



Home

Modellazioni per il calcolo della vita utile di strutture in calcestruzzo armato

Maurizio Nicoletta - Professore nell'Università degli Studi di Napoli Federico II 07/03/2018 370

La vita utile degli elementi in calcestruzzo armato può essere calcolata, con buona approssimazione, mediante alcune metodologie, che consentono di prevedere sia il momento nel quale il fronte di carbonatazione avrà superato il copriferro e raggiunto le armature, sia la velocità con la quale la corrosione interesserà le armature, diminuendone la sezione.

Una valutazione comparativa fra tre diversi tipi di edifici, realizzati con differenti calcestruzzi, evidenzia efficacemente quali possono essere gli scenari in termini di interventi manutentivi, e pone le basi per individuare le strategie più appropriate per il controllo dell'obsolescenza di queste strutture.

La situazione degli edifici in calcestruzzo armato del dopoguerra

L'avvento del calcestruzzo armato per le ricostruzioni e gli ampliamenti del dopoguerra, senza adeguati controlli

Il Magazine



Sfoggia la rivista online



Modellazioni per il calcolo della vita utile di strutture in calcestruzzo armato

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

ABSTRACT

La vita utile degli elementi in calcestruzzo armato può essere calcolata, con buona approssimazione, mediante alcune metodologie, che consentono di prevedere sia il momento nel quale il fronte di carbonatazione avrà superato il copriferro e raggiunto le armature, sia la velocità con la quale la corrosione interesserà le armature, diminuendone la sezione.

Una valutazione comparativa fra tre diversi tipi di edifici, realizzati con differenti calcestruzzi, evidenzia efficacemente quali possono essere gli scenari in termini di interventi manutentivi, e pone le basi per individuare le strategie più appropriate per il controllo dell'obsolescenza di queste strutture.

INTRODUZIONE

L'avvento del calcestruzzo armato per le ricostruzioni e gli ampliamenti del dopoguerra, senza adeguati controlli e con regole e prassi che si sono dimostrate largamente insufficienti, ha prodotto conseguenze ormai sono note a tutti ma che in realtà costituiscono solo la punta di un iceberg.

Sempre più spesso, infatti, accade di rinvenire componenti – ma anche interi edifici – realizzati con materiali estremamente carenti, sia dal punto di vista del mix design che da quello della progettazione strutturale. E se ci si interroga sulle motivazioni che consentono a questi fabbricati di essere ancora in piedi e sovente anche senza particolari sintomi di deficit prestazionale, non si può trascurare di considerare che il contesto sollecitante è significativamente mutato negli ultimi 70 anni, e che ora – ad esempio - il calcestruzzo è soggetto con ben diversa intensità al fenomeno che è ormai dimostrato essere il suo peggior nemico: la carbonatazione.

Tale situazione, in uno con i fenomeni sismici degli ultimi anni, contribuisce a formare un quadro d'insieme abbastanza preoccupante in ordine alla capacità/possibilità del patrimonio edilizio esistente di superare indenne eventuali (ma purtroppo certi), nuovi sismi.

L'articolo espone una valutazione comparativa, condotta su tre tipologie di edifici, di epoche e/o materiali diversi, del comportamento nel tempo (e dunque degli interventi necessari per la manutenzione) di edifici in conglomerato cementizio armato, avendo preliminarmente calcolato, sulla base delle indicazioni della letteratura scientifica sull'argomento, quale sia la legge di decadimento prestazionale, legata sia alla carbonatazione del calcestruzzo che alla conseguente diminuzione di sezione delle armature.

La finalità è non solo quella di avere a disposizione strumenti e metodologie per la previsione della vita utile delle strutture in conglomerato cementizio armato, ma anche di costruire un presupposto per valutare, fra i diversi approcci possibili, quello più appropriato dal punto di vista della gestione tecnico-economica.

STATO DELL'ARTE

Quello della vita utile delle strutture in c.a. è un argomento molto studiato, sia da ricercatori che appartengono al mondo della chimica o dell'ingegneria chimica, che da studiosi delle tecnologie o – ancora – da strutturisti.

Nel prosieguo si farà particolare riferimento ad alcune ricerche che sono pervenute a risultati di particolare interesse all'ambito specifico della durabilità dei conglomerati cementizi armati, e che vengono doverosamente citati sia nella bibliografia alla fine del presente articolo, sia – per alcuni – nel corso dello stesso. Si deve, in particolare, sottolineare che esistono numerosi studi che indagano sul mix design nelle sue più diverse declinazioni (tipo di cemento, rapporto A/C, additivi, inerti, aggregati, ecc.), e ricerche che sono maggiormente mirate ad aspetti durabilistici, sia sulla base dei sperimentazioni sul campo che di simulazioni di laboratorio. Per noi parlare, poi, di quanti si sono indirizzati sulle tematiche più attuali, come quella della sostenibilità, mediante l'utilizzo nell'impasto di sostanze provenienti da rifiuti, non solo da C&D.

Si è tenuto conto, nella trattazione di seguito esposta, dell'insieme delle ricerche nel campo come riferimento generale, e pertanto nella bibliografica si riporteranno, in generale, i testi più direttamente pertinenti al merito dell'articolo.

MATERIALI E METODI

Lo scenario di strategie manutentive da mettere a confronto è alquanto vasto, così come si potrebbero considerare diverse caratteristiche costruttive che nelle diverse epoche, dal dopoguerra ad oggi, si sono succedute, per non parlare nei numerosi mix design possibili.

E' parso opportuno mettere a confronto tre tipi di edificio:

- edifici esistenti, costruiti nel dopoguerra, e dunque con calcestruzzi ordinari dell'epoca, che avevano – mediamente – un certo tipo di composizione e di caratteristiche, mentre per quanto riguarda l'armatura, si sono considerati l'acciaio dell'epoca e i diametri rinvenuti in alcuni edifici;
- edifici di nuova costruzione, progettati nell'anno in corso, con due diversi materiali: un calcestruzzo ordinario C25/30 e un calcestruzzo autocompattante.

Ciò allo scopo di comparare il comportamento nel tempo di strutture concepite con criteri differenti, materiali differenti, e dunque con dinamiche di degrado diverse, tali da poter condurre a scelte in termini di strategia manutentiva anche molto differenti.

Le situazioni alle quali sono state applicate le modellazioni secondo i criteri di seguito esposti sono riepilogate nella tabella fig. 1

| EDIFICIO | TIPOLOGIA CLS E COPRIFERRO | TIPOLOGIA ARMATURE | COEFFICIENTE CARBONATAZ. | SEZIONE TRAVE | ARMATURA TRAVE | SEZIONE PILASTRO | ARMATURA PILASTRO |
|----------|----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|
| A | ordinario C20/25 | FeB38k | K = 9 | 40 x 50 | 4+4Ø12 | 50 x 40 | 4Ø25 |
| 1946 | 2 cm. | | mm/anno ^{1/2} | | staffe Ø6/20" | | staffe Ø6/20" |
| B | ordinario C25/30 | B450C | 6 < K < 9 | 30 x 50 | 4+4Ø18 | 40 x 70 | 8Ø18 |
| 2018 | 4 cm. | | mm/anno ^{1/2} | | staffe Ø8/10" | | staffe Ø8/10" |
| C | autocompattante C32/40 | B450C | 2 < K < 6 | 30 x 50 | 4+4Ø18 | 40 x 70 | 8Ø18 |
| 2018 | 4 cm. | | mm/anno ^{1/2} | | staffe Ø8/10" | | staffe Ø8/10" |

Figura 1 – Tabella riepilogativa delle caratteristiche delle tre tipologie di edifici prescelte

Dal punto di vista degli interventi, si sono ipotizzati quelli maggiormente diffusi negli ultimi anni, secondo criteri meramente conservativi, ovvero di ripristino delle caratteristiche perdute o – ancora - di rinforzo.

Si sono, pertanto, considerate le seguenti tipologie:

sulle nuove costruzioni:

- per le strutture realizzate con calcestruzzo autocompattante: periodico risanamento corticale (scenario definito “A”), ovvero intervento di ripristino/incremento della resistenza meccanica a mezzo di materiali compositi, allorquando il degrado lo renderà necessario (scenario “B”);
- per le strutture realizzate con calcestruzzo ordinario: periodico risanamento corticale (scenario “A”), ovvero intervento di ripristino/incremento della resistenza meccanica a mezzo di risanamento profondo della struttura ed integrazione delle armature, allorquando il degrado lo renderà necessario (scenario “B”), o – ancora - intervento di ripristino/incremento della resistenza meccanica a mezzo di materiali compositi, allorquando il degrado lo renderà necessario, a mezzo di materiali compositi (scenario “C-1”) o di blindatura con carpenteria pesante in acciaio e calcestruzzo autocompattante (scenario “C-2”);

sulle strutture esistenti:

si possono considerare gli stessi criteri su esposti, ovvero scenario “A”, scenario “B” e scenario “C” (del tipo “C-1” o C-2”, come schematizzato nelle figure 2 e 3

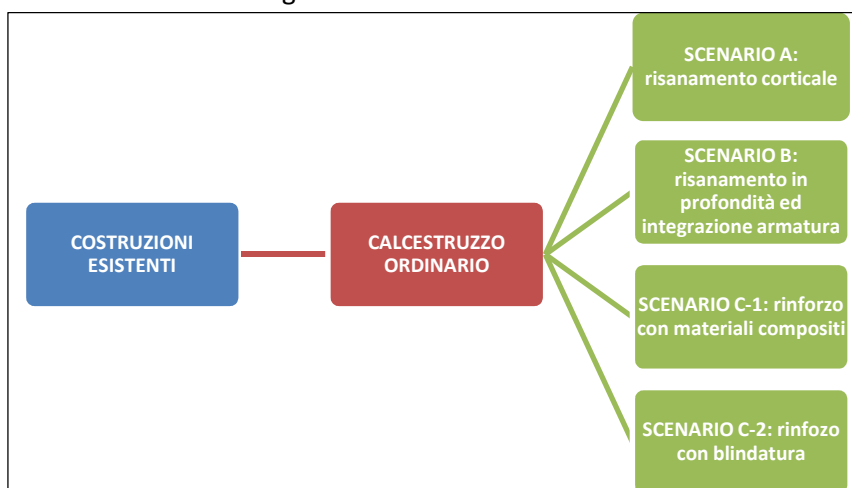


Figura 2 – Schematizzazione degli scenari (corrispondenti a diverse strategie manutentive) per gli edifici esistenti

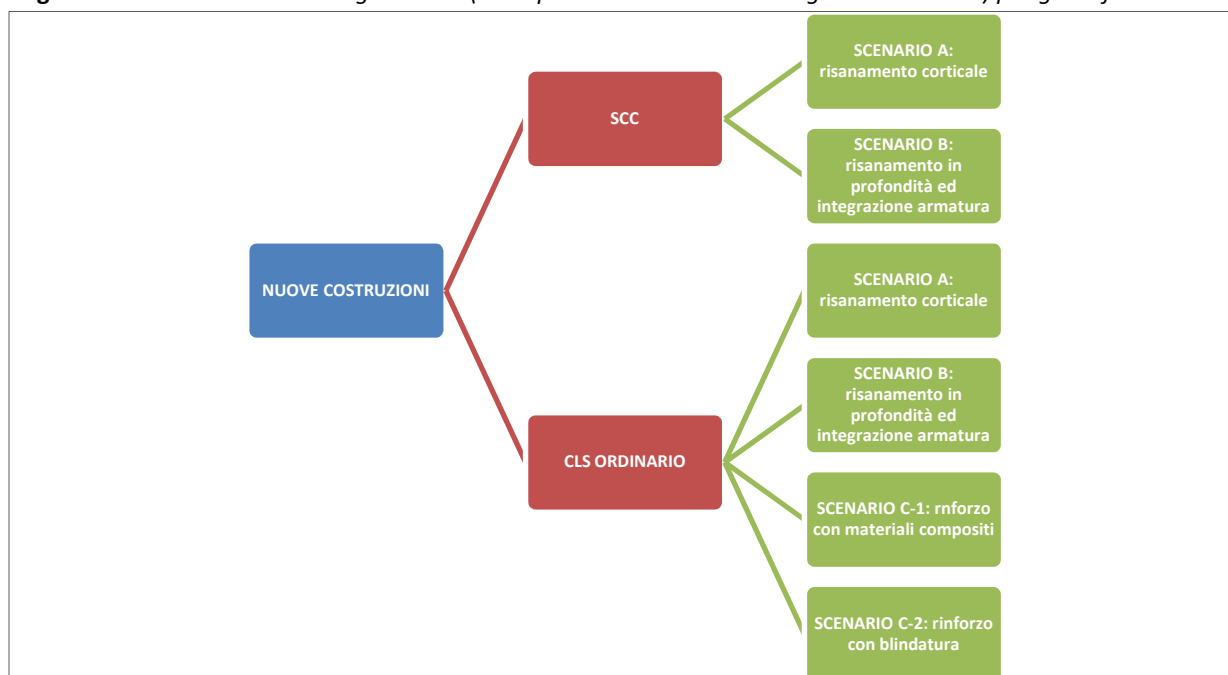


Figura 3 – Schematizzazione degli scenari per gli edifici di nuova costruzione

Per il confronto fra le diverse strategie, si è scelto di valutare, ipotizzando un ambiente cittadino in prossimità del mare, e con riferimento ad elementi esposti verso la strada, le conseguenze del trascorrere del tempo e gli effetti delle diverse scelte gestionali, utilizzando le metodologie 1, 2 e 3 di seguito riportate.

1. Relazione spessore carbonatato / tempo:

$$S = K * \sqrt[n]{t}$$

dove S è lo spessore carbonatato, K la costante di diffusione della CO₂ e t il tempo.

Da tale espressione, mediante la formula inversa, è possibile calcolare il tempo di innesco, ma anche valutare, a diversi step temporali (in questo caso 10 – 20 – 30 – 50 anni), l'avanzamento del fronte di carbonatazione.

2. Abaco di Pedefferri:

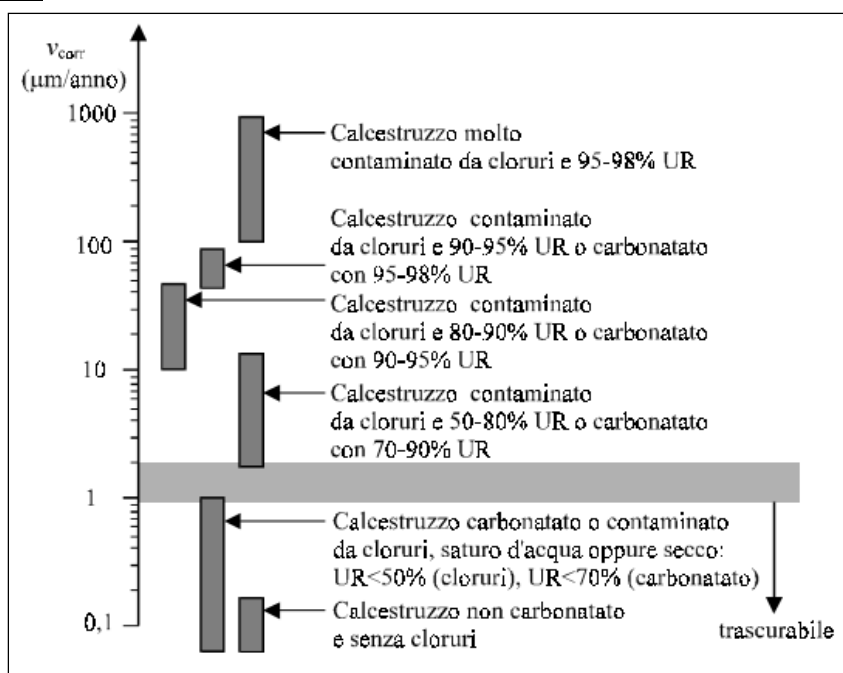


Figura 4 – Abaco messo a punto da Pietro Pedefferri per il calcolo speditivo della velocità di corrosione

Da tale abaco è possibile, con molta facilità, determinare la velocità con la quale progredisce la corrosione delle armature, tenendo conto di umidità relativa, presenza di cloruri e carbonatazione, senza far ricorso ad espressioni più sofisticate ma di minore immediatezza.

3. Modellazione di Biondini:

essa approfondisce specificamente il problema del fenomeno della corrosione che si innesca e si propaga al variare del tempo.

Il diametro di una barra corrosa $\varphi = \varphi(t)$, può essere espressa in funzione della penetrazione della corrosione:

$$P_x = P_x(t) = p_x \cdot \Delta t$$

dove : $\Delta t = t_i - t$, con $t > t_i$

quindi :

$$\varphi(t) = \varphi_0 - P_x(t) = (1 - \delta(t)) \cdot \varphi_0$$

dove:

φ_0 è il diametro della barra non danneggiato

$\delta = \delta(t) \in [0;1]$ è un indice di penetrazione della corrosione:

$$\delta(t) = \frac{P_x(t)}{\phi_0}$$

La variazione nel tempo della sezione trasversale indicata come $A_s(t)$ della barra d'acciaio corrosa può anche essere espressa per mezzo di un indice di danno della corrosione, come segue:

$$\delta_s = \delta_s(t) \in [0;1]$$

$$A_s(t) = (1 - \delta_s(t)) * A_{s_0}$$

dove :

$A_{s_0} = \pi \phi_0^2 / 4$ è l'area della barra di acciaio non danneggiata

$$e \delta_s(t) = \delta(t) \cdot (2 - \delta(t))$$

RISULTATI

Tempo di innesco della carbonatazione

In base a quanto sopra esposto, è possibile calcolare il tempo di innesco per i tre edifici tipo, ovvero il tempo in cui il fronte di carbonatazione supera il copriferro e raggiunge le armature, fissando, per semplicità di trattazione ed a vantaggio di sicurezza, $n = 2$, e desumendo K dai più accreditati studi sperimentali:

| EDIFICIO | COEFF. DI CARBONATAZ. | TEMPO | SPESSORE CARBONATATO | TEMPO D'INNESCO |
|----------|---------------------------|--------|----------------------|-----------------|
| | [mm/anno ^{1/2}] | [anni] | [cm] | [anni] |
| A | 9 | 10 | 2,85 | 5 |
| | | 20 | 4,02 | |
| | | 30 | 4,93 | |
| | | 50 | 6,36 | |
| B | 7,5 | 10 | 2,37 | 28 |
| | | 20 | 3,35 | |
| | | 30 | 4,11 | |
| | | 50 | 5,30 | |
| C | 4 | 10 | 0,86 | 100 |
| | | 20 | 1,09 | |
| | | 30 | 1,24 | |
| | | 50 | 1,47 | |

Con il metodo suggerito da Biondini, si ottengono, poi, i risultati esposti nella tabella sottostante, e riguardanti l'avanzamento nel tempo della corrosione, vista come diminuzione della sezione di barre e staffe:

| EDIFICIO | ARMAT. | t = 10 anni | | | | t = 20 anni | | | |
|--------------------------|--------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | | px(t) | $\delta(t)$ | $\phi(t)$ | $\delta_s(t)$ | px(t) | $\delta(t)$ | $\phi(t)$ | $\delta_s(t)$ |
| A (t _i = 5) | Ø12 | 0,5 | 0,042 | 11,5 | 0,083 | 1,5 | 0,0126 | 10,5 | 0,235 |
| | Ø25 | 0,5 | 0,020 | 24,5 | 0,040 | 1,5 | 0,060 | 23,5 | 0,117 |
| | Ø6 | 0,5 | 0,084 | 5,5 | 0,162 | 1,5 | 0,251 | 4,5 | 0,439 |
| B (t _i = 28) | Ø18 | | | | | | | | |
| | Ø8 | | | | | | | | |
| C (t _i = 100) | Ø18 | | | | | | | | |
| | Ø8 | | | | | | | | |

| EDIFICIO | ARMAT. | t = 30 anni | | | | t = 50 anni | | | |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|-----------|---------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| | | px(t) | $\delta(t)$ | $\phi(t)$ | $\delta_s(t)$ | px(t) | $\delta(t)$ | $\phi(t)$ | $\delta_s(t)$ |
| A ($t_i = 5$) | $\emptyset 12$ | 2,5 | 0,209 | 9,5 | 0,374 | 4,5 | 0,376 | 7,5 | 0,61 |
| | $\emptyset 25$ | 2,5 | 0,100 | 22,5 | 0,190 | 4,5 | 0,180 | 20,5 | 0,328 |
| | $\emptyset 6$ | 2,5 | 0,418 | 3,5 | 0,661 | 4,5 | 0,751 | 1,5 | 0,938 |
| B ($t_i = 28$) | $\emptyset 18$ | 0,2 | 0,009 | 17,8 | 0,017 | 2,2 | 0,120 | 15,8 | 0,225 |
| | $\emptyset 8$ | 0,2 | 0,019 | 7,8 | 0,038 | 2,2 | 0,269 | 5,8 | 0,466 |
| C ($t_i = 100$) | $\emptyset 18$ | | | | | | | | |
| | $\emptyset 8$ | | | | | | | | |

Come si può notare, la diminuzione della sezione delle barre appare significativa:

- per l'edificio A, ad esempio, la staffa $\emptyset 6$ dopo 50 anni è praticamente scomparsa (e questo corrisponde perfettamente a quanto osservato sul campo per gli edifici del dopoguerra, già da una ventina di anni), mentre la barra $\emptyset 12$ si è quasi dimezzata;
- per l'edificio B, per quanto – ovviamente – la fenomenologia di degrado sia molto meno intensa, comunque si assiste ad un passaggio da un $\emptyset 18$ ad un $\emptyset 15$ circa, e da un $\emptyset 8$ ad un $\emptyset 5$ circa;
- l'edificio C, stante il tempo di innesco incredibilmente lungo, non è ancora interessato, nemmeno dopo 50 anni, da alcun problema di diminuzione di sezione delle armature.

Riduzione di duttilità delle barre di armatura

La corrosione può ridurre significativamente la duttilità delle barre di acciaio, e ciò principalmente a causa dell'elevata variabilità della penetrazione della corrosione. Il risultato di test sperimentali dimostra che la riduzione della duttilità è un fattore della perdita della sezione trasversale: in particolare, secondo gli studi condotti da Biondini e Vergani (*"Deteriorating beam finite element for non linear analysis of concrete structures under corrosion"*, 2015), la deformazione ultima (condizione di rottura) ϵ_{su} di una barra corrosa è correlata all'indice di danno, secondo la seguente espressione:

$$\epsilon_{su} = \begin{cases} \epsilon_{su0} & 0 \leq \delta_s < 0.016 \\ 0.1521 \delta_s^{-0.4583} \epsilon_{su0} & 0.016 < \delta_s \leq 1 \end{cases}$$

dove ϵ_{su0} è la deformazione ultima della barra di acciaio.

Gli effetti di corrosione non si limitano a danneggiare solo le barre di acciaio ma possono determinare lo sviluppo di fessure nel calcestruzzo nelle zone circostanti le barre corrose, e di conseguenza la rottura e l'espulsione del copriferro. Questo deterioramento locale del calcestruzzo può essere modellato attraverso una legge di degrado della superficie resistente efficace della matrice di cemento A_c :

$$A_c = [1 - \delta_c(\delta)] A_{c0}$$

dove:

A_{c0} è l'area di calcestruzzo integro

$\delta_c = \delta_c(\delta)$ è una funzione adimensionale che fornisce una misura del danno del calcestruzzo nell'intervallo $[0,1]$.

Tuttavia, questa forma può essere non immediata per stabilire un rapporto tra la funzione del danno δ_c e la penetrazione di corrosione δ ; in alternativa, per gli effetti di deterioramento del calcestruzzo, si può tener conto di ciò modellando la riduzione della resistenza a compressione del calcestruzzo f_c :

$$f_c = [1 - \delta_c(\delta)] f_{c0}$$

dove f_{c0} è la resistenza del calcestruzzo integro.

La resistenza ridotta f_c del calcestruzzo può essere valutata come segue:

$$f_c = \frac{f_{c0}}{1 + k \frac{\varepsilon_{ortog}}{\varepsilon_{c0}}}$$

in cui:

k è un coefficiente legato al diametro e alla rugosità ($k=0,1$ per diametro medio di barre scanalate);

ε_{c0} è la deformazione, pari al 2‰ (a cui corrisponde una resistenza a compressione f_c massima);

ε_{ortog} è un valore medio della deformazione di trazione del calcestruzzo fessurato, ortogonale alla direzione dello sforzo applicato.

La deformazione trasversale è valutata con la seguente relazione:

$$\varepsilon_{ortog} = \frac{b_f - b_i}{b_i} = \frac{\Delta b}{b_i}$$

dove:

b_i è la larghezza della sezione trasversale di calcestruzzo integro;

b_f è la larghezza della sezione trasversale dopo la corrosione.

A questo punto definendo la duttilità come rapporto tra la deformazione ultima e la deformazione al limite dello snervamento si ha:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{su}}{\varepsilon_{sy}}$$

Con riferimento ai tre edifici prescelti, si ha pertanto:

| EDIFICIO A | | | | |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|
| $f_{yk} = 380 \text{ Mpa}$ | | $\gamma's = 1,15$ | | $f_{yd} = 380 \text{ Mpa}$ |
| $E_s = 210000 \text{ Mpa}$ | | $\varepsilon_{sy} = 0,002$ | | $\varepsilon_{su0} = 0,01$ |
| t [anni] | $\delta s(t) [-]$ | $\phi \text{ 12[mm]}$ | $\varepsilon_{su} [-]$ | $\mu [-]$ |
| 5 | 0,000 | 12,0 | 0,0100 | 5,00 |
| 10 | 0,083 | 11,5 | 0,0047 | 2,35 |
| 20 | 0,235 | 10,5 | 0,0029 | 1,45 |
| 30 | 0,474 | 9,5 | 0,0024 | 1,20 |
| 50 | 0,610 | 7,5 | 0,0015 | 0,75 |
| EDIFICIO B | | | | |
| $f_{yk} = 450 \text{ Mpa}$ | | $\gamma's = 1,15$ | | $f_{yd} = 391,3 \text{ Mpa}$ |
| $E_s = 210000 \text{ Mpa}$ | | $\varepsilon_{sy} = 0,002$ | | $\varepsilon_{su0} = 0,01$ |
| t [anni] | $\delta s(t) [-]$ | $\phi \text{ 12[mm]}$ | $\varepsilon_{su} [-]$ | $\mu [-]$ |
| 20 | 0,000 | 18,0 | 0,0100 | 5,00 |
| 30 | 0,020 | 17,8 | 0,0090 | 4,50 |
| 50 | 0,230 | 15,8 | 0,0027 | 1,35 |

L'analisi sul terzo tipo di edificio non è da effettuare, in quanto si prevede che alla soglia dei 50 anni non inizi ancora la carbonatazione, essendo il tempo di innesco calcolato per il calcestruzzo autocompattante intorno ai 100 anni.

CONCLUSIONI

Gli scenari di degrado come sopra delineati, in base alle modellazioni eseguite, denotano la possibilità di diverse strategie manutentive, e precisamente:

Edificio A: il primo intervento, qualora si volesse operare con una strategia di manutenzione preventiva, sarebbe necessario già dopo 5 anni, in quanto i primi fenomeni di espulsione del copriferro si verificherebbero dopo 10-15 anni, ovvero allorquando il fronte di carbonatazione, penetrando di 3 cm., ha già superato lo spessore del copriferro, e si rende necessario un intervento in profondità con integrazione dell'armatura; dopo 25-30 anni, l'intervento necessario sarebbe quello di blindatura.

Edificio B: dopo 10-15 anni il fronte di carbonatazione è quasi arrivato a superare il copriferro (4 cm.), e dunque è quello il periodo per eseguire un intervento di manutenzione preventiva che anticipi il momento in cui la carbonatazione sarà arrivata alle armature (28 anni), e per evitare di eseguire interventi in profondità con integrazione di armature (30 anni) o con FRP o blindatura (50 anni).

Edificio C: per tale tipo di edificio, le particolari caratteristiche del calcestruzzo autocompattante renderebbe necessario il primo intervento di manutenzione ad una distanza notevolissima, grazie alla sua bassa porosità capillare.

Una valutazione di tipo meramente economico è agevole, riferendosi, ad esempio, ad una piccola porzione di facciata di circa 500 mq, con una struttura in c.a. in essa contenuta, costituita da telai con travi e pilastri di luce ordinaria (circa 4 m.), e tenendo conto della progressione del degrado come sopra determinata e che viene di seguito riepilogata:

| EDIFICIO A | t _i | SPESSORE CARBONATATO [cm] | DIAMETRO BARRA Ø12 [mm] | DIAMETRO BARRA Ø25 [mm] | DIAMETRO STAFFA Ø6 [mm] |
|------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 10 | 5 | 2,85 | 11,5 | 24,5 | 5,5 |
| 20 | | 4,02 | 10,5 | 23,5 | 4,5 |
| 30 | | 4,93 | 9,5 | 22,5 | 3,5 |
| 50 | | 6,36 | 7,5 | 20,5 | 1,5 |
| EDIFICIO B | t _i | SPESSORE CARBONATATO [cm] | DIAMETRO BARRA Ø18 [mm] | DIAMETRO BARRA Ø8 [mm] | |
| 10 | 28 | 2,37 | 18,0 | 8,0 | |
| 20 | | 3,35 | 18,0 | 8,0 | |
| 30 | | 4,11 | 17,8 | 7,8 | |
| 50 | | 5,3 | 15,8 | 5,8 | |
| EDIFICIO C | t _i | SPESSORE CARBONATATO [cm] | DIAMETRO BARRA Ø18 [mm] | DIAMETRO BARRA Ø8 [mm] | |
| 10 | 100 | 0,86 | 18,0 | 8,0 | |
| 20 | | 1,09 | 18,0 | 8,0 | |
| 30 | | 1,24 | 18,0 | 8,0 | |
| 50 | | 1,47 | 18,0 | 8,0 | |

Facendo una stima approssimata delle tipologie di interventi come sopra descritte, si ottengono i seguenti costi approssimati per l'esempio considerato:

- risanamento corticale € 20.000
- risanamento profondo con integrazione armature: € 30.000
- rinforzo con FRP: € 130.000
- rinforzo con blindatura: € 100.000

Ciò vuol dire che:

- per l'edificio A, la necessità, a causa del tempo di innesco calcolato, di intervenire con strategia di manutentiva preventiva 10 volte nell'arco di 50 anni, porterebbe ad un costo complessivo addirittura superiore a quello che si avrebbe con un intervento posticipato quanto più possibile, ma comunque unico nell'arco dei 50 anni, e questo porterebbe verso scelte più caute ma meno sicure (ad esempio un intervento non prima di 10 anni);
- per l'edificio B, intervenendo preventivamente prima dei 28 anni, si dovrebbero considerare due interventi di risanamento corticale nell'arco dei 50, con la conseguenza che in questo caso questo atteggiamento gestionale diventa decisamente conveniente rispetto alla strategia di attendere per poi essere costretti ad interventi molto più costosi.

Anche alla luce di queste considerazioni, si ritiene che la scelta della strategia più opportuna non può prescindere da altre valutazioni che non siano semplicemente legate al comportamento nel tempo ed al costo di intervento. Si ritiene tuttavia che, sulla base di quanto richiesto dal D. Lgs. 50/2016, l'approccio tecnico-economico sia da considerare un buon punto di partenza per valutazioni speditive che possano orientare le committenze verso approcci da considerare comunque più appropriati dei tanti che hanno condotto il patrimonio edilizio esistente verso un grave stato di degrado ed una vulnerabilità preoccupante.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Andrade C., Corrosion Propagation Modelling, 5th International Essen Workshop-TRANSCOND 07, Essen, Germany, June, 11–13 2007.
- Andrade C., Multilevel (four) Methodology for Durability Design, International Workshop RILEM on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, Spain, 2006. 101–108.
- Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis and Repair, 2nd ed. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2013.
- Bertolini L., Materiali da costruzione Vol II – Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro, Ed. Città Studi, 2006.
- Biondini F., Vergani M., Deteriorating beam finite element for non linear analysis of concrete structures under corrosion”, Structure and Infrastructure Engineering, Taylor & Francis, Volume 11, 2015.
- Collepardi M., Il Nuovo calcestruzzo. 4° edizione, Hoepli, 2006.
- Collepardi 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.
- D.M. 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le costruzioni, 2008.
- 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).
- Ghersi A., Il cemento armato, Ed. Dario Flaccovio, 2005.
- Nicolella M., Hypothesis for an application of the Factor Method to reinforced concrete, Atti del Convegno Internazionale “Back to 4.0: Rethinking the digital Construction Industry”, Napoli, 2016.
- Nicolella M., Valutazione sperimentale della durabilità di sistemi di rinforzo con calcestruzzo autocompattante, Atti del convegno “Concrete 2016”, Termoli, 2016.
- Pedferri P., Corrosione e protezione dei materiali metallici, Polipress, 2010.
- Pedferri P., Bertolini L., La durabilità del calcestruzzo armato, McGraw-Hall, 2000.
- UNI-EN 206-1, Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità.