



Home

SCC, FRP, incamiciatura per un intervento di rinforzo di strutture in c.a. fortemente degradate del dopo guerra

Maurizio Nicoletta - Professore - Università di Napoli "Federico II" © 20/03/2018 960

ABSTRACT

L'articolo espone problematiche palesatesi e rimedi adottati nel particolarissimo ed emblematico caso studio di un fabbricato sito in Napoli, edificato nell'immediato dopoguerra (1947/49), e che nel 2011 ha presentato gravi problemi agli elementi strutturali in calcestruzzo armato.

Grazie ad una estesissima campagna di prove in sito, si è potuto innanzi tutto valutare la legge di variabilità dei fenomeni degradanti in funzione del fronte di esposizione e dell'altezza, e quindi si è potuto concepire un intervento di rinforzo, dalle fondazioni fino al piano attico, attuato con materiali di ultima generazione (calcestruzzo autocompattante, materiali compositi), e tale da garantire un nuovo ciclo di vita superiore a quello

Il Magazine



Sfoggia la rivista online



SCC, FRP, incamiciatura per un intervento di rinforzo di strutture in c.a. fortemente degradate del dopoguerra

AUTORE: Maurizio Nicoletta, Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II

ABSTRACT

L'articolo espone problematiche palesatesi e rimedi adottati nel particolarissimo ed emblematico caso studio di un fabbricato sito in Napoli, edificato nell'immediato dopoguerra (1947/49), e che nel 2011 ha presentato gravi problemi agli elementi strutturali in calcestruzzo armato.

Grazie ad una estesissima campagna di prove in sito, si è potuto innanzi tutto valutare la legge di variabilità dei fenomeni degradanti in funzione del fronte di esposizione e dell'altezza, e quindi si è potuto concepire un intervento di rinforzo, dalle fondazioni fino al piano attico, attuato con materiali di ultima generazione (calcestruzzo autocompattante, materiali compositi), e tale da garantire un nuovo ciclo di vita superiore a quello da considerare ormai concluso.

Dal punto di vista sperimentale, a tal fine, sono stati in parallelo condotti studi finalizzati alla determinazione del momento nel quale la carbonatazione avrà superato il guscio di rivestimento in SCC, e riproporrà quindi il problema dell'aggressione al calcestruzzo di origine. Sulla base di sperimentazioni condotte mediante test di carbonatazione accelerata secondo la norma UNI EN 13295-2, dei modelli teorici della letteratura internazionale sull'argomento ma anche dei dati raccolti sul campo, è stato ipotizzato – con riferimento al noto modello di Tuutti – il periodo di ultimazione dell'innesco e di inizio della propagazione.

Il caso può essere considerato, per questo tipo di edifici, paradigmatico per valutazioni di resilienza del patrimonio edilizio nonché per strategie di riduzione di vulnerabilità, sia per la fase di approccio (diagnosi ed intervento) sia per la fase di programmazione della manutenzione, alla luce del fatto che in Italia circa il 70% degli edifici sono stati costruiti dopo il 1946 e quasi tutti hanno le stesse caratteristiche costruttive, mentre circa il 30% è stato edificato fra il 1946 ed il 1971 (anno di pubblicazione della legge 1086), e buona parte di essi è prevedibile possano avere problematiche analoghe nei prossimi anni.

INTRODUZIONE

Il caso studio è da considerare in realtà un emblematico esempio di imprevisto in corso d'opera: nel corso di semplici interventi di manutenzione ordinaria, direttore dei lavori ed impresa, all'atto della rimozione di intonaci e pavimentazione dei balconi, si sono trovati di fronte a situazioni come quelle di cui alle foto 1 e 2, ovvero:

- crollo della soletta in calcestruzzo armato, con messa a nudo di armature ormai ridotte di sezione o addirittura parzialmente scomparse;
- esposizione di elementi in c.a. in condizioni di degrado avanzatissimo: armature profondamente ossidate, calcestruzzo polverulento, lesioni profonde.

La imprevista situazione ha costretto a provvedere alla nomina di un gruppo di tecnici, per provvedere essenzialmente a:

- eseguire una campagna di prove;
- verificare la sussistenza delle condizioni di sicurezza;
- ipotizzare una strategia di intervento congrua rispetto alla situazione effettiva ma anche del costo di intervento, considerando che l'edificio ha una superficie di piano di circa mq. 750 e si sviluppa su 11 livelli, con una cubatura complessiva che supera gli 8.000 mc., ma anche che all'epoca della descritta situazione era interamente messo a reddito o utilizzato dai proprietari.

Si ritiene, in particolare, che l'esperienza qui raccontata costituisca un precedente molto importante sia per la tipologia e quantità di prove condotte in fase di studio per avere un soddisfacente livello di conoscenza della struttura, e sia per la tipologia di interventi eseguiti, che hanno riguardato ogni singolo elemento strutturale.



Foto 1 – crollo parziale di una soletta a sbalzo all'atto della rimozione del pavimento

Foto 2 – gravi condizioni di degrado con profonda lesione da taglio in una trave di bordo

LE INDAGINI

E' stata preliminarmente condotta una ampia ed estesa campagna di indagini (non solo sugli elementi strutturali), così riepilogabili:

- n° 59 prelievi di carote $\varnothing 80$ e $\varnothing 100$ e successive prove di carbonatazione e rottura a compressione;
- n° 5 determinazione dei cloruri nel calcestruzzo;
- n° 201 prove sclerometriche;
- n° 201 prove ultrasoniche;
- n° 185 elaborazioni SonReb;
- n° 1 determinazione del carbonio equivalente su n°1 barra di armatura;
- n° 1 prelievo di blocco di lapilcimento, costituente un tramezzo, e successiva determinazione del peso specifico e prova di rottura a compressione;
- n°22 prelievi di barre d'armatura dalle travi e dai solai della struttura e successive prove di trazione.

Tali indagini, in uno con la disponibilità di quasi tutti gli elaborati di progetto originari (alcuni dei quali visibili nelle figure 1 e 2) e la generale congruenza degli stessi con quanto realizzato, come risultante da indagini a campione, hanno consentito di definire un livello di conoscenza LC2 così come definito al § C.8A.1.B delle NTC2008. A tale livello di conoscenza corrisponde un fattore di confidenza $FC = 1,20$.

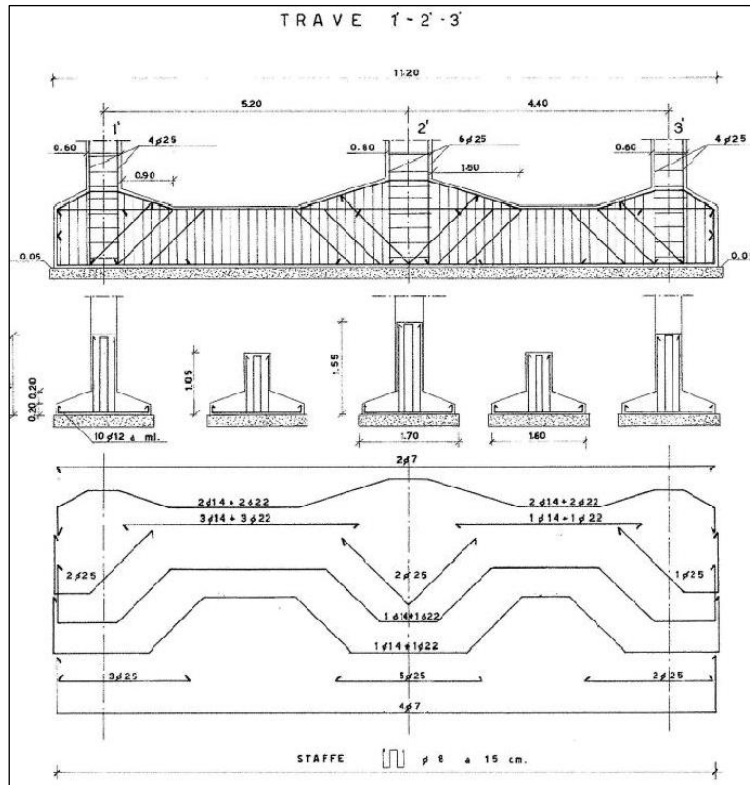


Figura 1: carpenteria delle travi di fondazione del progetto degli anni '40

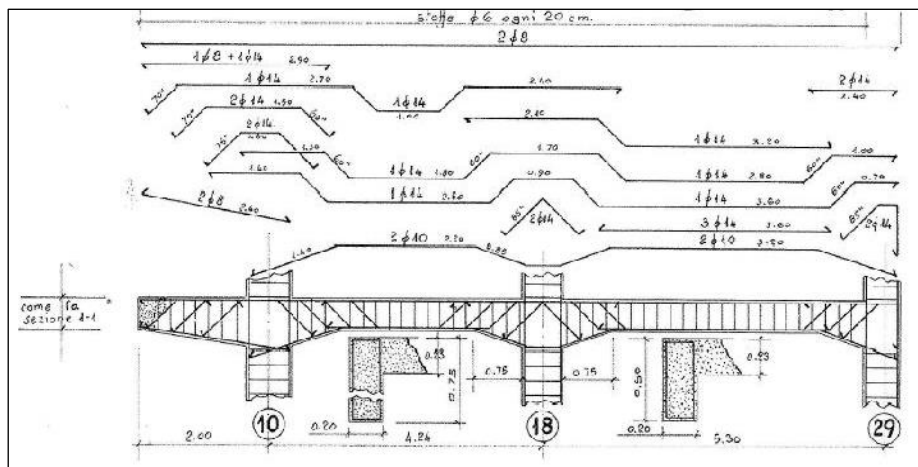


Figura 2 – carpenteria delle travi del piano tipo del progetto degli anni '40

I valori medi delle resistenze cilindriche f_{cm} dei calcestruzzi riscontrate dai prelievi in opera sono sintetizzati nella tabella sottostante:

Impalcati	f_{cm} (MPa)	
I	22.00	22.04
II	22.53	
III	22.17	
IV	21.49	
V	21.16	15.45
VI	15.08	
VII	10.91	

VIII	10.27	10.02
IX	9.64	
X	14.19	14.19

Come si nota chiaramente, le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo peggiorano con l'altezza. Per quanto riguarda i rilievi della profondità di carbonatazione, è interessante riepilogare la distribuzione sia del punto di vista planimetrico (figura 3), che altimetrico (figura 4), con chiare conseguenze dell'esposizione all'ambiente cittadino, ma qualche sorprendente risultato anche dal fronte opposto.

Su n° 3 carote è stato poi determinato il contenuto di cloruri secondo la norma UNI EN 14629. I campioni esaminati sono stati scelti in maniera tale da evidenziare una eventuale differenza di contenuto di cloruri tra i campioni che affacciano direttamente sulla strada e quelli prelevati verso l'interno del fabbricato e quindi più protetti. I cloruri erano presenti in una percentuale molto bassa, chiaramente in misura maggiore in direzione del mare, sul fronte esterno.

Con calcestruzzi non carbonatati ottenuti con normali cementi portland ($pH > 13$), il rischio di corrosione è basso per un contenuto di cloruri inferiore a 0,4% (in massa rispetto al contenuto di cemento) ed elevato per tenori superiori a 1%. Quindi sull'opera oggetto d'indagine non era così rilevante l'apporto di cloruri ai fini della corrosione. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella sottostante a sinistra, mentre in quella di destra sono riportati i risultati di prelievi dalla facciata interna, sempre con valori poco significativi e dunque trascurabili rispetto alla carbonatazione

N.	Ubicazione	% Cl	N.	Ubicazione	Cloruri Solubili %
1	Trave 18-29 - I impalcato (telaio lato cortile)	0,009	1	III° impalcato – Balcone tra i pilastri 11'-14'	0,009
2	Trave 20' - 31' - VIII impalcato (telaio interno)	0,007	2	V° impalcato – Balcone tra i pilastri 30-30'	< 0,005
3	Trave 1 - 4 - VIII impalcato (telaio lato Riviera)	0,010			

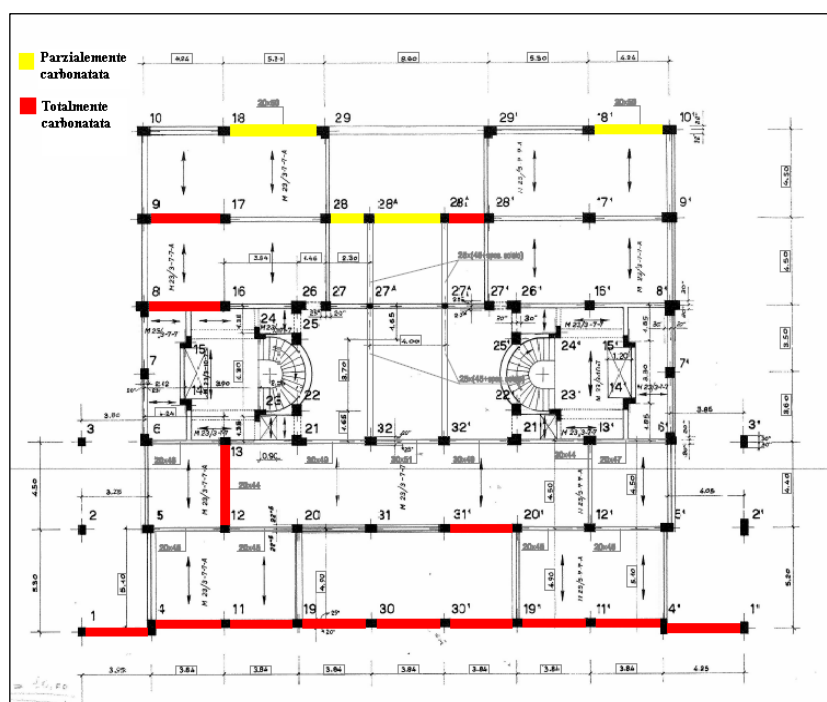


Figura 3 – andamento planimetrico della carbonatazione rilevata: in basso il fronte esposto verso la strada a grande scorrimento e verso il mare, in giallo valori di carbonatazione parziale, in rosso totale

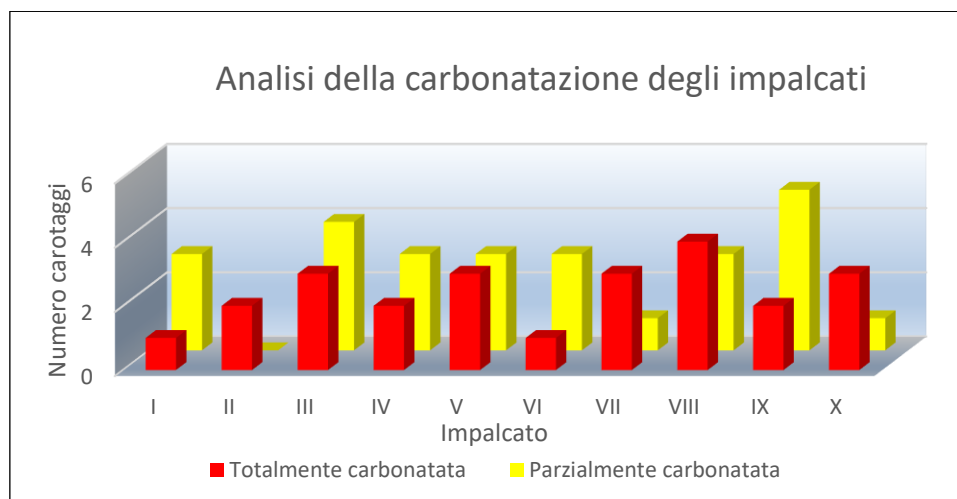


Figura 4 – istogramma rappresentativo dell'andamento altimetrico della carbonatazione rilevata

Per quanto attiene invece alle barre di armatura in acciaio, in considerazione dei risultati ottenuti dalle prove eseguite con prelievo in opera (dopo una vasta campagna di rilievi pachometrici), si è ritenuto in sede di verifica, di adottare quale valore rappresentativo delle caratteristiche meccaniche delle stesse, quello medio, come di seguito esposto:

N°	Elemento	f_y [N/mm ²]	f_t [N/mm ²]	f_t/f_y
1	trave scala A II impalcato	401.9	499.3	1.242349
2	trave scala b II impalcato	374.6	475.5	1.269354
3	trave scala B VII impalcato	413.9	493.4	1.192075
4	travetto rovescia 20'-21'	334.4	480.7	1.4375
5	trave scala B IX impalcato	404.4	485.4	1.200297
6	trave scala B x impalcato	488.2	551.1	1.128841
7	trave scala B III impalcato	390	618.4	1.585641
8	trave 12'-13' I impalcato	338.4	406.7	1.201832
9	trave scala B IV impalcato	459.2	612.7	1.334277
10	trave 27'-32' I impalcato	341.1	439.2	1.287599
11	travetto solaio 19-20-30-31 VII impalcato	357.6	461.1	1.28943
12	trave 1'-4' VIII impalcato	407.2	471	1.15668
13	travetto solaio 11'-12'-19'-20' VIII impalcato	419.9	532.7	1.268635
14	travetto solaio 11'-12'-19'-20' VIII impalcato	296.1	368.1	1.243161
15	trave 1'-4' VII impalcato	540.8	875.8	1.619453
16	balcone 19'-30' VI impalcato	397.2	439.2	1.10574
17	trave 1'-4' V impalcato	356.5	438.8	1.230856
18	trave 1-4 IX impalcato	402.9	501.1	1.243733
19	trave 1'-4' IV impalcato	543.9	564.4	1.037691
20	trave 1-4 VI impalcato	284	340.9	1.200352
21	trave 1-4 III impalcato	679.8	683.2	1.005001
22	trave 1-4 VII impalcato	341.4	442.5	1.296134
	Valore Medio	407.88	508.24	

CRITERI DI PROGETTO

Il progetto degli interventi per il consolidamento strutturale ai fini di un miglioramento sismico è stato redatto dal Prof. Luigi Petti in accordo ai criteri previsti dalle norme tecniche di cui alle NTC2008. In considerazione dell'ormai consolidato approccio prestazionale che ormai è a fondamento della normativa tecnica degli ultimi anni, i suddetti criteri hanno garantito i livelli prestabiliti di prestazione/sicurezza per eventi sismici descritti da diversa probabilità di occorrenza in considerazione dell'importanza che la struttura riveste sul territorio e della pericolosità del sito.

Nel caso delle costruzioni esistenti, le norme tecniche vigenti consentono di poter conseguire un livello di sicurezza minore nei confronti delle azioni sismiche in considerazione delle esigenze dei proprietari e delle funzioni che si svolgono nella costruzione. Nel caso in oggetto, i proprietari hanno ritenuto procedere al consolidamento strutturale dell'edificio per ripristinare innanzitutto la sicurezza dello stesso nei confronti dei carichi statici verticali.

Per quanto attiene alle azioni sismiche, sulla base di considerazioni essenzialmente tecnico-economiche, e considerato che le norme tecniche vigenti consentono per le costruzioni esistenti interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle norme stesse per le nuove costruzioni, hanno ritenuto procedere al miglioramento sismico dell'edificio.

In generale ricadono in questa categoria tutti gli interventi che, non rientrando in quella dell'adeguamento (§ 8.4.1 NTC2008), fanno variare significativamente la rigidità, la resistenza e/o la duttilità dei singoli elementi o parti strutturali, così che il comportamento strutturale locale o globale, particolarmente rispetto alle azioni sismiche, ne sia significativamente modificato.

Nello specifico, sono stati previsti interventi per innalzare la sicurezza nei confronti dei carichi statici verticali e, al contempo, eliminare le principali fonti di fragilità intrinseche e tipiche delle costruzioni dell'epoca, trasformando essenzialmente i principali meccanismi di collasso locali da fragili a duttili.

È opportuno osservare che l'edificio risale a metà degli anni '40 e che la prima classificazione sismica della città di Napoli (terza categoria) è successiva al terremoto del 1980, pertanto, il progetto originario fu condotto essenzialmente nei confronti dei carichi verticali, e non per assorbire azioni sismiche.

In particolare, l'elevata vulnerabilità sismica che ne scaturiva era legata alle seguenti principali carenze strutturali:

- gli elementi di controvento, telai in c.a., risultavano distribuiti in modo non uniforme nelle due direzioni principali dell'edificio con una maggiore carenza nella direzione trasversale dello stesso (v. figura 5);
- i nodi trave-pilastro non risultavano confinati e non erano, pertanto, in grado di assorbire l'azione di taglio che si determina in condizioni di carico sismico;
- i solai orditi principalmente nella direzione trasversale, considerato che la soletta superiore non è armata ed i travetti sono debolmente armati (v. figura 6), non erano in grado di trasferire le azioni inerziali orizzontali, che nascono in condizioni di carico sismico, ai telai di controvento;
- la sovrapposizione delle barre longitudinali nei pilastri e nelle travi era insufficiente a trasmettere le sollecitazioni cicliche indotte da un evento sismico;
- la tipologia di staffe presenti non consentiva un idoneo confinamento delle sezioni dei pilastri e delle travi.

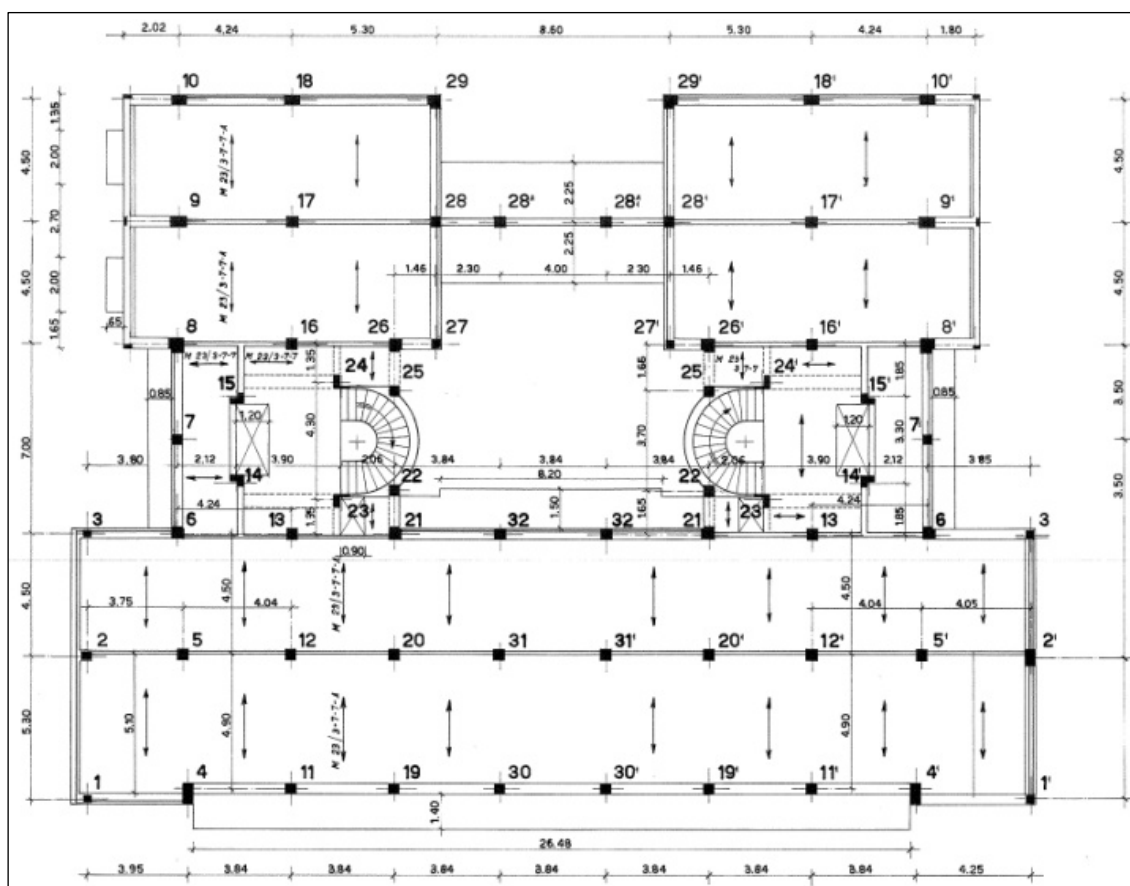


Figura 5 – schema di carpenteria, tratto dal progetto originario degli anni '40

Si evidenziano, inoltre, i seguenti ulteriori aspetti che comunque incidono sulla vulnerabilità statica e sismica dell'edificio nello stato di fatto:

- le resistenze dei calcestruzzi accertate con prove dirette ed indirette presentavano una elevata dispersione con valori minimi più bassi in corrispondenza di alcuni livelli;
- parte degli elementi strutturali portanti presentavano dimensioni particolarmente ridotte. Ad esempio le travi portanti in corrispondenza di alcuni fronti, tra cui quello che si affaccia sul fronte esterno, presentavano una base di 15cm e le solette degli sbalzi sezioni variabili con spessore di 6 cm in punta;
- alcuni elementi strutturali portanti, quali i pilastri, erano debolmente armati;
- le barre di armature erano in alcuni casi del tipo liscio con limitata capacità di aderenza nei confronti del calcestruzzo;
- le resistenze delle barre di armatura accertate con prove dirette presentavano una elevata dispersione;
- le tamponature esterne e le tramezzature, realizzati in tufo giallo ed in lapilimento vibrato, in condizioni di carico sismico potevano determinare, in considerazione della resistenza e rigidità degli stessi, una crisi per taglio dei nodi travi-pilastro;
- nello stato di fatto si è rilevato, soprattutto in corrispondenza del prospetto sulla Riviera, un degrado avanzato degli elementi in c.a. con sensibile riduzione delle sezioni resistenti delle armature e delle sezioni in calcestruzzo;
- le analisi condotte, come riportato nel seguito, hanno mostrato che i pilastri sono generalmente soggetti, già per soli carichi statici verticali, a sforzi di compressione tali da comportare tassi di lavoro particolarmente elevati per le sezioni di calcestruzzo.

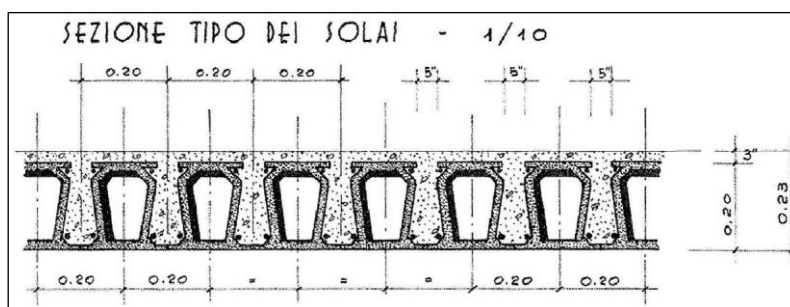


Figura 6 – caratteristiche tecniche dei solai

Il progetto dell'intervento di consolidamento, per tutto quanto sopra esposto, ha perseguito i seguenti obiettivi specifici:

- ripristino ed incremento della capacità portante dei pilastri (v. figura 7);
- confinamento dei nodi trave-pilastro (v. figura 8);
- ripristino ed incremento della capacità portante delle travi;
- ricostruzione/riparazione degli sbalzi (v. figura 9);
- ripristino in generale degli elementi in calcestruzzo armato ammalorati.

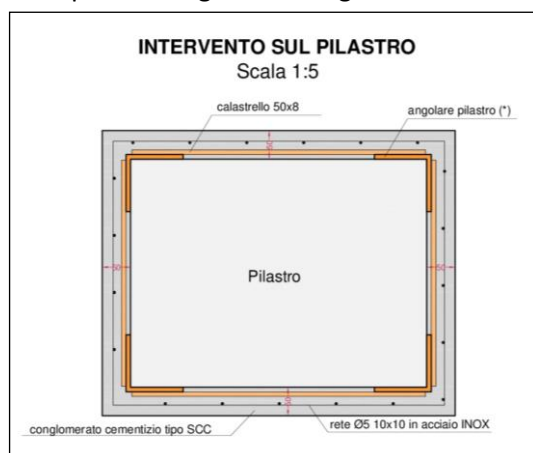


Figura 7 – particolare dell'intervento sui pilastri, consistente nella realizzazione di una blindatura con SCC, armato con carpenteria in angolari e calastrelli e rete elettrosaldada inox.

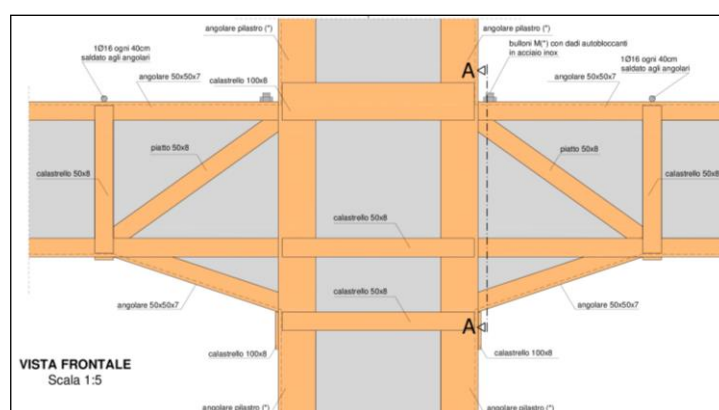


Figura 8 – particolare di progetto riguardante un nodo trave pilastro, confinato con angolari e calastrelli, e successivo getto di SCC

Tali interventi, mitigando le principali cause di fragilità e vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche, hanno consentito all'edificio un incremento sostanziale delle prestazioni rispetto alle azioni sismiche previste dalla norma per il sito.

Il quale, per l'edificio in oggetto, presentava alcune particolari peculiarità, che configurano un ambiente molto aggressivo per le strutture in particolare ma per l'edificio in generale:

- esposizione diretta ad ambiente cittadino, su strada di traffico particolarmente intenso (e dunque con alto tasso di inquinamento atmosferico) anche dal punto di vista della velocità di transito e della dimensione di automezzi (e dunque con notevoli vibrazioni indotte);
- prossimità al mare, con conseguente percentuale di cloruri nell'aria abbastanza elevata;
- presenza di falda a circa 2 m. dal piano di campagna, in materiale di riporto di natura piroclastica con inclusi antropici e tufacei, con angolo di attrito prossimo ai 30°.

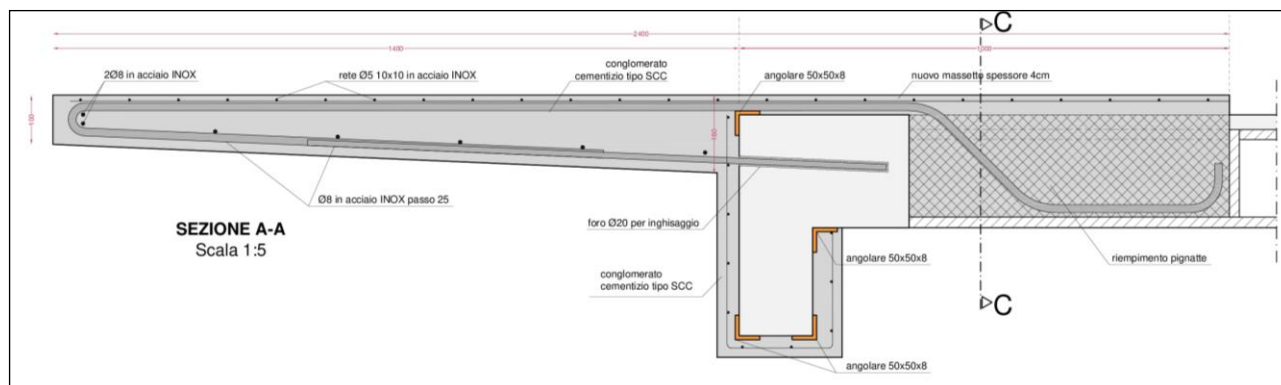


Figura 9 – particolare del progetto di ricostruzione degli sbalzi che sono stati demoliti

CARATTERISTICHE DEGLI INTERVENTI

Il progetto degli interventi ha riguardato, in particolare, alcuni elementi ed alcune tecnologie di rinforzo, di seguito brevemente riepilogate.

Incamicatura pilastri con angolari e calastrelli con confinamento nodi

È stata realizzata la blindatura dei pilastri mediante angolari e calastrelli in acciaio e getto integrativo con calcestruzzi tipo SCC a ritiro controllato, armato con rete elettrosaldata in acciaio inox, con l'obiettivo di incrementare e confinare la sezione resistente dei pilastri, integrare l'armatura longitudinale e migliorarne la connessione in corrispondenza dei nodi. L'intervento previsto consente inoltre di confinare i nodi trave-pilastro.

Incamicatura travi con angolari e calastrelli

È stata realizzata la blindatura delle travi dei telai di bordo e dei telai in corrispondenza delle scale mediante angolari e calastrelli e getto integrativo con calcestruzzi tipo SCC a ritiro controllato, con l'obiettivo di incrementare e confinare la sezione resistente delle travi, integrare l'armatura a flessione e taglio e migliorarne la connessione in corrispondenza dei nodi.

Ricostruzione degli sbalzi

La ricostruzione degli sbalzi è stata realizzata, per tutti i balconi esposti verso l'esterno (mare + strada ad alto scorrimento) mediante ricostruzione delle armature a flessione ed a taglio con acciaio inox e getto di calcestruzzo integrativo del tipo SCC. Per ancorare le "molle" è stata realizzata la disposizione delle code delle stesse nelle pignatte del solaio retrostante. Le barre di armatura presenti all'intradosso sono invece state inghisate nelle travi di bordo. Gli sbalzi sono, quindi, gettati con calcestruzzo del tipo SCC avendo preventivamente disposto una rete elettrosaldata in acciaio inox in corrispondenza dell'estradosso.

Riparazione degli sbalzi

Per gli sbalzi che si presentano in condizioni di degrado sufficientemente limitato, con ossidazione limitata in corrispondenza delle armature e calcestruzzo in opera che presenti valori di resistenza sufficiente, sono stati realizzati interventi di riparazione e ripristino. In particolare, il progetto prevedeva il ripristino e la passivazione delle armature, il ripristino del calcestruzzo in corrispondenza dell'estradosso e dell'intradosso delle solette, la disposizione di fasce in FRP all'estradosso per incrementare l'armatura in zona tesa e l'incremento dello spessore della soletta mediante la disposizione di rete elettrosaldata in acciaio inox e getto di calcestruzzo tipo SCC. L'armatura integrativa (rete) è stata ancorata alla soletta del solaio retrostante mediante connettori.

Rinforzo delle travi mediante fasce in FRP

Per le travi di spina e per quelle in corrispondenza dei corpi scala è stato realizzato un placcaggio mediante fasciatura con fasce in FRP di carbonio. Obiettivo dell'intervento è quello di incrementare la portanza delle

stesse, a flessione ed a taglio, nei confronti dei carichi accidentali.

L'incremento di resistenza a taglio è stato conseguito mediante disposizione di tessuto in fibra quadri-direzionale da impregnare in sito. La resistenza a flessione è prevista migliorata, invece, mediante l'applicazione di fasce pultruse all'intradosso delle travi.

Per quanto riguarda i materiali impiegati, sono stati i seguenti:

- Acciaio per Carpenteria Metallica tipo S355
- Calcestruzzo SCC classe C32/40, XC4, XC2, XS1, XF1, XA2; A/C = 0,45;
- Acciaio in barre tipo B450
- Acciaio INOX: rete elettrosaldata e in tondini nervati per calcestruzzo armato AISI 304
- Materiali compositi: lamine di rinforzo in CFRP con resistenza a trazione min = 2800 N/mm² e modulo a trazione med N = 165000 N/mm²; tessuto in fibra di carbonio monodirezionale con resistenza a trazione delle fibre = 4300 N/mm² e modulo elastico a trazione = 234000N/mm²; tessuto in fibra di carbonio quadriassiale con resistenza a trazione delle fibre nominale = 4510 N/mm² e modulo di elasticità a trazione delle fibre medio = 230 GPa

FASI DI CANTIERE

La particolarità dell'intervento, che ha riguardato anche le fondazioni, con scavi che hanno messo a nudo il piano di posa delle stesse (foto 3), ma anche la necessità di non sgomberare del tutto l'edificio, riducendo l'inutilizzo delle unità immobiliari al minimo indispensabile, ha fatto propendere per una suddivisione dell'appalto in due lotti consecutivi, con segmentazione del fabbricato in verticale.

Si è dovuto provvedere ad un aggettamento della falda nella fasi di lavoro in fondazione, in quanto i dati delle indagini geognostiche riferivano un valore medio, che in alcuni momenti dell'anno sono stati smentiti dalle oscillazione della quota della falda stessa.

E' stato, ovviamente, disposto un monitoraggio assiduo per eventuali assestamenti del piano fondale o rotazioni rigide, il cui esito è stato sempre altamente positivo.

In corso d'opera sono intervenuti numerosi imprevisti, alcuni dei quali contraddistinti da una notevole singolarità:

- un caso di estrema fragilità di un pilastro, rivelatosi in condizioni di notevole pericolosità, con legante ormai assente, inerti costituiti da ciottoli arrotondati, e sezione ridotta ben oltre il possibile (foto 4);
- un caso di incredibile attraversamento delle travi di bordo ad opera di una discendente pluviale, per l'intera altezza dell'edificio (foto 5);
- le situazioni di contiguità con gli edifici a confine, con i quali si è riuscita ad evitare del tutto una interferenza delle strutture e degli interventi, con realizzazione di paretine in calcestruzzo alleggerito in aderenza, con apposito giunto di separazione;
- lo scalone di accesso all'edificio, elemento architettonico distintivo, che si è rivelato non avere praticamente fondazione, e per il quale si è dunque resa necessaria la demolizione e ricostruzione.

In realtà, l'imprevisto è stato il leit-motiv quasi quotidiano, e la pratica dell' *as built* è stata di particolare impegno sia per il direttore dei lavori che per l'impresa.



Foto 3 – fase di consolidamento delle travi rovesce in fondazione



Foto 4 – immagine di un pilastro al 2° piano in stato di degrado estremo



Foto 5 – particolare dell'attraversamento, da parte di una discendente pluviale, delle travi di bordo per l'intera verticale

PIANO DI MANUTENZIONE

Marzo – 2018

Le NTC08 impongono, per qualsiasi intervento di nuova costruzione o di recupero con nuovi elementi strutturali, di redigere il “Piano di manutenzione delle strutture”.

Particolare rilevanza, vista l’esperienza, di straordinario interesse ma anche per certi versi traumatica, rivestiva il tema dell’arco temporale entro il quale la realizzazione della blindatura di travi e pilastri e del rivestimento con intonaco tinteggiato può garantire adeguata protezione al calcestruzzo originario, ormai ampiamente interessato dalla carbonatazione, e quindi delle soglie temporale alle quali prevedere interventi manutentivi.

Grazie ad una campagna di prove sperimentali, condotte in laboratorio ma fondate anche su osservazioni in sito di edifici campionati nell’arco di anni, si è potuto valutare comparativamente lo scostamento fra il comportamento del calcestruzzo compattante e di quello ordinario in condizioni di esposizione omogenei, per poter mettere a punto un modello previsionale del futuro comportamento del guscio di SCC.

La figura 10 mostra i risultati comparati delle prove di laboratorio rispetto all’avanzamento del fronte di carbonatazione, con chiara prevalenza del SCC, il quale peraltro, ha esposto valori migliori anche nelle prove di compressione eseguite ai vari step temporali sui provini.

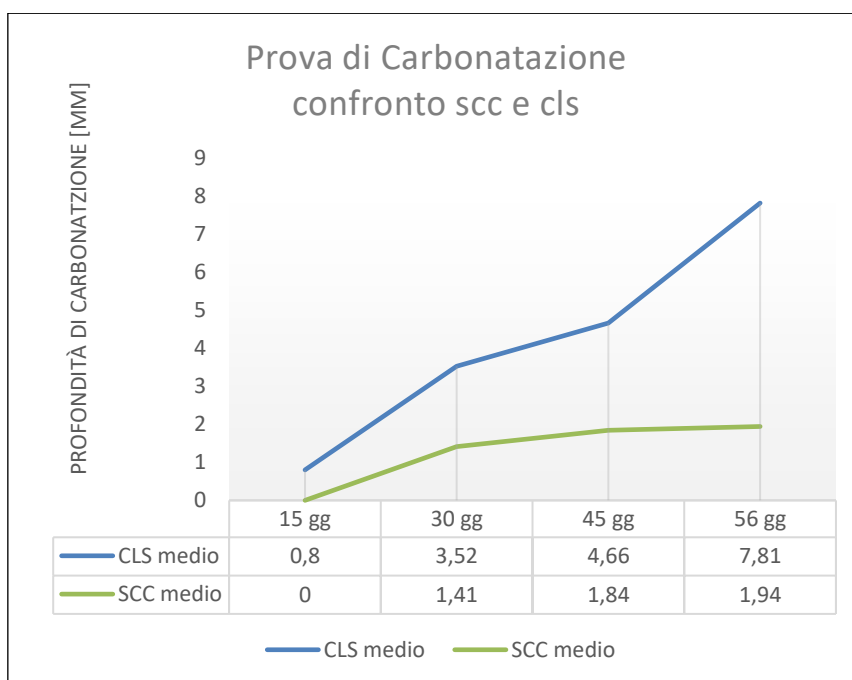


Figura 10 – comparazione del progressivo avanzamento del fronte di carbonatazione nei provini di calcestruzzo ordinario e di SCC

I risultati medi sono stati in seguito analizzati tramite un’analisi di regressione lineare (Figg. 11-12-13-14). La regressione formalizza e risolve il problema di una relazione funzionale tra variabili misurate sulla base di dati campionari estratti da un’ipotetica popolazione infinita. L’obiettivo è quello di definire una relazione lineare che caratterizzi l’andamento medio della carbonatazione nei provini analizzati per ipotizzarne il comportamento nel tempo.

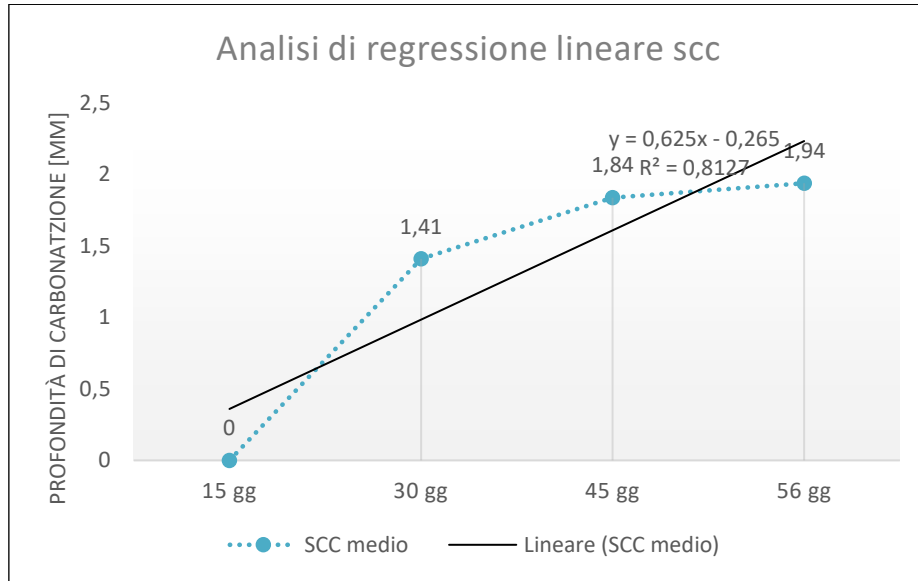


Figura 11

Sono state quindi definite delle relazioni per entrambe le tipologie di provini:

$CLS \rightarrow y = 2,217x - 1,345$ con $R^2 = 0,9727$

$SCC \rightarrow y = 0,625x - 0,265$ con $R^2 = 0,8127$

In base a queste equazioni è stato quindi possibile prevedere il tempo necessario affinché gli agenti atmosferici carbonatassero prima i 60 mm di calcestruzzo autocompattante e successivamente i 20 mm di calcestruzzo ordinario del pilastro esaminato, e 20 mm di SCC per lo sbalzo, ovvero i copriferri.

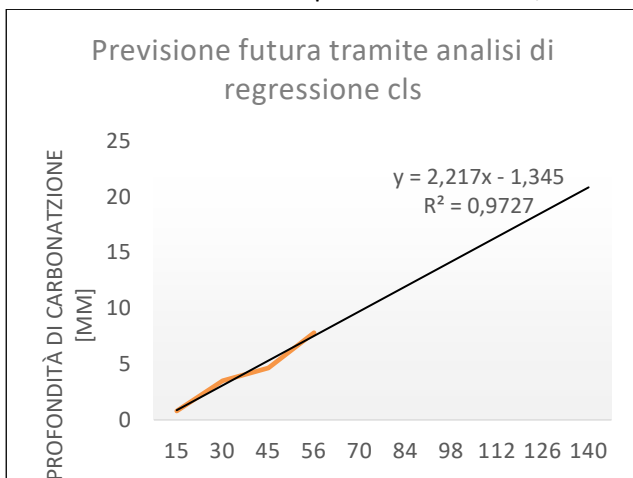


Figura 12

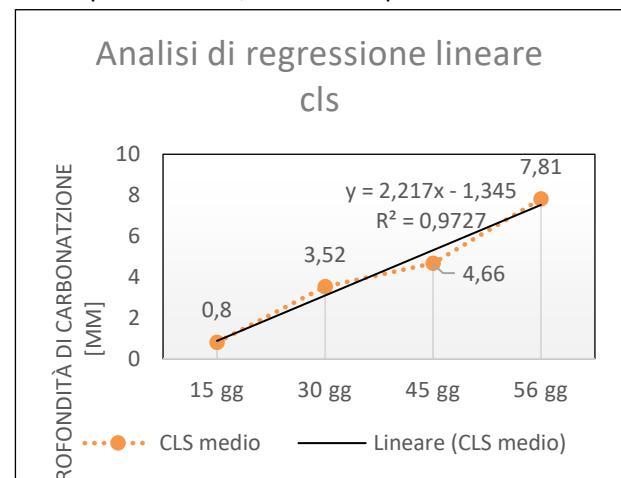


Figura 13

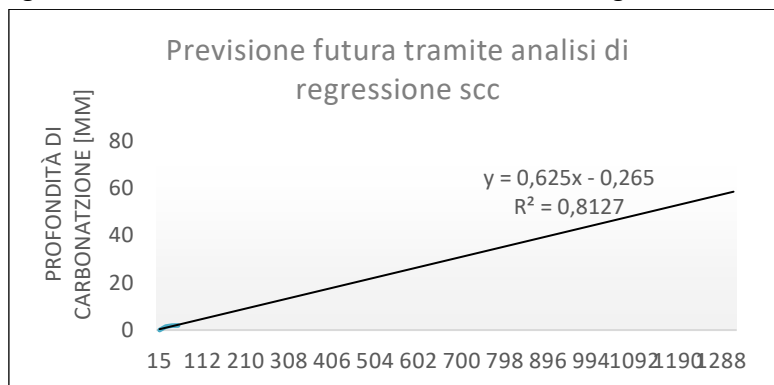


Figura 14

Nel corso di una sperimentazione di Ho & Lewis nel 1987 si è riscontrato che una settimana di esposizione a

un'atmosfera con il 4% di anidride carbonica provoca la stessa penetrazione della carbonatazione di un anno di esposizione alla normale atmosfera. Tuttavia, è provato che con elevati tenori di anidride carbonica la porosità del calcestruzzo è più elevata rispetto a quella che si ottiene per esposizione all'atmosfera naturale, soprattutto se il calcestruzzo è ottenuto con cementi di miscela o contiene alti tenori di cemento. Considerando la concentrazione dell'1% utilizzata nella sperimentazione, si ipotizza che 5,5 giorni nella cella climatica corrispondano ad un anno nell'ambiente reale. Si ottengono i seguenti risultati:

PILASTRO			
	spessore	cella climatica	vita utile
	[mm]	[giorni]	[anni]
CLS	20	140	25
SCC	60	1288	234
TOT	80	1428	259

SBALZO			
	spessore	cella climatica	vita utile
	[mm]	[giorni]	[anni]
CLS	0	0	0
SCC	20	406	74
TOT	20	406	74

Quindi tramite questa stima di massima del comportamento in laboratorio delle miscele di SCC e calcestruzzo ordinario e tenendo conto delle ipotesi inerenti il comportamento del nucleo, è possibile ipotizzare una vita utile della struttura superiore alle opere ordinarie (50 anni) definite nelle NTC08 e programmare la manutenzione nel tempo dopo un periodo di circa 75 anni.

Per realizzare un modello previsionale di comportamento del SCC, ci si è poi basati, alla luce dei risultati delle prove comparative su esposte e delle indicazioni di Ho & Lewis, su alcuni studi condotti per il calcestruzzo ordinario, ovvero:

- modello di Parrot (1995);
- modello Duracrete (2000).

avendo dovuto scartare altri in quanto i risultati sono apparsi anomali.

La proposta di Parrot cerca di evidenziare il ruolo dei *parametri compositivi del calcestruzzo*, mediante le seguenti relazioni:

$$\log(K_{60\%}) = \frac{30 - R_c}{10} \quad K = m \cdot K_{60\%} \quad x = 64 \frac{K^{0.4} t^n}{c^{0.5}}$$

Dove:

- x è lo spessore carbonatato
- K è la permeabilità all'aria del calcestruzzo
- $K_{60\%}$ è la permeabilità all'aria del calcestruzzo ad UR=60%
- c è il contenuto di ossido di calcio nei prodotti di idratazione del cemento
- n ed m sono delle funzioni dell'umidità relativa
- t è la vita utile
- R_c è la resistenza a compressione

E' dunque possibile desumere t, ovvero la vita utile, in questa sede (volendo ipotizzare un modello di manutenzione preventiva) considerata coincidente col tempo di innesco, in funzione dell'elemento e delle sue caratteristiche geometriche.

E' stato applicato questo approccio (come quello Duracrete, di cui più oltre), per i due tipi di calcestruzzo e per due elementi (pilastro e sbalzo), ricavando i dati esposti nella sottostante tabella, riferita ad uno sbalzo realizzato in SCC:

PROPOSTA PARROT - SBALZO SCC		
R _{c,medio}	43	Mpa
k _{60%}	0.05	m ²
m	0.797	kg/m ³
k	0.040	m ²
t	75	anni
n	0.48	kg/m ³
c	460	kg/m ³
x	6.54	mm

Dai risultati in tabella si può notare che solamente 6,54 mm. su 20 (quindi solo il 33%) del copriferro vengono carbonatati in un periodo di 75 anni. Si è ritenuto superfluo applicare il modello al pilastro del caso studio poiché sicuramente verificato.

L'approccio probabilistico del modello *DuraCrete* prevede l'impiego di valori caratteristici per le variabili e di fattori parziali per il progetto della vita di servizio basato sull'impiego del metodo dei fattori di sollecitazione e resistenza:

$$t_i = \left(\frac{(x^c - \Delta x) \cdot R_{0,ca}^c}{2 \cdot c_{s,ca}^c \cdot k_{e,ca}^c \cdot k_{c,ca}^c \cdot t_0^{2n_{ca}^c} \cdot \gamma_{R_{ca}}} \right)^{\frac{1}{1-2n_{ca}^c}}$$

dove:

t_i è il tempo di innesco

x^c è lo spessore nominale di copriferro

Δx è la variazione attesa dello spessore di copriferro

R_{0,ca}^c è la resistenza alla penetrazione della carbonatazione

c_{s,ca}^d è il valore di progetto della concentrazione di CO₂ nell'ambiente

k_{c,ca}^c è il fattore di stagionatura

k_{e,ca}^c il fattore ambientale

t₀ è l'età del calcestruzzo

n_{ca}^c è il fattore d'età;

γ_{Rca} è il fattore parziale della resistenza alla penetrazione della carbonatazione.

Si riporta, di seguito, anche in questo caso la tabella riepilogativa dell'applicazione dell'approccio Duracrete ad uno sbalzo in SCC:

APPROCCIO DURACRETE – SBALZO SCC			
Concentrazione anidride carbonica	c _{s,ca}	0.0005	kg/m ³
Rapporto acqua/cemento	a/c	0.45	-
Spessore nominale copriferro	x _c	20	mm
Resistenza penetraz. carbonatazione dopo 7 gg	R _{0,ca}	0.0004228	annix(kg/m ³)/mm ²
Fattore di attenuazione	Δx	8	mm
Valore di progetto copriferro	x _d	12	mm
Fattore di stagionatura 28 gg	k _{c,ca}	0.76	-
Fattore ambientale	k _{e,ca}	0.86	-
Fattore d'età	n _{ca}	0.098	-

Fattore parziale di sicurezza	γ_r	1.3	-
Età del calcestruzzo	T_0	28	giorni
Tempo di innesco	t_i	36.7	anni

Il risultato è chiaramente condizionato dal fatto che nel caso studio le dimensioni esigue delle solette dell'edificio preso in esame costringono a spessori di copriferro molto esigui (12 mm.): per estrapolazione, tuttavia, si può desumere che il valore di 75 anni desunto dall'altro modello può essere considerato attendibile, sia per comparazione con i tempo di innesco ormai noti per il calcestruzzo ordinario, sia in considerazione del fatto che sulla scorta delle indicazioni del quadro normativo vigente sul calcestruzzo strutturale, il calcolo dello spessore del copriferro in genere porta a valori non inferiore a 30 mm.

CONCLUSIONI

Esperienza sul campo, sperimentazione in laboratorio e modello di previsione teorico, appaiono in sostanziale sintonia sulla previsione del comportamento nel tempo che possono avere elementi in calcestruzzo sottoposti ad interventi di questo tiro.

Ma pare di poter affermare che, rispetto alle indicazioni che le NTC08 danno sulla vita nominale del calcestruzzo ordinario alla tabella 2.4.1, come sotto riportata

Tabella 2.4.1 – Vita nominale V_N per diversi tipi di opere

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

il calcestruzzo autocompattante meriterebbe una diversa trattazione, potendosi azzardare, sulla scorta di diversi studi e di quanto sopra argomentato, una valutazione incrementativa del 50%.

Restano tuttavia fondamentali, evidentemente, per la vita utile di queste strutture, diversi altri parametri che ben si conoscono, che intervengono sia nella fase di progettazione che nella fase di esecuzione.

Pare opportuno non trascurare, ancora, la fase di gestione, non potendosi dimenticare che nella definizione di vita nominale contenuta nelle NTC08 è presente la locuzione “*purchè soggetta alla manutenzione ordinaria*”, un concetto troppo spesso dimenticato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Alonso A., Andrade C., Life Time of Rebars in Carbonate Concrete, "Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion, Ed. Institute of Metal, p. 634, 1993.

Assiè S., Durabilità des bétons autoplaçants, in *INSA de Toulouse*, France, 2004.

Audenaert K., Transport mechanisms in self-compacting concrete in relation with carbonation and chloride penetration, in *PhD thesis*, Ghent University, 2006.

Audenaert K., Boel V., Schutter G., Chloride penetration in self compacting concrete by cyclic immersion, in *Proc. SCC'2005, (RILEM PRO 42)*, China, 2005.

Bakker R.F.M., Prediction of service life of reinforcement in concrete under different climatic conditions at given cover, in *UK Corrosion & Eurocorr 94*, London, 1994.

- Bamforth P.B., Prediction of the Onset of Reinforcement Corrosion Due to Chloride Ingress, in *Proc. of "Concrete Across Borders"*, Odense, Denmark, 1994.
- Bertolini L., *Materiali da costruzione - Volume II: Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro*, Novara: Città Studi Edizioni, 2006.
- Boubitsas D., Paulou K., Self compacting concrete for marine environment, in *Report TVBM-5048*, Lund Institute of Technology, Sweden, 2000.
- Brunner M., Durability of SCC with high water content, in *Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago, 2005.
- Cioffi R., Colangelo F., Colangelo M., Durability of self-compacting concrete, in *Proceedings of the Eight Convegno Nazionale AIMAT*, Palermo, 2006.
- Colleparidi M., *Il Nuovo calcestruzzo*. 4° edizione, Hoepli, 2006.
- Colleparidi M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*. 3° edizione, Hoepli 1991.
- Coppola L., *Concretum*, McGraw Hill, 2007.
- Coppola L., Ceruli T., Salvioni D., Costruire sostenibile e calcestruzzi autocompattanti, *L'Edilizia* n. 133.
- Coppola L.; La reologia ed il proporzionamento dei calcestruzzi autocompattanti, *Industria Italiana del Cemento*, N° 76, 2001.
- Corinaldesi V., Moriconi G., Durable fiber reinforced self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (2), pp. 249-254, 2004.
- D.M. 14 gennaio 2008, *Norme Tecniche per le costruzioni*, 2008.
- DuraCrete, *The European Union - Brite EuRam III*, Documento BE95-1347/R17, 2000.
- DuraCrete, Probabilistic performance based on durability design of concrete structures. EU-Brite EuRam Project BE95-1347.
- Eurocodice 2 parte 1 e 2 (UNI EN 1992-1-1 e UNI EN 1992-1-2).
- Hamada M., Carbonation of Concrete, in *"Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement" Vol.3*, Tokyo, 1969.
- Herman G., Vandewalle L., Boel V., Audenaert K., Schutter G., D'Hemricourt J., Desmet B., Vantomme J., Chloride penetration and carbonation in self-compacting concrete, in *International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning*, Dead Sea, Israel, 2006.
- Ho D.W.S., Lewis R.K., «Cement and Concrete Research,17,» p. 489, 1987.
- Ho D.W.S., Lewis R.K., Carbonation of Concrete and Its Prediction, *Cement and Concrete Research Vol.17*, p. 489, 1987.
- JSCE, Proposed Recommendation on Durability Design for Concrete Structures, *Concrete Library of JSCE*, 1990.
- Makishima O., Tanaka H., Itoh Y., Komada K., Satoh F., Evaluation of mechanical properties and durability of super quality concrete, in *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Japan, 2001.
- Nehdi M., Pardhan M., Koshowsky S., Durability of self-compacting concrete incorporating high-volume replacement composite cements, in *Cem. Concr. Res.*, 34, 2004.
- Nicolella M., Valutazione sperimentale della durabilità di sistemi di rinforzo con calcestruzzo autocompattante, *Atti del convegno "Concrete 2016"*, Termoli, 2016.
- Ozyildirim C., Lane S., Evaluation of self-compacting concrete, in *Final Report for the Virginia Transportation Research Council*, 2003.
- Papadakis V., Vayenas C., Fardis M., A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 35 (10), pp. 1639-1650, 1989.

- Papadakis V., Vayenas C., Fardis M., Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Brighton, 1990.
- Parrott L.J., Design for Avoiding Damage Due to Carbonation-Induced Corrosione, in *3rd Int. Conf. "Durability of Concrete"*, Nice, 1995.
- Pedefferri P., Bertolini L., La durabilità del calcestruzzo armato, Milano: McGraw-Hill Libri Italia srl, 2000.
- Pedefferri P., Corrosione e protezione dei materiali metallici, Polipress, 2010.
- Persson B., Assessment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete, in *Report TVBM-3100*, Lund Institute of Technology, 2001.
- Powers T., Brownyard T., Studies of the physical properties of hardened cement paste (nine parts), *Journal of th American Concrete Institute*, pp. 43-44, 1946-1947.
- Raghavan K.P., Sama B., Chattopadhyay D., Creep, shrinkage and chloride permeability properties of self-consolidating concrete, in *Proc. 1st North American Conference on the Design and Use of Self-Compacting concrete*", Illinois, USA, 2002.
- RILEM TC 205-DSC Report 38, «"Durability of Self-Compacting Concrete",» *State of the Art Report*, 2007.
- Rougeau P., Maillard J., Mary-Dippe C., Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction, in *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Petersson, Sweden, 1999.
- Sideris K.K., Kiritsas S., Haniotakis E., Evaluation of mechanical properties and durability of super quality concrete, in *Proceedings of the 14th Greek Concrete Conference, Vol III*, Greek, 2003.
- Sideris K.K., Durability of Self-Compacting concretes different strenght categories, in *Internal Report, Laboratory of Building Materials*, Democritus University of Thrace, Greek, 2006.
- Silva P., Brito J., Experimental study on carbonation and chloride migration coefficients of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixtures of fly ash (FA) and limestone filler (LF), in *XIII Internationa Conference on Durability of Building Materials*, Sao Paolo, Brazil, 2014.
- Tang L., Andalen A., Johansson J.O., Hjelm S., Chloride diffusivity of self-compacting concrete, in *Proc. 1st Inter. RILEM Symposium on Self-COMPacting Concrete*, 1999.
- Tragardh J., Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, in *Proceedings of the Firts International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Petersson, Swedem, 1999.
- UNI-EN 206-1, Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità.
- Ushida S., Hamada M., «"Durability tests of steel and concrete",» *Journal of Architecture and Building Science" (516)*, pp. 1-18, 1928.
- Zhu W., Bartos P.J.M., Permeation properties of self-compacting concrete, in *Cem. Concr. Res.*, 33 (6), 2003.