto a paglia sminuzzata con cui veniva realizzato lo strato grezzo sul quale si procedeva a stendere successivamente uno strato di finitura costituito da gesso e calcare macinato.

Anche l'architettura greca ha utilizzato estesamente - al contrario di quanto si possa pensare - gli intonaci. Quando ci riferiamo all'architettura greca, infatti, siamo abituati a pensare alle strutture a grandi blocchi di pietra generalmente accostati e privi di collegamenti con malte. Ma la verità è ben diversa: qualsiasi struttura dell'architettura greca era sempre rivestita da un sottilissimo strato di intonaco se non addirittura ricoperta da uno spesso strato di stucco.

### 3.3 Il periodo Romano [6]

Durante il periodo romano l'intonaco raggiunge il suo massimo splendore. È Vitruvio a definire le modalità di realizzazione dell'intonaco, concepito a più strati. L'intonaco secondo Vitruvio doveva essere costituito da un rinzaffo, con funzione di aderenza al supporto, realizzato con calce (1 parte), sabbia grossa (2 parti) e pezzi di mattone misti a ritagli di marmo (1 parte). Dopo aver proceduto "*alla sgrossatura della pareti e mentre si asciuga vi si stenda al di sopra ...*", suggeriva Vitruvio,

"l'arenato". L'arenato era costituito da un pacchetto di tre strati di intonaco realizzati fresco su fresco con calce e sabbia (1:2) a cui era affidata una funzione strutturale e di durabilità dell'intonaco nel tempo. "*Quando siano stati applicati tre mani di arenato*", consigliava Vitruvio, "*si passa a stendere un'altra serie di strati*": il marmorato. Al marmorato veniva affidata una funzione estetica ed allo stesso tempo di protezione nei confronti degli agenti atmosferici. Al pari dell'arenato, anche il marmorato veniva realizzato in tre strati costituiti da calce e granuli di marmo (1:2) di dimensioni decrescenti verso l'esterno.

All'estrema cura nella definizione degli strati dell'intonaco, Vitruvio associava una grande attenzione nella selezione degli ingredienti per il confezionamento degli impasti. In sostanza, Vitruvio raccomandava di impiegare sabbie poco porose e soprattutto prive di frazioni limo-argillose che potessero compromettere la resistenza dell'intonaco.

Per la calce, il grande architetto suggeriva che quella per gli intonaci dovesse provenire dalla cottura di "*sasso poroso*".

Pur riconoscendo a Vitruvio il grande merito di aver definito e raccolto in maniera sistematica informazioni, prescrizioni e tecniche esecutive, occorre sottolineare come le indicazioni fornite dal grande architetto per realizzare i "*tectoria*" venivano spesso disattese.

L'analisi degli intonaci di Pompei, ad esempio, mostra che generalmente essi venivano realizzati in tre strati: il primo direttamente applicato alla struttura muraria, veniva di solito inciso con la cazzuola per consentire una migliore compenetrazione del secondo strato. Quest'ultimo, che costituiva l'intonaco vero e proprio, aveva uno spessore generalmente variabile tra 3 e 5 cm e poteva essere realizzato - oltre che con calce e sabbia - conficcando nello spesso strato dell'intonaco pezzi di marmo e frammenti ceramici. L'ultimo strato era generalmente realizzato con calce pura o mista a calcare o marmo in polvere. Esso presentava uno spessore di 1-2 mm e poteva essere destinato a ricevere i pigmenti colorati.

### 3.4 L'età Rinascimentale [6]

Gli autori rinascimentali - facendo proprie le indicazioni di Vitruvio - assegnano all'intonaco la funzione di protezione e finitura. Uno dei trattatisti dell'epoca L.B. Alberti suggerisce di realizzare l'intonaco almeno in tre strati. Al primo (rinzafo), confezionato con calce, sabbia e cocci di mattone (1:2:1), è affidato il compito di aderire al supporto e sostenere gli strati restanti. Al terzo, invece, viene affidata una funzione prevalentemente di tipo estetico. Faceva da ponte tra questi due strati l'arriccio; realizzato con calce e sabbia di fiume (1:2), l'arriccio svolgeva funzioni di livellamento oltre ad avere "l'incombenza di porre riparo ai difetti dell'uno e dell'altro".

Oltre a L.B. Alberti, si rifanno a Vitruvio architetti quali Palladio, Scamozzi e Zannini. L'appartenenza, però, di questi architetti ad un'area geografica (il Veneto) diversa da quella dell'Alberti determinerà scelte differenti sia nei materiali destinati alla realizzazione degli intonaci che nelle tecniche esecutive.

### 3.5 L'età Moderna e Contemporanea [6]

Nella seconda metà del 1700, l'intonaco inizia a perdere il valore estetico che aveva assunto sino a quel momento. A differenza di quanto raccomandato, l'intonaco non viene più battuto, né liscio, ma viene semplicemente rifinito con il fratazzo. Il risultato delle "pratiche sbrigative" che si vanno affermando è che gli intonaci del periodo settecentesco sono fragili e caratterizzati da una ridotta durabilità alle azioni aggressive ambientali. Anche il numero degli strati di intonaco viene notevolmente ridotto tanto che Francesco Milizia ricordando i numerosi strati dell'intonaco Vitruviano, lamentava "... ci contentiamo di un solo strato di arena su cui spianiamo subito un'incrostatura marmorea. Qual meraviglia se i nostri riescono informi e fragili". A questo declino contribuirà non poco l'avvento dei nuovi leganti che soppianderanno nella trattatistica italiana quelli utilizzati per gli intonaci antichi.

Il generale decadimento della qualità degli intonaci riguarderà non solo quelli realizzati con i nuovi cementi, ma anche quelli a calce, che risulteranno il più delle volte costituiti da un unico strato di modesto spessore (1 cm).

Agli inizi del secolo si affermerà definitivamente l'intonaco a cemento, cosiddetto "tradizionale", realizzato di solito in tre strati. Purtroppo, l'inosservanza di alcune regole fondamentali nella realizzazione delle stabiliture e soprattutto l'abuso di cemento nel confezionamento degli impasti determinerà una serie di insuccessi, fessurazioni e un generale scadimento delle proprietà estetiche dei rivestimenti superficiali. La scarsa attenzione nella realizzazione degli intonaci si perpetuerà anche nel secondo dopoguerra, quando, l'edilizia per sostenere il rapido processo di industrializzazione che coinvolge il Nord del Paese, adotterà materiali e tecniche costruttive basate più sulla necessità di una rapida esecuzione che sulla volontà di realizzare manufatti durevoli.

Negli ultimi anni, anche alla luce della crisi che ha coinvolto il settore, la durabilità delle opere ha acquistato sempre più un ruolo centrale del processo costruttivo. È in quest'ottica che si sta assistendo ad una rivalutazione dell'intonaco, non solo come elemento decorativo e di abbellimento delle facciate, ma anche quale presidio contro l'azione aggressiva degli agenti atmosferici. Questa rivalutazione sta avvenendo attraverso una riscoperta in chiave moderna degli intonaci del passato. Riscoperta che avviene nella consapevolezza che la maggior parte degli insuccessi e delle brutture dei moderni intonaci a cemento sono da ascrivere ad una eccessiva compattezza della matrice legante.

## Capitolo 4

### LA PITTURA MURALE

#### 4.1 Introduzione

Con il termine pittura si definisce una miscela di sostanze chimiche o naturali o l'insieme di entrambe, capace di formare una pellicola solida, continua e aderente, tale da proteggere il supporto dall'aggressione degli agenti fisici e chimici esterni presenti nell'ambiente e capace di mutare l'aspetto estetico del manufatto pitturato.

#### 4.2 Le origini

Le prime pitture murali compaiono in epoca preistorica, all'inizio del paleolitico superiore, circa 30.000 anni prima di Cristo. La prima testimonianza è costituita da impronte di mani applicate sulle pareti delle caverne/abitazioni in positivo o in negativo.

I principali pigmenti impiegati dagli "artisti" paleolitici erano ossidi naturali di ferro e di manganese, l'ematite, la limonite, che forniscono una gamma che va dall'ocra bruna al giallo, e ai quali si aggiungevano il nero (carbone naturale di legna o d'osso) e a volte il bianco (probabilmente un derivato dell'argilla chiamato volgarmente ingobbio).

Si sa che la terra rossa, utilizzata anche per i tatuaggi e in diversi riti, aveva, nella maggior parte delle culture arcaiche, un significato magico religioso.

Una caratteristica generale delle pitture rupestri paleolitiche e dei loro prolungamenti, in Africa e in Asia come in Europa, è l'esecuzione diretta sulla roccia, senza che questa venga preparata con alcun supporto. D'altronde, fin dalle origini, si manifesta uno stretto legame fra pittura e rilievi, la pittura sviluppando volentieri le suggestioni plastiche offerte dalla parete.

Bisogna attendere il neolitico per vedere la pittura associarsi all'architettura, che fa la sua apparizione in questo periodo. La superficie naturale, irregolare della roccia, lascia il posto al piano del muro, costruito e spianato dall'uomo e, di norma,

ricoperto da un intonaco d'argilla che riceve la pittura. Il progresso della tecnologia dell'argilla è d'altronde una delle caratteristiche della nuova era protostorica. Dapprima sotto forma di mattone crudo, poi di mattone cotto o di vasellame, l'argilla costituisce ben presto il supporto per eccellenza della pittura e anche delle prime forme scritte.

Questo tipo di tecnica neolitica fu perfezionata nelle grandi civiltà agrarie, dove il limo dei fiumi offriva la materia prima degli intonaci. L'uso di mischiare all'argilla paglia tritata per assicurarne maggior coesione, specialmente al momento dell'asciugatura, si sviluppò probabilmente assai presto; è attestato dai tempi più antichi per i rivestimenti dei muri in Egitto e in Mesopotamia.

A differenza dell'Egitto, la Mesopotamia presenta una più grande varietà di tecniche, e se l'uso dell'argilla appartiene alla tradizione fin dalle origini del neolitico, le malte di calce appaiono molto prima che in Egitto. Un forno per calce risalente almeno al 2.500 a.C. è stato scoperto a Chafadje presso Baghdad nel moderno Iraq.

Mentre la Grecia e Roma stavano per rivoluzionare profondamente la tecnica della pittura murale introducendo o sviluppando il principio dell'affresco, la formula tradizionale d'origine neolitica restava alla base delle scuole asiatiche, in particolare della grande corrente che il Buddismo porterà tra il II e l'VIII sec. dal Nord dell'India a Ceylon, da una parte, al Turkestan, alla Cina, alla Corea e al Giappone, dall'altra.

### **4.3 Il periodo Romano**

La tecnica delle pitture murali romane è descritta da Vitruvio nel Libro VII del *De Architectura*, e numerose allusioni sono fatte a questo proposito da Plinio nella sua *Historia naturalis*. Come l'autore dice esplicitamente nella prefazione, il Libro VII del *De Architectura* è completamente dedicato alle *expolitiones*, cioè agli intonaci levigati e decorati dei muri.

Il termine *expolitiones* non designa infatti il semplice intonaco nudo, considerato come fondo destinato a ricevere la pittura, ma indica proprio l'intonaco con la decorazione colorata e levigata, che ne è naturalmente considerata parte integrante.

Vitruvio precisa che, nelle *expolitiones* il colore è fissato alla base grazie alle proprietà della calce. L'intonaco o "tonachino" è l'elemento più importante dell'intero affresco, ancor più del colore stesso. Esso è composto da un impasto fatto con sabbia di fiume fine, polvere di marmo, o pozzolana setacciata, calce ed acqua. Questo tipo d'intonaco si distingue perciò da un'altra forma di preparazione delle pitture menzionata da Plinio: la *cretula* che «conviene per i pigmenti che non sopportano di essere applicati sull'intonaco umido».

Essendo i colori applicati sull'intonaco umido e fissati grazie alle proprietà della calce, non si può dubitare che l'operazione descritta da Vitruvio sia la forma antesignana dell'affresco. D'altra parte in questo senso è stata compresa dalla maggior parte dei traduttori e dei commentatori. Vitruvio però dice di più, egli precisa, infatti, che i colori sono applicati con le *politiones*.

Che cosa sono dunque queste *politiones* che dettero il loro nome all'insieme dell'intonaco con la sua decorazione a colori e che tuttavia intervengono solo al momento di applicare i colori? Si tratta di un prodotto, o di un'operazione, o di un'operazione con un prodotto? In realtà si conviene che così come il termine levigatura designa ancora oggi in alcune lingue l'azione e il prodotto che la rende possibile, il termine *politiones* indica per Vitruvio i pigmenti levigabili in relazione al loro carattere argilloso, cioè le terre argillose bianche o colorate, attualmente conosciute sotto il nome di *bolus* e utilizzate come fondo per la doratura a foglia al fine di permetterne la brunitura.

È significativo che Vitruvio, dopo il capitolo III, non dedichi alcun capitolo particolare alla tecnica pittorica. La ragione della lacuna è semplice. Ai propri occhi, egli tratta esaustivamente questa questione nel capitolo III, poiché le pitture sono parte integrante delle *expolitiones*.

Il libro termina quindi con i capitoli sul marmo e i pigmenti, senza un capitolo dedicato in modo particolare all'eventuale legante. Dunque, ci sono tutte le ragioni

per pensare che non solo gli sfondi, ma anche tutti i motivi che vi si sovrappongono, fossero eseguiti «*cum politionibus, in udo tectorium*» cioè ad affresco.

Quando, tuttavia, l'abitazione apparteneva non ad un membro delle classi dominanti ma ad un qualsiasi cittadino libero di media estrazione, l'abitazione era solo in rari casi decorata "a fresco"; più spesso, le pareti con quella che era la malta preparatoria erano ricoperte semplicemente dal tonachino, uno strato più fine di colore bianco-grigiastro che solo in casi particolari, o quando le condizioni economiche del proprietario lo consentivano, era rifinito con un ultimo strato di malta spenta, pozzolana e polvere sottilissima di marmo.

#### **4.4 L'età rinascimentale**

La nuova visione prospettica e le tendenze realistiche dei pionieri umbro-fiorentini del Quattrocento non dovevano tardare ad esigere innovazioni tecniche.

A partire dalla metà del secolo, vediamo gli artisti ricorrere a diverse combinazioni dei metodi tradizionali e dei procedimenti nuovi, secondo le modalità proprie del processo creativo individuale. Fin da prima della fine del XV sec. appaiono quindi i primi segni di una crisi dell'affresco.

Il protagonista è qui Leonardo da Vinci che, con i risultati che si conoscono, si abbandona a varie esperienze innovative, talvolta anche fallimentari o poco riuscite, come nel caso emblematico del Cenacolo. L'affresco, infatti, non poteva soddisfarlo perché non permetteva di realizzare le sfumature del modellato indispensabili al suo amato «sfumato» e la ricca gamma di densità e di trasparenze che cercava, ma anche perché esso era contrario al suo modo di lavorare, fatto di continue riprese e correzioni inframezzate da lunghe pause di riflessione. Nel frattempo è abbandonato l'uso della sinopia (che in altre aree sarà invece usata fino alla fine del XVI secolo) e viene introdotto l'uso del cd. cartone preparatorio.

L'intero disegno preparatorio veniva riportato a grandezza naturale sul cartone. Le linee che componevano le figure erano poi perforate. Una volta appoggiato il cartone sull'intonaco fresco, era spolverato con un tampone intriso di finissima polvere di carbone; in tal modo la polvere, passando attraverso i piccoli fori,

lasciava la traccia da seguire per la stesura a pennello. Questa tecnica è chiamata "spolvero", ma con il tempo venne impiegata esclusivamente per le parti del dipinto che necessitavano maggiore precisione nell'esecuzione dei dettagli (come le mani, i volti, o alcuni particolari delle vesti).

Già all'inizio del Rinascimento si comincia al contempo ad impiegare, per le parti del dipinto più ampie e meno ricche di particolari, una nuova tecnica: l'incisione indiretta. In questo caso la carta impiegata per riportare il disegno era molto più spessa di quella usata per lo spolvero. Si procedeva facendo aderire il cartone all'intonaco ancora fresco, ripassando successivamente le linee del disegno con uno stilo ligneo o metallico con la punta arrotondata. La pressione dello strumento rilasciava, attraverso la carta, una leggera incisione nella malta che serviva come linea guida o di contorno, per la stesura definitiva del colore.

Tocca a Raffaello e a Michelangelo portare il lavoro ad affresco ad un grado di ricchezza e di raffinatezza mai toccate, suscettibile di rispondere rapidamente alle esigenze nuove volte alle possibilità dell'olio e alla sua perfetta integrazione con il supporto a malta.

Attratti al contempo dalla concezione eroica, michelangiolesca dell'affresco e dalle nuove possibilità pittoriche dell'olio, i pittori manieristi non tardano tuttavia a riconoscere le qualità proprie di ognuna delle due tecniche e a ricorrere intenzionalmente alla loro contrapposizione in un medesimo insieme per distinguervi due livelli diversi di realtà o di copresenza dell'immagine.

Come già sopra accennato, la decorazione artistica o "pittura d'arte", tuttavia, era appannaggio di élite ristrette, il resto della popolazione viveva in abitazioni spesso malsane e in cui le pareti e i soffitti erano semplicemente imbiancate con la finitura approssimativa di tonachino e spolvero in marmo. Era questa la pittura delle abitazioni dei ceti medio-bassi e la prassi restò tale fino alla fine dell'epoca preindustriale, quando la diversificazione delle classi portò a nuove tipologie abitative, ad un'urbanistica massiva e ad una conurbazione totalmente diversa dai secoli precedenti.

Al contempo variarono pure le modalità decorative, all'affresco si affiancò l'uso della carta da parato decorativa e delle stoffe di pregio.

#### 4.5 L'età moderna e contemporanea, dal XVII secolo ad oggi

Nel XVII e nel XVIII secolo, il mutamento del mercato dell'arte e dei rapporti di potere tra artisti e committenti si ripercuote anche sulle tecniche pittoriche quali l'affresco. La preparazione del supporto pittorico è sempre più raffinata (gli affreschi conservati risalenti a quest'epoca sono, infatti, in numero molto maggiore rispetto alle epoche precedenti). Lo sviluppo del cartone preparatorio era preceduto dal bozzetto, cioè un disegno in scala, molto particolareggiato, dell'affresco; il bozzetto veniva sottoposto al giudizio del committente e, se approvato, si procedeva con l'esecuzione. Al contempo, la Controriforma richiese uno sforzo sempre maggiore nell'ambito del proselitismo antiluterano, per cui il numero di edifici religiosi crebbe come mai in precedenza e di pari passo accadde con le superfici dipinte, chiamate stavolta, ancora più che in passato a fare da arte guida e da Bibbia dei poveri. L'arte di questo periodo, nata come risposta al protestantesimo, assunse un ruolo di grande importanza per la diffusione al popolo delle idee controriformiste e venne usata come mezzo per ricondurlo alla dottrina cattolica.

I palazzi e soprattutto le chiese furono decorati da immensi e grandiosi affreschi, che si avvicinano alla realtà grazie alla rappresentazione assolutamente naturale dei personaggi. Questo conferisce alle scene sacre rappresentate un carattere di credibilità che riavvicinava i fedeli. Grande importanza fu data alla decorazione dei soffitti, i pittori barocchi, grazie alla maestria nell'uso della prospettiva riuscivano ad ampliare gli spazi architettonici creando spazi irreali che univano il cielo e la terra, per esempio il soffitto della chiesa di Sant'Ignazio a Roma dipinto da Andrea Pozzo nel quale figure reali ondeggiano nell'aria in sospensione tra cielo e terra creando effetti *trompe d'oeil* mai visti prima. Altro esempio romano, la Galleria Farnese. Qui la meticolosità con la quale Annibale Carracci progettò gli affreschi è un'ulteriore testimonianza del recupero della grande tradizione rinascimentale italiana costituito dall'impresa di Palazzo Farnese, segnato dal rifiuto di quella *prestezza* esecutiva che il tardomanierismo raccomandava. Nel Settecento l'attenzione per il paesaggio si accentua e contemporaneamente si assiste a uno snellimento notevole delle rappresentazioni figurative e dell'utilizzo dell'affresco. Si assiste ad una ripresa di istanze classicistiche: si riprendono storie tratte dalla mitologia a cui la pittura dell'epoca è

strettamente legata. A Venezia nasce una scuola di vedutisti italiani: il Canaletto, Bellotto e Guardi; a Roma Giovanni Paolo Pannini.

La pittura di veduta è caratterizzata da un forte grado di aderenza al vero, una grande vastità degli orizzonti e un ampio uso della prospettiva. Si assiste in questo periodo alle ultime propaggini dell'antica tecnica, soppiantata pian piano dalla ripresa dei grossi formati in tela e in legno e all'emergere prorompente della scultura a tutto tondo come “arte guida” che terrà la scena almeno per un secolo. Nell'Ottocento si abbandona l'arte classica: l'artista si svincola dalle regole tradizionali. I temi della campagna e del lavoro sono quelli che più interessano i pittori. All'inizio del secolo si sviluppano le correnti del Romanticismo prima, del Realismo poi e dell'impressionismo infine, assistendo al tramonto definitivo della pittura a fresco, abbandonata a favore di composizioni più veloci e facilmente fruibili che apriranno le porte alla scomposizione pittorica e figurativa delle Avanguardie storiche del Novecento.

Fu con l'inizio del Novecento che la decorazione parietale entrò definitivamente in crisi, iniziò a cambiare la concezione stessa dell'abitazione e per la prima volta, la pittura decorativa da parete perse il suo valore di status simbol. La maggiore attenzione alle norme sanitarie, alla salubrità degli ambienti e una maggiore disponibilità a buon prezzo dei materiali e delle maestranze, oltre che una più rapida ed efficace messa in opera, fecero sì che la prassi della tinteggiatura, intesa alla maniera moderna, prendesse piede e anche la medio piccola borghesia e poi via via, il proletariato delle grandi città prestassero maggiore attenzione ad un aspetto che per secoli fu ritenuto secondario, se non addirittura velleitario.

#### **4.6. Gli elementi costituenti oggi**

Le materie prime costituenti la miscela sono sostanzialmente cinque e sono:

– Le resine

Le resine sono polimeri solubili nei comuni solventi organici o in acqua (alchidici, acrilici, epossidici, poliuretanic, poliesteri, vinilici, ecc.). Sempre presenti, determinano la natura del prodotto e ne condizionano fortemente le caratteristiche e

le prestazioni. Così, ad esempio, si utilizzeranno resine acriliche o poliestere se al prodotto si chiederanno particolari capacità di conservare la brillantezza ed il colore, e resine epossidiche se invece sono necessarie elevate resistenze agli agenti chimici.

Le più importanti sono: resine alchiliche, resine acriliche, resine epossidiche, resine poliestere.

– I pigmenti

Sono composti organici o inorganici, insolubili (ossidi, cromati, ferrocianuri,, toluidine, azoici, ecc.). I pigmenti inorganici offrono solitamente ottime prestazioni, si disperdono con maggiore facilità, sono veramente insolubili. I pigmenti organici, invece, si lasciano preferire per la gamma estesissima di tonalità e per la nitidezza del colore. I pigmenti sono sempre presenti come fase dispersa e la loro funzione è quella di impartire al film colore e “coprenza”<sup>1</sup>. Un tipo particolare di pigmenti sono i coloranti, composti organici solubili, che impartiscono colore ma lasciano inalterata la trasparenza propria del film e si utilizzano perciò nelle finiture trasparenti colorate. Pigmenti e coloranti costituiscono spesso la parte più costosa della formula.

Da un punto di vista fisico, la particella di pigmento dispersa nel film di prodotto essiccato rappresenta un punto di discontinuità del film stesso, e quindi ne indebolisce le caratteristiche di resistenza, sia meccaniche che chimiche. Esiste, anzi, una concentrazione critica di pigmento (CPVC, Critical Pigment Volume Concentration) al di là della quale il film perde completamente la sua continuità con un decadimento drastico di tutte le sue caratteristiche.

Un pigmento è tanto più pregiato quanto maggiore è la sua resistenza alla luce. Naturalmente il costo varia in proporzione, e a volte raggiunge livelli proibitivi, centinaia di volte superiore alla media. La scelta di un pigmento, quindi, passa per la ricerca di un equilibrio ottimale tra colore, sua conservazione nel tempo, coprenza, costo e CPVC.

– Le cariche

---

1 <sup>1</sup> La coprenza è l'esatto contrario della trasparenza

Sali inorganici insolubili (silicati, solfati, carbonati ecc.). Spesso presenti, non impartiscono né colore né coprenza, e costituiscono la parte più povera della formula. Nei fondi, negli stucchi e talvolta nelle finiture, svolgono una importante funzione di “riempimento” e facilitano le operazioni di livellamento e di carteggiatura.

– I solventi

I solventi sono composti liquidi a vario grado di volatilità, quasi sempre utilizzati in miscela tra loro (idrocarburi, alcoli, esteri, chetoni, acqua, ecc.). Servono a permettere la lavorazione delle resine e degli impasti con pigmenti e cariche, nonché a consentirne l’applicazione. Sono destinati ad evaporare e quindi non se ne trova traccia nel film essiccato.

La messa a punto di una buona miscela solvente per un determinato prodotto è un lavoro molto importante e critico. Infatti il solvente deve:

- tenere in soluzione la resina (o, come più spesso accade, le resine), ricercando l’equilibrio ottimale tra stabilità della soluzione, sua concentrazione e sua viscosità;
- dopo l’applicazione, evaporare gradualmente dal corpo del film, in tempi sufficientemente rapidi per evitare “colature”, ma non tanto rapidi da provocare il brusco raffreddamento del film o movimenti tumultuosi al suo interno: nel primo caso si avrebbe condensa sulla superficie, nel secondo caso formazione di crateri;
- durante l’evaporazione dei solventi non si deve verificare che la resina, progressivamente privata del suo solvente, precipiti dalla soluzione.

– Gli additivi

Sono prodotti di varia natura che impartiscono alle pitture durante la lavorazione e l’applicazione, o ai film dopo l’essiccazione, particolari caratteristiche (possono agire ad es. sulla tensione superficiale, sull’aspetto del film, sulla sua “scivolosità” al tatto, e così via).

Gli additivi sono molto numerosi e vengono classificati a seconda dell’azione che esercitano. Si parla perciò di:

- antiingiallenti - assorbono le radiazioni UV, evitando che esse vadano a degradare e ingiallire il film;
- acceleranti - accelerano l'essiccazione ad aria, catalizzando la reazione con l'ossigeno;
- antisedimentanti - aiutano a tenere in sospensione le particelle di pigmenti e cariche, evitando o rallentando la loro sedimentazione;
- plastificanti - aumentano l'elasticità della pellicola secca;
- distendenti - procurano una superficie "distesa" del film, evitando che si formi in modo eccessivo l'aspetto "buccia d'arancia";

L'efficacia degli additivi varia in funzione della quantità utilizzata, con un massimo dell'efficacia che corrisponde ad una percentuale ben precisa (di solito agiscono in % molto basse, mai superiori al 3-4%) e della natura del prodotto.

## **PARTE 2<sup>a</sup> - Comportamento nel tempo dei componenti edilizi**

### ***Introduzione***

I contenuti relativi alla 2<sup>a</sup> parte riguardano gli aspetti fondamentali che interessano il comportamento nel tempo dei componenti edilizi, quali: la *Durabilità*, le *Metodologie di valutazione della vita utile* e il *Degrado*.

Relativamente alla Durabilità dei componenti edilizi, data la vastità e la complessità di tale aspetto, si è scelto di limitare questo capitolo alla sola descrizione delle principali problematiche, sollevate negli ultimi anni, riguardanti la valutazione della vita utile, riservando, inoltre, una parte di questo capitolo ad una descrizione critica delle più importanti metodologie di valutazione.

Per quanto riguarda il degrado del calcestruzzo, dopo aver effettuato una breve sintesi sui principali componenti e le principali caratteristiche dei materiali che lo compongono, si è scelto di descriverne le cause di degrado più comuni, focalizzando l'attenzione su quella che, ai fini del lavoro di ricerca svolto rappresenta la questione uno degli aspetti principali della sperimentazione, ossia la "carbonatazione del calcestruzzo e la conseguente corrosione delle armature metalliche".

Relativamente agli elementi che costituiscono rivestimento per il calcestruzzo armato è stato effettuato uno studio sulle principali caratteristiche e peculiarità dei componenti, per poi approfondire gli aspetti relativi al degrado, in particolar modo dell'intonaco e delle pitture.

## Capitolo 5

### DURABILITÀ DEI COMPONENTI EDILIZI

#### 5.1 Generalità

In edilizia, la **durabilità** è un requisito che indica il comportamento nel tempo dei componenti edilizi ed è definito in Italia dalla norma UNI 11156, “Valutazione della durabilità dei componenti edilizi”, come *la capacità di svolgere le funzioni richieste durante un periodo di tempo specificato, sotto l’influenza degli agenti previsti in esercizio.*

La propensione prestazionale del componente studiato in relazione al requisito di durabilità si deduce dalla conoscenza della sua durata, o *vita utile*, accompagnata dall’*affidabilità* del componente stesso che, come meglio specificato nel paragrafo successivo, rappresenta la probabilità che l’elemento tecnico funzioni senza guastarsi nell’arco di tempo che va dal tempo zero, momento in cui il componente viene installato e messo in opera, al tempo di fine vita utile del componente stesso in esercizio.

Nell’arco di tempo sopra considerato, l’elemento tecnico subisce una naturale caduta prestazionale in relazione anche alla vita utile propria dei materiali impiegati per la sua realizzazione, alla loro messa in opera e all’interfaccia che si crea tra i differenti materiali della stratigrafia realizzata. Oltre un certo limite di soglia, la prestazione del componente raggiunge valori sotto i quali non è più in grado di dare una risposta efficace in relazione alla funzione richiestagli e decretando così la sua fine di vita utile.

Ponendosi in linea con la norma ISO 15686, Buildings and constructed assets. Service life planning, che fornisce il quadro generale a livello internazionale in merito alla valutazione e alla gestione della vita utile dell’edificio, la UNI 11156 definisce appunto questa durata o vita utile del componente (Service life) come il periodo di tempo, dopo l’installazione, durante il quale l’elemento tecnico mantiene livelli prestazionali superiori o uguali ai limiti di accettazione definiti in relazione al soddisfacimento delle funzioni richiestegli, alle esigenze espresse dall’utenza e

considerando un livello di manutenzione minimo assimilabile alle operazioni di manutenzione ordinaria che normalmente si effettuano durante il periodo di uso e gestione del manufatto edile.

La valutazione della vita utile (*Service life*) si articola a sua volta in una valutazione di “vita utile di riferimento” (*Reference service life*) e di “vita utile stimata” (*Estimated service life*), a seconda di chi effettua la valutazione e di quale obiettivo si pone. La valutazione della “vita utile di riferimento” è infatti per lo più indirizzata a quegli Enti preposti al controllo della durabilità degli elementi tecnici nella fase di produzione e in particolar modo per la certificazione di durabilità dei prodotti. Il termine “riferimento” sta quindi ad indicare le condizioni al contorno assunte dal produttore, che certifica la durabilità del suo prodotto fuori sistema, e considerando condizioni di uso e di degrado plausibili e che mediamente si verificano. La “vita utile stimata”, invece, è quella calcolata dal progettista e quindi relativa alle condizioni reali in cui si colloca il suo progetto. Pertanto, partendo dai dati di durata dichiarati nella *Reference service life*, il progettista può rendere tali dati più reali, rispetto al suo specifico progetto, modificando le condizioni di riferimento assunte dal produttore affinché risultino più veritiere rispetto alle condizioni del contesto progettuale specifico. Per effettuare questo passaggio la norma mette a disposizione del progettista diversi metodi, più o meno complessi e più o meno affidabili, utilizzando fattori correttivi o basandosi su analisi statistiche sia del contesto sollecitante che del comportamento dei materiali.

## **5.2 Valutazione della durabilità di un organismo edilizio**

Il requisito di durabilità di un sistema edilizio esprime *l'attitudine del sistema stesso a mantenere nel tempo, senza interventi manutentivi, in determinate condizioni ambientali e di uso, il livello delle prestazioni tecnologiche iniziali*; pertanto il requisito attiene al comportamento del sistema tecnologico.

La dinamica di detto comportamento è particolarmente complessa sostanzialmente per due ordini di problemi tra loro connessi.

Il primo riguarda l'obsolescenza tecnologica differenziata delle parti funzionali che costituiscono il sistema; il secondo concerne il diverso andamento del

decadimento prestazionale nel tempo a fronte di ogni singolo requisito tecnologico connotante, cioè pertinente alle diverse parti funzionali del sistema tecnologico.

Queste considerazioni portano a ritenere del tutto teorica la possibilità di valutare, in termini univoci e assoluti, la durabilità del sistema tecnologico applicato ad uno specifico organismo edilizio sito in una ben definita localizzazione territoriale.

Ne consegue che la valutazione della durabilità va perseguita a livello di ogni singola parte funzionale significativa del sistema tecnologico, con riferimento alla scomposizione funzionale del sistema (vedi UNI 8290), cioè a livello di classi di elementi tecnici. Inoltre, per ogni classe, la valutazione della durabilità risulta diversa per ogni singola prestazione tecnologica corrispondente ad ogni singolo requisito della classe presa in considerazione.

Va poi osservato che le valutazioni, ancorché condotte per classi di elementi tecnici, forniranno esiti diversi al variare delle condizioni contestuali di sollecitazioni alle quali le parti funzionali del sistema tecnologico risulteranno sottoposte nello specifico organismo edilizio entro il quale saranno applicate.

Queste riflessioni preliminari evidenziano la complessità del problema e in particolare portano ad osservare che la valutazione del comportamento nel tempo del sistema tecnologico innanzitutto:

- deve essere perseguita a livello di classi di elementi tecnici;
- deve essere analizzata separatamente per ogni prestazione tecnologica significativa della specifica classe;
- deve essere relazionata alle specifiche condizioni ambientali e d'uso, cioè allo stato di sollecitazione previsto per l'utilizzo della classe nell'organismo edilizio cui è destinata.

### **5.3 Valutazione della durabilità dei componenti edilizi: la UNI 11156**

Nel febbraio del 2006 è stata pubblicata la norma UNI 11156, che stabilisce lo standard italiano per la valutazione della durabilità dei componenti edilizi.

La norma è suddivisa in tre parti:

- UNI 11156-1:2006  
Parte 1: Terminologia e definizione dei parametri di valutazione
- UNI 11156-2:2006  
Parte 2: Metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità
- UNI 11156-3:2006  
Parte 3: Metodo per la valutazione della durata (vita utile)

### Parte 1: Terminologia e definizione dei parametri di valutazione

Il primo approccio nei confronti della questione della durabilità dei componenti edilizi è fornito dall'individuazione di una rassegna dei termini e dei parametri di maggior utilizzo, con lo scopo di unificare il glossario nel settore dell'edilizia per l'elaborazione normativa e per le attività di programmazione degli interventi edilizi. Tra le definizioni riportate, si riportano, per brevità, solo quelle più significative per il presente studio:

**Durabilità:** capacità di un edificio o delle sue parti, di svolgere le funzioni richieste durante un periodo di tempo specificato, sotto l'influenza degli agenti previsti in esercizio.

**Requisito di durabilità:** traduzione di un requisito tecnologico nelle caratteristiche di durata e di affidabilità che connotano un elemento tecnico per il soddisfacimento del requisito stesso.

**Qualità utile:** è l'insieme delle caratteristiche degli elementi tecnici di un organismo edilizio articolate per requisiti di durabilità.

**Vita utile:** periodo di tempo dopo l'installazione durante il quale l'edificio o le sue parti mantengono livelli prestazionali uguali o superiori a quelli accettabili.

**Durata spontanea:** è il periodo di tempo durante il quale le prestazioni del componente si mantengono entro limiti accettabili, sotto la sola influenza degli agenti sollecitanti.

**Vita utile di riferimento** (Reference service life): è la vita utile dell'edificio o delle sue parti prevista in definite condizioni d'uso.

**Vita utile stimata** (Estimated service life): è la vita utile dell'edificio o delle sue parti, prevista in definite condizioni d'uso, calcolata correggendo le condizioni di

riferimento in funzione di materiali, progetto, ambiente, condizioni d'uso e manutenzione.

**Vita utile di progetto** (Design life): è la vita utile definita dal progettista e si identifica sulla necessaria durata che un edificio o una delle sue parti deve avere.

**Affidabilità**: è la probabilità che il sistema o l'elemento funzioni senza guastarsi ad un livello predisposto, per un certo tempo  $t$  e in predeterminate condizioni ambientali e d'uso.

### Parte 2: Metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità

La seconda parte della norma tratta il tema della determinazione della propensione all'affidabilità, la quale accompagna ed integra le operazioni di valutazione della durabilità dei componenti edilizi; inoltre il metodo di valutazione della propensione all'affidabilità si configura come uno strumento che mira a stabilire la probabilità che un elemento tecnico possa funzionare in un certo istante di tempo della sua vita. La valutazione dell'affidabilità è intimamente legata al concetto di guasto, che è definibile come la perdita della capacità da parte dell'elemento, o di una sua parte, di svolgere una funzione connotante. La stima dell'affidabilità dunque, si propone come un'analisi del funzionamento dell'elemento tecnico che avviene attraverso un'analisi funzionale, oggettuale e strutturale.

L'affidabilità può essere espressa come il valore adimensionale compreso tra 0 ed 1, oppure come un valore percentuale e quindi compreso tra 0 e 100%; il complemento a 1 (o a 100) del valore stimato di propensione all'affidabilità rappresenta il rischio di entrata in crisi dell'elemento durante la vita utile. I valori 0 ed 1 (o 100) rappresentano i limiti ideali ai quali corrisponde il minimo o massimo grado di propensione all'affidabilità.

Poiché tali valori non vengono mai raggiunti nella realtà, la variazione dell'affidabilità ( $A$ ) è compresa tra due valori estremi  $\delta_1$  e  $\delta_2$ , pertanto possiamo scrivere:

$$\delta_1 < A < 1 - \delta_2$$

Gli aspetti della valutazione della propensione all'affidabilità precedentemente esaminati, concorrono a determinare l'affidabilità globale ( $A_g$ ), che risulterà come la media aritmetica tra tutti i valori che essi assumono, secondo la formula:

$$A_g = \frac{(A_f + A_e + A_i + A_c)}{4}$$

Ogni classe di giudizio  $A_i$  è individuata da una serie di criteri di giudizio che esprimono gli aspetti elementari che determinano l'affidabilità dell'elemento.

### Parte 3: Metodologia per la valutazione della durata (vita utile)

La presente parte della norma definisce il metodo di valutazione della vita utile nei componenti edilizi; essa si divide in due livelli principali, corrispondenti alla definizione di una metodologia generale e alla descrizione dei metodi di valutazione.

La metodologia generale individuata dalla norma è stata recepita dalla norma ISO 15686 (parte 2). Essa si propone come principio ordinatore per l'implementazione dei metodi per la valutazione della vita utile e come strumento di utilizzo diretto, rivolto agli enti preposti al controllo della durabilità degli elementi tecnici nelle fasi di produzione, o per la certificazione della durabilità (laboratori di prove sperimentali, laboratori di controllo qualità delle aziende produttrici, o comunque in qualsiasi struttura preposta alla ricerca di dati nel campo della durabilità in edilizia).

In sintesi, la normativa introduce una metodologia generale, per la valutazione della durabilità, divisa sostanzialmente in due fasi:

- Valutazione della vita utile in condizioni di riferimento – RSL
- Valutazione della vita utile in condizioni di progetto – ESL

#### **5.3.1 Valutazione della vita utile in condizioni di riferimento – RSL**

La metodologia proposta è illustrata nella Fig. 12 e si articola in più fasi fondamentali, in correlazione tra loro, sintetizzabili nei seguenti punti:

- Definizione

- Preparazione
- Prove preliminari
- Esposizione e misura
- Analisi ed interpretazione dei dati

Le fasi che compongono la metodologia hanno lo stesso significato delle analoghe viste nella ISO 15686; infatti, il procedimento parte con la definizione dello studio e con la caratterizzazione degli elementi tecnici.

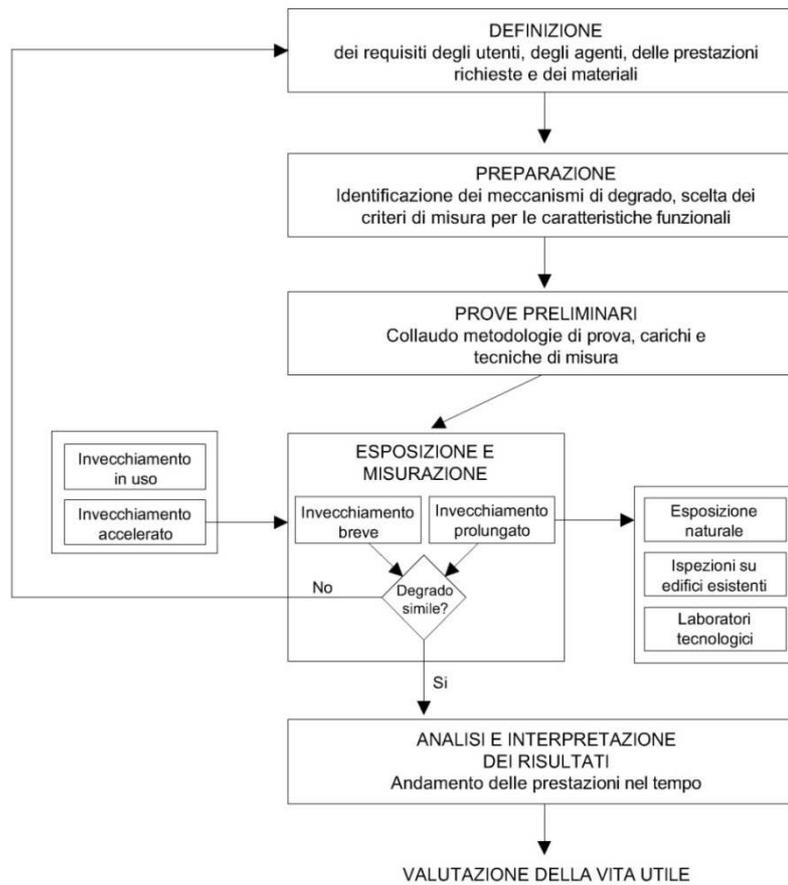
Il primo passo da compiersi è quello della scelta tra uno studio di carattere specifico o generale; nel primo caso lo studio è mirato a stimare la vita utile di riferimento, riferita a certe condizioni ambientali e d'utilizzo, mentre nel secondo caso l'obiettivo è quello di valutare la vita utile in diverse condizioni ambientali e d'uso. La caratterizzazione degli elementi tecnici avviene mediante la definizione delle caratteristiche funzionali; ognuno di essi affinché sviluppi una o più prestazioni, deve possedere dei requisiti funzionali che esprimano il significato della sua esistenza nell'ambito del sistema edilizio.

La fase di preparazione si basa sull'individuazione a cascata degli agenti di degrado, dei meccanismi di degrado e delle cadute prestazionali.

Per l'individuazione dei più significativi agenti di degrado si fa riferimento alla norma UNI 8290, che raggruppa gli agenti nelle categorie: climatici, chimici, artificiali esterni, dovuti all'uso e biologici.

L'individuazione dei meccanismi di degrado può svilupparsi in via empirica, mediante prove in sito o in laboratorio, oppure in via analitica, sfruttando la conoscenza scientifica relativa a determinati fenomeni.

Sulla base dei fenomeni di rottura, devono essere analizzati i decadimenti prestazionali in relazione alle caratteristiche funzionali e devono essere definiti i metodi di misura con i quali sono valutate le prestazioni. In questa fase infatti, va sviluppato il programma preliminare di esposizione agli agenti, proprio per valutare la caduta prestazionale degli elementi o delle loro parti.



**Fig. 12** - Metodologie per la valutazione della vita utile di un componente edilizio  
(tratto dalla ISO 15686)

Il collaudo del metodo attraverso le prove preliminari si effettua per verificare che l'esposizione degli elementi agli agenti di degrado porti a risultati sufficientemente vicini a quelli ipotizzati. Lo scopo principale è di determinare la reale intensità degli agenti ai quali vanno sottoposti gli elementi in esame, al fine di sviluppare una stretta corrispondenza tra le prestazioni reali e quelle valutate in seguito all'invecchiamento accelerato.

Oltre a questo è importante stabilire una gerarchia dei maggiori fattori di degrado ed isolare da questi quelli di scarsa importanza.

La fase di sviluppo dei programmi sperimentali di esposizione all'invecchiamento è quella che ci permette un'elaborazione dei fenomeni riscontrati sugli elementi in certe condizioni ambientali e d'uso.

Le esposizioni all'invecchiamento possono essere a lungo termine e a breve termine. Le esposizioni a lungo termine sono quelle in cui l'elemento è sottoposto al naturale processo di degrado della relativa condizione ambientale (esposizione in esterno di campioni di prove, ispezioni su più edifici esistenti dalle caratteristiche analoghe, sperimentazione su edifici innovativi ed esposizione in condizioni d'uso).

Le esposizioni a breve termine sono invece quelle attraverso le quali possiamo verificare in poco tempo lo sviluppo del degrado; esse si realizzano mediante cicli di invecchiamento accelerato in laboratorio oppure con esposizioni all'esterno.

L'ultima fase è quella di analisi ed interpretazione dei risultati conseguiti; in seguito alle prove effettuate per determinare le prestazioni e le caratteristiche funzionali, vengono definite le funzioni di decadimento delle prestazioni nel tempo, o le funzioni di crescita del degrado. Pertanto, relativamente alle caratteristiche funzionali, può essere stabilito un limite temporale alle prestazioni che individuerà la vita utile dell'elemento.

Se le condizioni di esposizione non corrispondono alle condizioni reali in cui l'elemento è utilizzato, bisogna ottenere nuove funzioni di decadimento prestazionale, interpolando i risultati con fattori correttivi.

Una delle prime operazioni da effettuare nella metodologia appena trattata è quella della definizione delle caratteristiche funzionali dell'elemento tecnico; tale operazione è perseguibile mediante l'applicazione di un metodo indicato dalla stessa norma e noto come "analisi funzionale degli elementi tecnici". Lo sviluppo di prestazioni tecnologiche da parte degli elementi tecnici si identifica con lo svolgimento di funzioni tecnologiche. Per ciascuna soluzione tecnica sono individuati i requisiti connotanti che rappresentano le esigenze da soddisfare; a ciascuno di questi requisiti corrisponde una funzione base, che è dunque il ruolo posseduto dall'elemento. La funzione viene svolta attraverso le caratteristiche proprie possedute dai prodotti costituenti la soluzione, e che costituiscono i vettori funzionali.

La valutazione della qualità degli elementi edilizi è strettamente connessa con l'individuazione delle proprietà caratteristiche e la durabilità è definibile come la capacità di mantenere invariato il grado di soddisfacimento dei requisiti. Il

decadimento della soluzione tecnica è individuabile nella perdita dell' idoneità a svolgere delle funzioni, le quali al tempo zero ne caratterizzavano il funzionamento.

L' analisi funzionale si attua mediante lo sviluppo di un modello funzionale in fase metaprogettuale, e di un modello oggettuale in fase progettuale. Il modello funzionale è costituito dalla serie di relazioni funzionali qualitative che intercorrono tra le parti che costituiscono la soluzione tecnica mentre l' analisi oggettuale si basa comunque sulle relazioni funzionali ma da un punto di vista quantitativo, cioè analizzando fisicamente gli enti che concorrono allo svolgimento delle funzioni.

Ogni funzione base individuata per una soluzione tecnica è divisibile in una serie di funzioni analitiche che esprimono la modellazione del comportamento degli enti che le sviluppano. La conoscenza delle funzioni analitiche permette dunque di stabilire dei limiti di accettazione, i "limiti funzionali", cioè quei valori prestazionali estremi che garantiscono il funzionamento della soluzione.

### **5.3.2 Valutazione della vita utile in condizioni di progetto – ESL**

I metodi citati dalla norma e di seguito indicati per la previsione della vita utile stimata in condizioni di progetto, si dividono nelle seguenti categorie:

- metodi deterministici;
- metodi stocastici;
- metodi ingegneristici.

Ormai è noto che quando si parla di metodi deterministici essi si identifichino con il Metodo Fattoriale, da sempre protagonista della ricerca e delle normative nel campo; esso deve il suo nome ai fattori correttivi che intervengono a modificare le condizioni di riferimento (vita utile di riferimento), al fine di ottenere la previsione della vita utile stimata.

Tali fattori correttivi sono raggruppati in classi che rappresentano gli aspetti più importanti, ai fini del degrado o comunque delle cadute prestazionali, della vita di un edificio. Le classi di fattore (dalla A alla G) sono suddivise in categorie di agenti

legati alla qualità intrinseca del componente, alle caratteristiche dell'ambiente in cui esso è collocato e alle condizioni d'uso al quale è sottoposto.

I metodi stocastici si basano sull'analisi statistica sia del contesto sollecitante (agenti di degrado) sia del comportamento dei materiali o dei componenti. La loro natura statistica comporta una grossa necessità di informazioni di partenza, e conduce allo sviluppo di una funzione prestazionale continua, nella quale è possibile individuare il livello di adempimento funzionale in ogni istante della vita.

I metodi ingegneristici sono caratterizzati da un grado di complessità paragonabile a quello affrontato dai progettisti nella pratica progettuale. Nella quasi totalità dei casi essi sono dei metodi frutto dello sviluppo probabilistico di alcuni aspetti dei metodi deterministici, e più precisamente come un'evoluzione del metodo fattoriale.

A monte dell'applicazione del metodo occorre però identificare, fin dalle prime fasi, il livello di approfondimento dello studio che varia fra questi estremi:

*a) Studio specifico:* l'obiettivo è valutare la vita utile dell'elemento tecnico in definite condizioni ambientali e d'uso di riferimento (RSL), con un pacchetto definito di specificazioni prestazionali.

*b) Studio generale:* l'obiettivo è definire un modello di comportamento nel tempo dell'elemento tecnico al fine di valutarne la vita utile in diverse condizioni ambientali di sollecitazione e d'uso, sulla base dell'indicazione di specificazioni prestazionali.

### **5.3.3 Valutazione della vita utile sulla base di dati da edifici campione**

Uno dei possibili sviluppi ingegneristici del metodo fattoriale è stato condotto dalla Scuola Politecnica e delle Scienze di Base dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, e il metodo frutto della ricerca è stato proposto dall'Ente di Unificazione Italiana come una valida proposta metodologica, ponendolo in allegato alla terza parte della norma UNI 11156.

Il metodo si basa sulla possibilità di poter stimare la vita utile di un componente edilizio in qualsiasi contesto, valutando le condizioni specifiche del caso in oggetto

come deviazione da un valore medio-normale, determinato in precedenza in via sperimentale.

Si caratterizza attraverso un algoritmo nel quale il valore di riferimento, definito medio-normale ( $D_{mn}$ ), viene modificato da coefficienti correttivi che rappresentano, relativamente ai fattori che influenzano il degrado, lo scostamento del caso in oggetto da quello di riferimento.

Il metodo ha due versioni, definite metodo “diretto” e metodo “indiretto”, le quali si differenziano unicamente per la determinazione dei coefficienti correttivi e per l’algoritmo di calcolo della durata, avendo in comune i presupposti teorici fondamentali.

Il valore di durata medio-normale ( $D_{mn}$ ), ovvero la durata del componente in oggetto nelle condizioni che si assumono come medio-normali, è determinato come la media statistica dei valori rilevati dallo studio di un certo numero di edifici-campione in condizioni analoghe di riferimento (medio-normali).

I criteri di scelta per la formazione del campione di edifici sono i seguenti:

- qualità e quantità delle informazioni disponibili;
- possibilità di monitorare, le variazioni significative in termini di prestazioni degli elementi costruttivi;
- caratteristiche degli interventi eseguiti;
- omogeneità dei fattori di influenza;

La valutazione della durata in servizio di un elemento impone innanzitutto l’individuazione dei fattori che la influenzano. Un presupposto molto importante per l’applicazione della metodologia proposta è dato dall’adozione dell’ipotesi che il degrado, in relazione al quale definire la durata dell’elemento stesso, sia legato al solo invecchiamento spontaneo e naturale e non a quello di tipo patologico.

Prescindendo, dunque, da agenti quali gli errori di esecuzione, progettazione, uso o gestione, si possono individuare quei fattori che abbiano maggiore influenza sul comportamento del componente considerato: l’individuazione degli stessi, così come il loro peso sul valore di durata, varia da componente a componente.

La scelta dei fattori, così come il peso della loro influenza sul valore della durata, è dunque oggetto di specifica determinazione al variare dell'elemento considerato. Scelti i fattori, occorre definirne le condizioni di variazione ovvero le diverse condizioni in cui ogni fattore esprime la propria natura e, dunque, la propria influenza.

Noto il valore di durata medio-normale, determinate nel modo descritto le condizioni di variazione relative a tutti i fattori assunti per il componente prescelto, occorre definire i coefficienti che traducono numericamente la diversità di comportamento del caso in oggetto da quello di riferimento. Si propongono a tale fine due possibili approcci: indiretto o diretto.

### 1. Metodo indiretto

La relazione attraverso la quale si può correggere un valore di riferimento (medio-normale) con coefficienti che traducano la peculiarità del caso in oggetto è la seguente:

$$D_{pp} = D_{mn} \times F_i$$

in cui:

**D<sub>pp</sub>** è il valore della “durata più probabile”, corrispondente alla durata del componente considerato, nelle condizioni ipotizzate;

**D<sub>mn</sub>** è il valore “medio-normale” della durata, ovvero quella del componente considerato nelle condizioni assunte come medio-normali di riferimento;

**F<sub>i</sub>** sono i coefficienti correttivi da associare a ciascun gruppo di fattori omogenei individuati, in una fase preliminare, in quanto ritenuti influenti sulla vita utile dell'elemento considerato.

Nel metodo indiretto i coefficienti correttivi si riferiscono ai gruppi omogenei in cui questi risultano organizzati, ad ogni gruppo corrisponde un singolo fattore.

### 2. Metodo diretto

La relazione che traduce analiticamente la possibilità di correggere un valore di riferimento (medio-normale) con coefficienti, la cui determinazione è diretta e non

filtrata dall'attribuzione di punteggi alle condizioni di variazione dei fattori di influenza assunti, è la seguente:

$$D_{pp} = D_{mn} \times \sum(\lambda_i F_i / 100)$$

in cui:

**D<sub>pp</sub>** e **D<sub>mn</sub>** hanno il medesimo significato del metodo indiretto;

**F<sub>i</sub>** sono i coefficienti correttivi da associare ad ogni fattore singolo;

**λ<sub>i</sub>** sono i pesi che definiscono l'influenza relativa dei vari fattori nei confronti del degrado del componente in oggetto. Per motivi di opportunità il valore di ogni coefficiente viene assunto in modo che la somma totale risulti pari a 100; su tale base si effettuerà, dunque, la media pesata.

#### 5.4 Metodologie di invecchiamento per la valutazione della vita utile

Nel corso degli anni sono stati messi a punto vari metodi per la determinazione della vita utile dei componenti edilizi. La maggior parte dei ricercatori utilizza attualmente o il test dell'esposizione naturale oppure i test accelerati di laboratorio.

Il test dell'esposizione naturale offre molti vantaggi: rispecchia la realtà, non è dispendioso ed è facile da eseguire; tuttavia, molti produttori e ricercatori non possono aspettare anni per capire se un determinato prodotto rappresenta veramente un'innovazione; Per questo motivo, risultano attualmente largamente utilizzate le apparecchiature da test per invecchiamento accelerato che forniscono risultati veloci e riproducibili e che ben si prestano alle esigenze di ricerca e di sviluppo.

Qual è, quindi, la metodologia migliore?

Non esiste una semplice risposta a questa domanda; a seconda delle esigenze, qualsiasi metodologia può essere appropriata. La scelta della metodologia da utilizzare dovrebbe quindi dipendere dal prodotto o dal materiale in uso, dall'applicazione finale, dal modo di degradazione a cui si è interessati, dalle restrizioni economiche e soprattutto dal tempo a disposizione per l'acquisizione dei risultati.

### 5.4.1 Esposizione all'esterno

L'esposizione all'esterno fornisce una verifica definitiva delle performance del materiale in quella data località ed in quel dato tempo.

La selezione dei siti di esposizione richiede necessariamente il controllo della variabilità delle condizioni climatiche dovute a cicli giornalieri, stagionali e annuali: la riproducibilità e la ripetibilità dei risultati di esposizione all'esterno risulta essere il vero tallone di Achille di tale metodologia; nel merito, Martin (nota industria produttrice) in una interessante rassegna dichiara, alla luce di una estesa serie di articoli raccolti, che tali risultati non sono né riproducibili né ripetibili se uno qualunque dei seguenti parametri tipici è modificato:

- sito di esposizione
- angolo di esposizione
- durata dell'esposizione
- tempo dell'anno di esposizione (giorno e mese di inizio, giorno e mese di termine)
- anno di esposizione

Ciascuno di questi parametri può influenzare sia la velocità che il meccanismo di degradazione dei materiali.

Da quanto detto, si capisce come la variabilità delle condizioni climatiche non solo rende estremamente difficile la standardizzazione di tale metodologia, benché esistano norme in merito che classificano le atmosfere quali la ISO12944 oppure la classificazione della World Meteorological Organization; ma inoltre, rende difficoltosa la comparazione dei risultati relativi alla degradazione dei materiali in generale: questo è il principale motivo per il quale sono stati sviluppati i test di laboratorio.

Per quanto riguarda invece la problematica “tempo di esposizione”; ovviamente maggiore è il tempo di esposizione all'esterno e migliori saranno le confidenze associate ai risultati ottenuti; generalmente si ritengono sufficienti due anni anche se non è infrequente trovare in letteratura esposizioni della durata di cinque anni,

soprattutto per il settore auto; tuttavia, va detto che non esiste un tempo minimo univocamente definito e riconosciuto di esposizione all'esterno.

I telai standard atti ad ospitare i vari provini sono in alluminio anodizzato, rivolti verso l'equatore (Sud per il ns. emisfero) con tipici angoli di inclinazione (tilt angle) del provino pari a 0° (orizzontale), 5°, 45° e 90° (verticale). La prassi Lechler comunemente accettata internazionalmente è un angolo di inclinazione di 45°, pari, in questo specifico caso, alla latitudine del sito stesso.

Esistono accorgimenti e modifiche degli espositori tali da rendere la condotta del test e i relativi risultati più conformi alle destinazioni d'uso del prodotto. In breve:

- Esposizioni sotto vetro (verosimiglianza con situazioni interno- auto o interno- casa);
- Esposizioni in scatole nere (verosimiglianza con situazioni interno-auto in condizioni estive);
- Esposizioni con spray (spruzzi ciclici sui provini di opportune soluzioni acquose);
- Esposizioni a secco (è preclusa l'azione della pioggia);
- Esposizioni a traccia solare (il provino segue la posizione del sole nelle ore diurne);
- Esposizione con concentratori di luce (specchi concentratori della radiazione solare sul provino, fattore di concentrazione fino a 5,6).

Pertanto ogni test di esposizione all'esterno dovrebbe includere informazioni relative al sito di esposizione (latitudine) e alle modalità fisiche di esposizione quali angolo di inclinazione e direzione rispetto ai 4 punti cardinali.

#### **5.4.2 Esposizione di laboratorio**

L'assenza di contaminazioni, la variabilità praticamente nulla, il continuo controllo delle condizioni applicate ed il raggiungimento di risultati in breve tempo sono i motivi principali che hanno contribuito alla nascita ed allo sviluppo dei test accelerati di laboratorio. A dispetto di questi vantaggi c'è difficoltà da parte degli esperti del settore nell'accettare risultati di laboratorio senza prima convincersi di

una similarità sufficiente fra le condizioni di laboratorio e l'ambiente esterno (affinché i risultati di un test accelerato siano plausibili deve essere verificata la similarità del meccanismo di degradazione in atto all'esterno e quello in laboratorio).

Rimane aperta la questione sulla effettiva capacità di tali strumentazioni di simulare la degradazione all'esterno attraverso l'impostazione di opportuni parametri.

In realtà ci sono tre problemi che bisogna tenere in considerazione:

1. la variabilità del tempo atmosferico il quale non riproduce neanche se stesso;
2. quale parte dell'anno deve essere simulata;
3. quali condizioni climatiche devono essere selezionate per prodotti usati ovunque nel mondo;

Vanno inoltre considerate le differenze fra i test accelerati e quelli dell'esposizione naturale in termini di responso del materiale in funzione delle mutate condizioni da esso percepite.

La più importante conclusione che si può trarre in virtù di quanto citato è che *i test accelerati devono essere verificati dall'esposizione all'esterno.*

È però evidente che tali strumenti possono giocare un ruolo strategico - *come nel caso della presente tesi* - nelle prove comparative fra i vari componenti edilizi testati facendo emergere da queste prove quale componente si comporta meglio rispetto agli altri.

## Capitolo 6

### DURABILITÀ E DEGRADO DEL CALCESTRUZZO ARMATO

#### 6.1 Brevi cenni sui principali componenti del calcestruzzo [1]

Con riferimento ai calcestruzzi tradizionali, finora ordinariamente impiegati nell'edilizia civile, si esamineranno le caratteristiche principali dei componenti di base del *conglomerato cementizio*.

In particolare si procederà all'esame delle proprietà del cemento, dell'acqua di impasto, dei materiali lapidei, comunemente definiti *aggregati*, e degli aditivi, di quelle sostanze, cioè, che vengono aggiunte all'impasto fresco allo scopo di migliorare alcune proprietà *già possedute* dal conglomerato.

##### 6.1.1 Il cemento

Il cemento è un materiale polverulento che, impastato con acqua – in genere nel rapporto di 3:1 – forma la cosiddetta pasta cementizia che, dopo qualche ora, dapprima si rapprende (fenomeno della presa) e successivamente assume la durezza di una pietra (fenomeno dell'indurimento) che ha capacità di resistenza meccanica.

La normativa europea classifica 25 tipi di cementi, ciascuno disponibile in 6 diverse classi di resistenza. Complessivamente sono classificati 150 cementi ma non tutti prodotti in tutti i Paesi europei. In Italia sono prodotti cinque tipi di cemento:

- il cemento Portland (Tipo I)
- il cemento Portland di miscela (Tipo II)
- il cemento d'Altoforno (Tipo III)
- il cemento Pozzolánico (Tipo IV)
- il cemento Composito (Tipo V)

Per ciascuno di questi cinque tipi vengono commercializzati cementi con sei classi di resistenza: 32,5N; 32,5R; 42,5N; 42,5R; 52,5N; 52,5R.

I numeri 32,5, 42,5, 52,5 indicano il titolo del cemento, ovvero la resistenza a compressione in N/mm<sup>2</sup> a 28 giorni di stagionatura valutata su malta normalizzata.

Le lettere N (Normale) ed R (Rapido), invece, indicano il comportamento del cemento alle stagionature brevi (3 e 7 gg).

### Processi di idratazione dei cementi

Anche se in maniera sintetica, si ritiene opportuno descrivere i *processi di idratazione* dei componenti del cemento.

Nel clinker sono presenti due alluminati di calcio,  $C_4AF$  e  $C_3A$ , e due silicati,  $C_3S$  e  $C_2S$ <sup>1</sup>. I due alluminati, presenti per circa il 20%, sono responsabili del fenomeno della presa; i due silicati, presenti per circa l'80%, sono responsabili del processo di indurimento.

Gli alluminati reagiscono rapidamente con l'acqua, e quindi nelle prime ore del mescolamento, senza che avvenga un significativo sviluppo di resistenze meccaniche. I silicati, invece, reagiscono con l'acqua dando luogo alla formazione di una famiglia di composti determinanti per l'indurimento e, quindi, per lo sviluppo delle resistenze meccaniche.

La presenza del gesso, o dell'anidro, riduce il fenomeno della presa rapida (minore di 60 minuti) dovuta all'idratazione degli alluminati.

Infatti una parte degli alluminati reagendo con l'acqua e con il gesso determina la formazione del composto definito ettringite primaria (per distinguerla da quella secondaria che si può formare successivamente in alcune condizioni sfavorevoli), che si deposita sulla restante parte degli alluminati impedendo, temporaneamente, il contatto con l'acqua e quindi ritardando la presa. Purtroppo la quantità di gesso non deve superare il limite del 7-8%, in quanto la formazione dell'ettringite avviene con aumento di volume per cui quantità eccessive di gesso potrebbero comportare fenomeni fessurativi nella massa del calcestruzzo.

L'idratazione dei silicati comporta anche la formazione di idrossido di calcio,  $Ca(OH)_2$ , che, reagendo con l'anidride carbonica dell'aria, può abbassare il pH della miscela favorendo l'ossidazione delle armature metalliche nelle strutture in cemento armato.

---

<sup>1</sup> Nella chimica del cemento vengono normalmente adottate le seguenti formule abbreviate:  
C= CaO ossido di calcio; A=  $Al_2O_3$  alluminia; F= $Fe_2O_3$  ossido di ferro; S= $SiO_2$  silice; H=  $H_2O$  acqua.

Nei cementi pozzolanici e d’altoforno l’idrossido di calcio viene fissato dalla silice, presente nei due materiali, con formazione di altri composti che riducono la porosità della pasta cementizia.

### 6.1.2 L’acqua d’impasto

L’acqua per i conglomerati cementizi è uno dei componenti essenziali essendo chiamata a svolgere più funzioni nell’ambito dell’impasto.

Senza l’acqua non si hanno le reazioni di idratazione dei componenti del cemento e quindi non si ha la presa e l’indurimento. Purtroppo il dosaggio di acqua va controllato in quanto rapporti elevati di A/C comportano riduzione della resistenza meccanica e della durabilità del materiale.

L’acqua d’impasto totale A, nel caso più generale, può ritenersi somma di tre parti:

- l’acqua di presa  $A_p$
- l’acqua di lavorabilità  $A_l$
- l’acqua di bagnatura  $A_b$

L’acqua di presa è quella che entra in combinazione con il cemento dando luogo ai processi chimico-fisici di presa e indurimento.

L’acqua di lavorabilità agisce come un lubrificante all’interno dell’impasto, riducendo l’attrito tra i materiali solidi, e facendo crescere la classe di consistenza.

L’acqua di bagnatura, che ricopre la superficie degli inerti di un film liquido, è necessaria poiché durante l’impasto gli inerti si bagnano. Se non fosse stata prevista  $A_b$ , la bagnatura degli inerti avverrebbe a scapito delle altre due quantità di acqua  $A_p$  e  $A_l$  e, quindi, una parte del cemento non potrebbe far presa e l’impasto risulterebbe meno lavorabile.

### 6.1.3 Gli aggregati

Nel calcestruzzo i materiali lapidei costituiscono lo *scheletro portante*, mentre la pasta di cemento ne costituisce il *collante*. Questo scheletro portante occupa circa i due terzi del calcestruzzo.

Questi materiali, di opportune dimensioni e qualità, vengono comunemente definiti *inerti* in quanto, nella quasi totalità dei casi, non partecipano alle reazioni di presa e indurimento della pasta di cemento.

Un esempio di calcestruzzo confezionato con materiale lapideo non inerte è il *Betunium* dei Romani.

È noto infatti che i Romani impiegavano calcestruzzi costituiti da calce, pozzolana, materiali lapidei grossi ed acqua nella realizzazione di opere di ingegneria, anche in acqua. La pozzolana, infatti, reagendo con la calce, conferiva idraulicità all'impasto.

Con la scoperta dei leganti idraulici, e in particolare dei cementi, viene meno la necessità di adoperare la pozzolana e lo scheletro del calcestruzzo viene realizzato con materiali inerti, naturali o di frantoio.

La miscela di inerti che, opportunamente assortita, viene impiegata nei calcestruzzi si definisce *aggregato misto* o *misto granulometrico*.

Secondo una classificazione generalmente adottata, gli aggregati di dimensioni inferiori a 7 mm costituiscono gli inerti fini e vengono definiti *sabbie*; per dimensioni maggiori si hanno gli inerti grossi, ovvero le *ghiaie* e i *pietrischi* a seconda che si tratti di elementi di roccia da frantumazione naturale o di roccia da frantumazione meccanica.

Nella tabella 6.1.3 è riportata la classificazione, in relazione alle dimensioni, degli aggregati impiegati nei calcestruzzi.

Classe - mm	Materiale naturale	Materiale di frantoio
0 – 1	Sabbia di fiume per calcestruzzo	Sabbia fine per calcestruzzo
1 -7	Sabbione di fiume per calcestruzzo	Sabbione per calcestruzzo
7 – 30	Ghiaia per calcestruzzo	Pietrisco per calcestruzzo
30 – 40	Ghiaia grossolana per calcestruzzo	Pietrame per calcestruzzo

Tab. 6.1.3 – Classificazione aggregati

#### 6.1.4 Gli additivi

Gli additivi sono quelle sostanze che aggiunte all'atto della sua confezione in piccole quantità al calcestruzzo studiato ne migliorano le caratteristiche.

Purtuttavia è bene osservare, che gli additivi non sono in grado di conferire al calcestruzzo delle caratteristiche da esso non possedute.

Gli additivi sono essenzialmente delle sostanze tensioattive capaci di determinare alcuni fenomeni fisici al limite delle fasi solido-liquido e liquido-gassosa, che caratterizzano il calcestruzzo allo stato fresco. Le sostanze tensioattive si possono classificare in due categorie: sostanze disperdenti e sostanze aeranti.

Le sostanze disperdenti agiscono all'interfaccia tra i granelli di cemento e l'acqua d'impasto favorendo la deflocculazione dei grani. In tal modo si ottiene una soluzione con la fase solida molto dispersa. Le sostanze aeranti, invece, sono particolari agenti schiumogeni che determinano la distribuzione di numerosissime bollicine d'aria nella massa del calcestruzzo.

Accanto alle sostanze tensioattive, inoltre, esistono altre varietà di sostanze che agiscono nella massa del calcestruzzo per via chimica.

Tutti gli additivi, comunque, consentono di conseguire ottimi risultati se impiegati, però, nelle esatte dosi prescritte dalle case produttrici e se omogeneizzati a fondo nella massa del calcestruzzo. Infatti, come dimostrato dalle esperienze, un dosaggio sbagliato comporta, per certi additivi, un rallentamento della presa o dell'indurimento o di entrambi; per altri, invece, un accelerazione di uno o entrambi i fenomeni.

Le conseguenze di un errato dosaggio di additivo, comunque, sono variabili da additivo ad additivo e, molto spesso, non si possono né prevedere né spiegare completamente.

I più importanti e diffusi additivi in commercio si possono classificare, secondo l'azione principale che esplicano sul calcestruzzo, in: *Acceleranti*; *Aeranti*; *Anti-evaporanti*, *Antigelo*; *Antiritiro*, *Disarmanti*, *Fluidificanti* e *Superfluidificanti*; *Idrofobizzanti*; *Inibitori di corrosione*, *Plastificanti*; *Ritardanti*.

## 6.2 Cenni sulla durabilità del conglomerato cementizio [1]

In generale, per le strutture in cemento armato, possiamo dire che la durabilità è legata alla capacità del calcestruzzo di proteggere le armature metalliche dai processi di corrosione provocati dall'attacco degli agenti aggressivi presenti nell'aria, nell'acqua e nei terreni.

La durabilità, quindi, è strettamente legata, oltre alle caratteristiche intrinseche del materiale, anche all'esposizione ambientale della struttura.

Le NTC-2008 al § 11.2.11, e di recente le NTC-2018, stabiliscono che per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato ordinario o precompresso, esposte all'azione dell'ambiente, si devono adottare quei provvedimenti atti a limitare gli effetti di degrado indotti dall'attacco chimico, fisico e derivante dalla corrosione delle armature e dai cicli di gelo e disgelo.

La norma UNI-EN 206 definisce sei classi di esposizione rapportandole al rischio di degrado del calcestruzzo. Per ciascuna classe di esposizione la norma fissa le caratteristiche del calcestruzzo da utilizzare: in particolare il rapporto a/c, il dosaggio di acqua ed il tipo di cemento appropriato.

Nella tabella 6.2, riportata nella pagina che segue, è evidenziato l'elenco delle classi di esposizione ambientale, e le relative sottoclassi, con la descrizione dell'ambiente di esposizione, alcuni esempi delle sue condizioni e infine le prescrizioni da osservare per ognuno di essi.

## 6.3 Principali cause di degrado del calcestruzzo armato [7]

Un moderato decadimento delle proprietà del calcestruzzo armato è fisiologico e deve essere accettato. Tuttavia, in particolari condizioni, esso si manifesta in tempi così brevi ed in maniera talmente estesa da determinare una perdita di funzionalità della struttura o, addirittura, una riduzione sensibile della sua resistenza. In questi casi il decadimento delle proprietà del calcestruzzo armato assume una connotazione patologica e si parla dunque di *degrado*.

Il degrado del calcestruzzo armato è principalmente causato da fenomeni fisici e chimici che comportano la corrosione delle armature metalliche o il progressivo decadimento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. A queste cause di

degrado debbono inoltre aggiungersi quelle legate ad eventi eccezionali quali urti, incendi e sisma.

Classe di esposizione ambientale	Descrizione dell'ambiente di esposizione	Esempi di condizioni ambientali	UNI 9858	A/C massimo	Contenuto minimo di cemento kg/m <sup>3</sup>	Rck minima N/mm <sup>2</sup>	Contenuto minimo di aria %	Copriferro minimo Mm
<b>1 Assenza di rischio di corrosione o attacco</b>								
X0	Molto secco	Cis per interni di edifici con umidità dell'aria molto bassa	1	-		C12/15	-	15
<b>2 Corrosione delle armature per effetto della carbonatazione</b>								
XC1	Secco o permanentemente bagnato	Cis per interni di edifici con umidità relativa bassa o immerso in acqua	2a	0,65	260	C20/25	-	20
XC2	Bagnato, raramente secco	Superfici in cis a contatto con acqua per lungo tempo es. fondazioni	2a	0,60	280	C25/30	-	20
XC3	Umidità moderata	Cis per interni con umidità relativa moderata o alta e cis all'esterno protetto dalla pioggia	5a	0,55	280	C30/37	-	30
XC4	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Superfici in cis a contatto con l'acqua, non nella classe XC2.	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
<b>3 Corrosione delle armature per effetto dei cloruri esclusi quelli provenienti dall'acqua di mare</b>								
XD1	Umidità moderata	Superfici in cis esposte a nebbia salina	5a	0,55	300*	C30/37	-	30
XD2	Bagnato, raramente asciutto	Piscine: cis esposto ad acque industriali contenenti cloruri	4a, 5b	0,55	300	C30/37	-	30
XD3	Ciclicamente bagnato ed asciutto	Parti di ponti esposte a spruzzi contenenti cloruri, pavimentazioni di parcheggi	5c	0,45	320	C35/45	-	40
<b>4 Corrosione delle armature indotta da cloruri presenti nell'acqua di mare</b>								
XS1	Esposto alla nebbia salina ma non all'acqua di mare	Strutture prossime o sulla costa	4a, 5b	0,50	300	C30/37	-	30
XS2	Permanentemente sommerso	Parti di strutture marine	5c	0,45	320	C35/45	-	40
XS3	Zone esposte alle onde o alla marea	Parti di strutture marine	5c	0,45	340	C35/45	-	40
<b>5 Attacco dei cicli di gelo/disgelo con o senza sali disgelanti</b>								
XF1	Moderata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cis esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,55	300	C30/37	-	30
XF2	Moderata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti	Superfici verticali in cis di strutture stradali esposte al gelo e nebbia dei sali disgelanti	3, 4b	0,55	300	C25/30	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF3	Elevata saturazione d'acqua in assenza di sali disgelanti	Superfici orizzontali in cis esposte alla pioggia e al gelo	2b	0,50	320	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	30
XF4	Elevata saturazione d'acqua in presenza di sali disgelanti o acqua di mare	Strade e impalcati da ponte esposti ai sali disgelanti. Superfici in cis esposte direttamente a nebbia contenente sali disgelanti	3, 4b	0,45	340	C30/37	4,0 e aggregati resistenti al gelo/disgelo	40
<b>6 Attacco chimico</b>								
XA1	Ambiente chimico debolmente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5a	0,55	300	C30/37	-	30
XA2	Ambiente chimico moderatamente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	4°, 5b	0,50	320 cemento resistente ai solfati	C30/37	-	30
XA3	Ambiente chimico fortemente aggressivo (vd. prospetto 2 della EN 206)	-	5c	0,45	360 cemento resistente ai solfati	C35/45	-	40

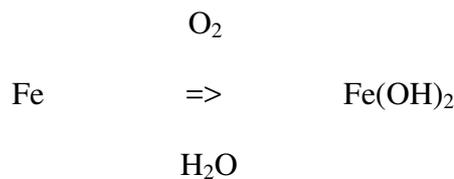
**Tab. 6.2** Classi di esposizione ambientale secondo la UNI EN 206-1

Nei successivi paragrafi vengono esaminati i fenomeni che più comunemente possono determinare il degrado di una struttura in calcestruzzo armato

distinguendoli in due categorie: quelli che provocano la corrosione delle armature metalliche (corrosione da carbonatazione e da cloruri) e quelli che comportano il deterioramento del calcestruzzo (attacco solfatico e cicli di gelo e disgelo). Per ciascuno dei casi analizzati vengono illustrati i meccanismi che determinano il degrado del calcestruzzo armato, nonché le condizioni e i parametri che influiscono sui tempi in cui esso si manifesta.

### 6.3.1 Corrosione dell'armatura

La corrosione dell'armatura è determinata dalla reazione chimica del ferro (Fe), che costituisce il componente prevalente dell'acciaio, con l'ossigeno (O<sub>2</sub>) e l'acqua (H<sub>2</sub>O) contenuti nell'aria. La reazione determina la formazione di idrossidi di ferro ovvero della ruggine:



La corrosione interessa inizialmente la superficie esterna dell'armatura. Tuttavia, l'ossigeno e l'acqua possono superare il primo strato di ruggine, che è porosa, ed entrare in contatto con la parte interna.

La corrosione dell'armatura ha effetti deleteri sulla resistenza degli elementi in cemento armato. La trasformazione dell'acciaio in ruggine, ovvero in un materiale incoerente ed incapace di aderire alla superficie del metallo, comporta una riduzione della sezione resistente delle barre. Inoltre, poiché tale trasformazione avviene con aumento di volume (la ruggine possiede un volume specifico circa 6-7 volte maggiore di quello dell'acciaio) si verifica la fessurazione e la successiva espulsione del calcestruzzo di ricoprimento. Ciò determina una riduzione della sezione resistente in calcestruzzo nonché la perdita di aderenza delle armature.

La reazione chimica che porta alla graduale trasformazione dell'acciaio in ruggine può avvenire solo se l'armatura metallica si trova immersa in un ambiente con pH inferiore ad 11. In caso contrario, il ferro reagisce con l'ossigeno formando una pellicola di ossido di ferro (FeO) stabile, impermeabile ed aderente alla

superficie metallica. La pellicola impedisce il contatto dell'armatura con l'ossigeno e l'acqua contenuti nell'aria scongiurando di fatto il pericolo della corrosione. In condizioni normali le armature di una struttura in calcestruzzo armato si trovano in questa situazione, detta di *passività*. Infatti, durante il processo di idratazione del cemento, nel calcestruzzo si sviluppa idrossido di calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  che rende l'ambiente fortemente basico (pH maggiore di 13). In questo ambiente, l'armatura è protetta dalla pellicola passivante di ossido di ferro e non subisce corrosione. Tale condizione, ottimale per la buona conservazione dell'armatura, permane fino a quando l'integrità della pellicola passivante non è compromessa. Ciò può avvenire tipicamente a causa di due fenomeni: la carbonatazione del calcestruzzo di ricoprimento e la penetrazione dei cloruri.

La carbonatazione del calcestruzzo costituisce un fenomeno piuttosto centrale nel presente lavoro, per questo motivo verrà esposto in maniera estesa nel capitolo 7 “*Corrosione delle armature per carbonatazione*”, al quale si rimanda per spiegazioni approfondite sul tema.

#### Corrosione promossa da cloruri

L'azione protettiva della pellicola passivante può venire meno, anche se il pH del calcestruzzo si mantiene elevato, a causa del contatto con lo ione cloro Cl. In particolare, quando il tenore di cloruro nel calcestruzzo diventa superiore a circa lo 0,2% rispetto al peso di cemento, la pellicola protettiva diventa porosa consentendo il passaggio di acqua ed ossigeno. In questi casi il metallo subisce una corrosione localizzata che determina, in tempi brevi, una pericolosa riduzione della sezione dell'armatura. Anche la presenza dello ione cloruro, al pari della carbonatazione, non è causa diretta della corrosione ma semplicemente una circostanza che crea le condizioni affinché la corrosione possa avere luogo.

Lo ione cloruro si trova in soluzione nell'acqua di mare, nei sali disgelanti utilizzati nelle regioni fredde durante il periodo invernale, in alcune acque industriali o negli aggregati qualora il calcestruzzo venga confezionato impropriamente con aggregati di mare.

Sperimentalmente, lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro può essere determinato spruzzando sul calcestruzzo una soluzione di fluoresceina e nitrato d'argento: il calcestruzzo assume il colore rosa nella zona penetrata dal cloruro ed il colore nero nella zona non ancora penetrata dal cloruro.

Il tempo necessario al cloruro per penetrare l'intero ricoprimento in calcestruzzo e raggiungere l'armatura, aumenta adottando sia valori elevati dello spessore del ricoprimento, perché aumenta la lunghezza del percorso del cloruro, che valori bassi del rapporto a/c, perché così si ottengono calcestruzzi con porosità capillare modesta. Dunque gli accorgimenti che permettono di ottenere una buona protezione dalla corrosione promossa da cloruri sono analoghi a quelli che proteggono l'armatura dalla corrosione promossa da carbonatazione, anche se in presenza di cloruri è generalmente necessario adottare valori maggiori del ricoprimento e valori più bassi del rapporto a/c.

### 6.3.2 Attacco solfatico

L'attacco solfatico si verifica quando lo ione solfato  $\text{SO}_4$  penetra all'interno del calcestruzzo e reagisce con alcuni componenti della matrice cementizia: la calce, gli alluminati di calce idrati e, in taluni casi, i silicati di calcio idrati. Il solfato si trova in alcuni terreni ed acque naturali (terreni ed acque aggressive) e può essere trasportato dall'acqua all'interno del calcestruzzo attraverso i pori capillari. In questo caso si parla di attacco solfatico esterno. Tuttavia, il solfato può essere già presente all'interno del calcestruzzo, ad esempio nell'aggregato. In questo caso si parla di attacco solfatico interno.

All'interno del calcestruzzo lo ione solfato reagisce con la calce e l'acqua formando gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Successivamente il gesso reagisce con gli alluminati di calcio idrati e l'acqua per formare ettringite. Entrambe le reazioni che portano alla formazione del gesso e dell'ettringite avvengono con aumento di volume. Poiché queste reazioni si verificano quando il calcestruzzo è ormai indurito nascono delle tensioni interne, molto elevate, che determinano lo sgretolamento dell'elemento strutturale a partire dalla parte corticale.

La presenza dello ione solfato all'interno del calcestruzzo produce effetti ancora più dirompenti quando si verifica in concomitanza a particolari condizioni: temperatura inferiore a 10°C, umidità relativa superiore al 95% e presenza di anidrite carbonica. In questo caso lo ione solfato e l'anidrite carbonica reagiscono con la calce formando rispettivamente gesso e carbonato di calcio. Questi composti reagiscono quindi con i silicati di calcio idrati formando thaumasite. Anche questa reazione avviene con aumento di volume e determina tensioni interne in grado di danneggiare il calcestruzzo. L'effetto è ancora più devastante di quello che si osserva nel caso di formazione dell'ettringite perché questa seconda reazione determina una perdita dei silicati di calcio idrati, ovvero di quei composti a cui è prevalentemente dovuta la resistenza meccanica della pasta cementizia. La formazione di thaumasite disgrega quindi il calcestruzzo e lo trasforma in un materiale incoerente.

La precauzione più efficace da prendere per contrastare l'attacco solfatico esterno consiste nell'impiegare calcestruzzi confezionati con un basso rapporto a/c e dunque poco permeabili all'acqua che trasporta i solfati. Per evitare l'attacco solfatico interno bisogna fondamentalmente evitare di confezionare il calcestruzzo con aggregati che contengono solfati.

### **6.3.3 Cicli di gelo e disgelo**

il calcestruzzo può subire danni a seguito di cicli di gelo e disgelo quando il grado di saturazione dei suoi pori, dato dal rapporto tra il volume di acqua contenuta e volume dei pori, è superiore al grado di saturazione critico pari al 91,7%. In questo caso, infatti, l'aumento di volume dell'acqua durante la trasformazione in ghiaccio (circa il 9%) comporta l'insorgere di tensioni interne molto forti in grado di fessurare il calcestruzzo.

Quando l'elemento strutturale viene a contatto con l'acqua, ad esempio in occasione di una precipitazione meteorica, la saturazione dei pori si raggiunge solo nella zona corticale. Se alla saturazione dei pori segue un abbassamento di temperatura in grado di trasformare l'acqua in ghiaccio, la zona corticale prima si fessura e, per successivi cicli di gelo e disgelo, si sgretola. Attraverso questo

meccanismo il calcestruzzo dello strato esterno dell'elemento viene progressivamente sbriciolato fino ad interessare uno spessore significativo.

Gli effetti dei cicli di gelo e disgelo possono essere mitigati adottando un basso valore del rapporto a/c per confezionare il calcestruzzo ed inglobando bolle d'aria ad elevato diametro (100-300  $\mu\text{m}$ ) nella matrice cementizia mediante additivi aeranti. L'adozione di un basso rapporto a/c riduce la quantità d'acqua che non riuscendo a reagire con il cemento rimane intrappolata nel calcestruzzo nonché la quantità e la dimensione dei pori. La presenza di aria nel calcestruzzo aumenta la sua resistenza al gelo ma, purtroppo, ne riduce anche la resistenza meccanica. Un'ulteriore precauzione per contrastare gli effetti dei cicli di gelo e disgelo consiste nell'impiego di aggregati non gelivi.

## Capitolo 7

### CORROSIONE DELLE ARMATURE PER CARBONATAZIONE

#### 7.1 Descrizione delle fasi del fenomeno corrosivo [8]

Nella vita delle strutture in calcestruzzo armato si possono individuare due fasi distinte e successive: la *fase d'innescò*, nella quale si ha la penetrazione dell'anidride carbonica all'interno del materiale fino a raggiungere la depassivazione del ferro, e la *fase di propagazione* (fig. 13).

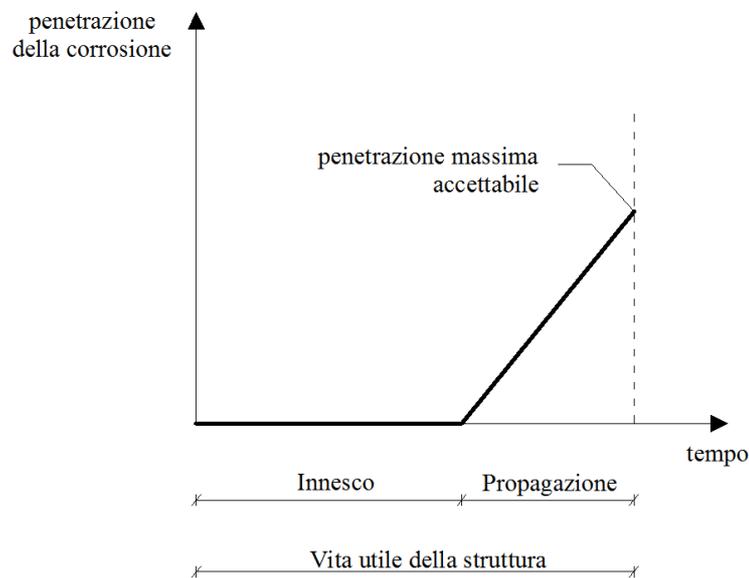
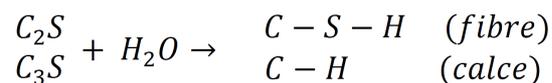


Fig. 13 - Rappresentazione della fase di innesco e di propagazione

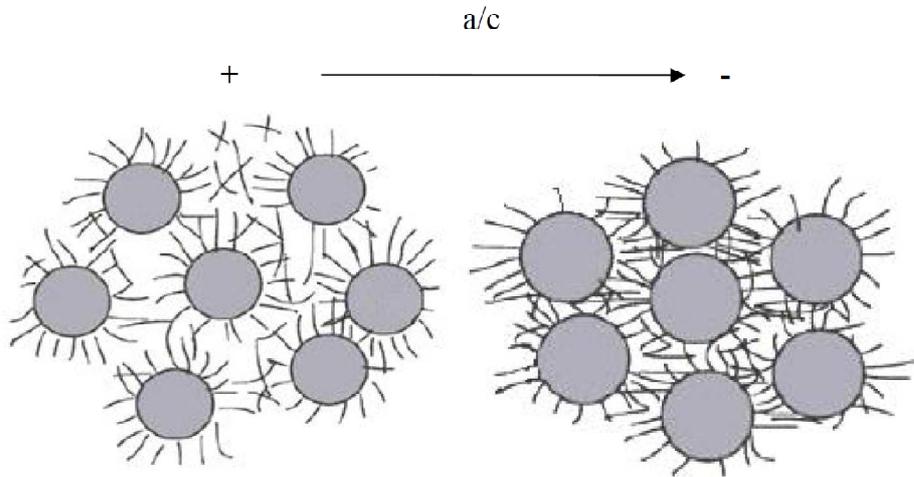
#### Fase di innesco

Come mostrato precedentemente nel paragrafo 461.1, facendo reagire il cemento con l'acqua d'impasto si ottengono principalmente due prodotti: le fibre e la calce.



Le fibre risultano tanto più intrecciate e legate tra loro quanto più è minore il rapporto acqua/cemento, come si può notare in (fig. 14); infatti, diminuendo il

rapporto a/c, le fibre sono più vicine tra loro e, quindi, la struttura è meno porosa e più resistente.



**Fig. 14** - Schema delle fibre all'interno del calcestruzzo, al variare del rapporto a/c

Le fibre sono le responsabili della resistenza del calcestruzzo mentre la calce contribuisce nel proteggere i ferri dalla corrosione, quando si hanno valori del pH tipicamente compresi tra 13 e 13,5, creando uno strato protettivo di ossidi sul ferro; questa condizione, definita di passività, è favorevole alla buona conservazione delle armature in quanto, la presenza del film passivante sulla barra, rallenta nettamente la velocità di propagazione della corrosione.

Tuttavia, durante la vita di servizio, il calcestruzzo si può depassivare, ovvero si può distruggere il film protettivo a seguito di due possibili processi:

- Carbonatazione
- Ingresso dei cloruri

La seconda condizione è stata già esaminata nel capitolo precedente (par. 6.3.1), si procede di seguito ad esaminare la prima.

L'anidride carbonica proveniente dall'esterno penetra, attraverso i pori, all'interno del calcestruzzo, abbattendo il pH della soluzione presente nei pori dal valore iniziale di 13 ad un valore inferiore a 9 e trasformando la calce in calcare:

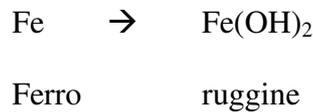


Il calcare a dispetto della calce non protegge più i ferri i quali, a contatto con ossigeno ed umidità, si corrodono.

### Fase di propagazione

I fenomeni corrosivi risultano spesso segnalati dalla comparsa, sulla superficie esterna di calcestruzzo, di macchie di ruggine oppure da danneggiamenti del copriferro provocati dall'azione espansiva dei prodotti di corrosione.

Una volta raggiunta la depassivazione, infatti, si produce corrosione ovvero la trasformazione dell'acciaio in ruggine, ovvero ossidi ferrici, dalla consistenza porosa, incoerente e voluminosa.

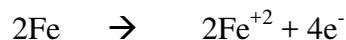


Tale fenomeno viene messo in moto solo se persistono contemporaneamente due condizioni: la presenza sulla superficie dell'armatura di ossigeno e di acqua.

Nel dettaglio la corrosione è un processo elettrochimico che comporta la formazione di una cella elettrolitica nel calcestruzzo armato contenente: un anodo e un catodo (sulla superficie dell'acciaio), un conduttore (l'acciaio) e un elettrolita (la soluzione acquosa presente nei pori).

Le reazioni elettrochimiche sono essenzialmente due:

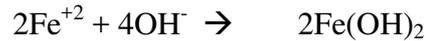
- Reazione anodica: Nell'anodo il ferro si ossida e libera elettroni



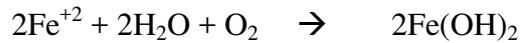
- Reazione catodica: Gli elettroni liberati vengono trasportati attraverso l'armatura nel catodo dove reagiscono con l'acqua e ossigeno, riducendo quest'ultimo



Gli ioni OH<sup>-</sup> generati si dirigono verso l'anodo attraverso l'elettrolita alimentando la formazione di ruggine, Fe(OH)<sub>2</sub>:



Complessivamente il processo è il seguente:



## 7.2 Avanzamento della carbonatazione [9]

La reazione di carbonatazione inizia dalla superficie esterna del calcestruzzo fino ad interessare le regioni più interne.

L'andamento della penetrazione della carbonatazione nel tempo segue una legge del tipo:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

dove:  $s$  è lo spessore dello strato carbonatato e  $t$  il tempo.

In calcestruzzi compatti, la diminuzione nel tempo della velocità di carbonatazione è più marcata, per cui  $n > 2$ . In calcestruzzi molto impervi la velocità tende nel tempo praticamente ad annullarsi.

In calcestruzzi porosi l'esponente  $n$  vale circa 2 e quindi si ottiene un andamento parabolico:

$$s = K \cdot \sqrt{t}$$

Il coefficiente  $K$ , che esprime la velocità con cui avanza la carbonatazione, dipende sia da fattori ambientali (umidità, temperatura, contenuto di anidride carbonica) sia da fattori legati al calcestruzzo stesso (alcalinità, porosità). Un valore indicativo di  $K$  per calcestruzzi compatti è  $K=1$  (ovvero  $s=8$  mm in 15 anni) mentre per quelli porosi può raggiungere valori fino a 10 ( $s=40$  mm in 15 anni).

Oltre alla formula parabolica, sono state proposte altre formule empiriche che prendono direttamente in conto i principali fattori che regolano la carbonatazione: sia ambientali (umidità, temperatura) che relativi al calcestruzzo (tipo di cemento, rapporto a/c, stagionatura). Ad esempio la relazione proposta da Parrott (1987) è la seguente:

$$D = a \cdot k^{0.4} \cdot t^n - c^{0.5}$$

in cui  $k$  è la permeabilità ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ), dipendente dall'umidità relativa,  $c$  è il contenuto di ossido di calcio nel copriferro,  $a = 64$ ,  $n$  vale 0.5 per ambienti interni, mentre decresce all'aumentare dell'umidità relativa.

Una formulazione analitica più complessa, che tiene conto dei flussi di calore, di acqua e di  $\text{CO}_2$  all'interno del calcestruzzo, si può trovare in (Saetta et al., 2004) in cui si assume comunque che i coefficienti di diffusione dei gas all'interno del calcestruzzo siano noti da prove sperimentali. Viene evidenziato come i parametri che maggiormente influenzano il fenomeno siano proprio i coefficienti di diffusione dell'ossigeno e dell'anidride carbonica. Entrambi questi parametri possono essere collegati alla porosità del calcestruzzo e quindi al rapporto  $a/c$  ed al tipo di cemento. I coefficienti di diffusione decrescono al crescere dell'umidità relativa.

Inoltre, per applicare un modello di questo tipo, si deve conoscere la concentrazione di  $\text{CO}_2$  nell'ambiente ( Tabella 7.2).

Ambiente	Concentrazione di $\text{CO}_2$ (% in vol.)
Aperta campagna	0.015
Centro città	0.036
Zona industriale	0.045
Stalla ben aerata	0.046
Stalla	0.075

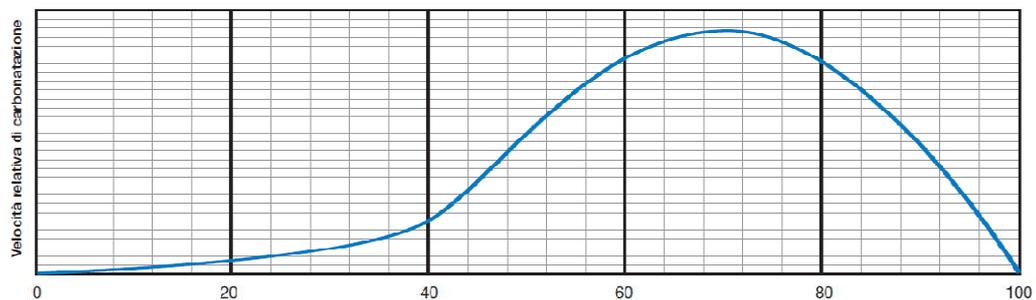
Tabella 7.2: valori di concentrazione di  $\text{CO}_2$  misurati in diversi ambienti

Nel seguito si effettua una breve disamina sui principali fattori che regolano la carbonatazione.

### Umidità relativa

La velocità di penetrazione della carbonatazione varia con l'umidità del calcestruzzo per due motivi. Anzitutto il trasporto dell'anidride carbonica all'interno di questo materiale ha luogo facilmente attraverso i pori riempiti d'aria, cioè in fase gassosa, mentre avviene molto lentamente in quelli riempiti d'acqua (il rapporto tra le velocità di diffusione nelle due condizioni è di circa  $10^4$ ). Di

conseguenza la velocità di diffusione dell'anidride carbonica diminuisce al crescere dell'umidità relativa (più marcatamente al di sopra dell'80%) fino praticamente ad annullarsi in calcestruzzo saturo. Questo significa che quando il calcestruzzo è bagnato, la penetrazione della  $CO_2$  cessa. D'altra parte la reazione di carbonatazione vera e propria si produce soltanto in presenza d'acqua per cui, di fatto, per umidità inferiori al 40% non avviene con velocità apprezzabile. Per questi due opposti motivi, l'intervallo di umidità relativa più pericoloso per la carbonatazione è compreso tra 50 e 80%.



**Fig. 15** - Velocità di carbonatazione rispetto alla % di umidità relativa

Il valore di  $K$ , quindi, può cambiare nel tempo (ad esempio perché la struttura è soggetta a bagnamenti e asciugamenti), da una zona all'altra della costruzione (ad esempio, passando da una zona riparata dalla pioggia a una esposta o da una zona in corrispondenza alle riprese di getto a una più lontana, la velocità di penetrazione può risultare notevolmente inferiore), passando dagli strati più esterni a quelli più interni del calcestruzzo.

Si sottolinea l'estrema importanza, nelle situazioni concrete, del microclima, cioè delle condizioni di umidità e temperatura che si creano nelle diverse parti della struttura, per effetto anche della geometria della struttura stessa. I parametri importanti sono il tempo in cui la struttura resta bagnata, ma anche la frequenza e la durata dei cicli di bagnamento - asciugamento.

### Concentrazione dell'anidride carbonica

Al crescere del contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera, la velocità di penetrazione del fronte carbonatato aumenta.

### Temperatura

L'aumento della temperatura, a parità di altre condizioni e in particolare dell'umidità che in genere è il parametro più importante, fa crescere la velocità di penetrazione.

### Alcalinità del calcestruzzo

La capacità di un calcestruzzo di fissare la CO<sub>2</sub> è proporzionale all'alcalinità presente nella sua pasta cementizia e quindi dipende dalla quantità di cemento utilizzato.

L'alcalinità dipende anche dal tipo di cemento. Nel cemento portland circa il 64% del peso di cemento è costituito da ossido di calcio (CaO, solo in piccola parte in soluzione e per il resto presente all'interno dei prodotti di idratazione) e circa 0,5-1,5% da Na<sub>2</sub>O e da K<sub>2</sub>O (prevalentemente in soluzione come NaOH e KOH). Nel caso di cementi d'alto forno con il 70% di loppa, il contenuto di CaO scende a circa il 44%. Per cementi con aggiunte pozzolaniche, la quantità di CaO è intermedia tra questi due valori.

### Rapporto a/c, stagionatura

La porosità del calcestruzzo ha una notevole influenza sulla velocità di penetrazione della carbonatazione. La diminuzione del rapporto a/c, determinando una diminuzione della porosità capillare della pasta cementizia idrata, consente di rallentare la penetrazione della carbonatazione. Per ottenere questi vantaggi, tuttavia, il calcestruzzo deve essere stagionato adeguatamente.

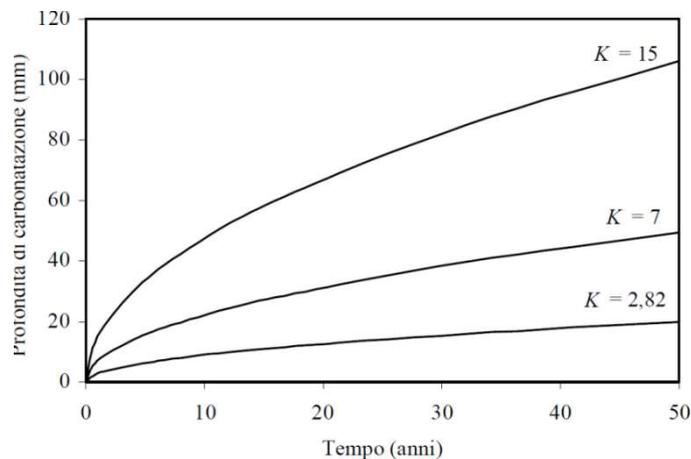


Fig. 16 - Profondità del fronte carbonatato, calcolata con la formula  $s=K \cdot t^{1/2}$ , in funzione del tempo e di K

Dalla Fig. 16, che riporta l'andamento nel tempo dello spessore carbonatato per diversi valori di K, si può vedere come il fronte carbonatato risulti inferiore a 20 mm (spessore minimo di copriferro in molte strutture) dopo 50 anni, solo se K è inferiore a 2,82. Questo significa che, in zone riparate dalla pioggia, 2 cm di copriferro portano a un periodo di innesco superiore a 50 anni solo con calcestruzzi molto compatti.

### 7.3 Avanzamento della corrosione [9]

Una volta che il fronte carbonatato ha raggiunto le armature, depassivandole, la corrosione può aver luogo se sono presenti acqua e ossigeno. Se si escludono solo le condizioni di completa e permanente saturazione del calcestruzzo, l'ossigeno è in grado di raggiungere la superficie delle armature in quantità sufficienti per permettere lo svolgimento del processo corrosivo. In realtà la velocità di corrosione è determinata principalmente dalla resistività del calcestruzzo. Il contenuto d'acqua nel calcestruzzo è il parametro più importante, nel determinarne la resistività, mentre hanno un ruolo secondario (anche se rimangono significative nell'intervallo di umidità relativa compreso fra 60 e 90%) le caratteristiche del calcestruzzo e quindi i fattori che le determinano (tipo di cemento, rapporto a/c, maturazione, ecc.) che sono invece importanti nel determinare la velocità di penetrazione della carbonatazione e quindi il tempo di innesco.

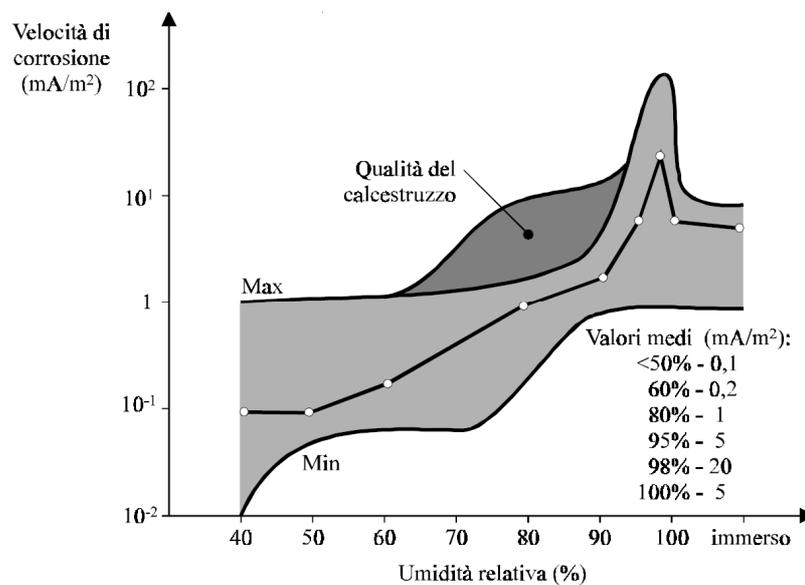


Fig. 17 - Valori massimi, minimi e medi della velocità di corrosione al variare dell'U.R.

Poiché, almeno con calcestruzzi di buona qualità, la velocità di corrosione risulta trascurabile per umidità relative minori di 80% spesso si introduce il fattore tempo di bagnato ( $\omega$ , cioè la frazione di tempo in cui l'umidità relativa risulta superiore al 80%) per esprimere la penetrazione dell'attacco ( $p$ ) nel tempo  $t$ . Si suppone cioè che la corrosione propaghi solo durante il tempo di bagnato. Inoltre si è osservato che la velocità di corrosione tende a diminuire nel tempo. Infatti i prodotti di corrosione, ancorché non in grado di passivare le armature, interferiscono con il processo corrosivo riducendone la velocità.

In Fig. 17 sono riportate le velocità di corrosione per carbonatazione in funzione dell'umidità relativa. Si può notare come, solo in vicinanza delle condizioni di saturazione sia possibile raggiungere velocità massime di corrosione dell'ordine di 100-200  $\mu\text{m}/\text{anno}$ , mentre i valori massimi tipici per molte delle condizioni ambientali riscontrabili in pratica con l'esposizione agli agenti atmosferici è compresa tra 5 e 50  $\mu\text{m}/\text{anno}$ .

Dai valori riportati risulta evidente come la velocità di corrosione da carbonatazione possa ritenersi trascurabile, se non in condizioni di elevata umidità o in presenza di condense alla superficie del calcestruzzo di durata e frequenza tali da far variare il tenore d'acqua a livello delle armature. Ad esempio, in strutture esposte in ambienti interni o comunque riparati dalla pioggia, il fatto che il calcestruzzo a livello delle armature sia carbonatato raramente costituisce un problema perché eventuali momentanee presenze di condensa o di bagnamenti alla superficie del calcestruzzo non si traducono in aumenti del tenore di acqua a livello delle armature. Ovviamente se, per qualsiasi motivo, ad esempio perdita di una tubazione o infiltrazioni d'acqua, dovesse penetrare dell'acqua nel calcestruzzo carbonatato, la velocità di corrosione non sarebbe più trascurabile.

Siccome nelle condizioni in cui la velocità di carbonatazione è massima (UR 50-80%), la velocità di penetrazione della corrosione è modesta e viceversa, le situazioni peggiori sono quelle caratterizzate da alternanza di condizioni di umidità bassa con altre ad alta umidità, come succede nel caso di calcestruzzo esposto alla pioggia.

#### 7.4 Effetti della corrosione sul calcestruzzo [8]

Anche se il danno diretto derivante dalla perdita di sezione di armatura è il più rilevante, soprattutto se le barre sono soggette a livelli di tensione elevati, nel caso di corrosione uniforme, con bassa velocità di penetrazione, può diventare rilevante il degrado indiretto subito dal calcestruzzo.

Molti dei problemi legati alla corrosione non sono dovuti alla perdita di sezione delle barre di armatura ma alla formazione dei prodotti di ossidazione: questo porta allo sviluppo di fessure longitudinali ed al distacco del copriferro. Il più comune problema causato dalla corrosione è lo spalling del copriferro, con evidenti problemi di sicurezza per gli utenti delle strutture quando si verifica il distacco di parti di solette o di travi di copertura.

Esistono situazioni molto particolari, in cui i prodotti di corrosione riescono a diffondere nei pori, senza dar luogo al distacco del copriferro, mentre comunque la corrosione continua ad avanzare.

A questo proposito è interessante fare una considerazione sul fatto che la fessurazione longitudinale ed il distacco del copriferro costituiscono sì un grave pericolo per la sicurezza degli utenti, ma sono anche il segno inequivocabile del processo corrosivo in atto.

Una volta che le fessure longitudinali si sono formate, chiaramente costituiscono una via di accesso facilitata per gli agenti esterni ( cloruri, ossigeno, acqua) favorendo lo sviluppo della corrosione della barra.

I prodotti della corrosione del ferro (Figura 18 e Tabella 7.4) occupano un volume diverse volte maggiore rispetto a quello del materiale vergine, quindi il loro accumulo attorno alla barra è causa di tensioni nel calcestruzzo, che portano alla fessurazione ed al successivo distacco del copriferro.

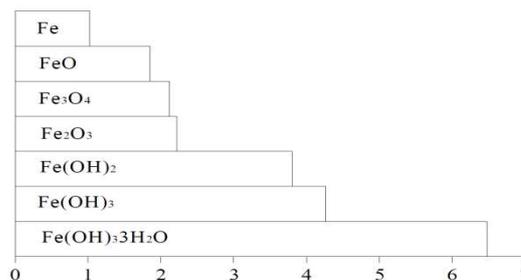


Fig. 18 - Volumi relativi del ferro metallico ed i suoi prodotti di corrosione.

Prodotto di corrosione	Rapporto volumetrico relativo	Peso molecolare	Densità ( $10^3 \text{kg/m}^3$ )	Volume specifico ( $\text{g/cm}^3$ )	Volume specifico relativo
Fe	1	56	7.85	0.127	1
FeO	1.7	72	5.93	0.169	1.32
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2	232	16.24	0.062	0.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.1	160	10.67	0.094	0.74
Fe(OH) <sub>2</sub>	3.6	90	3.5	0.286	2.24
Fe(OH) <sub>3</sub>	4	107	3.75	0.267	2.09
Fe(OH) <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	6.2	161	3.64	0.275	2.16

**Tab. 7.4.** - Caratteristiche dei prodotti di corrosione

Le fessure sono prevalentemente longitudinali, parallele alle barre di armatura (Figura 19). L'effetto protettivo del copriferro viene così drasticamente ridotto, causando un aumento dell'ingresso delle specie aggressive e della velocità di corrosione.



**Fig. 19** - Fessurazione longitudinale e distacco del copriferro in una trave soggetta a corrosione

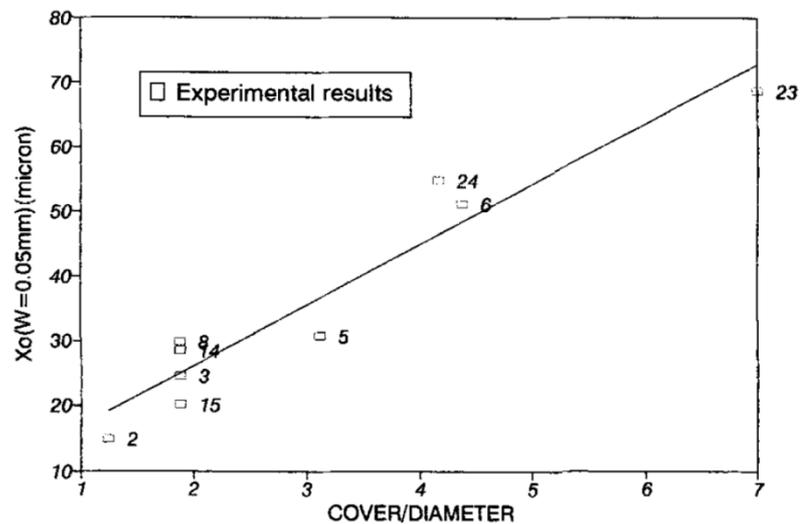
La conseguenza della fessurazione del copriferro è anche una riduzione della resistenza a compressione del calcestruzzo oltre che dell'aderenza tra acciaio e calcestruzzo.

La disposizione delle barre longitudinali determina le modalità con cui le fessure si sviluppano fino a raggiungere aperture tali da consentire il distacco della parte di calcestruzzo delimitata dalle fessure stesse.

I fattori che influenzano la fessurazione del copriferro sono principalmente il rapporto  $c/d$  (copriferro/diametro della barra) e la qualità del calcestruzzo: chiaramente per un basso rapporto  $c/d$  i prodotti di corrosione tenderanno immediatamente a provocare la fessurazione del copriferro, mentre invece con un

rapporto c/d elevato la fessurazione sarà ritardata. Un calcestruzzo con un più alto rapporto a/c, più poroso, permette ai prodotti di corrosione di penetrare nei vuoti riducendo la fessurazione.

Tra gli studi sperimentali condotti per valutare l'influenza del rapporto tra copriferro e diametro sul livello di corrosione necessario per avere la fessurazione (visibile in superficie) si comprende come (fig. 19), anche con un rapporto c/d molto elevato, il livello di corrosione necessario a far comparire le fessure in superficie sia molto modesto ( tale cioè da non compromettere l'integrità della barra). Si tenga presente che l'ipotesi adottata per calcolare la profondità della corrosione nella fig. 20 è che la corrosione sia di tipo uniforme, e che la dimensione della fessura visibile è di 0.05 mm.



**Fig. 20** - Relazione tra la penetrazione dell'attacco che produce la prima fessurazione visibile (0.05 mm) ed il rapporto (c/d) (da Alonso, 1997)

È da notare, infine, che entro certi limiti la presenza di fessure nel calcestruzzo è da considerarsi fisiologica. Infatti, si osserva che se le dimensioni delle fessure sono modeste (ad esempio se la loro apertura è inferiore a circa 0,3 mm), dopo l'innesco dell'attacco corrosivo è possibile che i prodotti di corrosione riescano dapprima a sigillare le fessure, almeno nella zona più vicina alle armature, e poi anche a ripristinare il film protettivo. Ad esempio, nel caso in cui la corrosione sia causata dalla carbonatazione, la ripassivazione avviene se l'alcalinità che si diffonde dal calcestruzzo circostante riporta il pH dei prodotti di corrosione (o meglio della

soluzione presente nei pori di questi prodotti) a valori superiori a 11,5 conferendo loro caratteristiche passivanti.

## **Capitolo 8**

### **CARATTERISTICHE E DEGRADO**

### **DEGLI ELEMENTI DI RIVESTIMENTO**

#### **8.1 Introduzione**

Come accennato, ai fini del presente lavoro di ricerca, l'elemento considerato "di rivestimento" acquisisce una connotazione lievemente diversa dall'accezione comune. Per meglio specificare, si può ribadire che ci si riferisce ad una specifica configurazione che si viene a generare, in corrispondenza di un elemento strutturale in calcestruzzo, a seguito di un intervento di blindatura dello stesso con calcestruzzo autocompattante. È chiaro che la "nuova configurazione" consente di definire rivestimento qualsiasi elemento faccia da elemento di protezione esterna del calcestruzzo originario. Ne deriva che nel novero di tali elementi si possono sicuramente identificare il calcestruzzo autocompattante, l'intonaco, e la pittura di finitura.

#### **8.2 Il calcestruzzo autocompattante**

##### **8.2.1 Normativa di riferimento**

Le nuove norme si dividono in due gruppi principali:

- Il primo comprende la norma UNI 11040:2003, complementare alla UNI 206-1, e riguarda la definizione, i materiali, la formulazione, la produzione e il controllo della qualità del calcestruzzo SCC;
- Il secondo gruppo si riferisce alle prove sul calcestruzzo autocompattante fresco e comprende le norme UNI 110441, 11042, 11043, 11044, 11045:2003, ognuna delle quali tratta un preciso metodo di verifica.

Nel primo gruppo di norme, la UNI elenca precisi termini e definizioni sul calcestruzzo SCC tra cui la capacità di riempimento, la capacità di passare attraverso gli ostacoli, la resistenza alla segregazione, ecc. Il calcestruzzo autocompattante SCC viene definito "*calcestruzzo omogeneo che viene messo in*

*opera e compattato senza intervento di mezzi esterni(vibrazione) ma per effetto della sola forza gravitazionale. Il calcestruzzo autocompattante, oltre a soddisfare i requisiti di classe di resistenza e di esposizione definiti nella UNI EN 206-1, ha la specifica proprietà, allo stato fresco, di un'elevata fluidità con assenza di segregazione”.*

Tra le definizioni, si evidenziano quelle di:

- “tempo di spandimento”, tempo necessario a raggiungere il diametro di 500 mm dopo l’efflusso dell’imbuto;
- “tempo di lavorabilità”, tempo necessario per ridurre la consistenza del calcestruzzo fresco dal valore iniziale a 600mm;
- “finissimo”, materiale minerale ( somma di cemento, filler, aggiunte, finissimi dell’aggregato)passante allo staccio da 0,125 mm.

In riferimento alle aggiunte minerali, la norma evidenzia l’uso di due tipi di aggiunte:

1. Tipo I: filler conformi alla EN 12620, pigmenti conformi alla UNI EN 12878;
2. Tipo II: ceneri volanti conformi alla UNI EN 450, fumi di silice conformi alla EN 13263-1;

sottolineando l’importanza che ogni finitura di filler sia corredata di documentazione circa la finezza in termini di superficie specifica di Blaine.

Per quel che riguarda l’aggiunta di additivi, in particolare i modificatori della viscosità, deve essere garantita la compatibilità con gli impasti cementizi nei riguardi dello sviluppo della resistenza e della durabilità.

Il secondo gruppo di norme definisce le prove sul calcestruzzo autocompattante fresco, identificando i criteri e le modalità esecutive con i relativi limiti di accettazione, che sono riportati per praticità in una tabella nella norma UNI 11040.

### **8.2.2 Durabilità del calcestruzzo autocompattante**

Gli SCC possono consentire di ridurre significativamente i tempi di esecuzione dei getti, compensando così il loro maggiore costo di produzione rispetto agli NCC. Si

possono inoltre ridurre sia i rischi per la salute dei lavoratori sia i livelli di rumore legati all'assenza di operazioni di vibrazione della miscela.

Per il progettista, la prescrizione di un calcestruzzo autocompattante può consentire di aumentare l'affidabilità della messa in opera, in quanto riduce i rischi conseguenti ad una non corretta costipazione. Inoltre, per ottenere il requisito di autocompattabilità, è necessario un maggior rigore nella selezione delle materie prime e nei controlli; anche questo favorisce, nella pratica di cantiere (dove i controlli di qualità non sono sempre rigorosi), una maggiore attenzione alla qualità dei processi di lavorazione.

L'impiego di questo tipo di miscele può richiedere tecniche di messa in opera diverse da quelle adottate per i calcestruzzi tradizionali. Per getti di grandi dimensioni sarà necessario delimitare le zone di getto, al fine di evitare un eccessivo scorrimento del materiale. Per strutture in elevazione, il pompaggio può avvenire anche dal basso; questa tecnica consente una migliore espulsione dell'aria, e quindi una migliore compattazione del calcestruzzo.

L'elevata fluidità del calcestruzzo autocompattante e il basso limite di scorrimento, danno luogo ad una spinta idraulica del getto molto elevata. Per sicurezza, quando si usano queste miscele, si considera che la spinta esercitata sui casseri sia pari a quella idrostatica (tenendo conto che la densità del calcestruzzo è circa 2400 kg/m<sup>3</sup>). Inoltre si deve controllare la tenuta dei casseri; è quindi necessario utilizzare casseri di buona qualità e verificare l'assenza di vuoti nelle zone di giunzione tra le tavole, dai quali potrebbero fuoriuscire il conglomerato. L'eliminazione della vibrazione consente, peraltro, di ridurre l'usura dei casseri, ritardandone l'invecchiamento, e di applicare gli SCC per i principali interventi di recupero di strutture degradate. I vantaggi derivanti dall'utilizzo degli autocompattanti nel recupero di strutture degradate derivano dal fatto che a causa del ridotto spessore dei ringrossi, spesso è impossibile procedere alla compattazione di un calcestruzzo tradizionale superfluido.

Inoltre l'elevata compattezza del conglomerato posto in opera, condizione avvalorata dalla letteratura scientifica, costituisce senza dubbio un elemento

deterrente rispetto alle situazioni ricorrenti di degrado che riguardano i conglomerati “tradizionali”.

### **8.3 Intonaci maggiormente impiegati in edilizia [10]**

Il termine intonaco indica lo strato di malta messo in opera come rivestimento di manufatti edilizi allo scopo di adempiere a differenti funzioni: proteggere il manufatto dall'azione degli agenti esterni, in particolare da quelli atmosferici, e conferire un aspetto esteticamente accettabile al manufatto.

Gli intonaci si suddividono in due grandi famiglie, interni ed esterni, a seconda che siano applicati sulla faccia esposta all'esterno o su quella prospiciente gli spazi interni di un manufatto; è evidente che le caratteristiche degli intonaci possono variare sensibilmente tra una famiglia e l'altra, in ragione delle differenti azioni che sono chiamati a fronteggiare: mentre gli intonaci esterni devono proteggere la struttura dall'azione delle intemperie oltre a fornire un importante apporto alla percezione che di essa si ha dall'esterno, quelli interni, hanno il compito prevalente di conformare la superficie all'utilizzo dello spazio confinato dal punto di vista estetico, igienico e della sicurezza (eliminando sporgenze e irregolarità). In entrambi i casi, l'intonaco deve garantire un adeguato livello di comfort igrometrico, lasciando passare il vapore e impedendo la formazione di condensa.

Essendo lo studio oggetto del presente lavoro riguardante gli intonaci esterni, è quindi su questi che si soffermerà l'attenzione, anche se numerosi concetti possono essere estesi anche a quelli interni.

Generalmente un intonaco è costituito da uno o più leganti e da aggregati impastati insieme con l'aggiunta di acqua; a questi elementi di base possono essere aggiunti additivi allo scopo di migliorarne le prestazioni (impermeabilità, resistenza al fuoco, isolamento termico, isolamento acustico, lavorabilità...). Per quanto riguarda le malte degli strati più esterni, possono anche essere aggiunti nell'impasto pigmenti per conferire particolari colorazioni in sostituzione dell'applicazione dello strato di tinteggiatura; a questo proposito va specificato che la tinteggiatura degli intonaci non svolge solo una funzione estetica, ma anche di protezione dell'intonaco stesso.

I componenti dell'intonaco possono essere miscelati in cantiere o premiscelati, cioè commercializzati già pronti nei dosaggi richiesti per i vari utilizzi.

Il tipo di legante e di aggregato, nonché le proporzioni con cui tali elementi sono mescolati tra loro, conferendo all'intonaco differenti caratteristiche, variano in funzione del tipo di intonaco che si intende realizzare.

Per gli intonaci esterni, dove si è visto che la funzione principale è quella protettiva, si impiegano materiali più resistenti agli agenti atmosferici, quindi leganti cementizi e calce idrauliche, con inerti di sabbia silicea. La realizzazione avviene per strati sovrapposti con particolare attenzione all'ultimo strato di finitura, che non deve presentare microfessurazioni. All'interno, dove non è richiesta la resistenza alle intemperie, si preferiscono malte a base di gesso, di calce aerea o semiidraulica che presentano una maggiore lavorabilità.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali dei tre tipi di intonaco per esterni maggiormente utilizzati in edilizia.

### **8.3.1 Intonaco di malta cementizia**

Gli intonaci di malta cementizia, costituiti da un impasto di sabbia e cemento, hanno trovato larga diffusione nel corso del XX secolo, grazie alle loro ottime caratteristiche in termini di resistenza meccanica, rapidità di esecuzione, impermeabilità all'acqua e compatibilità con diversi tipi di supporto. Generalmente essi sono confezionati utilizzando una parte di cemento, tre parti di sabbia perfettamente secca e mezza parte d'acqua. Uno degli aspetti negativi riguardanti le malte cementizie è la presenza di un forte ritiro, che comporta la necessità di diminuire il dosaggio di cemento negli strati più esterni, che comunque sono soggetti a fenomeni di fessurazione. Nonostante ciò, la durata del prodotto è in generale ottima, ma diminuisce sensibilmente per i supporti non compatibili. Altri aspetti negativi sono l'eccessiva rigidità dell'intonaco e l'impermeabilità al vapore acqueo, che viene quindi trattenuto all'interno delle murature. Per questi motivi, negli impasti, allo scopo di ridurre tali aspetti negativi, si aggiungono spesso altri leganti o additivi che riducono sensibilmente il fenomeno di ritiro e migliorano in generale le proprietà del prodotto.

### 8.3.2 Intonaco di malta di calce

L'intonaco di malta di calce è stato molto utilizzato in passato e preparato in cantiere da maestri artigiani. Oggi si trova spesso in forma di premiscelati a base di calce aerea, con l'aggiunta di particolari additivi che ne favoriscono l'impiego all'esterno.

L'esecuzione richiede l'impiego di manodopera specializzata ed il rispetto dei tempi di indurimento particolarmente lunghi. Presentano una discreta resistenza meccanica una volta terminato il processo di carbonatazione, sono permeabili all'acqua ma reagiscono bene ai cicli gelo-disgelo ed hanno inoltre il vantaggio di una elevata permeabilità al vapore. All'esterno sono di solito applicati su pareti protette da cornicioni per evitare l'azione di dilavamento delle acque piovane, mentre per i basamenti, dove sono maggiori le sollecitazioni meccaniche, si impiegano materiali con maggiori resistenze. In generale la durata è pari a quella degli altri intonaci, ma richiedono una messa in opera eseguita a regola d'arte e un rigoroso rispetto dei tempi di applicazione e stagionatura.

La superficie si presenta di colore grigio chiaro-bianco, ottima per la successiva applicazione di pitture, ed in funzione della grana degli inerti, si può presentare grezza, ruvida o liscia.

La calce aerea con la pozzolana, trova largo impiego in lavori di restauro, essendo compatibile con supporti di tipo tradizionale e costituendo a sua volta un supporto ideale per le tinteggiature a calce.

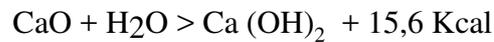
La calce come legante aereo, si suddivide in:

- 1) calce grassa in zolle (contenuto in  $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 94\%$ )
- 2) calce magra in zolle (contenuto in  $\text{CaO} + \text{MgO} \leq 94\%$ )
- 3) calce idrata in polvere che comprende due categorie di prodotti:
  - a) fiore di calce (contenuto in idrati di  $\text{Ca} + \text{Mg} \geq 91\%$ )
  - b) calce idrata da costruzione (contenuto in idrati di  $\text{Ca} + \text{Mg} \geq 82\%$ )
- 4) calce magnesiaca ossia quelle contenenti più del 20% di  $\text{MgO}$

La calce viene prodotta per cottura della pietra calcarea costituita da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) a temperature che variano tra gli 800 e 900 °C. Per effetto proprio della temperatura elevata, la pietra calcarea perde anidride carbonica formandosi così Ossido di Calcio ( $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 = \text{CaO}$ ) o anche Calce viva, denominata così proprio per la sua grande reattività con l'acqua.

La calce viva ( $\text{CaO}$ ), per poter esplicare un'azione legante, va sottoposta ad un processo di spegnimento, ossia, deve reagire con l'acqua per trasformarsi in idrossido di calce  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , chiamato anche Calce spenta.

La reazione chimica d'idratazione procede secondo la formula seguente:



Per la trasformazione da calce viva in zolle a grassello il rapporto acqua/calce viva è di 3:1, invece, per la trasformazione da calce viva a calce idrata in polvere, il rapporto acqua/calce viva è di 1:3.

Il meccanismo di presa e indurimento della calce in opera avviene in tre fasi:

- *la prima fase*, attraverso l'evaporazione dell'acqua d'impasto;
- *la seconda fase*, per la precipitazione di numerosi microcristalli esagonali di idrossido di calce che perdendo l'acqua e intersecandosi tra loro provocano la perdita di lavorabilità dell'impasto;
- *la terza fase*, nella reazione del grassello di calcio con l'anidride carbonica dell'aria che produce carbonato di calcio, e quindi l'indurimento; tale reazione è detta "carbonatazione".

La carbonatazione del materiale inizia velocemente dalla superficie a contatto con l'aria, per procedere successivamente verso l'interno.

La presa, che avviene complessivamente con una diminuzione di volume, è responsabile delle caratteristiche linee di fratture che si riscontrano sia sulla superficie degli intonaci che nella massa degli intonaci di corpo a base di calce.

Per ovviare a questo inconveniente gli intonaci di calce vanno "stretti" con apposite spatole dette fracasse, e che hanno lo scopo di diminuire lo spazio tra le

particelle e far risalire in superficie l'acqua in eccesso in modo che i fenomeni di ritiro durante la presa siano ridotti al minimo.

Da tale meccanismo, il grassello di calce si trasforma progressivamente in una massa dura e di elevata resistenza; più tempo passa dalla messa in opera, più il prodotto migliora le sue qualità funzionali di rivestimento protettivo, portando alla formazione conclusiva di prodotti provenienti dalla materia prima di partenza, il cosiddetto "ciclo della calce".

### **8.3.3 Intonaco di malta bastarda**

L'intonaco di malta bastarda è quello più diffuso, in quanto combinando i diversi leganti (cemento e calce) riesce a sfruttarne al meglio le caratteristiche positive di ciascuno di essi, attenuandone allo stesso tempo i difetti. I dosaggi dei singoli elementi possono essere variati in funzione delle proprietà che si vogliono far prevalere, tenendo conto che in generale aumentando i leganti idraulici si conferisce maggiore resistenza meccanica ma diminuisce la permeabilità al vapore, con eventuali inconvenienti nelle murature. L'aumento di calce aerea, invece, rende l'intonaco maggiormente permeabile ed elastico, massimizzando la compatibilità a vecchie murature, tuttavia ne riduce la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. La finitura superficiale varia da molto scabra a ruvida in funzione dei dosaggi, della lavorazione e della grana degli inerti. La durata nel tempo è ottima.

## **8.4 Degrado degli intonaci: principali cause**

Il deterioramento degli intonaci, come quello di ogni altro materiale edilizio, in particolare se collocato all'esterno, è legato all'azione di molteplici fattori ed alla loro reciproca interazione: agenti atmosferici e biologici, fattori di stress meccanico, fattori d'uso e incompatibilità.

Eventuali errori, nella scelta dei materiali (leganti, aggregati, acqua) o nei procedimenti esecutivi, possono ulteriormente compromettere la durata e le prestazioni del rivestimento, accelerandone il decadimento. Le principali cause di degrado degli intonaci possono essere così sintetizzate:

- *interazioni tra supporto e intonaco:*

- movimenti differenziali dovuti a differenti comportamenti termici ed elastici;
- cedimenti o assestamenti del supporto murario;
- presenza di umidità nella muratura;
- *aggressioni provenienti dall'ambiente esterno:*
  - agenti atmosferici (cicli di gelo/disgelo, acque meteoriche, soleggiamento, umidità, vento);
  - inquinamento ambientale;
  - azioni biologiche ad opera di microrganismi, funghi, batteri;
  - fattori d'uso (urti, atti vandalici);
- *errori legati alla scelta dei materiali e alle modalità di esecuzione:*
  - cattiva qualità dei materiali impiegati;
  - utilizzo di una malta inadatta al tipo di intervento da effettuarsi;
  - inadeguata preparazione del supporto;
  - errori di esecuzione.

#### Distacco dal supporto

Il distacco, totale o parziale, dell'intonaco dal supporto implica la rottura dei legami fisico-chimici tra muratura e rivestimento, fenomeno riconducibile a diverse possibili cause:

- *inadeguata preparazione del supporto*, in termini di ruvidezza, pulizia, consolidamento e bonifica dell'umidità.
- *insufficiente bagnatura del supporto*: un eccessivo assorbimento d'acqua da parte della muratura sottrae velocemente acqua all'impasto, compromettendone il corretto indurimento e le prestazioni dell'intonaco.
- *utilizzo di malta troppo magra*: l'impiego di una malta troppo magra, cioè con un ridotto dosaggio di legante, comporta una riduzione del potere adesivo dell'impasto e, di conseguenza, un intonaco con scarse proprietà meccaniche.

### Le fessurazioni

Effetti di azioni di natura fisico-meccanica, che possono a loro volta costituire causa di degrado delle superfici intonacate, sono tutti i fenomeni fessurativi che, per differenti ragioni, si producono negli edifici e si evidenziano sulle superfici stesse.

Le fessurazioni che si manifestano sull'esterno delle murature possono essere generate da problemi di carattere strutturale, da incompatibilità tra gli strati del rivestimento e supporto, da fenomeni di ritiro (in fase di indurimento dei materiali) o di espansione di parti interne (es. corrosione delle barre d'acciaio), e da movimenti (per dilatazioni termiche tra materiali a differente massa, assorbimento d'acqua, vibrazioni).

– Fessurazioni dovute a problemi strutturali:

I quadri fessurativi causati da problemi strutturali sono in genere piuttosto complessi e possono essere interpretati come processi evolutivi del sistema strutturale dell'edificio che tende localmente a sottrarsi a sforzi puntualmente concentrati troppo elevati, ripartendoli su zone adiacenti. In questo senso l'edificio, partendo da un sistema di equilibrio trova, a seguito di un dissesto, un nuovo equilibrio fessurandosi.

Naturalmente un fenomeno fessurativo non è di per sé indice di pericolo. Situazioni di pericolo sino al crollo si hanno, quindi, quando le lesioni si estendono concatenandosi in modo da formare un cinematismo.

I fenomeni fessurativi possono essere dovuti a cedimenti delle fondazioni, a spancamenti o fuori piombo delle pareti, a rotture di travi o capriate, a spinte di coperture, solai o volte, a disomogeneità di materiali, ecc. Essi si manifestano, tendenzialmente, vicino a cambiamenti di spessore o di materiale, in prossimità di aperture o vani e in vicinanza di carichi concentrati.

– Fessurazioni dovute a incompatibilità tra gli strati:

Incompatibilità tecnologiche, tra intonaco e supporto o tra i diversi strati di intonaco, possono provocare vasti fenomeni fessurativi sino alla perdita di aderenza da parte dell'intonaco stesso. Essi si possono verificare quando le caratteristiche

tecnologiche dei diversi strati che costituiscono l'intonaco sono tra loro incompatibili, in particolare quando non è rispettata la regola della crescente elasticità e porosità degli strati, dal più interno (meno elastico) al più esterno (che deve avere elasticità e porosità uguale o maggiore rispetto ai precedenti). Caso tipico di incompatibilità è l'applicazione di una finitura cementizia su un intonaco di calce aerea. L'intonaco nel suo complesso, deve avere inoltre caratteristiche di elasticità e porosità compatibili (uguali o maggiori) con quelle della muratura di supporto in modo da assecondare le naturali concentrazioni e dilatazioni del supporto senza fessurarsi.

I fenomeni fessurativi dovuti ad incompatibilità si manifestano generalmente con formazioni di lesioni superficiali ramificate a maglia larga ed hanno di solito una dimensione apprezzabile anche ad occhio nudo. Si rendono bene evidenti a seguito di bagnatura del supporto (es. dopo un evento di pioggia) poiché l'acqua penetrata nelle fessure le scurisce alquanto.

– Fessurazioni dovute a fenomeni di ritiro:

Questo tipo di degrado, causato da ritiro, si ha quando:

- *si utilizza malta con elevato dosaggio di legante:* l'indurimento del legante è sempre accompagnato da un fenomeno di ritiro (cioè di contrazione volumetrica) che determina sollecitazioni interne allo strato di intonaco. Se il ritiro è molto consistente, le tensioni create nel rivestimento possono risultare superiori alla soglia di tolleranza dell'intonaco, causandone perciò la rottura.
- *non si è provveduto ad una adeguata stagionatura dell'intonaco dopo l'applicazione:* dopo la posa in opera, l'intonaco deve essere protetto dall'azione diretta di sole e vento, in particolare durante il periodo estivo. Un'asciugatura troppo rapida, infatti, provoca il prematuro indurimento dello strato superficiale dell'intonaco con la conseguente comparsa di estese microfessurazioni.

La conseguenza dei fenomeni di ritiro è la formazione di fessurazioni ramificate capillari, diffuse a "ragnatela" (micro cavillature) su tutta la superficie

dell'intonaco. Spesso non sono visibili ad occhio nudo ma si rendono evidenti a seguito di bagnatura del supporto.

– Fessurazioni dovute a movimenti per dilatazioni termiche:

La formazione di quadri fessurativi in corrispondenza delle giunzioni tra materiali a differente massa è uno dei problemi più comuni.

Fessurazioni lineari generate dalle dilatazioni termiche tra materiali a differente massa e a differente coefficiente di dilatazione termica si evidenziano prevalentemente in corrispondenza dell'accosto tra trave/pilastro e muratura di tamponamento. Tali fessurazioni, che interessano sempre anche l'intonaco, sono maggiormente accentuate in presenza di murature coibentate in intercapedine, in quanto è più sensibile la differenza di temperatura tra i due materiali.

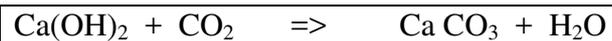
## 8.5 Pitture maggiormente impiegate in edilizia

Per la realizzazione delle finiture tinteggiate, esiste in commercio una varietà molto estesa di tipologie di pitture, che si differenziano per le caratteristiche di uno o più componenti illustrati al paragrafo 4.6. Alcune tipologie fra le più diffuse sono di seguito brevemente descritte:

– Pittura a calce

Di seguito vengono descritte le principali caratteristiche delle pitture a base di calce:

Il legante chimicamente riconosciuto come Idrossido di Calcio – come già accennato nel paragrafo 8.4 cui si rimanda per ulteriori chiarimenti – reagisce con l'anidride carbonica dando origine a legami cristallini di Carbonato di Calcio in base alla seguente reazione:



L'idrossido di calcio è una pasta finissima ottenuta dallo spegnimento della calce viva CaO in eccesso di acqua; le qualità di una pitturazione a calce sono legate alla natura dei supporti, al sistema di colorazione ed al corretto impiego.

La pittura a calce va applicata solo su supporti a base calce con i quali lega per compatibilità chimica mentre non è indicata per applicazioni su intonaci realizzati con malte cementizie.

Il sistema di colorazione è costituito da terre naturali o ossidi (ossido-idrossido di ferro, sesquiossido di ferro, silicati idrati contenenti ferro), naturalmente associate in proporzioni variabili con altri minerali (argilloidi, quarzo, carbonati, silicati ecc.), che non solo garantiscono una naturale morbidezza e trasparenza dell'effetto cromatico, ma con la loro natura idraulica contribuiscono a migliorare il potere legante e aggregante del grassello di calce.

La corretta interpretazione applicativa trasmessa dai maestri artigiani, prevede l'impiego delle pitture a calce in più mani per garantire l'ottimale penetrazioni della pittura nei micropori degli intonaci, evitando la formazione di croste non ancorate.

– Pittura al quarzo

La pittura al quarzo è una pittura plastica caratterizzata da un buon potere riempitivo, buona traspirazione e dall'aspetto opaco mascherante.

È un legante stirolo acrilico in dispersione acquosa ed è pigmentato generalmente con ossidi resistenti alla luce.

Essa può essere utilizzata per decorazione e protezione alle intemperie di facciate in muratura. Di aspetto uniforme matto, è particolarmente indicata per applicazioni sui muri vecchi con superficie irregolare in quanto non evidenzia le superfici non perfettamente piane.

– Pittura ai silicati di potassio

A partire dalla fine dell'800 il silicato fu confermato come valido consolidante ed impiegato per la produzione di pitture. L'impiego prevedeva la miscelazione in cantiere di due componenti: il silicato e le terre coloranti predisperse in acqua pulita. A causa però dell'instabilità del composto, gli artigiani incontravano non poche difficoltà nell'applicazione di tale prodotto, in quanto il silicato di potassio essendo particolarmente reattivo nei confronti dell'anidride carbonica e dei componenti idraulici presenti nelle terre naturali impiegate per la riproduzione delle tinte, dava origine a disuniformità ed a difficoltà nel riprodurre le tinte.



- le resine siliconiche a struttura tridimensionale che hanno un certo potere legante (basso) nei confronti dei pigmenti, ma non danno l'*effetto goccia* (idrorepellenza);
- gli oli siliconici a catena lineare che non hanno alcun potere legante, ma danno un buon *effetto goccia* (la pittura impiegata appartiene a questa famiglia).

Una pittura silossanica può contenere entrambi o un solo composto organo-silicico, che però da solo non garantisce alcuna stabilità all'esterno: essa deve sempre avere come legante principale una resina acrilica o stirolo acrilica, per potere garantire un ottimo potere legante nei confronti dei pigmenti e una buona durata all'esterno.

### **8.6 Degrado delle pitture e principali cause**

In sostanziale analogia rispetto a quanto accade nel degrado dell'intonaco, anche il deterioramento delle pitture, specie se esposte agli agenti atmosferici, è legato all'azione di molteplici fattori ed alla loro reciproca interazione: agenti atmosferici e biologici, fattori di stress meccanico, fattori d'uso e incompatibilità.

In questo caso gli errori possono accelerare il decadimento prestazionale, spesso a causa di scelte fatte senza tenere in debita considerazione le caratteristiche del supporto, sia in termini di composizione che di consistenza. Tra le principali anomalie riscontrabili, intese come forme di degrado che caratterizzano le pitture, ricordiamo:

#### Alterazione cromatica:

è la variazione del colore originale della pittura. L'alterazione cromatica può manifestarsi in zone ampie o essere localizzata in piccole porzioni del manufatto. È visibile a occhio nudo sulle superfici e definibile attraverso i parametri che definiscono il colore: tinta (hue), chiarezza (value), saturazione (chroma). L'alterazione cromatica può essere provocata da cause chimiche, fisiche, biologiche e antropiche.

#### Deposito superficiale:

È considerato deposito superficiale tutto ciò che si posa sulla superficie tinteggiata prodotto dal trascinarsi delle polveri circostanti formando una patina. Se di colorazione bruno-nero-verdastra accompagnata dall'aumento di spessore e di adesione al substrato, indica invece sostanze inquinanti (solfati, nitriti e nitrati) spesso unite a colonizzazioni biologiche (alghe, funghi, batteri) lo si definisce come deposito inquinante, concrezione, solfatazione, crosta nera.

#### Esfoliazione:

costituisce la perdita del materiale con distacco degli strati superficiali tra loro paralleli, secondo fogli, lamelle. Avviene dalla superficie verso l'interno ed è generalmente provocata dall'alternarsi delle variazioni di temperatura e umidità, con movimenti di acqua, evaporazione e deposizione dei sali. Ma nel caso specifico delle pitture può trattarsi più spesso di una scarsa adesione al supporto causata da incompatibilità e/o procedimenti di posa errati. Al danno può contribuire il degrado biologico, con formazione di colonie di microrganismi nelle sedi già separate.

#### Dilavamento:

consiste nel prolungato scorrimento dell'acqua, che agisce consumando gli strati più superficiali della tinteggiatura. Il degrado per dilavamento non riguarda solo le vie di scorrimento preferenziale e le aree investite da soffi d'aria e correnti, dove più rapida è l'evaporazione.

La superficie perde materiale, ma si copre di veli biancastri e compatti, con gore di umidità, per il processo di ricarbonatazione; possono coesistere depositi biancastri consistenti e macchie nerastre, dovuti rispettivamente a licheni di superficie e a licheni endolitici, cioè colonizzati all'interno e nelle cavità. Quando il dilavamento è dovuto a piogge acide, il degrado è più veloce e aggressivo per le reazioni chimiche che possono verificarsi.

#### Cavillature:

si tratta di microfessurazioni ad andamento filiforme che interessano soltanto lo strato superficiale di un paramento, ovvero la tinteggiatura. Sono provocate da fenomeni di origine chimica o meccanica.

Sfarinamento:

avviene quando si forma una polvere sulla superficie del film secco di pittura. E' causata dal deterioramento del legante e si verifica normalmente dopo lunghe esposizioni all'esterno.

## **PARTE 3<sup>a</sup> - Sperimentazione**

### ***Introduzione***

I contenuti relativi alla 3<sup>a</sup> e ultima parte del lavoro in oggetto, descrivono l'intera attività sperimentale svolta, riguardo la valutazione dell'influenza esercitata dagli elementi "di rivestimento" esterni sulla durabilità del calcestruzzo, attraverso l'esecuzione di prove di carbonatazione accelerata e prove di invecchiamento accelerato eseguite in laboratorio.

Questa parte si compone di cinque capitoli; il primo ha come obiettivo la conoscenza dello stato dell'arte della problematica d'interesse. A tale scopo, questo capitolo non solo descrive le principali tecniche oggi in uso per la prevenzione del degrado nel calcestruzzo, ma fornisce anche un approfondimento dedicato alla conoscenza dello stato attuale della ricerca, attraverso un'attenta disamina delle più importanti attività di sperimentazione in merito, effettuate negli ultimi anni.

Riguardo al secondo capitolo, esso è dedicato alla descrizione dei campioni utilizzati ai fini della prova per quanto concerne la forma e i materiali impiegati nel confezionamento, accompagnando, a tale descrizione, riferimenti normativi e considerazioni logico-deduttive utili al lettore per una migliore comprensione delle scelte effettuate.

Il terzo capitolo è dedicato alla descrizione dei programmi di prova relativi alla carbonatazione accelerata ed all'invecchiamento accelerato, descrivendo anche le attrezzature impiegate.

Il quarto capitolo è dedicato all'elaborazione dei risultati ottenuti dall'insieme delle prove eseguite. Ed infine l'ultimo capitolo costituisce la sintesi di una serie di considerazioni conclusive che permettono di evidenziare dai risultati ottenuti le osservazioni più interessanti riguardanti il contributo fornito dagli elementi di rivestimento sulla carbonatazione del calcestruzzo e sulle modalità di invecchiamento del paramento esterno.

## Capitolo 9

### **LO STATO DELL'ARTE: contributo dei rivestimenti**

#### **alla durabilità del calcestruzzo**

### **9.1 Principali tecniche di prevenzione del degrado nel calcestruzzo armato**

#### **9.1.1 Generalità**

Le situazioni in cui si deve intervenire con opere di recupero, sono quelle che si presentano più frequentemente, ed ancor più si presenteranno in futuro, col progressivo invecchiamento delle strutture in c.a. fino ad oggi realizzate senza particolari accorgimenti per aumentarne la durata. Quali siano i costi ed i rischi conseguenti ad un tale modo di procedere è facile immaginarlo: appare quindi ovvio come sia opportuno concentrare l'attenzione e gli sforzi delle ricerche sul campo della **prevenzione** del deterioramento delle strutture.

Si è visto come il degrado del calcestruzzo armato possa progredire, fino ad arrivare a provocare una situazione di pericolo per la stabilità della struttura, innanzi tutto per effetto della corrosione delle armature. Questa a sua volta è provocata in primo luogo dalla insufficiente protezione che offre il calcestruzzo. Per impedire il verificarsi di questi fenomeni si può quindi operare in uno dei seguenti modi, o ancor meglio in ambedue:

- Prevenire la corrosione delle armature usando barre protette (con procedimenti di vario genere che verranno brevemente descritti) o additivando il calcestruzzo con inibitori di corrosione;
- Rendere il calcestruzzo impermeabile per proteggere le armature dagli agenti esterni della corrosione.

#### **9.1.2 Protezione delle armature**

##### Zincatura

La zincatura dei tondini, preferibilmente già lavorati, si effettua a caldo.

Lo zinco si diffonde nell’acciaio con formazione di un rivestimento costituito da composti intermetallici. Tali composti hanno una notevole durezza, per cui il rivestimento protettivo possiede forte resistenza alle abrasioni.

Oltre alla **protezione fisica**, la zincatura fornisce all’acciaio una **protezione di tipo galvanico**: in soluzione elettrolitica tra zinco ed acciaio si stabilisce una differenza di potenziale in cui lo zinco si comporta da anodo ed il ferro da catodo. Si tratta quindi di un tipo di protezione catodica in cui lo zinco si consuma, ossidandosi, per proteggere il ferro. Il prodotto della corrosione dello zinco, però, occupa lo stesso volume del metallo di origine, e quindi non provoca alcun effetto dannoso nel calcestruzzo.

#### *Rivestimenti con vernici epossidiche*

Le resine epossidiche, per gli stessi motivi che ne consigliano l’impiego nel caso del ripristino, dovrebbero essere molto adatte a proteggere le armature anche in via preventiva, una volta applicate a tutte le barre costituenti le gabbie di armatura. Sorge però qualche perplessità nel caso, facile a verificarsi, che durante le operazioni di posa in opera il rivestimento possa essere scalfito localmente, potendosi in tali punti innescare un processo di corrosione che vanificherebbe le precauzioni prese ed i relativi costi di entità non trascurabile.

#### *Altri rivestimenti*

In sede sperimentale sono stati provati rivestimenti adatti ad impieghi particolari (ad es. per strutture di interesse storico-artistico), quali la nichelatura, la placcatura con acciaio inossidabile, o anche la più economica spennellatura con boiaccia di cemento.

#### *Protezione catodica*

Questo sistema si basa sul fatto che, facendo circolare una debole corrente continua nelle armature, queste si comportano da catodi se vi è un altro elettrodo che funzioni da anodo. Rendendo più negativo il potenziale delle armature, la reazione di corrosione si riduce a valori praticamente trascurabili.

#### *Impiego di inibitori di corrosione*

Gli inibitori di corrosione sono composti chimici che, usati come additivi del calcestruzzo, abbassano notevolmente la velocità di corrosione delle armature. Particolarmente efficace si è mostrato a tale scopo l’impiego di nitrito di calcio anche in presenza di cloruri, almeno finché il rapporto tra la quantità dei cloruri e quella dei nitriti si mantiene inferiore a 1,5.

Il punto più problematico in questo sistema di prevenzione è costituito dal controllo del suo funzionamento, che richiede tempi molto lunghi. In generale si adottano sistemi di monitoraggio capaci di fornire misure del potenziale di corrosione, della velocità di corrosione e della corrente galvanica.

### **9.1.3 Impermeabilizzazione del calcestruzzo**

Come si è già osservato, i fenomeni di degrado del calcestruzzo armato possono manifestarsi tanto più facilmente, quanto più permeabile è il conglomerato. Risulta quindi ovvia l’importanza di poter realizzare un calcestruzzo che risulti meno permeabile possibile. Questa caratteristica può ottenersi in due modi: o agendo sulla composizione e sulle modalità di esecuzione, o proteggendo il calcestruzzo esternamente.

#### *Interventi sulla composizione del conglomerato: il “Mix Design”*

Col termine “Mix Design” s’intende lo studio del proporzionamento del calcestruzzo, cioè delle proporzioni secondo cui devono essere miscelati i diversi ingredienti per tenere conto sia delle caratteristiche fisico-meccaniche del prodotto finito, sia delle condizioni di messa in opera.

Il calcestruzzo è un materiale poroso. I pori che si formano nella sua massa possono essere però di dimensioni varie. Ciò che si deve evitare è la formazione di macroporosità continue: la massa, cioè, deve risultare tanto compatta da contenere al suo interno solo microporosità discontinue. Affinché ciò avvenga è necessario:

- 1- che il rapporto a/c abbia valori bassi, non superiori a 0,45 – 0,50;
- 2- che la maturazione avvenga nei tempi dovuti, funzione a sua volta del rapporto a/c. Più alto è tale rapporto, più lunghi devono essere i tempi di

maturazione del getto, tenendo comunque presente che per  $a/c = 0,70$  è quasi impossibile evitare le macroporosità continue;

3- che sia ridotto al massimo il fenomeno dell'effetto di parete<sup>1</sup>.

Ora è noto come sia sempre più diffusa la tendenza ad impiegare calcestruzzi molto fluidi, per la facilità di lavorazione che ne consegue. Questo vale in modo particolare quando si fa uso di pompe da calcestruzzo, cosa oggi sempre più frequente.

D'altra parte una buona lavorabilità del getto garantisce maggiormente una buona esecuzione, specie in presenza di strutture "difficili" con spessori sottili, elevate percentuali di armatura, copriferri ridotti al minimo regolamentare, geometrie complesse delle carpenterie.

Ne deriva la necessità, da estendere praticamente a tutti i casi, di impiegare additivi fluidificanti e superfluidificanti perché solo così si riesce ad ottenere calcestruzzi facilmente lavorabili con basso rapporto  $a/c$ , e quindi sufficientemente compatti.

Ancora in fase sperimentali possono considerarsi le ricerche tendenti ad effettuare composizioni del calcestruzzo ottenute aggiungendo alla miscela classica sostanze capaci di costituire un'armatura interna alla massa del conglomerato: rientra in questa categoria il calcestruzzo rinforzato con fibre di polipropilene.

Del tutto eccezionale è infine da considerarsi l'impiego dei calcestruzzi polimero-impregnanti. Questi sono costituiti da calcestruzzo ordinario indurito ed essiccato a temperatura maggiore di  $100^{\circ}\text{C}$ , quindi impregnato con un monomero organico capace di polimerizzare dentro i pori della pasta cementizia o nelle macrocavità del calcestruzzo. Il risultato è un calcestruzzo impermeabile, dalle elevate caratteristiche di resistenza meccanica e resistentissimo agli acidi. Purtroppo però attualmente il suo costo è molto alto, sia per il costo del polimero, sia per la laboriosità del processo produttivo.

---

<sup>1</sup> La compattezza è fortemente legata al fenomeno dell'**effetto di parete "ε"**. Tale fenomeno spiega che un miscuglio incoerente presenta una diminuzione di compattezza in prossimità delle pareti del recipiente in cui esso è contenuto. L'entità del fenomeno, sarà tanto più grande quanto maggiore è il diametro medio  $d$  dei granuli, aumenterà con l'aumentare della superficie  $S$  del recipiente e diminuirà al crescere del volume  $V$  dello stesso ( $\epsilon = f \left[ \frac{d \times S}{V} \right]$ ).

### *Interventi sulla superficie esterna*

Certamente gli interventi sulla superficie esterna costituiscono il sistema più semplice ed economico per prevenire la corrosione nelle nuove strutture o in quelle esistenti. Ad un primo esame potrebbe apparire che sia possibile operare in un'infinità di modi, scegliendo tra i materiali più disparati, dalle guaine impermeabili ai rivestimenti tradizionali. Non bisogna però dimenticare i rischi conseguenti all'adozione di una protezione completamente impermeabile, sia all'acqua che ai gas. L'impossibilità di far evaporare il vapor d'acqua presente all'interno della massa di calcestruzzo può risultare infatti particolarmente pericolosa in presenza di sali solubili senza contare il fatto che, la presenza dell'acqua a livello delle armature, comporta un aumento della velocità di corrosione. Risulta allora preferibile adottare protezioni impermeabili all'acqua allo stato liquido e permeabili al vapor d'acqua, ma non ai gas SO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>.

Particolarmente efficaci in tal senso si sono mostrate le 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 siliconici costituenti uno strato secco impermeabile ma di elevata traspiranza. 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.

## **9.2 Prevenzione mediante interventi sulla superficie esterna: *stato dell'arte della ricerca***

### **9.2.1 Generalità**

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 dei rivestimenti di finitura.

La conoscenza di tali esperienze è di fondamentale importanza per due motivi:

1. È indispensabile per poter indirizzare l’attività di ricerca verso obiettivi sempre più ambiziosi e che si basano proprio sulle metodologie e sui risultati di tali sperimentazioni;
2. Fornisce utili informazioni metodologiche e riferimenti normativi necessari per una corretta definizione del programma sperimentale.

### 9.2.2 Attività di ricerca recenti

L’influenza dei rivestimenti sulla durabilità del calcestruzzo è stata affrontata da diversi autori. Tra i più recenti, un importante modello sperimentale è presentato nell’articolo a firma di Patrick F. McGrath dal titolo “A Simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete” [13].

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

Esso fornisce inoltre, utili informazioni per la realizzazione di una camera di prova accelerata necessaria per la valutazione della profondità di carbonatazione del campione esaminato.

A tal proposito, la camera descritta da Patrick F. McGrath (fig. 21) è stata realizzata utilizzando due barili da 45 galloni con opportune guarnizioni e morsetti, necessari per garantire la tenuta all’aria. Per il controllo dell’umidità sono stati utilizzati recipienti contenenti soluzioni saline sature composte da  $\text{NaNO}_2$  e acqua.

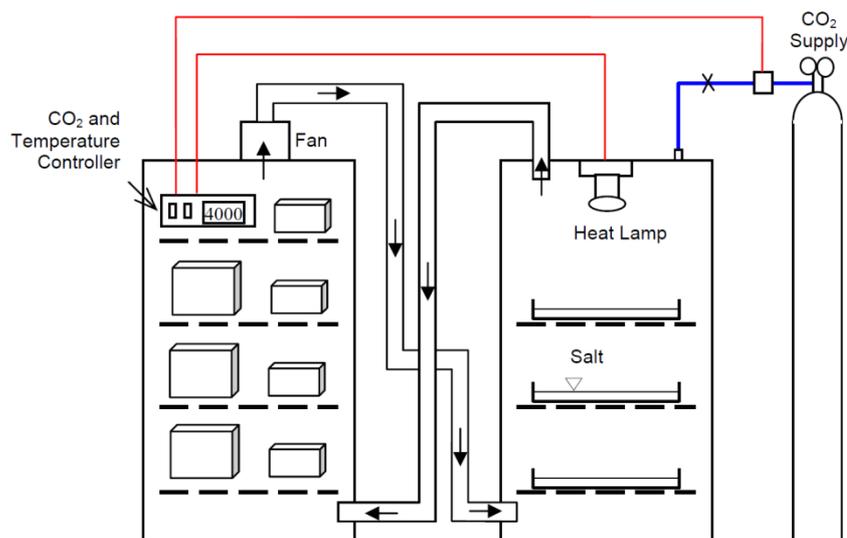


Fig. 21 - Schema della camera di prova accelerata di Patrick F. McGrath

Queste soluzioni, nella giusta quantità e in funzione della temperatura, permettono d’impostare l’umidità relativa nella percentuale voluta.

Il controllo della temperatura è stato invece effettuato utilizzando una lampada da 250 W.

Per quanto riguarda i materiali, sono stati realizzati pannelli di calcestruzzo da 40 a 50 mm di spessore trattati con rivestimenti acrilici (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> B di tipo liquido, C in polvere ridi sperdente). Tutte le mescole hanno pari contenuto in polveri, ad eccezione del tipo A<sub>2</sub> per il quale si è scelto un contenuto in polveri dimezzato.

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 del 58-62% e temperatura di 25°C.

Dopo un mese di esposizione, i campioni sono stati rimossi e segati in pezzi da 100x100 mm per creare due distinte letture di profondità di carbonatazione per ogni campione. La superficie asciutta è stata poi spruzzata con una soluzione indicatrice di 1% di fenolftaleina in alcool che colora in rosa-violetto le zone non carbonatate e lascia incolore quelle carbonatate.

Sulla base dei risultati ottenuti da P. F. McGrath si sono sviluppati ulteriori studi da parte del Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università degli Studi di Salerno su provini di calcestruzzo protetti non solo con finiture acriliche ma anche con rivestimenti cementizi di finitura [14].

In tale sperimentazione, i provini in calcestruzzo hanno forma prismatica di dimensioni 150x150x600 mm, con una resistenza unitaria media a compressione pari a circa 31-32 Mpa, utilizzando un rapporto a/c pari a 0,48.

La granulometria degli aggregati utilizzata è la seguente:

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

Per quanto riguarda il dosaggio teorico per un metro cubo di calcestruzzo, sono state utilizzate le seguenti quantità:

Dosaggio teorico per 1 m <sup>3</sup>	
	Kg/m <sup>3</sup>
Sabbia	934
Aggregato medio	187
Aggregato grosso	747
Cemento	340
Acqua	165
Sky 524	2.4

A maturazione avvenuta, dei tre provini in calcestruzzo realizzati, uno è stato trattato con la finitura acrilica (fig. 22 a sinistra); il secondo provino è stato trattato con il rivestimento cementizio (fig. 22 a destra), mentre il terzo provino non è stato sottoposto ad alcun trattamento protettivo (fig. 22 a sinistra).

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 una atmosfera contenente l'1% di CO<sub>2</sub>, una temperatura di 25°C ed umidità relativa del 65%.



**Fig. 22** - Confezionamento dei provini di calcestruzzo rivestiti con: 1) pittura acrilica a sinistra, 2) rivestimento cementizio a destra, 3) nessun trattamento a sinistra.

La cabina a tenuta per l'esposizione dei provini è dotata di raccordi di ingresso e di uscita del gas tali da consentire il raggiungimento di un flusso uniforme di CO<sub>2</sub> in tutte le parti della camera (fig. 23).

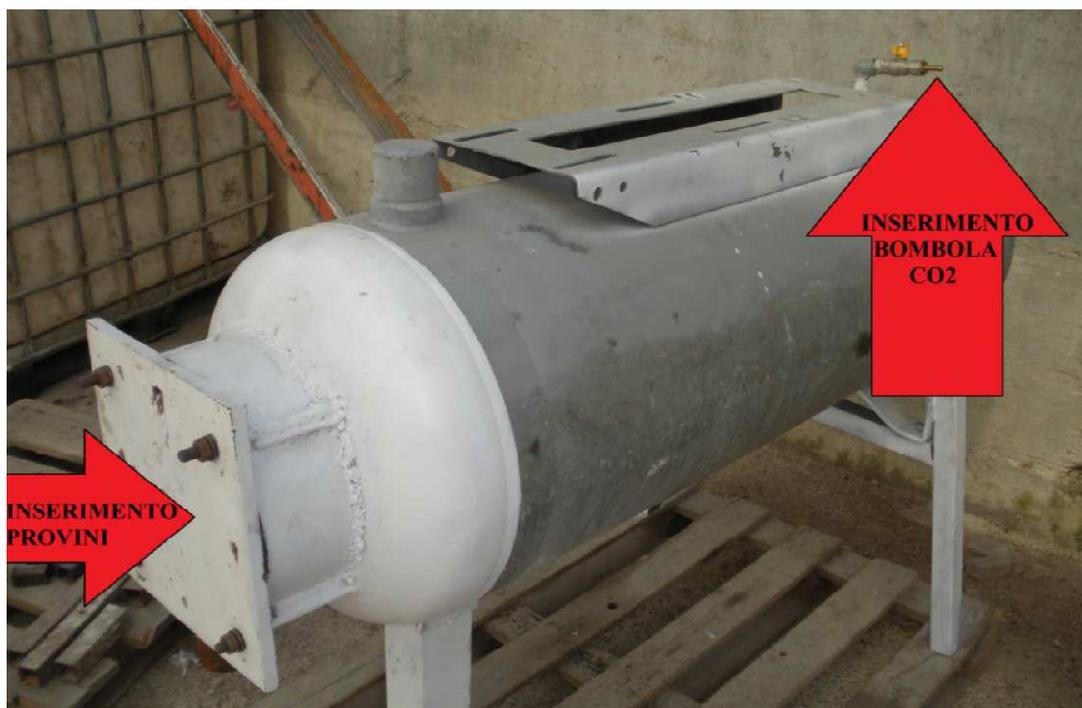


Fig. 23 - Cabina a tenuta per l'esposizione dei campioni.

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

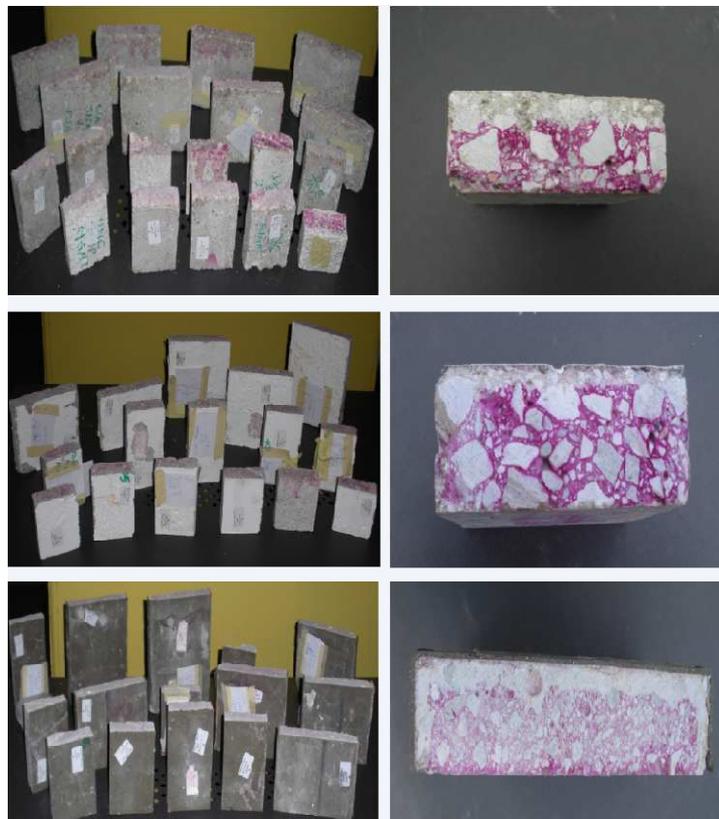


Fig. 24 - Foto dei campioni sottoposti a test con fenolftaleina

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 (fig. 24).

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

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

Sperimentazioni antecedenti al 2004 (anno di pubblicazione della norma 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 realizzati da: Luigi Coppola, Mario Collepari, Carlo Pistolesi, Pasquale Zaffaroni e Antonio Borsoi [15]; [16]; [17]. In ognuno di questi lavori si è utilizzata la 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, a seconda dell’attività di ricerca, 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) in quanto capace di resistere a tutte le sollecitazioni chimico-fisiche naturali (fig. 25).

Per quanto riguarda la realizzazione dei provini, sono stati confezionati una serie di campioni cubici in calcestruzzo dalle dimensioni 250x250x300 mm e fatti stagionare per sette giorni in un ambiente alla temperatura di 20°C e U.R. = 95% e successivamente per 15 giorni a T= 20°C e U.R. = 65%. Dopo questa stagionatura iniziale i provini sono stati trattati con i rivestimenti di protezione.

PRESCRIZIONE	CLASSE DI ESPOSIZIONE									
	1	2a	2b	3	4a	4b	5a	5b	5c <sup>1)</sup>	
Rapporto a/c massimo <sup>2)</sup>										
-cls*	---	0,70	0,55	0,50	0,50 <sup>7)</sup>	0,50	0,55	0,50	0,45	
-c.a.**	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50 <sup>7)</sup>	0,50	0,55	0,50	0,45	
-c.a.p.***	0,60	0,60	0,55	0,50	0,50 <sup>7)</sup>	0,50	0,55	0,50	0,45	
Dosaggio minimo cemento (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>3)</sup>										
-cls*	150	200	200	200	300	300	280	300	300	
-c.a.**	260	280	280	300	300	300	280	300	300	
-c.a.p.***	300	300	300	300	300	300	280	300	300	
Volume minimo di aria (%) inglobata per aggregati con diametro massimo di <sup>3)</sup> :										
32 mm			4 <sup>4)</sup>	4 <sup>4)</sup>		4 <sup>4)</sup>				
16 mm			5	5		5				
8 mm			6	6		6				
Aggregati resistenti al gelo <sup>6)</sup>			si	si		si				
Cls impermeabile			si	si	si	si	si	si	si	
Tipi di cemento secondo UNI-ENV 197/1										resistente ai solfati <sup>5)</sup> se il contenuto di solfati è > 500 mg/kg in acqua, > 3000 mg/kg nel suolo
Copriferro minimo (mm) secondo l'Eurocodice 2										
c.a.p.	c.a.	15	20	25	40	40	40	25	30	40
		25	30	35	50	50	50	35	40	50

1) In aggiunta, il calcestruzzo deve essere protetto dal contatto diretto con il mezzo aggressivo mediante rivestimenti, tranne nei casi in cui questa protezione non sia ritenuta necessaria.  
 2) I tipi di cemento permessi sono quelli previsti dalla prenorma UNI-ENV 197/1. Quando dei fini pozzolanici o ad attività idraulica latente vengono introdotti nella miscela, essi non devono essere tenuti in conto nel calcolo del dosaggio minimo di cemento e del massimo rapporto a/c conseguito.  
 3) con un fattore di spaziatura delle microbolle d'aria inglobata di 0,20 mm, misurato sul calcestruzzo indurito.  
 4) periodi di tempo, valori o misure diversi possono essere utilizzati qualora venga accertato mediante prove che il calcestruzzo possiede un'adeguata resistenza al gelo in accordo con UNI 7087.  
 5) La resistenza ai solfati di un cemento deve essere determinata secondo UNI 9156 ed UNI 9607.  
 6) Determinazione secondo UNI 8520/20.  
 7) Il rapporto a/c massimo previsto dalla norma ENV 206 per la classe di esposizione 4a è di 0,55.  
 \*: cls = calcestruzzo normale  
 \*\*: c.a. = calcestruzzo armato  
 \*\*\*: c.a.p. = calcestruzzo armato precompresso

Fig. 25 - Ingredienti e caratteristiche reologiche e meccaniche del calcestruzzo di mediocre qualità e del calcestruzzo top-quality

Effettuata l'applicazione dei rivestimenti sulla superficie del calcestruzzo, i provini rivestiti e non sono stati interessati da un'ulteriore stagionatura di sette giorni (T= 20°C; U.R. = 60%) prima dell'esposizione all'ambiente aggressivo di laboratorio (atmosfera arricchita al 30% di CO<sub>2</sub>).

La penetrazione all’anidrite carbonica è stata misurata a intervalli regolari utilizzando le metodologie descritte nella norma UNI 9944 dal titolo “Corrosione e protezione dell’armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo”.

### **9.3 Considerazioni conclusive**

Da quanto esposto in questo capitolo, si osserva che la valutazione del contributo alla durabilità del calcestruzzo da parte di rivestimenti e degli elementi di confinamento su di esso applicati, è stata ed è tutt’ora di forte interesse scientifico. Tuttavia, poichè le ricerche più datate sono al massimo risalenti agli anni ‘90, si nota che tale interesse risulta essere molto recente e per questo motivo, ricco di nuovi spunti su cui porre le basi per ulteriori interessanti ricerche. Infatti, se è vero che su tale tema molto si è detto riguardo il contributo dei rivestimenti di finitura sul degrado del calcestruzzo, ciò indirizza questo lavoro a valutare il contributo sul degrado del calcestruzzo da parte di altri componenti edilizi, dall’intonaco esterno alle miscele di placcaggio in calcestruzzo autocompattante che, al pari dei rivestimenti protettivi indagati dagli autori sopra citati, svolgono senz’altro anche il ruolo di proteggere il calcestruzzo dalle azioni ambientali esterne.

Sulla base delle informazioni riguardanti le metodologie d’indagine e le norme di riferimento presenti in questo capitolo (con particolare interesse verso le sperimentazioni più recenti) si è sviluppato il presente lavoro di ricerca, finalizzato allo studio dell’influenza di rivestimenti sulla durabilità degli elementi strutturali in calcestruzzo ordinario armato.

## Capitolo 10

### MATERIALI: caratteristiche dei campioni

#### 10.1 Generalità

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.

L'attività di ricerca si è proposta quindi di analizzare una composizione stratigrafica, che in maniera ricorrente si configura a seguito degli interventi succitati.

Per quanto sopra esposto, da una analisi degli strati funzionali e della tipologia di materiali impiegati, gli elementi costituenti la stratigrafia sono stati individuati in 4 e sono costituiti da: **nucleo** (costituito da calcestruzzo ordinario originario), dallo strato di **rinforzo** (costituito da calcestruzzo autocompattante), dallo strato di **rivestimento** (costituito da intonaco) e dallo strato di **finitura** (costituito dalla pittura) (Fig.26).

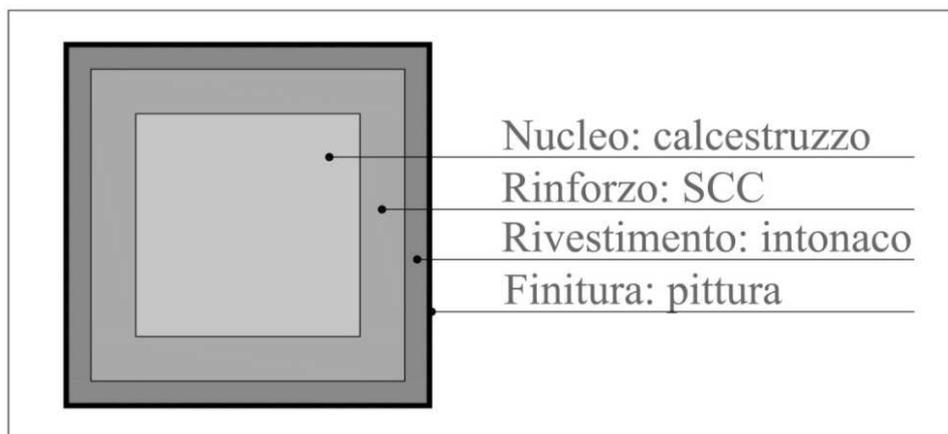


Fig. 26 - Schema della stratigrafia oggetto di studio

## 10.2 Materiali impiegati nel confezionamento dei campioni

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 armato.

Nello studio in oggetto, pur esistendo una specifica normativa di riferimento (UNI EN 1766:2001), si è ritenuto opportuno individuare, oltre alla composizione disposta dalla suddetta norma (denominato “calcestruzzo di riferimento”), un’ulteriore tipologia di calcestruzzo (denominato “calcestruzzo ordinario di prova”) la cui composizione si avvicina in maggior misura a quella di un calcestruzzo confezionato per la realizzazione degli 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.

### 10.2.1 Nucleo: calcestruzzo di riferimento

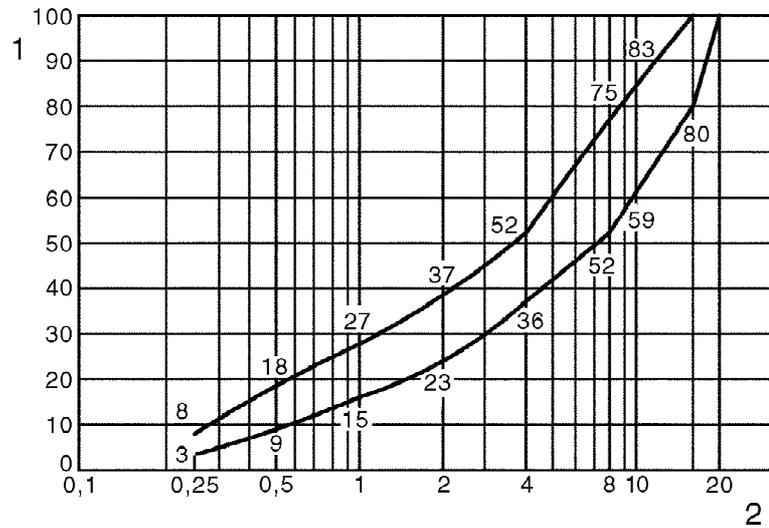
In accordo con quanto esposto, per la definizione di composizione e caratteristiche del calcestruzzo di riferimento da utilizzarsi per i campioni sottoposti alle prove di laboratorio, sono state seguite le indicazioni dalla norma UNI EN 1766 [8]. La norma specifica la composizione, le caratteristiche ed il procedimento di confezionamento del calcestruzzo di riferimento, da utilizzarsi nei metodi di prova per misurare le caratteristiche prestazionali dei prodotti e dei sistemi per la riparazione e la protezione delle strutture in calcestruzzo.

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 su una media di 28 giorni di  $50 \pm 5 \text{ MPa}$  nel caso di provini cubici.

Per quanto riguarda l’assortimento granulometrico, la norma propone un fuso granulometrico di riferimento all’interno del quale deve essere contenuta la curva granulometrica degli aggregati adottati nel confezionamento (fig. 27).

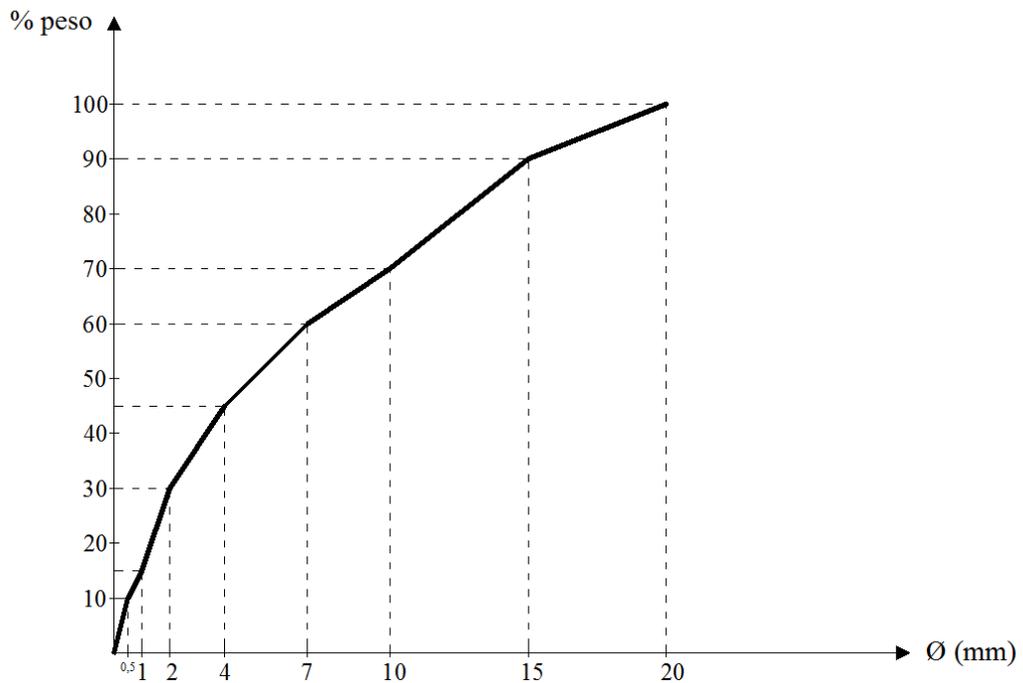
Legenda

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



**Fig. 27** - Fuso granulometrico degli aggregati per il confezionamento del calcestruzzo di riferimento

Di seguito si riporta inoltre la curva granulometrica adottata per il caso in esame (fig. 28)<sup>1</sup>.



**Fig. 28** - Curva granulometrica per gli aggregati utilizzati nel confezionamento dei campioni

<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.

Dopo il confezionamento i campioni sono stati sformati il giorno dopo (24 ore) e successivamente fatti stagionare per 27 giorni sott'acqua ad una temperatura di  $(21\pm 2)^\circ\text{C}$ .

### 10.2.2 Nucleo: calcestruzzo ordinario di prova

Data la forte variabilità delle caratteristiche del materiale al variare della sua composizione, dalle principali prescrizioni legislative viste di cui si è ampiamente esposto al paragrafo 1.3 (Decreto legge del 10/01/1907; R. Decreto legge del 29/07/1933; Decreto legge del 16/11/1939) e che regolamentavano l'esecuzione di opere in calcestruzzo armato nel periodo di realizzazione degli edifici oggetto dello studio (dopoguerra), è stato possibile definire una composizione tipo di calcestruzzo, considerata dalle stesse norme "dosaggio normale" (cap. 1 par. 1.3. del presente lavoro), e che ancora oggi viene definita in letteratura come composizione media di un  $\text{m}^3$  di calcestruzzo. [22] [23] [24]

Con riferimento a tale dosaggio tipo, si riportano di seguito le quantità dei vari componenti che entrano a far parte della miscela dei campioni confezionati, cui corrisponde una resistenza media a compressione pari a circa 25-30 Mpa.

CEMENTO	300 kg
PIETRISCO > 7 mm	0,8 $\text{m}^3$
SABBIA $\leq$ 4 mm	0,4 $\text{m}^3$
ACQUA	150 l

Tab. 10.2.2 - Dosaggio per un  $\text{m}^3$  di calcestruzzo

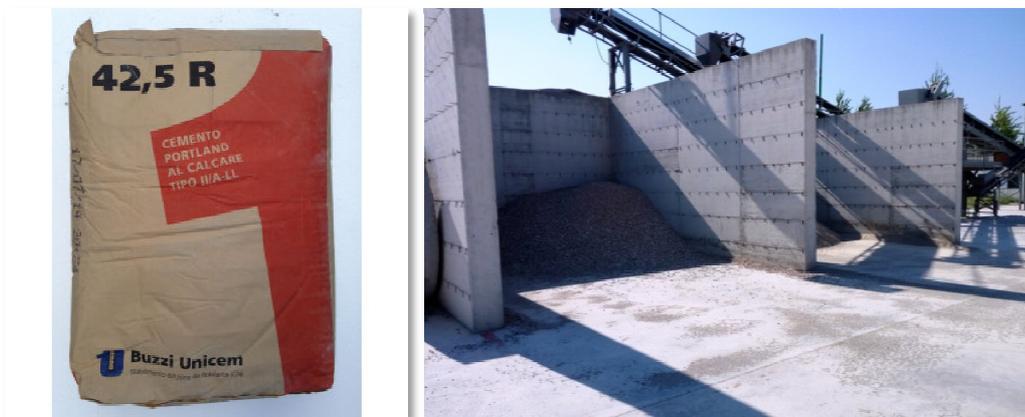


Fig. 29 – Cemento impiegato e impianto di approvvigionamento degli inerti



Fig. 30 – Attrezzature usate per la vagliatura della granulometria desiderata



Fig. 31 – Classi granulometriche selezionate

L'assortimento granulo metrico è stato scelto in maniera tale da soddisfare il fuso granulometrico proposto dal Decreto legge del 16/11/1939 dal titolo "Norme per l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato".

Si riporta di seguito il fuso granulometrico di riferimento (fig. 32), e la curva granulometrica adottata per il confezionamento dei campioni (fig. 33).

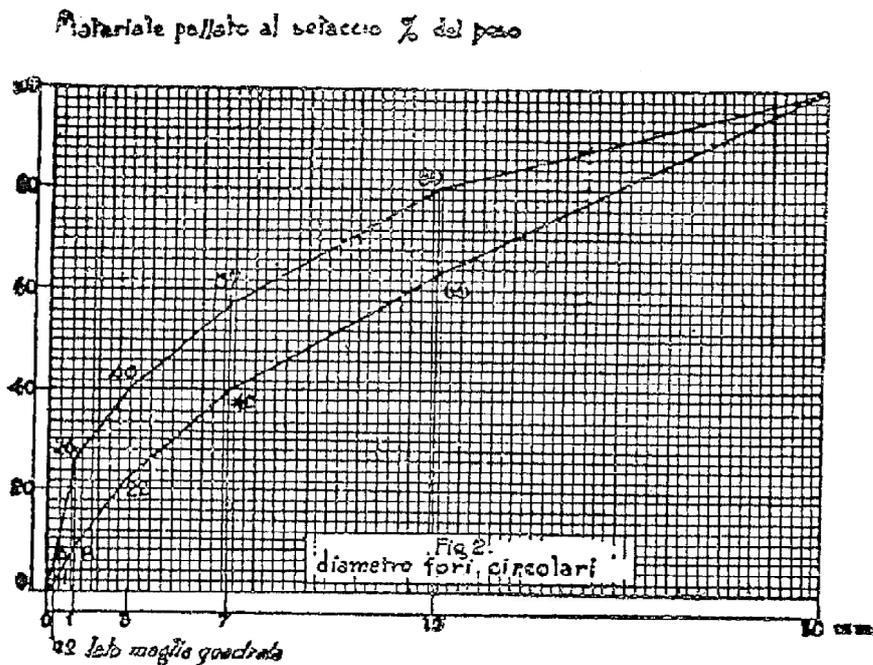
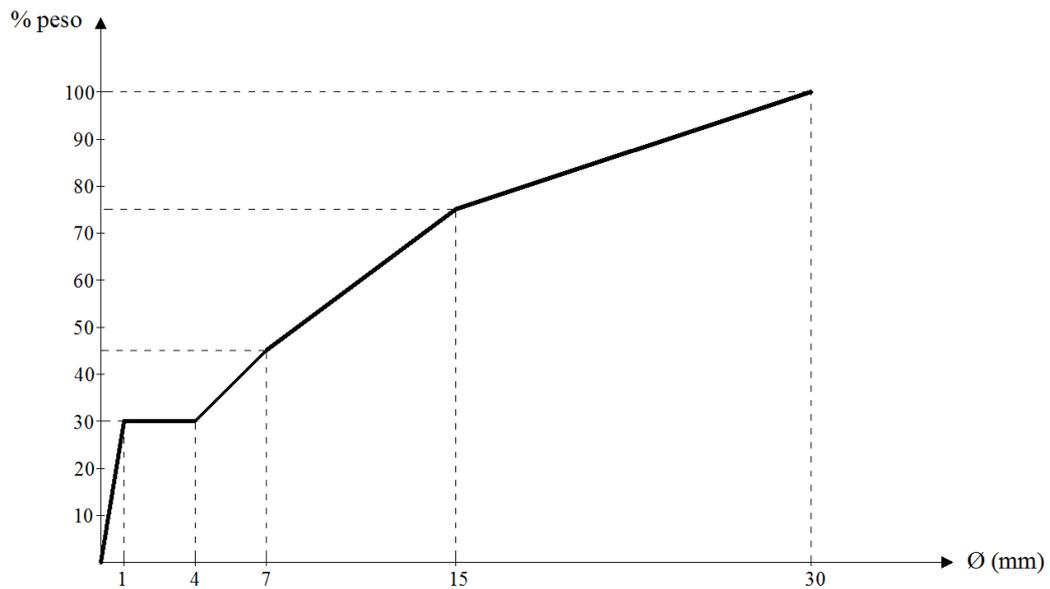


Fig. 32 - Fuso granulometrico per gli inerti proposto dal Decreto Legge del 16/11/1939



**Fig. 33** - Curva granulometrica per gli inerti utilizzati nel confezionamento dei campioni

Dopo il confezionamento eseguito nel rispetto della norma UNI EN 12390 (fig. 29, 30, 31), i campioni sono stati sformati il giorno dopo (24 ore) e successivamente fatti stagionare per 27 giorni sott’acqua ad una temperatura di  $(21 \pm 2)$  °C.

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 (f <sub>ck</sub> )	40 N/mm <sup>2</sup>
Rapporto acqua/cemento	≤ 0,45

**Fig. 34** - Estratto scheda tecnica SCC premiscelato Betonfluid Vaga

### 10.2.3 Rinforzo: calcestruzzo autocompattante SCC

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 state riassunte nella tabella di fig. 34.

### 10.2.4 Rivestimento: intonaci

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. In particolare, per lo studio in oggetto, gli elementi di rivestimenti del calcestruzzo autocompattante sono stati realizzati impiegando 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 è tradizionalmente costituito da cemento Portland, sabbia normale ed acqua nelle seguenti proporzioni in peso: una parte di cemento, tre parti di sabbia perfettamente secca e mezza parte d'acqua. La sabbia normale è una sabbia silicea, a granuli tondeggianti, di origine naturale, con dimensioni comprese tra 0,08 e 2,0 mm.

Il cemento utilizzato è di tipo Portland, ove per cemento Portland si intende il prodotto ottenuto per macinazione di clinker (consistente essenzialmente in silicati di calcio), con opportuna aggiunta di gesso dosato nella quantità necessaria per regolare il processo di idratazione.

---

<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 specifica applicazione in oggetto, esigenze operative hanno portato alla scelta di una malta cementizia premiscelata presente in commercio, in particolare la “ML 203” della Fassa Bortolo; si tratta di una malta secca premiscelata composta da cemento Portland, inerti leggeri con diametro < 4 mm ed additivi specifici per migliorare la lavorazione e l’adesione (fig. 35).

## 2. Malta Bastarda (MB)

L’intonaco di malta bastarda è quello più diffuso, in quanto combinando i diversi componenti riesce a sfruttarne al meglio le caratteristiche positive di ciascuno di essi, attenuandone allo stesso tempo i difetti.

Per gli stessi motivi operativi esposti in precedenza è stata scelta una malta bastarda premiscelata presente in commercio, in particolare la “MM 30” della Fassa Bortolo; si tratta di una malta secca premiscelata composta da calce idrata, cemento Portland, sabbie con diametro < 3 mm ed additivi specifici per migliorare la lavorazione e l’adesione (fig. 35).



**Fig. 35** - Sacchi da 20Kg e 30Kg di malta cementizia e malta bastarda premiscelate

### 10.2.5 Finitura: pitture

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. Sono state quindi individuate le seguenti pitture, le cui caratteristiche sono di seguito brevemente descritte:



Fig. 36 - Fusti di pittura al quarzo e silossanica

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

In accordo con quanto accennato nei paragrafi precedenti, la pittura al quarzo in generale è una pittura plastica caratterizzata da un buon potere riempitivo, buona traspirazione 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)

Le pitture silossaniche, di più recente sviluppo, sono impiegate per la tinteggiatura dei prospetti esterni di edifici moderni.

Contengono composti organo-silicici ed hanno 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.

Le pitture utilizzate per la realizzazione dei campioni sono commercializzate dalla LINVEA s.p.a., azienda napoletana produttrice di vernici. In particolare come pittura al quarzo è stato impiegato il prodotto "LINPLAST grana fine" mentre per la

pittura ai silos sani è stato impiegato il prodotto “SILOXAN-TOP” (fig. 36). In tutti i casi la tinteggiatura è di colore bianco.

Per ulteriori informazioni riguardo le modalità di posa in opera e le caratteristiche fisiche e meccaniche dei prodotti si rimanda alle schede tecniche allegate in appendice.

### **10.3 Numero, forma e dimensioni dei campioni**

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 nei paragrafi che seguono. Lo spessore di questi ultimi elementi, aggiunti al nucleo in calcestruzzo, è stato stabilito adottando il seguente criterio.

Si è partiti dall'analisi di un'intervento di incamiciatura “tipo”; osservando lo spessore dello strato usualmente realizzato per il ringrosso della sezione degli elementi strutturali esistenti, si è rilevato che in media tale spessore viene considerato nella misura corrispondente a circa 1/6 del lato dell'elemento stesso. Ritenendo opportuno mantenere nella simulazione di laboratorio le stesse proporzioni, in termini dimensionali, esistenti nella realtà, lo spessore viene calcolato in funzione delle dimensioni del nucleo.

Analogamente, applicando lo stesso criterio allo strato di intonaco, si osserva che in media tale spessore può essere considerato circa 1/15 del lato della sezione dell'elemento.

#### **10.3.1 Invecchiamento accelerato**

Allo scopo di valutare l'invecchiamento degli elementi costituenti la stratigrafia per effetto degli agenti atmosferici, si è scelto di seguire le indicazioni proposte dalla norma UNI EN 12390-1:2002 [12].

Per quanto riguarda la forma dei provini, la norma propone provini cubici o prismatici. Per motivi di opportunità relativa alle attrezzature a disposizione si è scelta la forma cubica e le dimensioni previste dalla norma 100x100x100 mm.

INVECCHIAMENTO ACCELERATO								
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
I.CP.1	Cls prova (anni '60)	2	Cubo	100x100x100	0	0	0	100x100x100
I.CP.2	Cls prova (anni '60)	2	Cubo	100x100x100	0	0	0	100x100x100
I.CR.1	Cls riferimento (UNI EN1766)	2	Cubo	100x100x100	0	0	0	100x100x100
I.CR.2	Cls riferimento (UNI EN1766)	2	Cubo	100x100x100	0	0	0	100x100x100
I.CP.SCC.MC.PQ.1	Cls prova + scc + mc + pq	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CP.SCC.MC.PQ.2	Cls prova + scc + mc + pq	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CP.SCC.MB.PS.1	Cls prova + scc + mb + ps	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CP.SCC.MB.PS.2	Cls prova + scc + mb + ps	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CR.SCC.MC.PQ.1	Cls rif. + scc + mc + pq	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CR.SCC.MC.PQ.2	Cls rif. + scc + mc + pq	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CR.SCC.MB.PS.1	Cls rif. + scc + mb + ps	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
I.CR.SCC.MB.PS.2	Cls rif. + scc + mb + ps	2	Cubo	100x100x100	17	7	2	152x152x152
<b>TOTALE CAMPIONI</b>		<b>24</b>						

**Fig. 37** – Caratteristiche dei campioni per l'invecchiamento accelerato

In fig. 37 si è riportato lo schema riassuntivo di sigla, composizione, numero, forma e dimensioni, dei campioni che sono stati confezionati per l'esecuzione delle prove di invecchiamento accelerato.

Per i motivi illustrati in precedenza, è stato adottato uno spessore di circa 17 mm per lo strato di calcestruzzo autocompattante e 7 mm per lo strato di intonaco,

mentre lo spessore della finitura costituito da rasante e pittura è vincolato da esigenze operative ad essere di 2 mm.



**Fig. 38** – Nucleo in calcestruzzo in fase di confezionamento



**Fig. 39** – Nucleo in calcestruzzo di prova



**Fig. 40** – Cassero in acciaio zincato realizzato ad hoc per il getto degli strati di rivestimento



**Fig. 41** – Provini nella loro configurazione definitiva



**Fig. 42** – Provino I.CR.SCC.MC.PQ.2 nella sua configurazione definitiva

### 10.3.2 Carbonatazione accelerata

Per le prove di carbonatazione, orientate alla valutazione dell'influenza degli strati esterni sulla carbonatazione del calcestruzzo, si è scelto di seguire la strada proposta dalla norma EN 13295: 2004 [3] già utilizzata in letteratura per la valutazione dell'influenza dei rivestimenti di finitura sulla durabilità del calcestruzzo.

Per quanto riguarda il numero dei provini, la norma prevede che la prova debba essere eseguita su due campioni di prodotto da esaminare e confrontati con altrettanti campioni di riferimento.

Per quanto riguarda le dimensioni dei provini, 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.



**Fig. 43** – A sinistra casseri in acciaio zincato realizzati ad hoc in varie misure per l'esecuzione degli strati di rivestimento. A destra nuclei in calcestruzzo di prova

In fig. 45 si riporta uno schema riassuntivo indicante sigla, composizione, numero, forma e dimensioni, dei campioni che sono stati confezionati per le prove di carbonatazione accelerata.



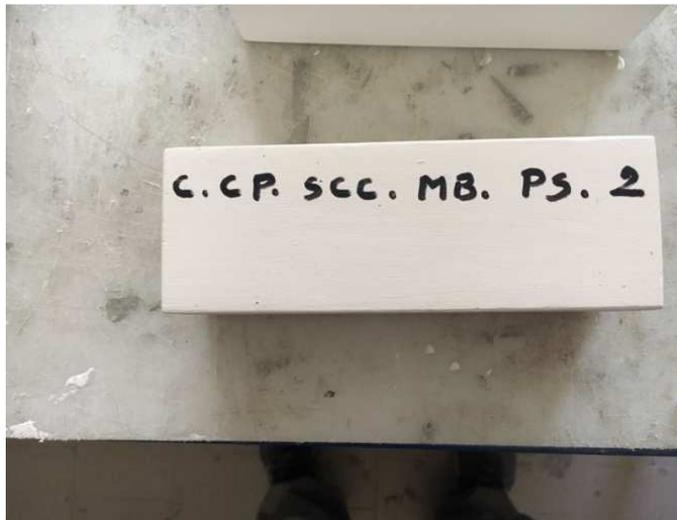
**Fig. 44** – Nuclei in calcestruzzo ordinario rivestiti con SCC

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 + sec	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CP.SCC.2	Cls prova + sec	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CR.SCC.1	Cls rif. + sec	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CR.SCC.2	Cls rif. + sec	2	Prisma	40x40x160	7	0	0	54x54x174
C.CP.SCC.MC.PQ.1	Cls prova + sec + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MC.PQ.2	Cls prova + sec + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MB.PS.1	Cls prova + sec + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CP.SCC.MB.PS.2	Cls prova + sec + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MC.PQ.1	Cls rif. + sec + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MC.PQ.2	Cls rif. + sec + mc + pq	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MB.PS.1	Cls rif. + sec + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
C.CR.SCC.MB.PS.2	Cls rif. + sec + mb + ps	2	Prisma	40x40x160	7	3	2	64x64x184
<b>TOTALE CAMPIONI</b>		<b>36</b>						

Fig. 45 – Caratteristiche dei campioni per la carbonatazione accelerata



**Fig. 46** – Provini nella loro configurazione definitiva



**Fig. 47** – Provino destinato alla carbonatazione accelerata nella sua configurazione definitiva costituito da nucleo in calcestruzzo di prova, rinforzo in SCC, rivestimento in malta bastarda e finitura in pittura silossanica

Si noti come fra le sigle dei provini confezionati per il programma di carbonatazione accelerata vi siano 2 tipologie di provini (C.CP.3.d e C.CR.3.d) confezionati con lo scopo specifico di sottoporli, dopo il completamento dell'esposizione, a prove meccaniche finalizzate a valutare l'eventuale variazione delle capacità in termini di resistenza e di duttilità. Ovviamente entrambe le tipologie sono state realizzate in 2 esemplari per confrontare adeguatamente le caratteristiche nelle due condizioni, prima e dopo l'esposizione.

## Capitolo 11

### **METODI: invecchiamento e carbonatazione accelerati**

#### **11.1 Generalità**

In accordo con quanto accennato in precedenza, le sperimentazioni sono state condotte sottoponendo i campioni, nelle configurazioni definite nei paragrafi precedenti, a prove di invecchiamento accelerato ed a prove di carbonatazione accelerata. Le prime sono state eseguite in collaborazione con il Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo, mentre le seconde sono state svolte presso il laboratorio TecnoLab s.r.l. di Napoli.

Le operazioni di confezionamento dei provini è stato eseguito in parte presso il laboratorio TecnoLab s.r.l. di Napoli ed in parte presso il Laboratorio di Ingegneria Edile del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale. Successivamente i campioni destinati all'invecchiamento artificiale sono stati spediti all'Università degli Studi di Palermo. In entrambi i casi è stata eseguita una serie di indagini, di seguito meglio specificate, finalizzate alla determinazione delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche dei provini nel loro stato conseguente alle operazioni di invecchiamento e carbonatazione accelerati.

#### **11.2 Invecchiamento accelerato**

L'esecuzione di un programma di invecchiamento accelerato dei provini opportunamente confezionati, come vedremo dei prossimi paragrafi, è stato finalizzato a valutare in che misura, e con quali modalità, gli elementi costruttivi caratterizzati nella maniera approfondita nel capitolo 10 subiscono decadimenti prestazionali, specie per quanto riguarda gli strati superficiali nelle combinazioni formulate. Per fare valutazioni di questo tipo è stato attuato un programma di prove mirato ad indagare l'avanzamento in particolar modo delle alterazioni cromatiche e delle situazioni di distacco fra gli elementi, attraverso l'esecuzione di indagini spettrofotometriche e termografiche a step temporali prefissati.

### 11.2.1 Riferimenti normativi

#### UNI EN 13187:2000

“Prestazione termica degli edifici - Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all’infrarosso”. Si tratta della norma che regola l’attività di rilievo termografico e l’analisi dei risultati.

ISO 15686 PART 8 : REFERENCE SERVICE LIFE AND SERVICE LIFE ESTIMATION. Tale normativa costituisce la parte della nota norma che è riferito alla vita utile di riferimento ed alla stima di quest’ultima.

In questo ambito, tra le metodologie contemplate per l’acquisizione di informazioni in merito alla vita utile degli edifici, viene sancita la possibilità di ricorso, a determinate condizioni, all’esecuzione di prove accelerate di laboratorio.

### 11.2.2 Definizione del programma di prova

Le prove sono finalizzate a monitorare la variazione delle caratteristiche prestazionali riferite alle diverse soluzioni individuate, in relazione all’esposizione ai fattori climatici. Il ciclo di invecchiamento accelerato messo a punto per i test, che tiene conto della natura dei materiali da testare, è derivato dall’analisi ed elaborazione dei dati meteo-climatici della città di Napoli, riferiti agli ultimi 5 anni.

In particolare, sono stati analizzati i periodi di condizioni meteo-climatiche pressoché costanti, che hanno permesso di stabilire le durate dei relativi segmenti del ciclo ed i valori di temperatura ed umidità relativa. Di seguito si riporta l’output finale del modello ricavato per la città di Napoli, elaborato dal D.I.C.E.A., e già in uso per gli studi sulla durabilità degli elementi costruttivi:

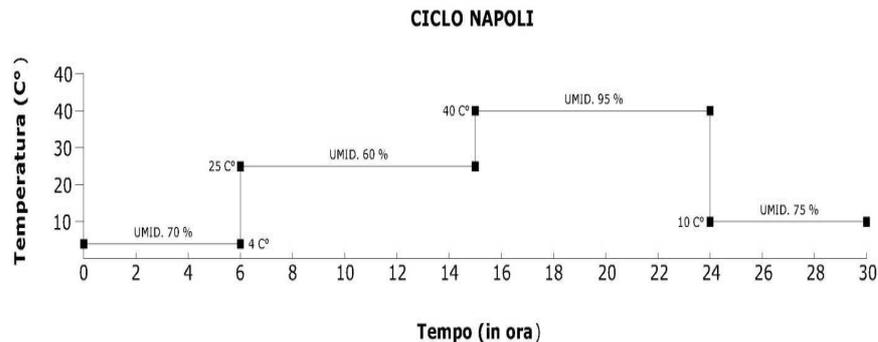


Fig. 48 – Graficizzazione dell’output finale del modello ricavato per la città di Napoli

SOTTOCICLI	DURATA	TEMPERTURA	UMIDITÀ RELATIVA	IRRAGGIAM.	H2O
FREDDO	6 ore	4 C°	70 %	No	No
CALDO MITE SECCO	9 ore	25 C°	60 %	Si	No
CALDO INTENSO UMIDO	9 ore	40 C°	95 %	Si	No
PIOGGIA	6 ore	10 C°	75 %	No	Si
<b>TOTALE CICLO</b>	<b>30 ore</b>	<b>20 – 40 – 60 cicli</b>			

Fig. 49 – Output finale del modello ricavato per la città di Napoli

Il programma di prova prevede che gli stessi provini subiscano 4 step di invecchiamento accelerato in camera climatica, attraverso la ripetizione del ciclo base elaborato sulla scorta degli studi effettuati dal gruppo di ricerca del DICEA e riportato in figura 50. Seguono le indagini sperimentali termografiche e spettrofotometriche, finalizzate rispettivamente ad apprezzarne le eventuali zone di distacco e le variazioni di colore; ognuna di queste effettuata al termine dell'esecuzione di un numero di cicli pari a 20.

Step	Descrizione
1°	<u>Inizio stagionatura dei campioni</u> : Secondo quanto stabilito dall'allegato A della norma EN 13295:2004, dopo 24 ore dal confezionamento i provini sono stati sformati e fatti stagionare per 27 giorni in acqua ad una temperatura di $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ .
2°	<u>Inizio conservazione in ambiente di laboratorio</u> : A fine stagionatura i campioni sono stati conservati in ambiente di laboratorio ad una temperatura di $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e ad una umidità relativa di 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 24h.
3°	<u>Inizio esposizione in camera climatica</u> : Terminato il periodo di conservazione, i provini sono stati alloggiati all'interno della camera climatica e sottoposti ai cicli di sollecitazione climatica esposti in precedenza.
4°	<u>Indagini termografiche</u> (distacco).
5°	<u>Indagini spettrofotometriche</u> (colore).

Fig. 50 – Programma di prove per i campioni sottoposti a invecchiamento accelerato

### 11.2.3 Attrezzature utilizzate

#### ACS CHALLENGE CH1200SP

La strumentazione per l'esecuzione delle prove di invecchiamento accelerato è costituita dalla camera climatica ACS CHALLENGE CH1200SP, della Angelantoni Test Technologies (fig. 51), in dotazione al Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo.

La macchina è stata progettata per eseguire test di temperatura, umidità, pioggia e raggi UV su prodotti industriali e apparati elettronici. Le prove climatiche consentono di stabilire l'affidabilità e le prestazioni nel tempo di materiali e componenti esposti a particolari condizioni ambientali.

La camera viene gestita da PC in ambiente Windows con l'utilizzo del software WinKratos di acquisizione, visualizzazione e gestione dati di prova.



**Fig. 51** – Camera Climatica ACS Challenge CH1200 SP

<b>Modello</b>	<b>CHALLENGE CH1200 SP</b>
<b>N. Seriale</b>	<b>43119</b>
<b>Anno</b>	<b>2006</b>
<b>Dimensioni utili interne (LxPxH)</b>	1000x1130x1020 mm
<b>Dimensioni esterne (LxPxH)</b>	1250x2160x2036 mm
<b>Capacità utile</b>	1152 lt
<b>Campo di temperatura</b>	-40° a +180° C
<b>Precisione</b>	± 0,25° - 0,3° C
<b>Campo di umidità (con temp. da +5° a 95° C)</b>	10 – 98%
<b>Precisione UR</b>	1% - 3%
<b>Campo punto di rugiada per prove non continuative</b>	-20° - +2° C
<b>Gas refrigerante</b>	R404 A
<b>Peso max caricabile su piano di appoggio</b>	50 kg
<b>Peso max caricabile sul pavimento</b>	160 Kg
<b>Carico a pavimento</b>	367 Kg/m <sup>2</sup>
<b>Rumore aereo con condensatore ad aria</b>	65 dB
<b>Peso</b>	990 KG
<b>Tensione di alimentazione</b>	400 +6/-10% 50 Hz 3+N+T
<b>Assorbimento elettrico Max</b>	26,3 A
<b>Potenza nominale</b>	8,7 kW
<b>Potenza impegnata</b>	14,6 kW
<b>Max carico termico interno</b>	1300 (-25° C)
<b>Assorbimento</b>	2500 W

Fig. 52 – Specifiche tecniche della camera climatica ACS Challenge CH1200 SP

**TERMOCAMERA FLIR P660**

Per l'esecuzione delle prove termografiche stabilite dal programma di prova è stata impiegata una termocamera Flir P660 in dotazione al Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo. Le immagini rilevate forniscono informazioni utili in merito allo stato di coesione tra i diversi strati.



**Fig. 53** – Termocamera Flir P660

Le caratteristiche tecniche dell'attrezzatura sono riassunte in Fig. 54:

CARATTERISTICHE	
Intervallo di temperatura	-40°C... + 500 °C (opzionale fino a +2000°C)
Sensibilità Termica	30 mK a 30°C
Precisione	± 1°C o ± 1% della lettura
Frequenza di immagine	30 Hz
Campo Spettrale	7,5 – 13 μm
Risoluzione IR	640×480 pixel
Puntatore LCD	1 area con min./max./intervallo
Alimentazione	2 x Batteria ricaricabile agli ioni di Litio (durata 3 ore in continuo)
Lenti disponibili	19mm (campo 45°) – 38mm (Campo 24°) 76mm (campo 12°) – 131mm (Campo 7°) Macro 0,5x per obiettivo 24° – Macro 1x

**Fig. 54** – Caratteristiche tecniche della termocamera Flir P660

### SPETTROFOTOMETRO KONICA MINOLTA CM-2300d

Per l'esecuzione delle prove spettrofotometriche stabilite dal programma di prova è stata impiegata uno spettrofotometro Konica Minolta in dotazione al Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo. Le rilevazioni effettuate forniscono informazioni utili in merito alle caratteristiche di alterazione cromatica della superficie.



**Fig. 55** – Spettrofotometro Konica Minolta CM-2300d

Le caratteristiche tecniche dell'attrezzatura sono riassunte in Fig. 56:

Modello	CM-2300d
<b>Illuminazione / Geometria del Sistema</b>	d:8° (Illuminazione diffusa, angolo visione 8°), misura contemporanea della Componente speculare inclusa SCI (di:8° speculare componente inclusa) / Componente speculare esclusa SCE (de:8° speculare componente esclusa) Conforme a CIE No.15,ISO 7724/1,ASTM E1164,DIN 5033 Teil7 e JIS Z8722 Condizioni C standard.
<b>Dim. Sfera Integrazione</b>	Ø 52 mm
<b>Rilevatore</b>	Array di fotodiodi al Silicio (doppia 40 elementi)
<b>Dispositivo di Separazione spettrale</b>	Reticolo di diffrazione
<b>Range lungh. d'onda</b>	360 nm to 740 nm
<b>Passo lungh. d'onda</b>	10 nm
<b>Ampiezza metà altezza</b>	Circa 10 nm
<b>Range in Riflessione</b>	0 a 175%, risoluzione: 0.01%
<b>Sorgente luminosa</b>	2 lampade Xenon pulsate
<b>Tempo di misura</b>	Circa. 1.5 secondo

**Fig. 56** – Principali caratteristiche dello Spettrofotometro Konica Minolta CM-2300d

### 11.3 Carbonatazione accelerata

L'esecuzione di un programma di carbonatazione accelerata dei provini opportunamente confezionati, come approfondiremo nei paragrafi che seguono, ha avuto come obiettivo quello di valutare il comportamento degli elementi costruttivi caratterizzati nella maniera approfondita nel capitolo 10, nei confronti del fenomeno della carbonatazione. Evidentemente la presenza di elementi di confinamento costituiscono un'utile contributo alla protezione del calcestruzzo, ma in che misura ciò accade? E soprattutto in che modo si comportano le specifiche, e certamente diverse, stratigrafie messe a punto? Il programma di prove messo a punto si basa sulla misurazione della profondità di carbonatazione ai diversi step temporali ed al confronto delle rilevazioni inerenti i differenti provini.

#### 11.3.1 Riferimenti normativi

L'espletamento della prova di carbonatazione accelerata nonché l'elaborazione dei risultati, sono stati effettuati in accordo con le normative di seguito brevemente esposte.

UNI EN 13295: 2005 [19]

La presente norma, 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>1</sup>, ad una temperatura di (21±2)°C e umidità relativa (U.R.) di (60±10)%.

Al paragrafo 5 della presente norma si elencano le attrezzature necessarie per l'esecuzione della prova:

- 1) Camera sigillata per l'esposizione dei campioni, dotata di ingressi e uscite di gas in modo tale che sia garantito un flusso uniforme in tutte le parti dell'attrezzatura;
- 2) La fornitura di gas, con 1% di CO<sub>2</sub> in aria, deve essere fornita in forma premiscelata;

---

<sup>1</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>.

- 3) Utensili per il taglio del provino tra cui un martello e uno scalpello;
- 4) Soluzione di fenolftaleina comprendente 1g di fenolftaleina in 70 ml di etanolo e 30 ml di acqua demineralizzata;
- 5) Apparecchiature di misura, ad esempio, righello o calibro.

Confezionati i campioni e fatti stagionare come già descritto al cap. 8 della presente tesi, la norma prevede, prima dell’inserimento dei campioni nella camera, un’ulteriore fase chiamata di “condizionamento”, i cui campioni devono essere portati ad un contenuto di umidità (U.R.) =  $(60\pm 10)\%$  e ad una temperatura  $T = (21\pm 2)^\circ\text{C}$  fino a quando la variazione di peso del provino è inferiore allo 0,2% in un periodo di 24 ore.

A questo punto, inseriti i campioni nella camera, ad intervalli regolari, è stata misurata la profondità di carbonatazione<sup>2</sup> secondo la procedura indicata nella norma EN 14630:2003 [13] par. 4.2.

Per ogni misura, una porzione di spessore 30 mm è stata tagliata via dal prisma con l’ausilio di una sega circolare, e la sezione rotta è stata spruzzata con l’indicatore della soluzione di fenolftaleina.

#### UNI EN 14630 [25]

La presente norma dal titolo “*Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo – Metodi di prova – Determinazione della profondità di carbonatazione di un calcestruzzo indurito con il metodo della fenolftaleina*” fornisce un metodo per misurare lo spessore dello strato carbonatato di un calcestruzzo indurito.

Al paragrafo 4.2 la norma definisce che:

*“Le superfici appena rotte devono essere pulite da polvere e particelle sciolte senza utilizzare acqua né abrasione, e devono essere spruzzate con soluzione indicatore di fenolftaleina in quantità appena sufficiente ad inumidire la superficie*

---

<sup>2</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”.

*senza colare lungo i bordi. La prova deve essere completata appena possibile dopo aver spruzzato la soluzione sulla faccia del calcestruzzo da indagare.”*

In una nota della presente norma, si specifica inoltre che dovrebbe essere misurata la modifica istantanea del colore in rosso-violaceo, e registrata entro 30 s dopo la spruzzatura. Se il colore cambia lentamente e/o il confine è sfocato, il metodo non darà risultati abbastanza accurati in tutti i casi e può indicare zone a carbonatazione parziale.

### 11.3.2 Definizione del programma di prova

L'espletamento della prova di carbonatazione accelerata, nonché l'elaborazione dei risultati, sono stati effettuati, in accordo con le normative brevemente esposte nel paragrafo seguente, presso il laboratorio TecnoLab s.r.l. di Napoli.

Step	Descrizione
1°	<u>Inizio stagionatura dei campioni:</u> Secondo quanto stabilito dall'allegato A della norma EN 13295:2004, dopo 24 ore dal confezionamento i provini sono stati sformati e fatti stagionare per 27 giorni in acqua ad una temperatura di $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ .
2°	<u>Inizio conservazione in ambiente di laboratorio:</u> A fine stagionatura i campioni sono stati conservati in ambiente di laboratorio ad una temperatura di $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e ad una umidità relativa di 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 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 $\text{CO}_2$ , ad una temperatura di $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e ad una umidità relativa di U.R. $(60 \pm 10)\%$ .
4°	<u>1<sup>a</sup> misurazione della profondità di carbonatazione (a 15 gg):</u> al quindicesimo 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 fenoltaleina proposto dalla norma EN 13295:2004. Il metodo consiste nell'applicare su un pezzo appena rotto di campione, una soluzione indicatore di fenoltaleina seguendo la procedura di cui al punto 4.2 della norma EN 14630 [18].
5°	<u>2<sup>a</sup> misurazione della profondità di carbonatazione (a 30 gg)</u>
6°	<u>3<sup>a</sup> misurazione della profondità di carbonatazione (a 45 gg)</u>
7°	<u>Prova di flessione (valutazione delle proprietà meccaniche)</u>

**Fig. 57** – Programma di prove per i campioni sottoposti a carbonatazione accelerata

Il programma di prove, ha previsto per gli stessi provini 7 step di carbonatazione accelerata, attraverso l'esposizione alle condizioni illustrate (fig. 57).

### 11.3.3 Attrezzatura utilizzata

L'attrezzatura impiegata per la realizzazione del programma di carbonatazione accelerata individuato, è costituito da un essiccatore di capacità nota (Fig. 58), nel quale, attraverso una pompa per il vuoto si è arricchito l'ambiente con la concentrazione di anidride carbonica desiderata. Durante l'esecuzione della prova, si è provveduto a monitorare accuratamente lo stato di tenuta del sistema ed il tenore di CO<sub>2</sub> mediante opportuno sensore applicato superiormente alla campana al tappo di chiusura a due uscite.



Fig. 58 – Essiccatore e sistema adottato per la prova di carbonatazione accelerata

## 11.4 Il rescaling

Nell'esecuzione di prove di invecchiamento accelerato in laboratorio, in generale, la questione relativa alla necessità di confrontare le esperienze osservate con le condizioni relative all'invecchiamento "naturale" costituisce senza dubbio un argomento di importanza cruciale.

Si tratta del *rescaling*, che si configura appunto come la necessità di individuare una relazione temporale (appunto *time rescaling*) fra i risultati relativi all'invecchiamento dei componenti studiati in condizioni di laboratorio e quello dei medesimi componenti esposti a condizioni di esposizione naturali.

Nel lavoro in oggetto, al fine di confrontarci con questi aspetti, si è provveduto a confezionare gli stessi identici provini, sia per numero che per caratteristiche, realizzati per l'esecuzione delle prove in laboratorio, sia in relazione all'invecchiamento accelerato che alla carbonatazione accelerata. Tali provini sono poi stati esposti agli agenti atmosferici in una configurazione confrontabile con le reali condizioni di esposizione di un pilastro in calcestruzzo armato sottoposto a intervento di blindatura con calcestruzzo autocompattante, al fine di confrontare i risultati ottenuti in laboratorio con l'effettivo comportamento in opera.



**Fig. 59** – Edificio in Via Riviera di Chiaia n.276

Nello specifico l'esposizione è stata effettuata posizionando i campioni sullo sbalzo in prossimità della tamponatura esterna della facciata principale di un edificio sito nel Comune di Napoli alla Via Riviera di Chiaia n.276, e posto al 4° livello fuori terra (Fig. 59).

L'esposizione della facciata è a sud, ed è utile sottolineare che l'edificio scelto per tale esposizione fu realizzato con struttura portante intelaiata in calcestruzzo armato

ed è stato realmente oggetto di un importante intervento di incamiciatura degli elementi portanti mediante angolari e calastrelli in acciaio e getto integrativo con calcestruzzo autocompattante, con caratteristiche identiche a quelle scelte per la realizzazione dei campioni (*Betonfluid Vaga*).

È evidente che l'osservazione dei risultati relativi al confronto delle condizioni di esposizione reali con quelle accelerate di laboratorio richiede tempistiche significative. Per questo motivo è prematuro nel lavoro in oggetto spingersi ad eseguire delle rilevazioni, ma è necessario attendere ulteriormente che l'invecchiamento naturale faccia il suo corso per poi trarne le informazioni necessarie. Operazione che senz'altro verrà affrontata in successivi approfondimenti.

Inoltre, sempre con l'obiettivo di affrontare la questione del rescaling, con riferimento alle disposizioni della norma ISO15686-7, contestualmente all'operazione di cui sopra verranno effettuate delle osservazioni in sito di una serie di edifici già individuati, che presentano caratteristiche costruttive e condizioni di esposizione confrontabili con quelle simulate in laboratorio.

## Capitolo 12

### **RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE**

#### **12.1 Introduzione**

Nei paragrafi che seguono si illustreranno i risultati ottenuti dalla sperimentazione eseguita. Tuttavia, per una lettura più approfondita delle rilevazioni effettuate in entrambi i programmi di prova, si rimanda all'appendice.

Per quanto riguarda il programma di invecchiamento accelerato, come accennato in precedenza, esso è stato svolto integralmente presso il Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo, sia relativamente alle fasi di esposizione che alle fasi di rilevazioni termografiche e spettrofotometriche.

Il programma di carbonatazione accelerata, invece, è stato integralmente svolto presso il laboratorio TecnoLab s.r.l. di Napoli sia le fasi di esposizione che quelle di taglio, lettura delle profondità di carbonatazione ed esecuzione delle prove meccaniche.

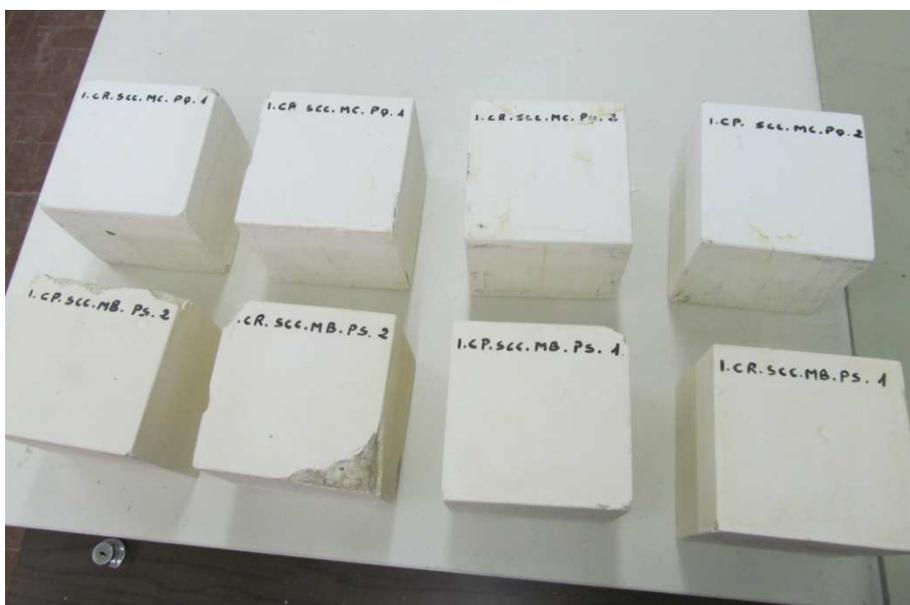
#### **12.2 Prove di invecchiamento accelerato**

In accordo con gli step evidenziati nel programma di prova di invecchiamento accelerato illustrato al paragrafo 11.2.2, a seguito del confezionamento e della stagionatura dei provini di cui al paragrafo 10.3.1 si è proceduto, per tutti i campioni esaminati, ad applicare il ciclo di invecchiamento illustrato al paragrafo 11.2.2 e ad effettuare le indagini termografiche e spettrofotometriche al termine dell'esecuzione del numero di cicli stabilito (20, 40, 60).

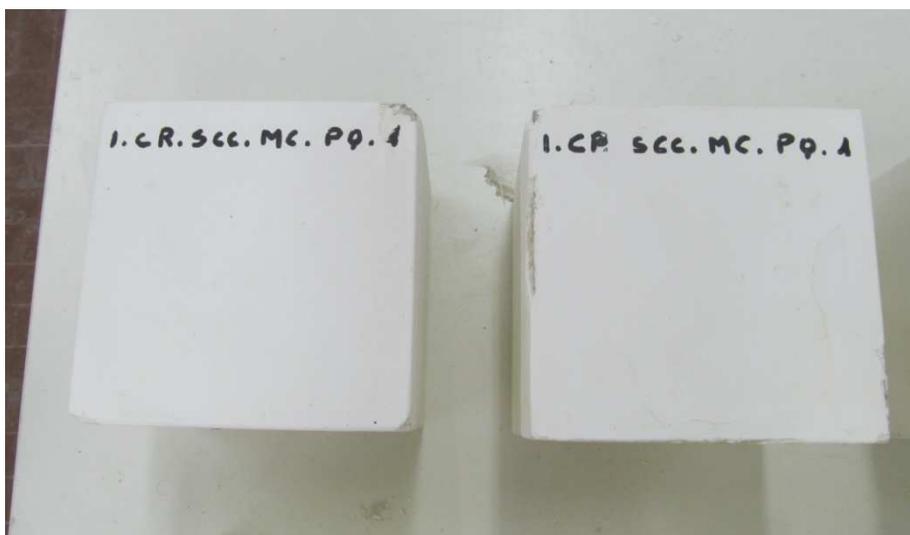
Vista la tipologia di rilevazioni eseguite, riguardanti soprattutto gli strati superficiali dei provini, sono stati esclusi da tale applicazione i provini costituiti esclusivamente dal conglomerato cementizio. Focalizzando l'attenzione, in questo modo, sull'effetto prodotto dai cicli di invecchiamento accelerato sulle caratteristiche di adesione al supporto e di resa cromatica delle tinteggiature applicate.



**Fig. 60** – Provini esposti in camera climatica ACS Challenge CH1200 SP



**Fig. 61** – Provini estratti dalla camera climatica la termine di 60 cicli

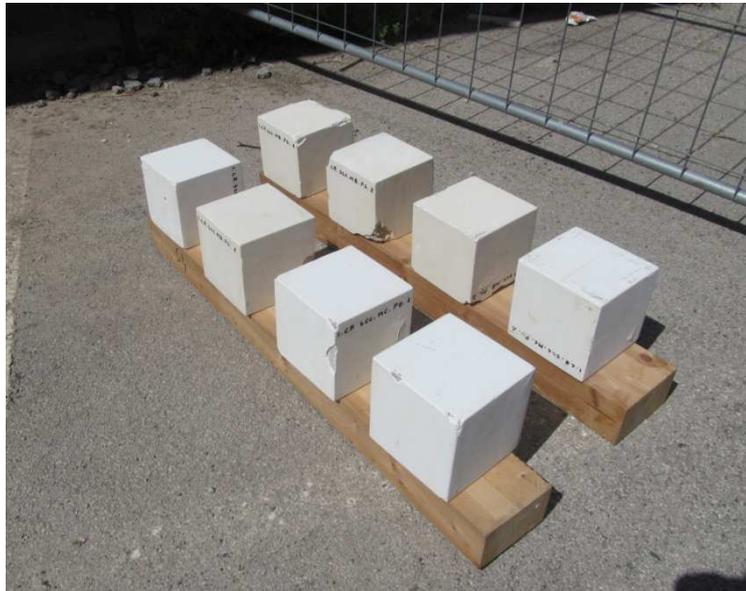


**Fig. 62** – Provini con strato di finitura costituito da pittura al quarzo

### 12.2.1 Analisi delle rilevazioni termografiche

La tecnica di rilievo termografico impiegata per l'individuazione di disomogeneità nell'adesione al supporto di elementi di rivestimento, prevede la possibilità di conoscere in maniera dettagliata la condizione degli strati, attraverso l'impiego di una termocamera opportunamente settata per lo scopo specifico.

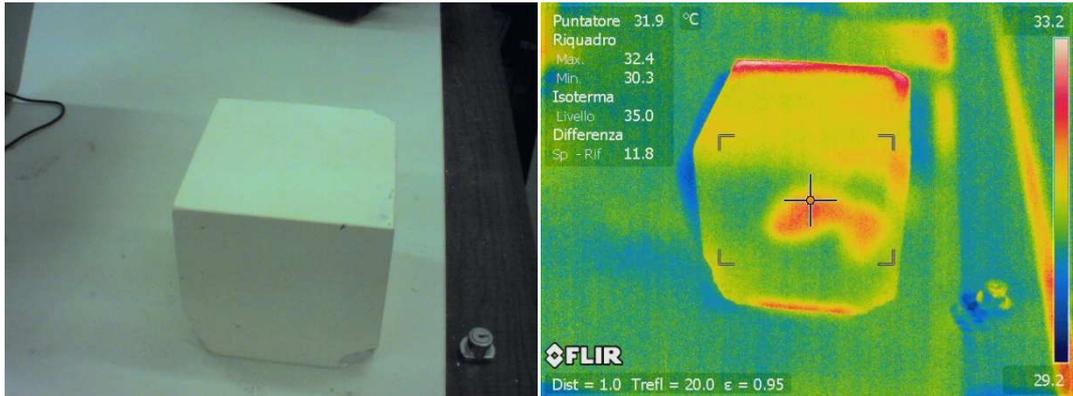
Al fine di consentire allo strumento di rilevare accuratamente l'oggetto è sempre opportuno operare a seguito di naturale irraggiamento solare. Nel caso in oggetto, trattandosi di elementi movibili, che al momento della prova termografica necessitavano di tale trattamento, si è provveduto ad esporre gli elementi preventivamente al riscaldamento per irraggiamento solare.



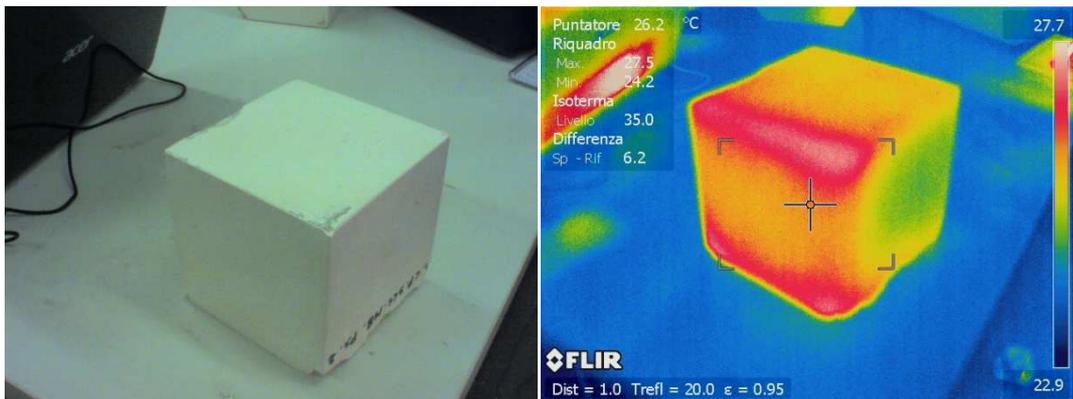
**Fig. 63** – Provini esposti all'irraggiamento solare prima dell'analisi termografica

A seguito di questo trattamento termico, rispetto ad una superficie con rivestimento ben aderente, dove l'energia dovuta al riscaldamento solare riesce a penetrare all'interno dello strato superficiale e del sottostante, le superfici (con medesime caratteristiche morfologiche e riscaldate dal medesimo soleggiamento) che invece sono soggette a distacco, o parziale adesione al supporto, si presentano con una temperatura superficiale maggiore.

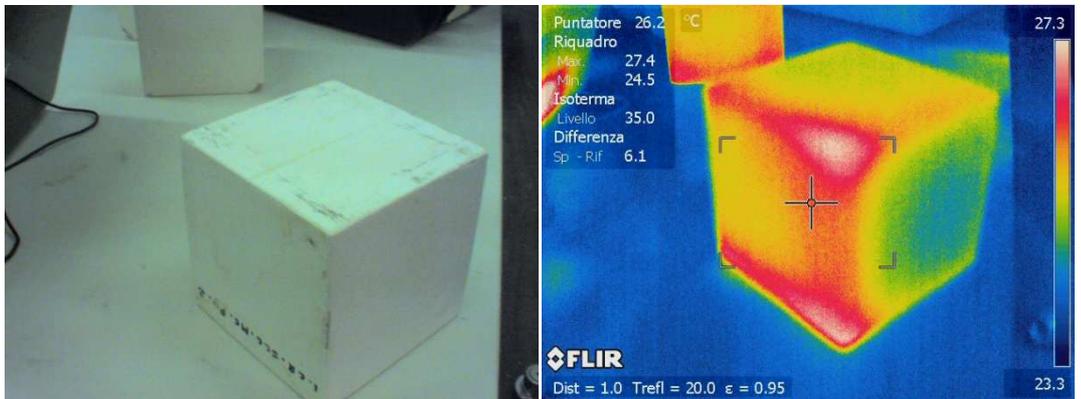
Tale differenza termica è immediatamente rilevata dallo strumento e registrata. Attraverso un'opportuna calibrazione della strumentazione, viene quindi identificata la minima temperatura associata alla condizione di “non aderenza”.



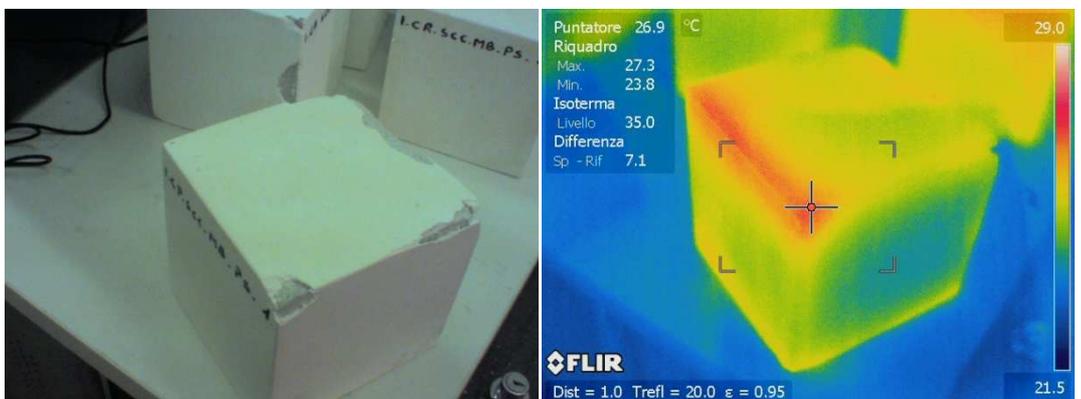
**Fig. 64** – Analisi termografica su provino I.CR.SCC.MB.PS.2



**Fig. 65** – Analisi termografica su provino I.CP.SCC.MB.PS.2



**Fig. 66** – Analisi termografica su provino I.CR.SCC.MB.PQ.2



**Fig. 67** – Analisi termografica su provino I.CP.SCC.MB.PS.1

Le indagini termografiche effettuate hanno evidenziato principalmente che:

- la combinazione formata da elemento di rivestimento in intonaco di malta bastarda e pittura ai silossani costituisce un elemento più vulnerabile nei confronti dell'azione diretta degli atmosferici. Si è rilevato, infatti, che i campioni costituiti da tale tipologia di finitura, da un lato hanno presentato in più punti vere e proprie lacune di materiale (cfr. fig. 67 provino I.CP.SCC.MB.PS.1); dall'altro hanno manifestato la presenza di diverse zone di distacco dal supporto e zone di erosione superficiale probabilmente dovute al dilavamento delle acque.
- la stratigrafia costituita da intonaco di malta cementizia e finitura in pittura al quarzo presenta in generale un compattezza maggiore. Ciò è dovuto probabilmente, sia alla maggiore resistenza opposta per sua naturale composizione da parte della pittura al quarzo al passaggio dell'acqua, sia ad una migliore compatibilità con il supporto. Circostanza, quest'ultima, che preserva la caratteristica coesione fra gli strati anche in presenza di passaggi a temperature notevolmente diverse in archi di tempo molto limitati.

### **12.2.2 Analisi delle rilevazioni spettrofotometriche**

La spettrofotometria eseguita su una superficie colorata qualsiasi costituisce il metodo sperimentale per misurare la frazione di intensità di radiazione visibile che la superficie riflette per diffusione alle diverse lunghezze d'onda. Dalla modifica della distribuzione spettrale della radiazione riflessa rispetto a quella della radiazione incidente bianca, come è noto, dipende il colore della superficie stessa.

Una misura spettrofotometrica è di solito rappresentata dalla curva che descrive l'andamento del coefficiente di riflettenza in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Essa può includere anche la zona dell'infrarosso in modo da ottenere una caratterizzazione più estesa delle proprietà di riflessione del materiale della superficie, al di là del solo spettro nel visibile. Deve essere attentamente notato, tuttavia, che la spettrofotometria non è una misura di colore, cioè essa non deve essere confusa con la colorimetria.

Nell'applicazione al presente lavoro di ricerca, le rilevazioni spettrofotometriche sono state effettuate al fine di valutare la variazione del coefficiente di riflettanza delle superficie diversamente trattate, a seguito dell'esposizione all'invecchiamento accelerato eseguito come da programma di prova illustrato al paragrafo 11.2.2.

Per ciascun provino indagato sono state effettuate misurazioni su 5 punti per ogni faccia del cubo che risultasse quella maggiormente esposta in camera climatica ( fig. 68-69).

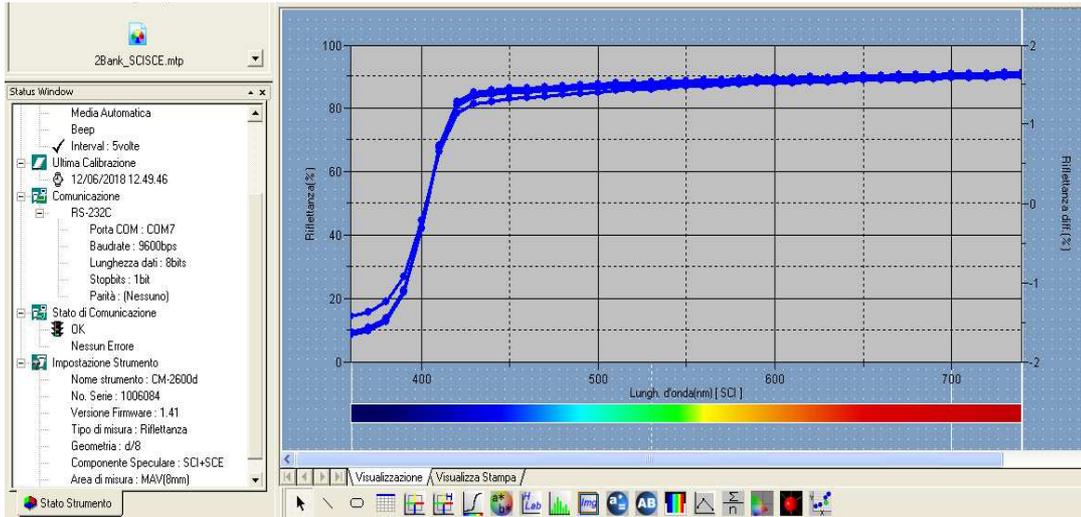


**Fig. 68** – Esecuzione dell'indagine spettrofotometrica

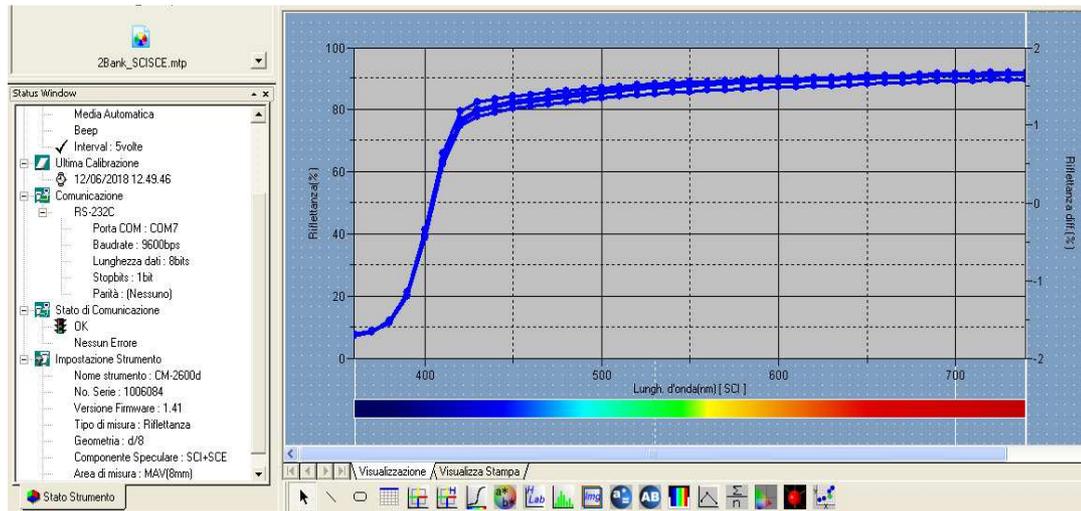


**Fig. 69** – Esecuzione dell'indagine spettrofotometrica

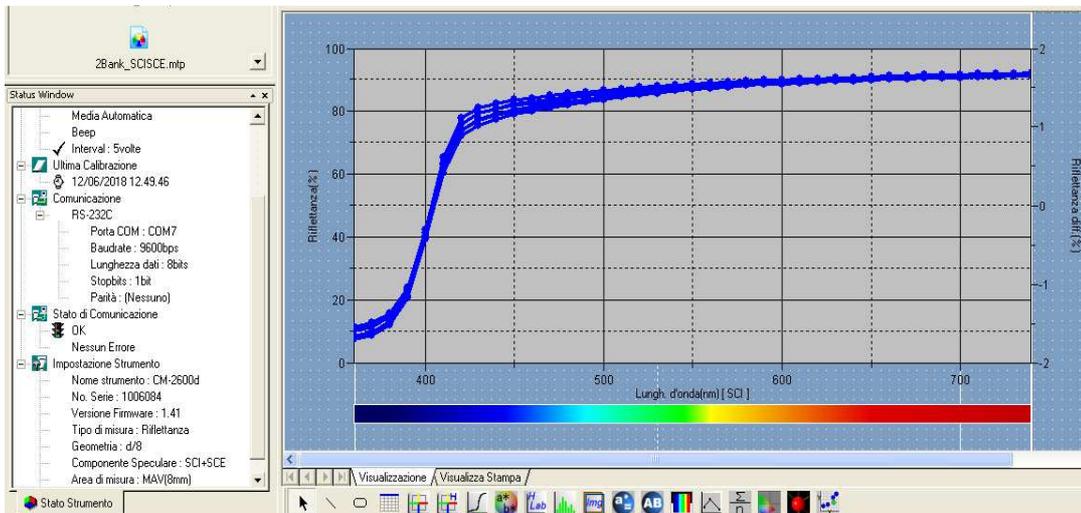
Nelle pagine che seguono, si riportano i grafici della riflettanza (5 punti) per provini non invecchiati con finitura in pittura al quarzo e ai silossani, confrontati ciascuno con i grafici relativi a provini di analoghe caratteristiche di finitura ma sottoposti al programma di prova di invecchiamento accelerato.



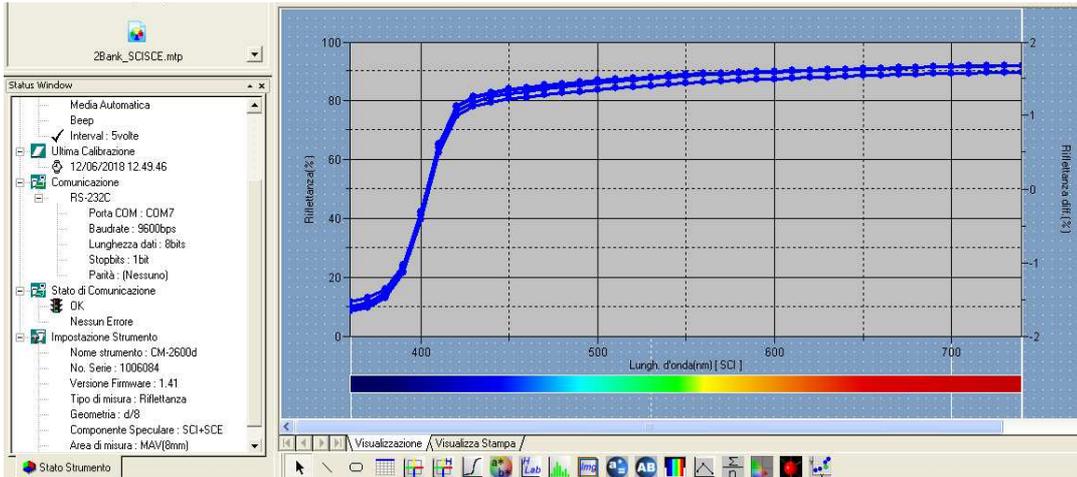
**Fig. 70** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo non invecchiato



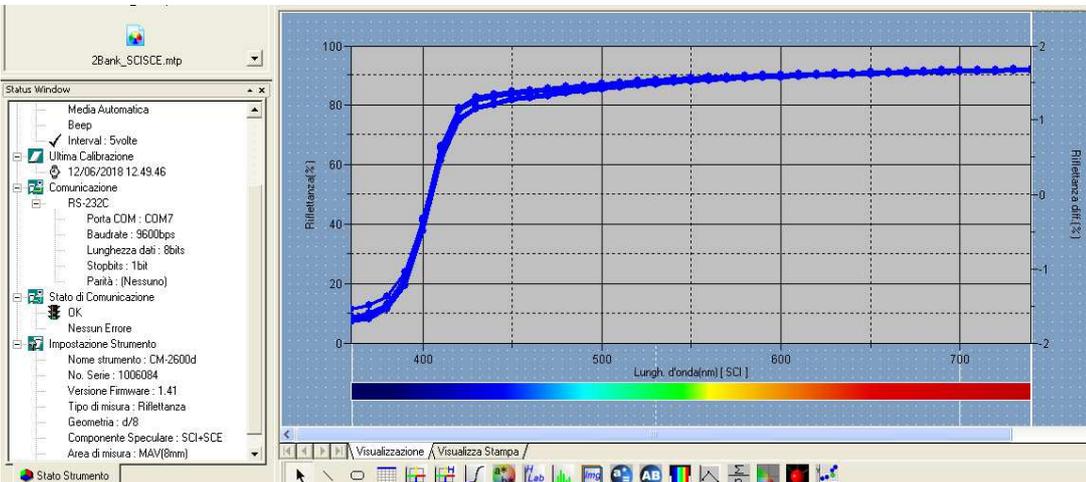
**Fig. 71** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CR.SCC.MC.PQ.1



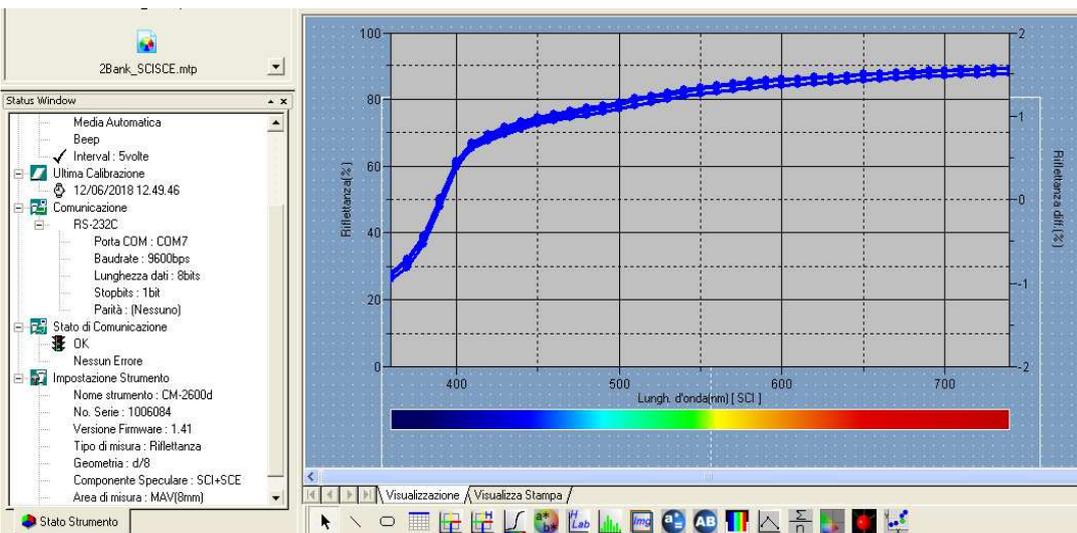
**Fig. 72** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CR.SCC.MC.PQ.2



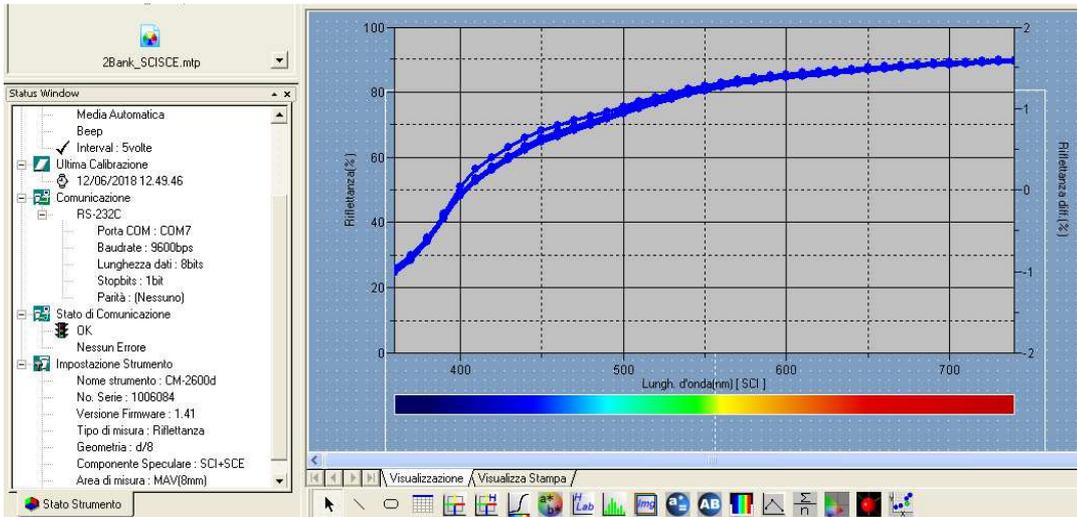
**Fig. 73** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CP.SCC.MC.PQ.1



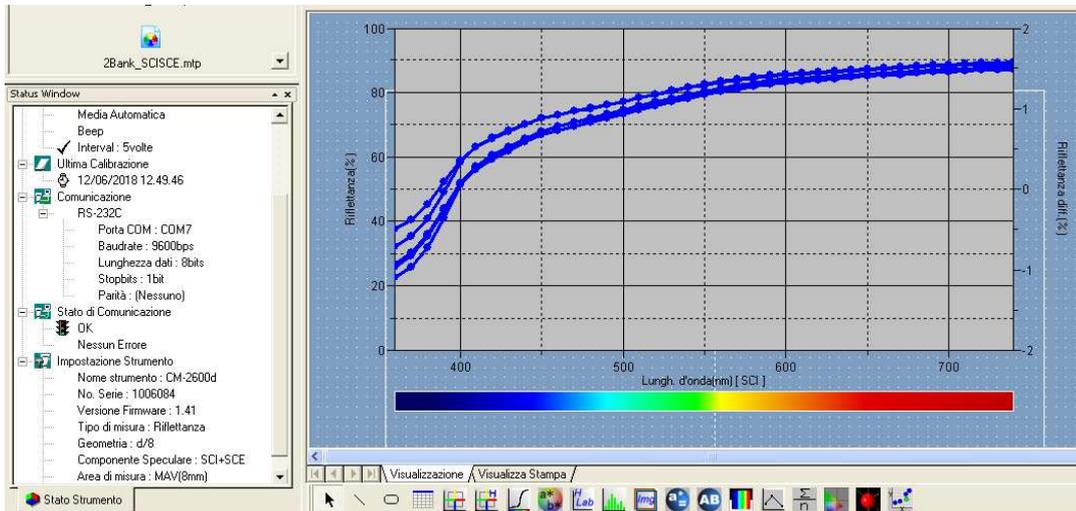
**Fig. 74** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CP.SCC.MC.PQ.2



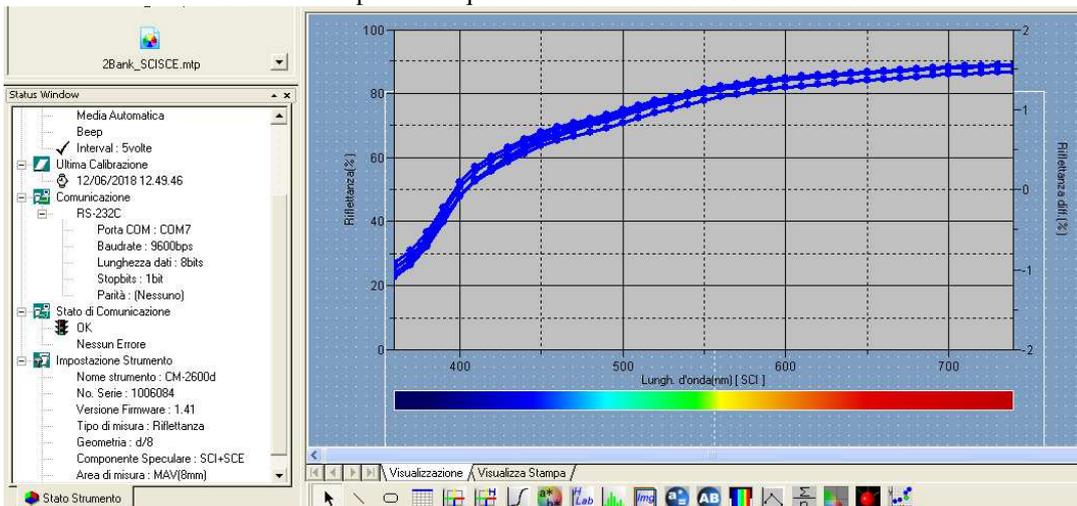
**Fig. 75** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura silossanica non invecchiato



**Fig. 76** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CP.SCC.MB.PS.2



**Fig. 77** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CR.SCC.MB.PS.2



**Fig. 78** – Grafico della riflettanza (5 punti) per provino con finitura in pittura al quarzo invecchiato I.CP.SCC.MB.PS.1

Dalle indagini spettrofotometriche effettuate, finalizzate a studiare in che maniera variano le caratteristiche cromatiche della superficie di finitura dei provini sottoposti alle prove di invecchiamento accelerato, emerge quanto segue:

- Confrontando il grafico spettrale indicativo della quantità di luce riflessa alle diverse lunghezze d'onda (riflettenza) per i due provini non invecchiati con finiture in pittura al quarzo ed ai silossani, si rileva un andamento del grafico differente. Dal confronto si noti come il provino con pittura al quarzo sia in grado di riflettere una quantità di luce più elevata nella regione del verde-blu. Ciò è da ricondurre probabilmente alle diverse caratteristiche intrinseche del colore bianco di base scelto.
- Per quanto riguarda i provini realizzati con finitura in pittura ai silossani, si osserva che a seguito dell'invecchiamento accelerato, il grafico della riflettenza evidenzia una penalizzazione ancora più accentuata nei confronti dei colori appartenenti all'area del blu. Condizione quest'ultima, che in verità risulta percepibile in alcuni casi anche ad occhio nudo.
- Relativamente ai provini realizzati con finitura in pittura al quarzo, si osserva che a seguito dell'invecchiamento accelerato, il grafico della riflettenza subisce variazioni di modestissima entità. Il che potrebbe denotare una buona resistenza agli agenti atmosferici (in particolare ai raggi UV, principali responsabili delle alterazioni cromatiche di cui si parla), ma tale circostanza andrebbe ulteriormente verificata proseguendo con ulteriori e diverse indagini sperimentali non oggetto del presente lavoro.

### **12.3 Prove di carbonatazione accelerata**

Con riferimento al programma di prova illustrato al paragrafo 11.3.2, si è proceduto, per tutti i campioni esaminati, ad effettuare le misurazioni della profondità di carbonatazione alle varie scadenze prefissate, secondo la procedura illustrata nel paragrafo che segue.

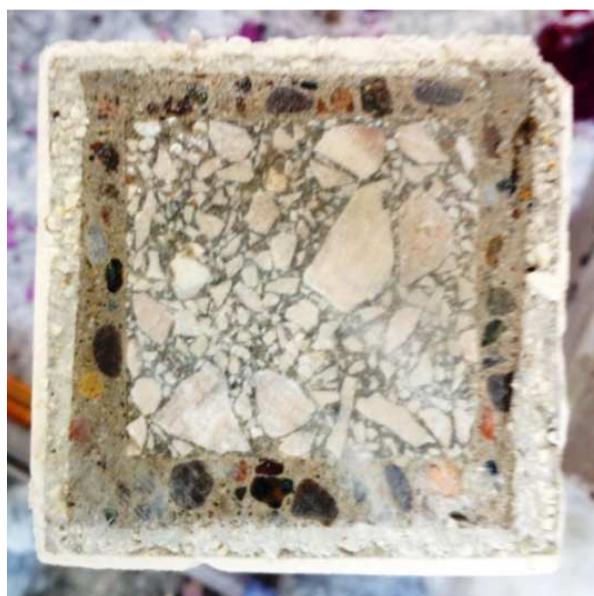
Una volta prelevati i provini dall'essiccatore (fig. 79), gli stessi sono stati sottoposti a taglio con sega circolare (fig. 80) e successivamente allo spruzzo con diffusore di fenolftaleina in soluzione (fig. 81).



**Fig. 79** – Provini esposti alla carbonatazione



**Fig. 80** – Taglio dei provini con sega circolare



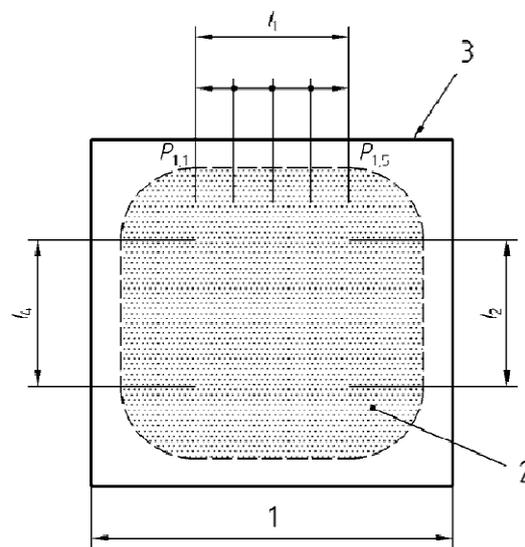
**Fig. 81** – Provini subito dopo il taglio, prima dello spruzzo della fenolftaleina



Fig. 82 – Provini allo spruzzo della fenolftaleina

### 12.3.1 Rilevazione della profondità del fronte di carbonatazione [19]

Secondo la procedura di misurazione standard proposta dalla norma EN 13295, per ogni superficie del campione, a turno, la lunghezza della superficie piana (l) è stata divisa in quattro parti uguali, fornendo in questo modo cinque punti di misurazione come mostrato nella fig.83.



$$d_{k,1} = \frac{\sum (p_{1,1-5})}{5}$$

$l \geq 30 \text{ mm}$

**Key**

- 1 Prism side dimension
- 2 Area stained pink by phenolphthalein indicator solution
- 3 Side 1, travelled face

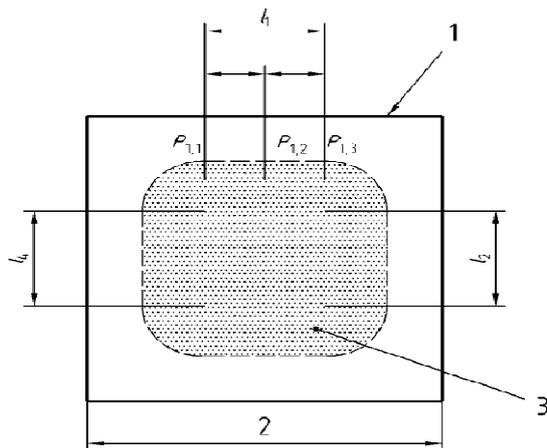
Fig. 83 - Provino caratterizzato da cinque misurazioni per lato

Con l'aiuto di un righello o di un calibro (fig. 84), la profondità di carbonatazione è stata misurata in ciascun punto (seguendo la procedura indicata dalla normativa UNI EN 14630 par. 4.2) con l'approssimazione di 0,1 mm. La media della profondità di carbonatazione (ad esempio  $d_{k1}$ ) su quel lato del campione è data dai cinque valori individuali, arrotondata poi al 0,5 mm. La misura è stata poi ripetuta per i tre lati rimanenti e la media di questi quattro valori calcolati rappresenta la profondità di carbonatazione ( $d_k$ ) per il campione.



Fig. 84 - Calibro digitale utilizzato per la misurazione del fronte carbonatato

Laddove i bordi della zona non carbonatata sono arrotondati, riducendo la lunghezza della parte piana su uno o più lati ( $l$ ) a meno di 30 mm, questa lunghezza ridotta è stata suddivisa in due parti uguali, dando tre punti di misura. È stata calcolata poi la profondità di carbonatazione media ( $d_{k1}$ ) delle tre misure (fig. 85) e poi la media per tutti e quattro i lati.



$$d_{k,1} = \frac{\sum (p_{1,1-3})}{3}$$

$20 \text{ mm} \leq l < 30 \text{ mm}$

**Key**

- 1 Side 1, trowelled face
- 2 Prism side dimension
- 3 Area stained pink by phenolphthalein indicator solution

Fig. 85 - Provino caratterizzato da tre misurazioni per lato

Tutte queste misure sono state poi ripetute per il campione duplicato. In generale se la profondità di carbonatazione sul campione duplicato presenta una differenza < 20% rispetto al suo gemello, allora la profondità di carbonatazione del prodotto indagato è la media dei due valori. In caso contrario, vanno riportati entrambi i valori.

### 12.3.2 Analisi dei risultati

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 di cui sopra:

1) In questa prima rappresentazione (fig. 86) si è messo a confronto la misurazione della 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.

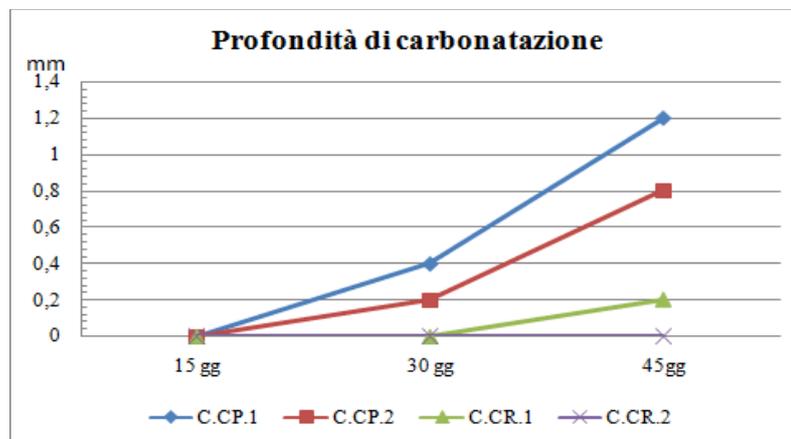


Fig. 86 – Profondità di carbonatazione in provini costituiti da calcestruzzo “di prova” e “di riferimento”

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 45gg 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.

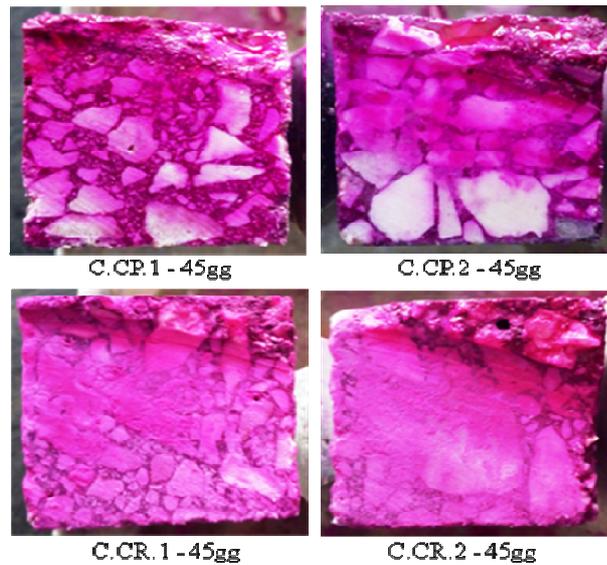


Fig. 87 - Provini costituiti da calcestruzzo “di prova” e “di riferimento”

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 dall'elevata 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 nei confronti del fenomeno della carbonatazione.

2) Nel secondo grafico (fig. 88) 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.

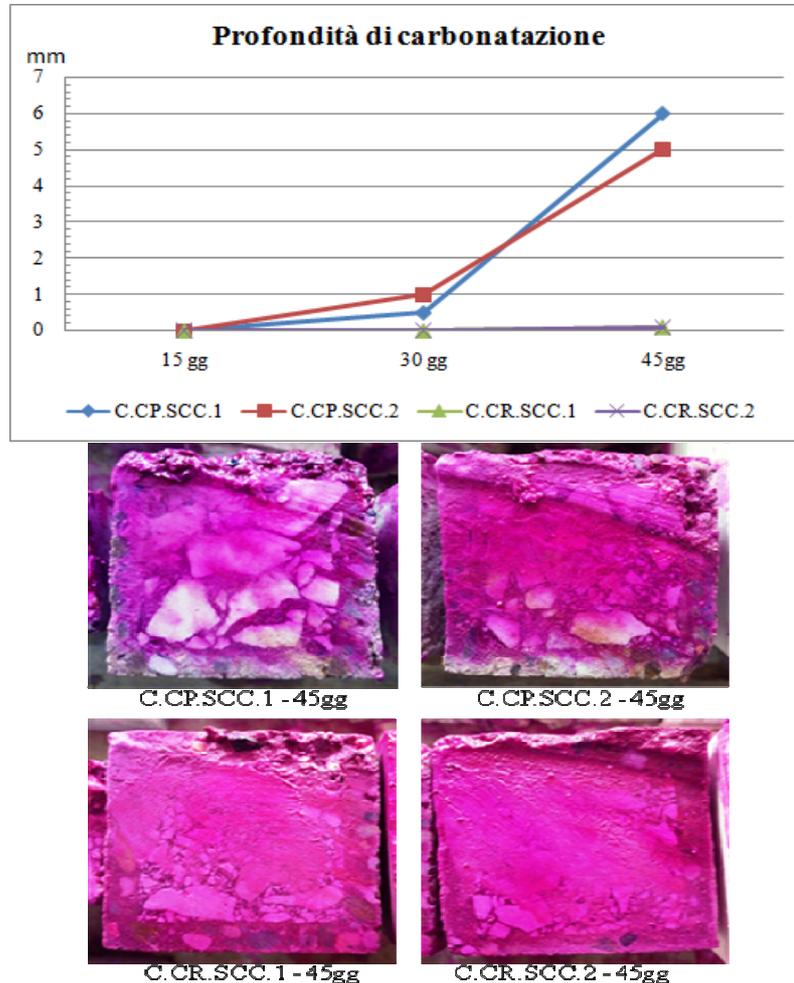


Fig. 88 - Provini costituiti da calcestruzzo “di prova” e “di riferimento” e rinforzo in SCC

Analizzando le curve ottenute, si rileva che:

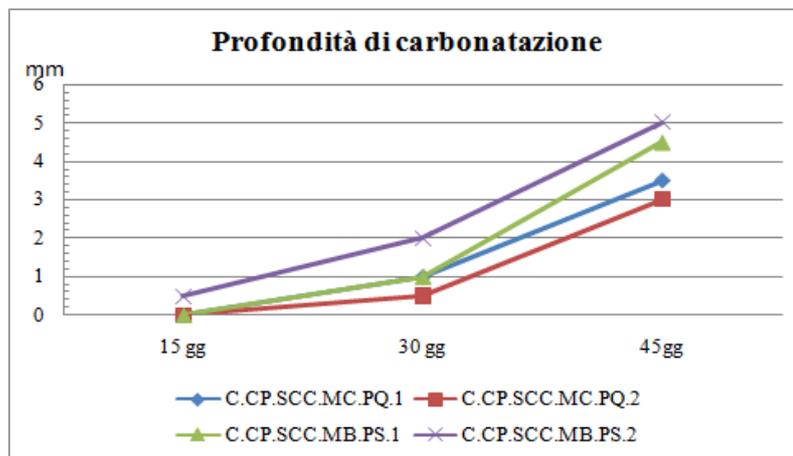
- La profondità del fronte di carbonatazione riscontrata nei due provini con nucleo costituito da calcestruzzo di riferimento a 45gg risulta nulla. Questa costituisce una condizione che, in base agli studi presenti in letteratura, è facilmente comprensibile, in quanto il calcestruzzo autocompattante 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 45gg 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 semplice spiegazione. Tuttavia da un'attenta riflessione si ritiene opportuno chiedersi:

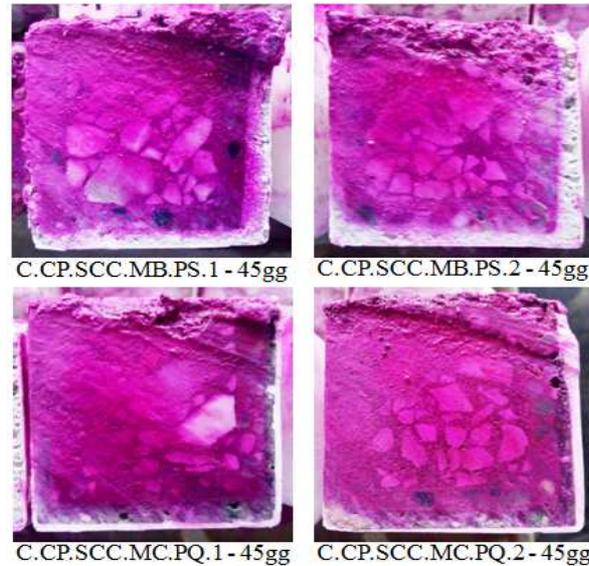
- È possibile che il supporto influenzi, con le sue caratteristiche, le prestazioni dell'elemento di rinforzo in SCC?
- È possibile che le condizioni del supporto (ad esempio in termini di porosità superficiale) in fase di posa in opera dell'elemento di rinforzo in qualche modo siano in grado di condizionare 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. 89) 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.



**Fig. 89** – Profondità di carbonatazione in provini costituiti da cls “di prova”, rinforzo in SCC, intonaco e pittura nelle combinazioni definite



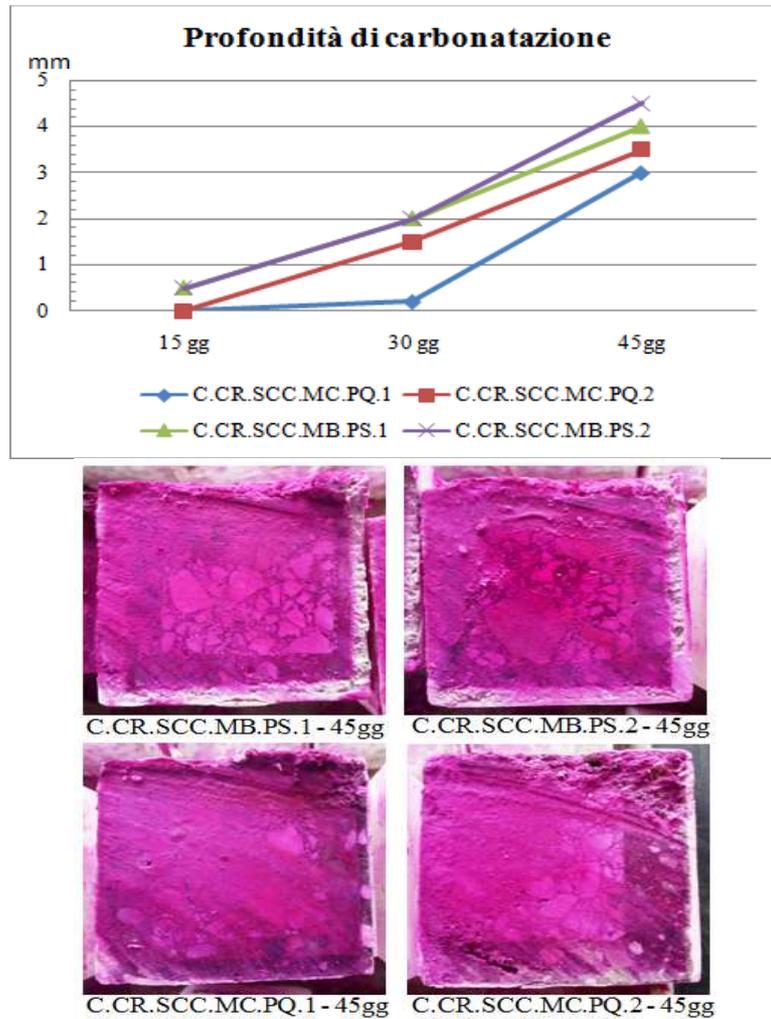
**Fig. 90** - Provini costituiti da cls “di prova”, rinforzo in SCC, intonaco e pittura nelle combinazioni definite

- 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 45gg 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.

In merito a questo aspetto si ritiene interessante approfondire la tematica mediante ulteriori campagne sperimentali.

4) Nel quarto grafico (fig. 91) 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.

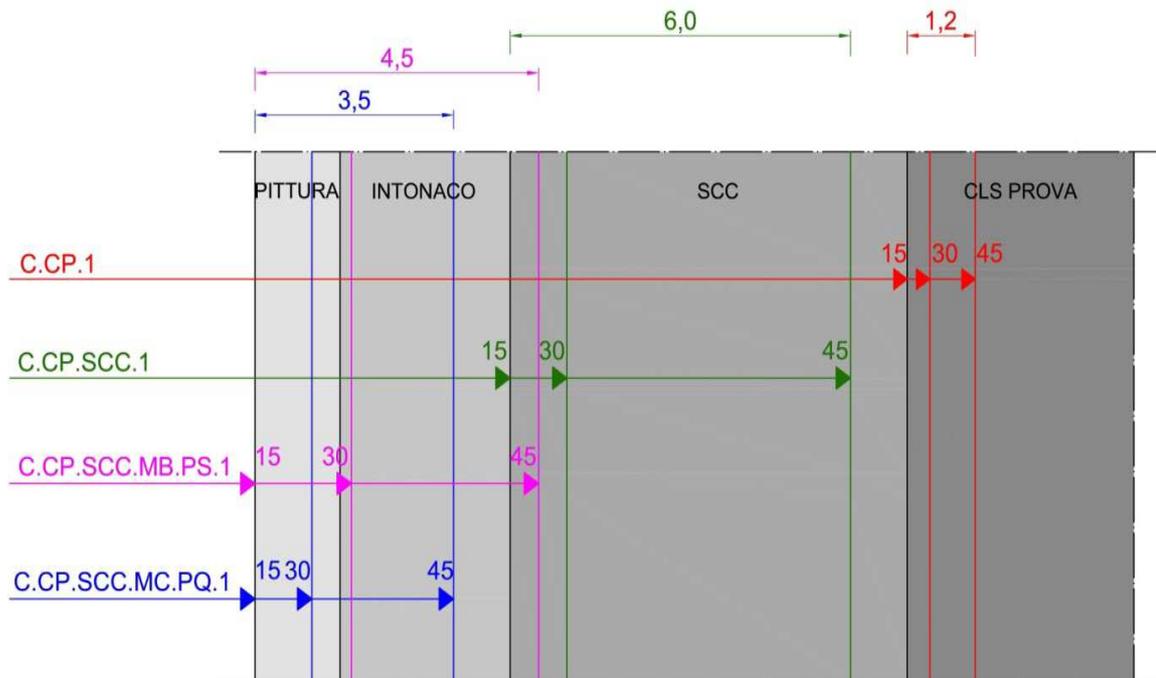


**Fig. 90** - Provini costituiti da cls “di riferimento”, rinforzo in SCC, intonaco e pittura nelle combinazioni definite

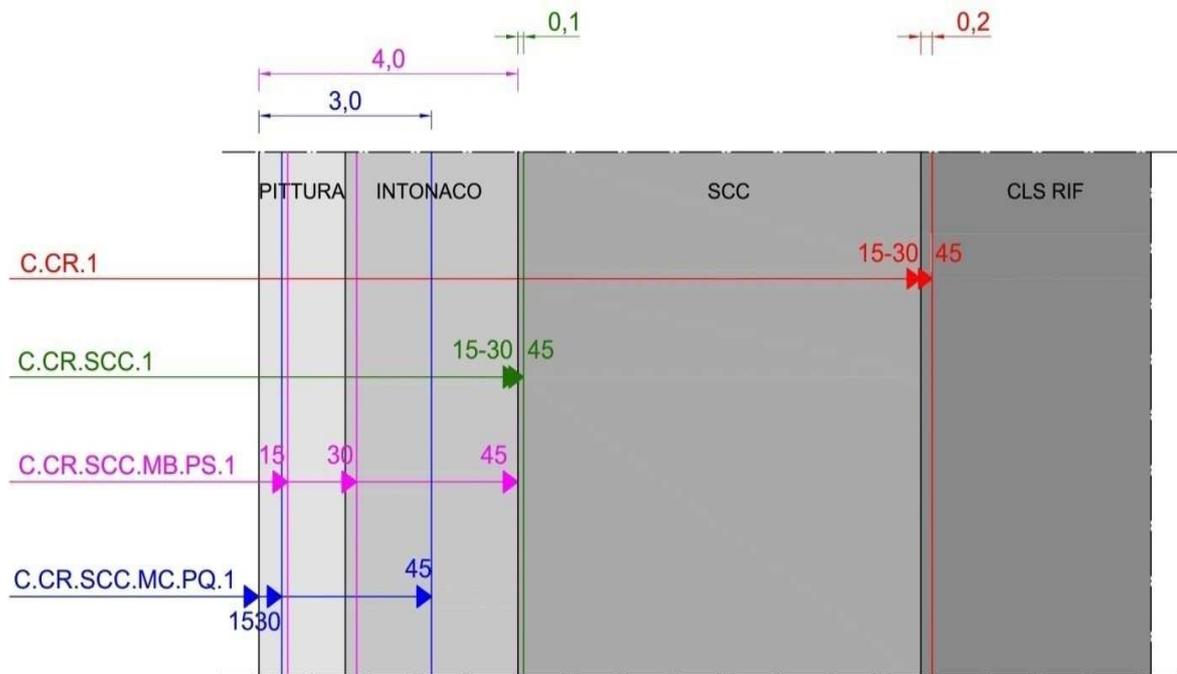
Analizzando le curve ottenute, si rileva che, in analogia evidentemente con quanto riportato per i provini con nucleo in calcestruzzo di prova, anche in questo caso risulta abbastanza evidente la più efficace opposizione proposta dalle pitture al quarzo nei confronti dell’aggressione da parte dell’anidride 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 che si illustrano di seguito, si è riportato, con riferimento alla profondità del fronte di carbonatazione rilevata ai diversi step temporali (15-30-45gg) il contributo offerto da parte degli elementi che

costituiscono la stratigrafia oggetto di studio, nelle diverse combinazioni più significative.



**Fig. 91** – Confronto delle profondità di carbonatazione in provino con nucleo in cls di prova



**Fig. 92** – Confronto delle profondità di carbonatazione in provino con nucleo in cls di riferimento

Dall'osservazione della fig. 91 si rileva che:

- Il provino costituito da solo calcestruzzo di prova, al 15° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 30 e 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 0,4 mm e 1,2 mm.
- Il provino costituito da calcestruzzo di prova e SCC, al 15° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 30 e 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 0,5 mm e 6,0 mm all'interno dello strato di SCC.
- Il provino costituito da calcestruzzo di prova, SCC, intonaco di malta bastarda e pittura silossanica, al 15° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 30 e 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 1,0 mm e 4,5 mm, aggredendo in questo modo lo strato di SCC.
- Il provino costituito da calcestruzzo di prova, SCC, intonaco di malta cementizia e pittura al quarzo, al 15° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 30 e 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 1,0 mm e 3,5 mm.

Dall'osservazione della fig. 92 si rileva che:

- Il provino costituito da solo calcestruzzo di riferimento, sia al 15° che al 30° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava di 0,2 mm.
- Il provino costituito da calcestruzzo di riferimento e SCC, sia al 15° che al 30° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava di 0,1 mm all'interno dello strato di SCC.
- Il provino costituito da calcestruzzo di riferimento, SCC, intonaco di malta bastarda e pittura silossanica, al 15°, 30° e 45° giorno di esposizione l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 0,5 mm, 2,0 mm e 4,0 mm, fermandosi in questo modo in corrispondenza dello strato di SCC.
- Il provino costituito da calcestruzzo di riferimento, SCC, intonaco di malta cementizia e pittura al quarzo, al 15° giorno di esposizione non manifestava segni di carbonatazione, mentre a 30 e 45 giorni l'approfondimento del fronte risultava rispettivamente di 0,3 mm e 3,0 mm.

Da una valutazione di tipo comparativo, delle diverse condizioni studiate, è emerso, specie per quanto riguarda la fig.92 (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 che trova il fenomeno della carbonatazione nell'aggredire lo strato di SCC del provino.

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.

Riassumendo, si riportano infine in forma tabellata, per tutti i campioni esaminati, le misurazioni della profondità di carbonatazione media del provino effettuate alle varie scadenze prefissate.

<b>Tab. 12.3.2 Profondità di carbonatazione media dei provini esaminati</b>					
SERIE CAMPIONI	Descrizione campioni	n°	Profondità di carbonatazione media del provino (mm)		
			15 gg.	30 gg.	45 gg.
			CP.	Provini di cls di prova dim. 40x40x160 mm	1
		2	0,00	0,20	0,8
CR.	Provini di cls di riferimento dim. 40x40x160 mm	1	0,00	0,00	0,20
		2	0,00	0,00	0,00
CP.SCC.	Provini di malta di cls di prova e SCC dim. 54x54x174 mm	1	0,00	0,50	6,00
		2	0,00	1,00	5,00
CR.SCC.	Provini di malta di cls di riferimento e SCC dim. 54x54x174 mm	1	0,00	0,00	0,10
		2	0,00	0,00	0,10

CP.SCC.	Provini di cls di prova, SCC, malta cementizia e pittura al quarzo dim. 64x64x184 mm	1	0,00	1,00	3,50
MC.PQ		2	0,00	0,50	3,00
CP.SCC.	Provini di cls di prova, SCC, malta bastarda e pittura ai silossani dim. 64x64x184 mm	1	0,00	1,00	4,50
MB.PS		2	0,50	2,00	5,00
CR.SCC.	Provini di cls di riferimento, SCC, malta cementizia e pittura al quarzo dim. 64x64x184 mm	1	0,00	0,20	3,00
MC.PQ		2	0,00	1,50	3,50
CR.SCC.	Provini di cls di riferimento, SCC, malta bastarda e pittura ai silossani dim. 64x64x184	1	0,50	2,00	4,00
MB.PS		2	0,50	2,00	4,50

### 12.3.3 Analisi della variazione di resistenza e duttilità

Al paragrafo 10.3.2 del presente lavoro è stata evidenziata l'opportunità di confezionare 2 tipologie di provini (C.CP.3.d e C.CR.3.d) con lo scopo specifico di sottoporli, dopo il completamento dell'esposizione all'intero programma di carbonatazione accelerata, a prove meccaniche finalizzate a valutare l'eventuale variazione delle capacità in termini di resistenza e di duttilità.

La prova effettuata è una prova a flessione, eseguita in conformità alla norma UNI EN 197-1, e consiste nel collocare il prisma nella macchina di prova con un faccia laterale sui rulli di supporto e con l'asse longitudinale normale rispetto ai supporti. Successivamente applicare verticalmente il carico per mezzo del rullo di carico sulla faccia laterale opposta del prisma e aumentarlo in modo uniforme a una velocità di  $(50 \pm 10)$  N/s fino a rottura.

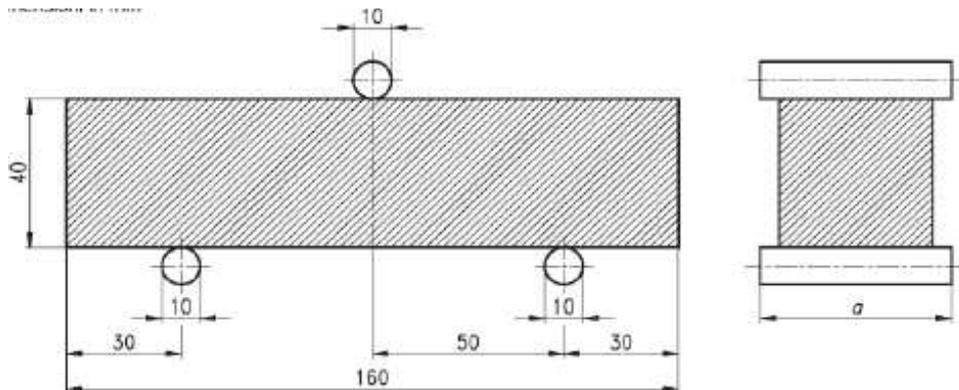


Fig. 93 – Schema di posizionamento del provino per la prova a flessione



**Fig. 94** – Campione C.CR.3d sottoposto a prova a flessione



**Fig. 95** – Campione C.CP.3d rotto a flessione

Nelle immagini che seguono si riportano i diagrammi ottenuti dalla prova a flessione eseguita sui provini in “calcestruzzo di prova” C.CP.3d e in “calcestruzzo di riferimento” C.CR.3d, nella condizione conseguente all’esposizione alla carbonatazione e non.

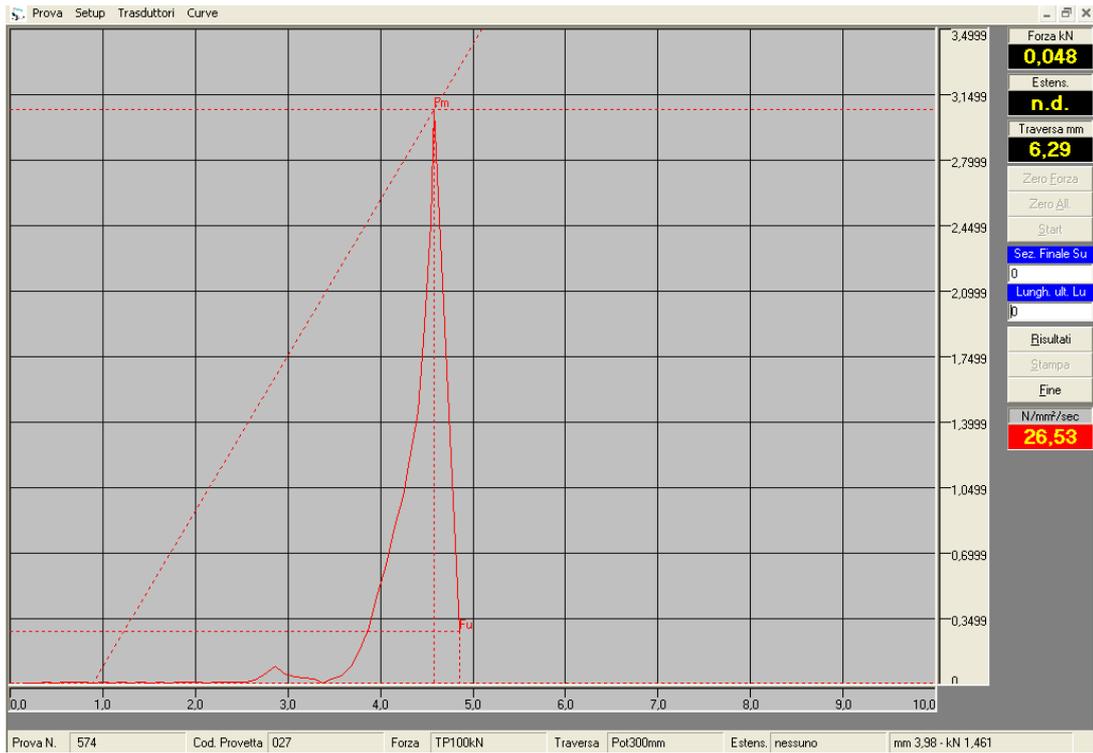


Fig. 96 – Provino C.CP.3d non sottoposto a carbonatazione accelerata

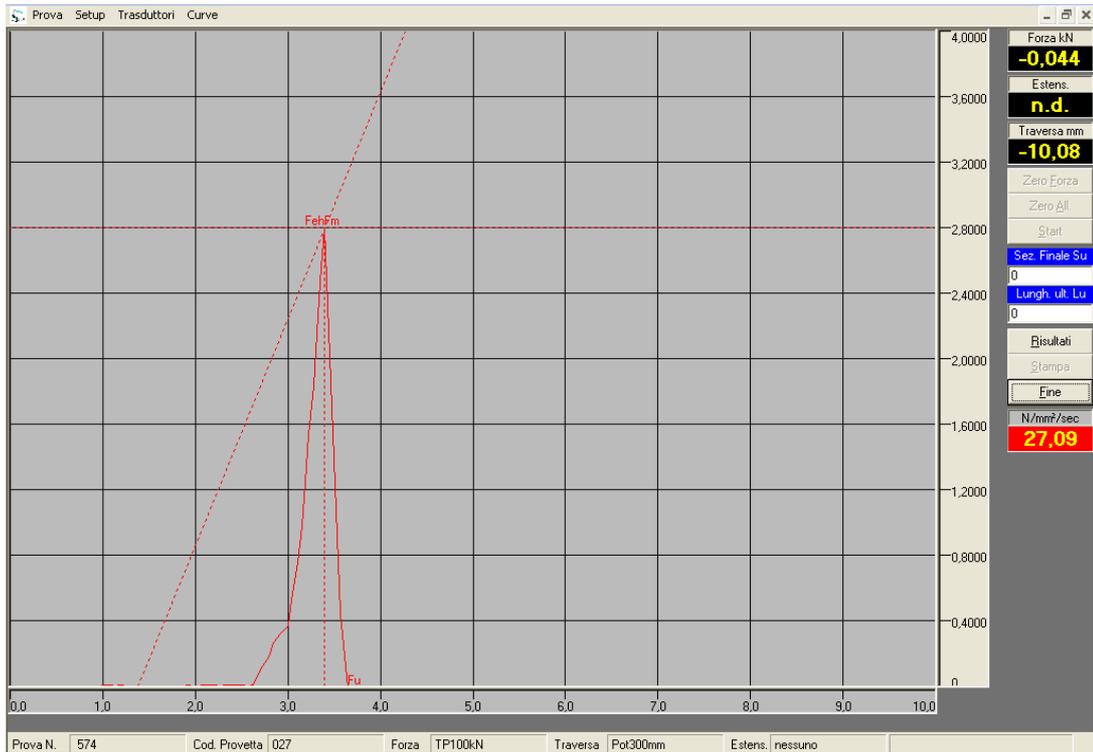
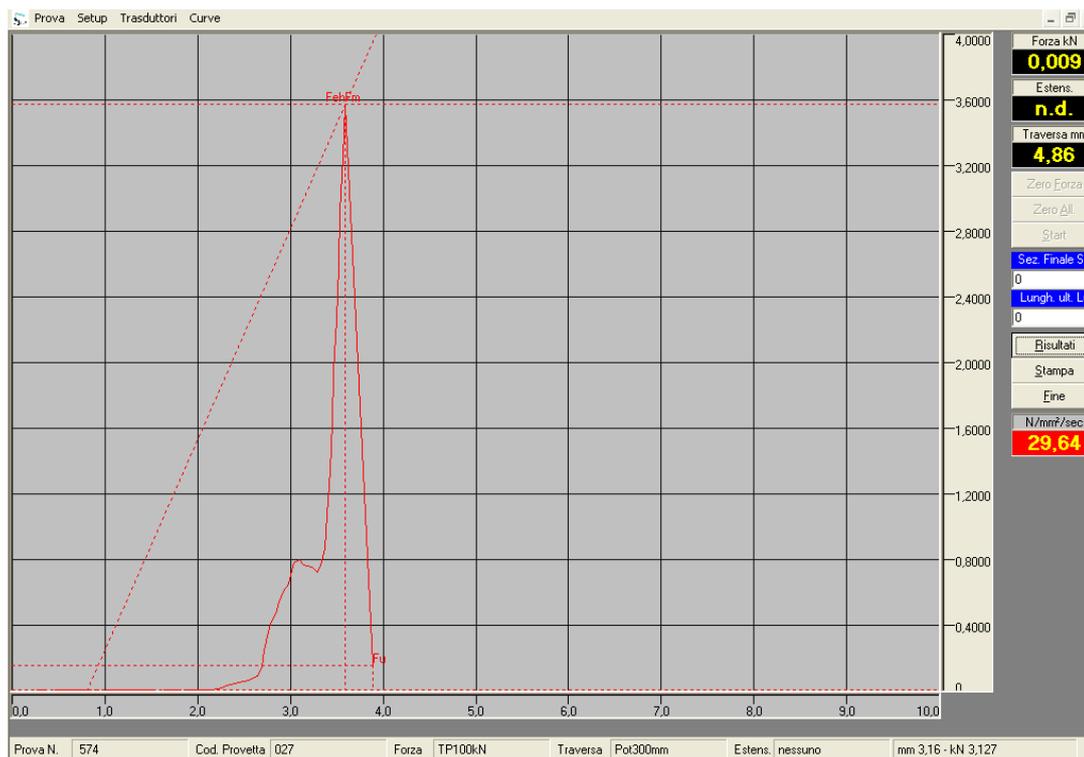
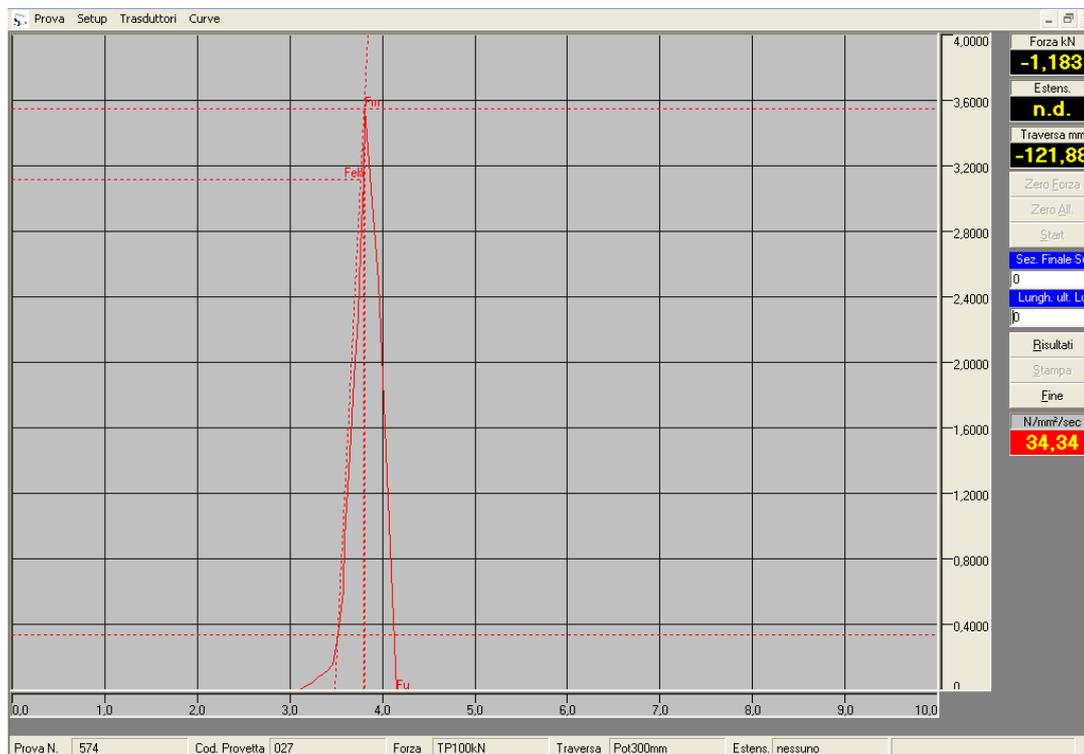


Fig. 97 – Provino C.CP.3d sottoposto a carbonatazione accelerata



**Fig. 98** – Provino C.CR.3d non sottoposto a carbonatazione accelerata



**Fig. 99** – Provino C.CR.3d sottoposto a carbonatazione accelerata

Di seguito si riportano per semplicità i valori della forza applicata al momento della rottura:

	C.CP.3d	C.CR.3d	C.CP.3d carb.	C.CR.3d carb.
F [KN]	3,071	3,574	2,799	3,114

Dal confronto si rileva in entrambi i casi una riduzione della resistenza conseguente all'esposizione al programma di prova di carbonatazione accelerata. Nel caso del calcestruzzo di prova stimabile nel 9% e nel caso del calcestruzzo di riferimento stimabile nel 13% circa.

Relativamente alla duttilità del calcestruzzo, dove per duttilità si intende la sua capacità di deformarsi sotto carico esibendo deformazioni plastiche prima di giungere a rottura, osservando i diagrammi relativi alle prove effettuate (Figg. 96-97-98-99) si osserva una riduzione della duttilità conseguente all'esposizione al programma di prova di carbonatazione accelerata. Quest'ultima stimabile nell'ordine del 30-35% circa.

In particolare la riduzione della duttilità riscontrata conferma in sostanza quanto riportato in letteratura scientifica a riguardo, e, ove mai fosse necessario la necessità di valutare con attenzione le conseguenze che il fenomeno in oggetto può avere sul comportamento fragile degli elementi portanti.

## **CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

A conclusione del lavoro di ricerca svolto, si ritiene opportuno riassumere i passaggi fondamentali di cui si è caratterizzato, evidenziando gli aspetti più qualificanti e le evidenze dei risultati ottenuti dall'attività di sperimentazione in laboratorio.

È utile, preliminarmente, ricordare che la motivation alla base dell'attività di ricerca in oggetto, è costituita dall'opportunità di approfondire lo studio dell'influenza di rivestimenti sulla durabilità degli elementi strutturali in calcestruzzo ordinario armato.

Contestualmente si è rilevata l'opportunità di studiare le interazioni fra i calcestruzzi di nuova generazione impiegati per il consolidamento dei componenti edilizi in calcestruzzo ordinario, e lo stesso calcestruzzo oggetto di consolidamento. Inoltre, posto che l'esecuzione degli interventi di rinforzo strutturale con incamiciatura in SCC è di consueto seguita dalla realizzazione dello strato di intonaco e dalla successiva tinteggiatura, particolare attenzione è stata posta anche allo studio dell'invecchiamento dei livelli più superficiali della stratigrafia oggetto della sperimentazione.

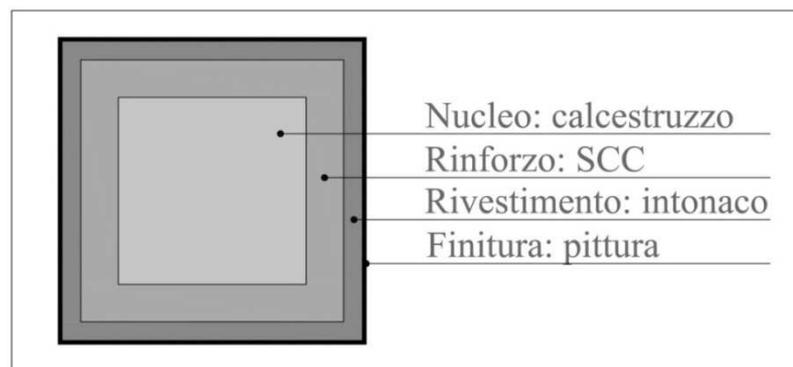
L'obiettivo finale che si è perseguito è costituito in definitiva dalla valutazione della durabilità dei manufatti risultanti dalle composizioni individuate, e dallo studio dell'interazione fra i diversi strati, al fine di comprendere in che misura i "gusci" di rivestimento costituiscono una protezione dell'elemento nucleo principale.

Tutto questo si traduce nella possibilità di fornire una serie di conoscenze e strumenti ai futuri progettisti degli interventi di consolidamento e/o di protezione, tali da consentire loro di effettuare scelte progettuali più consapevoli dal punto di vista della durabilità degli interventi stessi. Avere una conoscenza approfondita degli effetti delle scelte progettuali che si operano, rappresenta infatti un aspetto fondamentale per l'ottenimento di componenti edilizi durabili.

Dopo aver analizzato, nella prima parte, l'**evoluzione storica** dei componenti oggetto dell'attività di sperimentazione, si è proceduto allo studio del comportamento nel tempo e della **durabilità dei componenti edilizi**.

L'attività di **sperimentazione**, illustrata nella terza parte dell'elaborato, è stata preceduta da un approfondimento dello stato dell'arte.

L'individuazione delle caratteristiche dell'oggetto da riprodurre per l'esecuzione dell'attività sperimentale ha rappresentato una fase fondamentale, che ha richiesto lo studio delle soluzioni ricorrenti, l'analisi dei dati presenti in letteratura e del database della società Sirena Città Storica relativo al contesto della città di Napoli, e le valutazioni sulla riproducibilità in laboratorio delle stratigrafie ipotizzate. A valle di questo processo è stata individuata la composizione oggetto dello studio come illustrato in fig. 100.



**Fig. 100** - Schema della stratigrafia oggetto di studio

Individuato l'oggetto della sperimentazione, sono state messe a punto 2 attività sperimentali di laboratorio, costituite dall'applicazione di un programma di prova di invecchiamento accelerato ed un programma di prova di carbonatazione accelerata.

Per ciascuno di questi sono state definite, in accordo con le normative di riferimento, il numero, le forme e le dimensioni dei campioni. È stata quindi avviata la fase operativa con il supporto logistico del laboratorio TecnoLab Srl di Napoli ed il Laboratorio di Edilizia dell'Università degli Studi di Palermo.

A valle del completamento dell'esposizione all'**invecchiamento accelerato** in camera climatica, in accordo con il programma di prova stabilito al paragrafo

11.2.2, sono state eseguite indagini termografiche e spettrofotometriche. In particolare:

**Le indagini termografiche** effettuate hanno evidenziato principalmente che:

- la combinazione formata da elemento di rivestimento in intonaco di malta bastarda e pittura ai silossani costituisce un elemento più vulnerabile nei confronti dell'azione diretta degli atmosferici. Si è rilevato, infatti, che i campioni costituiti da tale tipologia di finitura, da un lato hanno presentato in più punti vere e proprie lacune di materiale (cfr. fig. 67 provino I.CP.SCC.MB.PS.1); dall'altro hanno manifestato la presenza di diverse zone di distacco dal supporto e zone di erosione superficiale probabilmente dovute al dilavamento delle acque.
- la stratigrafia costituita da intonaco di malta cementizia e finitura in pittura al quarzo presenta in generale un compattezza maggiore. Ciò è dovuto probabilmente, sia alla maggiore resistenza opposta per sua naturale composizione da parte della pittura al quarzo al passaggio dell'acqua, sia ad una migliore compatibilità con il supporto. Circostanza, quest'ultima, che preserva la caratteristica coesione fra gli strati anche in presenza di passaggi a temperature notevolmente diverse in archi di tempo molto limitati.

**Le indagini spettrofotometriche** effettuate, finalizzate a studiare in che maniera variano le caratteristiche cromatiche della superficie di finitura dei provini è emerso quanto segue:

- Confrontando il grafico spettrale indicativo della quantità di luce riflessa alle diverse lunghezze d'onda (riflettenza) per i due provini non invecchiati con finiture in pittura al quarzo ed ai silossani, si rileva un andamento del grafico differente. Dal confronto si noti come il provino con pittura al quarzo sia in grado di riflettere una quantità di luce più elevata nella regione del verde-blu. Ciò è da ricondurre probabilmente alle diverse caratteristiche intrinseche del colore bianco di base scelto.
- Per quanto riguarda i provini realizzati con finitura in pittura ai silossani, si osserva che a seguito dell'invecchiamento accelerato, il grafico della riflettenza evidenzia una penalizzazione ancora più accentuata nei confronti dei colori

appartenenti all'area del blu. Condizione quest'ultima, che in verità risulta percepibile in alcuni casi anche ad occhio nudo.

- Relativamente ai provini realizzati con finitura in pittura al quarzo, si osserva che a seguito dell'invecchiamento accelerato, il grafico della riflettanza subisce variazioni di modestissima entità. Il che potrebbe denotare una buona resistenza agli agenti atmosferici (in particolare ai raggi UV, principali responsabili delle alterazioni cromatiche di cui si parla), ma tale circostanza andrebbe ulteriormente verificata proseguendo con ulteriori e diverse indagini sperimentali non oggetto del presente lavoro.

Le misurazioni relative alla profondità di carbonatazione nei provini, eseguite ai diversi step temporali stabiliti nel programma di prove di **carbonatazione accelerata** di cui al paragrafo 11.3.2, hanno evidenziato che:

- 1) Relativamente ai provini prismatici costituiti da solo calcestruzzo, nelle due varianti "di riferimento" e "di prova":
  - In valore assoluto, la profondità del fronte di carbonatazione ha raggiunto per entrambe le formulazioni valori limitati (massimo 1,2 mm a 45gg 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 dall'elevata 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 nei confronti del fenomeno della carbonatazione.

2) Relativamente ai provini costituiti da calcestruzzo, nelle due varianti "di riferimento" e "di prova", rivestiti di calcestruzzo autocompattante:

- la profondità del fronte di carbonatazione riscontrata nei due provini con nucleo costituito da calcestruzzo di riferimento a 45gg 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 45gg 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 semplice 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) Relativamente ai provini con nucleo in calcestruzzo “di prova”, rivestiti di calcestruzzo autocompattante e delle due diverse combinazioni di intonaco-pittura definite:

- i provini confezionati con finitura costituita da pittura al quarzo hanno presentato una profondità di carbonatazione a 45gg inferiore rispetto a quelli con finitura costituita da pittura silossaniche.

Questa 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.

In merito a questo aspetto si ritiene molto interessante avviare ulteriori campagne sperimentali mirate ad approfondire la tematica.

Da una valutazione di tipo comparativo delle diverse condizioni studiate è emerso, specie per quanto riguarda la fig.92 (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 che trova il fenomeno della carbonatazione nell'aggregare lo strato di SCC del provino.

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.

Dalle prove di **resistenza a flessione** eseguite sui campioni a valle dell'esposizione alla carbonatazione accelerata, ed il confronto dei risultati con quelli relativi a campioni non carbonatati, si è riscontrato:

- in entrambi i casi una riduzione della resistenza conseguente all'esposizione al programma di prova di carbonatazione accelerata. Nel caso del calcestruzzo di prova stimabile nel 9% e nel caso del calcestruzzo di riferimento stimabile nel 13% circa.
- Relativamente alla duttilità del calcestruzzo, osservando i diagrammi relativi alle prove effettuate (Figg. 96-97-98-99) si osserva una riduzione della duttilità conseguente all'esposizione al programma di prova di carbonatazione accelerata; quest'ultima stimabile nell'ordine del 30-35% circa.

In particolare la riduzione della duttilità riscontrata conferma in sostanza quanto riportato in letteratura scientifica a riguardo, e, ove mai fosse necessario la necessità di valutare con attenzione le conseguenze che il fenomeno in oggetto può avere sul comportamento fragile degli elementi portanti.

Parallelamente all'attività eseguita, è stata avviata un'attività di esposizione in esterno, nel contesto climatico della città di Napoli, finalizzata all'individuazione di un fattore di **rescaling** temporale dei risultati ottenuti, necessario per la caratterizzazione della reale tempistica di manifestazione dei fenomeni.

Tale attività chiaramente verrà svolta nei prossimi anni attraverso una osservazione periodica dei provini esposti ed un confronto con le rilevazioni evidenziate nel presente lavoro di ricerca.

## *Appendice*

### **Scheda tecnica del calcestruzzo autocompattante utilizzato**

- Calcestruzzo autocompattante “BETONFLUID” della Vaga S.r.l.

### **Schede tecniche delle malte utilizzate**

- Malta cementizia “ML 203” della Fassa Bortolo S.r.l.
- Malta bastarda “MM 30” della Fassa Bortolo S.r.l.

### **Schede tecniche delle pitture utilizzate**

- Pittura al quarzo “LIN-PLAST” della Linvea S.r.l.
- Pittura ai silossani “SILOXAN TOP” della Linvea S.r.l.

# BEtonFLuid

Calcestruzzo AUTOCOMPATTANTE

## DESCRIZIONE

**BEtonFLuid** è il calcestruzzo autocompattante (SCC) di **VAGA** ad elevate resistenze meccaniche (**Rck 40 N/mm<sup>2</sup>**), predosato in sacchetti da 25 kg, ideale per la realizzazione di qualsiasi manufatto strutturale faccia a vista.

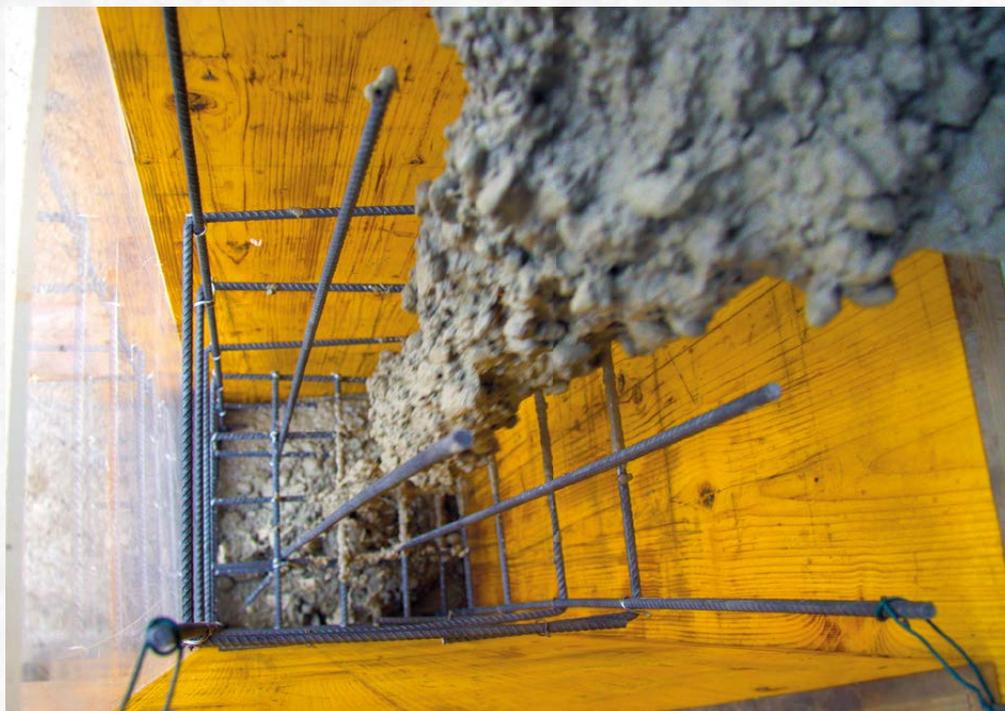
L'innovativo mix design è stato formulato in funzione delle esigenze di cantiere. **BEtonFLuid** nasce dallo studio dei laboratori di ricerca e sviluppo Mapei, leader da oltre 70 anni nei prodotti chimici per l'edilizia, capace di formulare in conformità alla EN 206-9 un prodotto di qualità superiore e durevole nel tempo. In particolare **BEtonFLuid** è un prodotto particolarmente adatto per il riempimento di casseformi speciali, anche in presenza di armature fitte, senza rischi di segregazione. Inoltre non è necessario vibrare il calcestruzzo. Il risultato è un calcestruzzo di qualità omogeneamente distribuito su tutta la sezione dell'elemento che permette all'applicatore di risparmiare tempo e risorse durante le fasi di getto.

## CAMPI D'IMPIEGO

**BEtonFLuid**, essendo autocompattante, può essere impiegato in tutte quelle situazioni in cui si richiede un calcestruzzo fluido, omogeneo e durevole, come ad esempio:

- Riempimento con calcestruzzo di casseformi aventi geometria particolarmente complessa, senza vibrazione, anche per elementi faccia a vista;
- Riempimento con calcestruzzo di casseformi fittamente armate;
- Calcestruzzi armati che richiedano una buona protezione alla carbonatazione come ad esempio ambienti ciclicamente bagnati ed asciutti (classe di esposizione XC4);
- Calcestruzzi armati che richiedano un alto grado di protezione all'azione dei cloruri come ad esempio i sali antigelo di pavimentazioni e parcheggi (classe di esposizione XD2) e/o strutture esposte all'azione dell'acqua di mare (XS1);
- Calcestruzzo resistente all'azione del gelo/disgelo (classe XF1);
- Elementi di calcestruzzo esposti all'attacco di agenti chimici aggressivi (classe XA2) come ad es. terreni o acque inquinate da agenti chimici.

La pratica confezione da 25 kg rende **BEtonFLuid** particolarmente indicato per realizzare tutti quegli elementi in calcestruzzo da costruire in aree difficilmente raggiungibili con i tradizionali sistemi di getto (autobetoniere).



## PREPARAZIONE del PRODOTTO

Miscelare **BEtonFLuid** con **1,5 / 2,0 litri** di acqua pulita per ogni sacchetto, avendo cura di utilizzare tutto il contenuto di ogni sacco. Per una corretta miscelazione si consiglia di utilizzare un mescolatore meccanico (betoniera, mescolatore a coclea, ecc.). Miscelare il prodotto per **3 minuti** circa.



## APPLICAZIONE

In generale si consiglia di adottare le stesse precauzioni e le tecniche utilizzate per i normali calcestruzzi strutturali. Essendo a consistenza estremamente fluida, **BEtonFLuid** non ha bisogno di essere vibrato durante il getto. Il prodotto deve essere utilizzato entro un tempo massimo di **20 minuti** dalla fine dell'impasto. Con temperature superiori a + 30°C bisogna cercare di evitare la rapida evaporazione dell'acqua tenendo umida la superficie del getto o coprendola adeguatamente.

Nel caso in cui si debbano eseguire getti di pavimentazioni, si consiglia di inserire dei giunti di dilatazione al massimo ogni 20 m<sup>2</sup> di superficie ed attorno ad eventuali pilastri che dovessero attraversare la pavimentazione stessa.

In caso di interruzione del getto, eseguire la ripresa entro 20 minuti. **BEtonFLuid** può essere posato anche utilizzando le più comuni macchine per il trasporto ed il pompaggio dei calcestruzzi tradizionali.

## RESA

Utilizzare circa 86 sacchi per confezionare 1 m<sup>3</sup> di calcestruzzo fresco.

## CONFEZIONI

**BEtonFLuid** è fornito in sacchi da 25 kg su pallett 2 vie per un totale di 1500 kg (equivalenti a 60 sacchetti).



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

AVVERTENZE	
N.B. PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE	
FARE SEMPRE RIFERIMENTO ALL'ULTIMA VERSIONE AGGIORNATA DELLA SCHEDA TECNICA, DISPONIBILE SUL SITO <a href="http://WWW.VAGAEDILIZIA.IT">WWW.VAGAEDILIZIA.IT</a>	
Precauzioni	<b>Non aggiungere altri prodotti e non variare le quantità predosate; in caso di movimentazione manuale si consiglia di adottare specifiche procedure operative (D.Lgs. 81/2008, art. 168). BEtonFLuid contiene cemento che, a contatto con il sudore o altri fluidi del corpo, provoca una reazione alcalina irritante e manifestazioni allergiche in soggetti predisposti. Può causare danni oculari. Durante l'applicazione indossare guanti e occhiali protettivi e utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. In caso di contatto con gli occhi o la pelle lavare immediatamente e abbondantemente con acqua e consultare il medico. Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza disponibile sul sito <a href="http://www.vagaedilizia.it">www.vagaedilizia.it</a></b>
Temperatura di utilizzo	<b>Da +5°C a +35°C</b>
Stoccaggio e conservazione	<b>Sino a 12 mesi all'aperto in luogo fresco e con imballo integro; prodotto conforme alle prescrizioni del Reg.(CE) N. 1907/2006 (Reach)-All.XVII, voce 47; rimossa la protezione in polietilene è indispensabile proteggere i sacchi dalla pioggia; non esporre per lungo tempo alla luce solare diretta.</b>
Data di confezionamento	<b>Stampata sul fronte del sacco</b>

### Malta cementizia per muratura termoisolante



#### **Composizione**

ML 203 è una malta secca premiscelata composta da cemento Portland, inerti leggeri ed additivi specifici per migliorare la lavorazione e l'adesione.

#### **Caratteristiche tecniche**

<b>Peso specifico della polvere</b>	550 kg/m <sup>3</sup> ca.
<b>Granulometria</b>	< 4 mm
<b>Spessore minimo</b>	10 mm
<b>Acqua di impasto</b>	56% ca.
<b>Resa</b>	6,50 q ca. di malta secca per ottenere 1.000 l di malta bagnata (con 1 sacco da 20 kg si ottengono 31 l ca. di malta bagnata)
<b>Densità del prodotto indurito</b>	750 kg/m <sup>3</sup> ca.
<b>Resistenza a flessione a 28 gg</b>	1,5 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Resistenza a compressione a 28 gg</b>	5 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Modulo di elasticità a 28 gg</b>	3.500 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Fattore di resistenza alla diffusione del vapore</b>	$\mu = 5/20$ (valore tabulato)
<b>Coefficiente di conducibilità termica</b>	= 0.23 W/m <sup>2</sup> K (Valore misurato) (UNI 7745)
<b>Classe</b>	M5 secondo UNI EN 998-2 M3 secondo D.M. 20-11-87
<b>Conforme alle Disposizioni per la Marcatura CE come da Appendice ZA-Norma UNI EN 998-2</b>	

#### **Impiego**

ML 203 viene usata come malta per l'esecuzione di murature in laterizio alveolato o blocchi in argilla espansa.

#### **Lavorazione**

Ad ogni sacco da 20 kg di ML 203 aggiungere circa 11 litri di acqua pulita e mescolare in betoniera o, per piccole quantità, a mano o con agitatore meccanico. Il tempo di miscelazione non deve superare i 3 minuti. ML 203 sfusa viene impastata mediante mescolatore orizzontale collegato direttamente alla stazione silo (a caduta) oppure, utilizzando silo a pressione e impianto di convogliamento, viene impastata con mescolatore al piano. Per una corretta realizzazione della

muratura è consigliabile riempire accuratamente le fughe orizzontali e verticali. La malta dopo la miscelazione deve essere applicata entro 2 ore.

#### **Avvertenze**

La malta fresca va protetta dal gelo e da una rapida essiccazione. Poiché l'indurimento della malta si basa sulla presa idraulica del cemento una temperatura di +5°C viene consigliata come valore minimo per l'applicazione e per il buon indurimento della malta. Al di sotto di tale valore la presa verrebbe eccessivamente ritardata e sotto 0°C la malta fresca o anche non completamente indurita sarebbe esposta all'azione disgregatrice del gelo.

**ML 203 deve essere usata allo stato originale senza aggiunte di materiali estranei.**

#### **Fornitura**

- Sfusa in silo.
- Sacchi speciali con protezione dall'umidità da 20 kg ca.

#### **Conservazione**

Conservare allasciutto per un periodo non superiore a 6 mesi.

#### **Qualità**

ML 203 è sottoposta ad accurato e costante controllo presso i nostri laboratori. Le materie prime impiegate vengono rigorosamente selezionate e controllate.

I dati riportati si riferiscono a prove di laboratorio; nelle applicazioni pratiche di cantiere queste possono essere sensibilmente modificati a seconda delle condizioni di messa in opera. L'utilizzatore deve comunque verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto, assumendosi ogni responsabilità derivante dall'uso. La ditta Fassa si riserva di apportare modifiche tecniche senza nessun preavviso. Edizione 03/08.

### Malta cementizia per muratura ed intonaco da utilizzare a mano per interni ed esterni



#### Composizione

MM 30 è una malta secca premiscelata composta da calce idrata, cemento Portland, sabbie classificate ed additivi specifici per migliorare la lavorazione e l'adesione.

#### Caratteristiche tecniche

<b>Peso specifico della polvere</b>	1.500 kg/m <sup>3</sup> ca.
<b>Granulometria</b>	< 3 mm
<b>Spessore minimo</b>	10 mm
<b>Acqua di impasto</b>	18% ca.
<b>Resa come intonaco</b>	15 kg/m <sup>2</sup> ca. con spessore 10 mm
<b>Resa</b>	17 q ca. di malta secca per ottenere 1.000 l di malta bagnata (con 1 sacco da 30 kg si ottengono 17,5 l ca. di malta bagnata)
<b>Densità malta indurita</b>	1.850 kg/m <sup>3</sup> ca.
<b>Resistenza a flessione a 28 gg</b>	2,5 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Resistenza a compressione a 28 gg</b>	5 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Modulo di elasticità a 28 gg</b>	8.000 N/mm <sup>2</sup> ca.
<b>Fattore di resistenza alla diffusione del vapore (EN 1745)</b>	$\mu = 15/35$ (valore tabulato)
<b>Classe</b>	M5 secondo UNI EN 998-2 M3 secondo D.M. 20-11-87
<b>Conforme alle Disposizioni per la Marcatura CE come da Appendice ZA-Norma UNI EN 998-2</b>	

#### Impiego

MM 30 viene usata come malta per murature in mattoni, blocchi in calcestruzzo, ecc. e per piccole riparazioni dove si richiede una lavorazione simile alla malta tradizionale.

#### Preparazione del fondo

La superficie da intonacare deve essere libera da polvere e sporco. Eventuali tracce di oli, grassi, cere, ecc. devono essere precedentemente rimosse. Le superfici in calcestruzzo devono essere asciutte e precedentemente trattate con materiali aggrappanti come ad esempio SP 22, oppure con un rinzafo a base di sabbia e cemento con aggiunta dello speciale additivo AG 15 alcali resistente.

#### Lavorazione

Ad ogni sacco da 30 kg di MM 30 aggiungere circa 5-5,5 litri di acqua pulita e mescolare in betoniera o, per piccole quantità, a mano o con agitatore meccanico. Il tempo di miscelazione non deve superare i 3 minuti. La malta dopo la miscelazione deve essere applicata entro 2 ore.

#### Avvertenze

- La malta fresca va protetta dal gelo e da una rapida essiccazione. Poiché l'indurimento della malta si basa sulla presa idraulica del cemento e su quella aerea della calce una temperatura di +5°C viene consigliata come valore minimo per l'applicazione e per il buon indurimento della malta. Al di sotto di tale valore la presa verrebbe eccessivamente ritardata e sotto 0°C la malta fresca o anche non completamente indurita sarebbe esposta all'azione disgregatrice del gelo.
- Pitture, rivestimenti, tappezzerie, ecc. devono essere applicati solo dopo la completa essiccazione e stagionatura della malta.
- E' necessario aerare adeguatamente i locali dopo l'applicazione sino a completo essiccaimento, evitando forti sbalzi termici nel riscaldamento degli ambienti.

**MM 30 deve essere usata allo stato originale senza aggiunte di materiali estranei.**

#### Fornitura

- Sacchi speciali con protezione dall'umidità da 30 kg ca.

#### Conservazione

Conservare all'asciutto per un periodo non superiore a 6 mesi.

#### Qualità

MM 30 è sottoposta ad accurato e costante controllo presso i nostri laboratori. Le materie prime impiegate vengono rigorosamente selezionate e controllate.

I dati riportati si riferiscono a prove di laboratorio; nelle applicazioni pratiche di cantiere questi possono essere sensibilmente modificati a seconda delle condizioni di messa in opera. L'utilizzatore deve comunque verificare l'idoneità del prodotto all'impiego previsto, assumendosi ogni responsabilità derivante dall'uso.

La ditta Fassa si riserva di apportare modifiche tecniche, senza alcun preavviso. Edizione 03/08.

**Fonti delle illustrazioni**

- Fig. 1: <http://www.viaggiandoin.com/viaggio/egitto/giza.html>;
- Fig. 2: <http://www.enricobaccarini.com/il-cemento-dei-faraoni-tra-mito-e-realta/>;
- Fig. 3: <http://www.activitaly.it/monument/colosseo.htm>;
- Fig. 4: tesi di dottorato di Emilio Traettino dal titolo "Il degrado del cemento armato Dinamiche, recupero e prevenzione";
- Fig. 5: <http://www.unicam.it/plschimica/cemento.asp>;
- Fig. 6: [http://www.tesoridiroma.net/monumenti\\_roma/ponti\\_roma.html](http://www.tesoridiroma.net/monumenti_roma/ponti_roma.html);
- Fig. 7: Il Palazzo dei Telefoni al Rione Amedeo in Napoli di Camillo Guerra, di Renato Iovino;
- Fig. 8: Decreto legge del 16 novembre 1939;
- Fig. 9: Appunti del corso Elementi di tecnologia dell'architettura- Il calcestruzzo (1^ parte), di Prof. Luca Venturi;
- Fig.12: TNL, Istituto Giordano: *rivista di innovazione tecnica e scientifica n.1 2007*;
- Fig.13: La corrosione delle armature nel calcestruzzo, di Pietro Pedefferri;
- Fig.14: Tesi di laurea di Giulia Ottaviani dal titolo "Progetti di Strutture di Fondazione M - Procedimenti analitici per il calcolo evolutivo della corrosione in armature metalliche";
- Fig.15: "Il degrado del calcestruzzo" MAPEI;
- Fig.16: La corrosione delle armature nel calcestruzzo, di Pietro Pedefferri;
- Fig.17: La corrosione delle armature nel calcestruzzo, di Pietro Pedefferri;
- Fig.18: Tesi di laurea di Matteo Vergani dal titolo "Modellazione del degrado di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione";
- Fig.19: Tesi di laurea di Matteo Vergani dal titolo "Modellazione del degrado di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione";
- Fig.20: Tesi di laurea di Matteo Vergani dal titolo "Modellazione del degrado di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione";

- Fig.21: *A simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete*, di P. F. McGrath, Canada;
- Fig.22;23;24: *Sperimentazione in sito sulla protezione del calcestruzzo da carbonatazione*, di Convegno di presentazione dei risultati di una Convenzione di ricerca Caparol – Dipartimento di Ingegneria Civile dell'università degli Studi di Salerno;
- Fig.25: *Silani pitture acriliche e rivestimenti elastici per la durabilità di strutture in calcestruzzo*, di Luigi Coppola, Mario Collepari, Carlo Pistolesi, Pasquale Zaffaroni;
- Fig.27: UNI EN 1766:2001, dal titolo “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – Calcestruzzo di riferimento per prove”;
- Fig.32: Decreto legge del 16 novembre 1939;
- Fig.83; 85: UNI EN 13295:2005, dal titolo “Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo – Metodi di prova – determinazione della resistenza alla carbonatazione”;

### **Riferimenti bibliografici**

- [1] R. Iovino, F. Fascia, (2008) *“La struttura in cemento armato per l’architettura – tecnica e tecnologia”*, Aracne Editrice, Ariccia (RM);
- [2] D.M. 10 gennaio 1907, *“Metodi normali di prova per gli agglomeranti idraulici”*;
- [3] R.D.L. n.1213 del 29/07/1933, *“Norme per l’accettazione dei leganti e per l’esecuzione delle opere in conglomerato cementizio”*;
- [4] R.D.L. n.2229 del 16/11/1939, *“Norme per l’esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato”*;
- [5] M.O. Zander, R. Nardi, G. Zizola, (2002) *“La conservazione e il restauro delle superfici architettoniche - gli intonaci e i dipinti murali”*, Il mondo dell’archeologia, Roma;
- [6] L. Coppola, (1998), *“Dagli intonaci della Magna Grecia ai moderni intonaci macroporosi”*, Enco, Engineering Concrete, Spresiano, Italia;
- [7] A. Ghersi, (2005), *“Il cemento armato – le basi della progettazione strutturale esposte in maniera semplice ma rigorosa”*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, Italia;
- [8] M. Verganti, Tesi di laurea *“Modellazione del degrado di strutture in calcestruzzo armato soggette a corrosione”*;
- [9] P. Pedferri, (1985), *“La corrosione delle armature nel calcestruzzo”*, *Convegno sulle opere in calcestruzzo: Durabilità e ripristino*, Milano;

### **Riferimenti generali**

- [10] P.F. McGrath, (2005) *“A simple Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete”*, *Proceedings of ConMat’05 3rd International Conference on Construction Materials*, Vancouver, Canada;
- [11] Fraternali F., Spadea S., Chechile R., Farina I., Sessa E., Vetrone 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*.
- [12] 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”*;
- [13] 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.
- [14] 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.

[15] 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.*

[16] 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*”;

[17] 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*”;

[18] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC, (2005), “*Linee Guida Europee per il Calcestruzzo Autocompattante*”;

[19] UNI EN 12390-1, (2012), “*Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme*”;

[20] 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*”;

[21] BS 7543, (2015), “*Guide to durability of building elements, products and components*”;

[22] RILEM TC 205-DSC Report 38, (2007), “*Durability of self-compacting concrete*”, State of the art report;

[23] M. Collepari, R. Fratesi, G. Moriconi, C. Branca, S. Simoncini, (1989), “*Influenza della carbonatazione sulla corrosione dei ferri nel calcestruzzo armato*”, *Giornate AICAP, Napoli*;

[24] P.N.Maggi, (2001), “*La valutazione della durabilità*”, Epitesto, Milano;

[25] A.M. Neville, (1975), “*Properties of concrete*”, Pitman paperback, Londra;

[26] M. Collepari, (2011), “*Dizionario enciclopedico del calcestruzzo*”, Tintoretto, Villorba (TV);

[27] M. Collepari, S. Collepari, L. Troli, (2009), “*Il nuovo calcestruzzo*”, Tintoretto, Villorba (TV);

[28] 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;

[29] P. Pedefferri, L. Bertolini, (2000), “*La durabilità del calcestruzzo armato*” Mc Graw-Hill, New York;

[30] K.K. Sideris, (2006), “*Durability of self-compacting concretes different strenght categories*”, Internale report, Laboratory of building materials, Democritus, University of Thrace, Greek;

[31] S. Assiè, (2004), “*Durabilité des bétons autoplacants*”, PhD thesis INSA de Toulouse, France;