

MODELLAZIONE DELLA VITA UTILE DI SERVIZIO DELLE STRUTTURE IN C.A. IN ACCORDO ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

Mario Collepari*

***Enco, Engineering Concrete**

Via delle Industrie 18/20 – 31050 Ponzano Veneto (TV), Italy

e-mail: collepari@encosrl.it

Sommario: *Le Norme Tecniche per le Costruzioni emanate con DM del 14 Settembre 2005 presentano alcune interessanti novità rispetto alla tradizionale situazione italiana nel settore delle costruzioni in calcestruzzo armato. Si segnala fra queste novità, l'obbligo al progettista di emettere prescrizioni precise sul calcestruzzo da impiegare, sulle modalità di getto e di stagionatura.*

Ma la novità più interessante è rappresentata dall'obbligo di definire la classe (1 oppure 2) delle strutture in funzione della vita di servizio attesa (50 oppure 100 anni).

1. INTRODUZIONE

E' trascorso un anno dal DM del 14 settembre 2005 sulle nuove **Norme Tecniche per le Costruzioni** (NTC). Vi sono tante novità interessanti e positive in questo DM, come anche qualche perplessità soprattutto sugli aspetti sismici.

L'aspetto più interessante del DM riguarda l'impostazione con la quale sono introdotte non poche novità talvolta rivoluzionarie rispetto alla consuetudine di non far nulla. Si può citare, a titolo di esempio il problema della durabilità delle strutture che, secondo il DM ricade sotto la **responsabilità del progettista** (e di chi altro se no?). Il progettista si deve esprimere di concerto con la committenza se la struttura deve durare almeno 50 (**Classe 1**) o 100 anni (**Classe 2**). Vengono anche suggeriti alcuni criteri sulla importanza dell'opera per orientare il progettista circa la scelta tra Classe 1 e Classe 2 in base all'importanza sociale dell'opera o alle difficoltà di restauro in caso di degrado.

Accanto a questa novità di non poco conto, le nuove NTC impongono al progettista la responsabilità di chi *deve anche* stabilire e prescrivere nel progetto le **modalità di getto, di compattazione e di maturazione** del calcestruzzo prescelto. E qui già sorgono le prime critiche: nulla si dice nelle NTC circa questi dettagli operativi sul getto, compattazione e maturazione, rimandando il progettista all'utile riferimento costituito dalla UNI EN 13670-1. Ma le NTC non sono un manuale di tecnologia del calcestruzzo dove si possono trovare questi dettagli [1-3]. Pertanto il progettista potrà consultare questi manuali o avvalersi del supporto di un tecnologo per affrontare questi dettagli importantissimi ai fini della durabilità. A solo titolo di esempio le Fig. 1, 2 e 3 indicano tipici difetti nel getto, nella compattazione e nella maturazione che mettono a repentaglio la durabilità delle strutture in c.a.



Figura 1: Calcestruzzo segregato.



Figura 2: Calcestruzzo mal compattato.



Figura 3: Calcestruzzo fessurato per mancata stagionatura.

Si è creata in sostanza una sorta di rigetto da parte di molti progettisti che non intendono “sporcarsi le mani” con il calcestruzzo. Il progettista ritiene in sostanza che si tratta di competenze da attribuire ad altri. Ci si potrebbe chiedere chi meglio del progettista sa quale calcestruzzo scegliere in funzione della struttura da realizzare: platea di fondazione ultra-armata, pile di un ponte, pavimentazione non armata, ecc. Chi meglio del progettista conosce le difficoltà esecutive dell’opera? Chi meglio del progettista conosce le conseguenze di fessure da ritiro su una struttura armata, che debbono essere prevenute mediante un’accurata stagionatura umida? In mancanza di queste indicazioni precise sul getto, sulla compattazione e sulla maturazione, sono più frequenti le contestazioni all’impresa per i difetti che talvolta si manifestano già in corso di opera. Non è meglio prevenire questi difetti e le conseguenti contestazioni che abbassano la qualità dell’opera e ne innalzano i costi di esercizio?

Esistono tuttavia dei casi nei quali il progettista non trova un’ immediata soluzione ai problemi da affrontare se non attraverso una modellazione matematica non prontamente disponibile se non in trattati specializzati. E’ questo il caso della **durabilità secolare** che garantisca una vita utile di oltre cento anni senza interventi di restauro

2. PROGETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO PER 100 ANNI DI VITA DI SERVIZIO

Tornando alle strutture di Classe 1 (50 anni) o Classe 2 (100 anni) previste nelle NTC, possiamo distinguere, per comodità di esposizione, le due categorie strutture in c.a.:

- la Classe 1 di strutture non verrà qui esaminata perché sulla durabilità delle opere per 50 anni esistono chiari punti di riferimento alle vigenti norme europee (EN 206-1) ed all’Eurocodice 2, sono disponibili manuali sul calcestruzzo e finanche un

software (Easy & Quick) che non solo calcola le prestazioni meccaniche e lo spessore del copriferro in funzione dell'ambiente, ma fornisce anche le prescrizioni sulla compattazione e sulla maturazione del calcestruzzo;

- la Classe 2 di strutture è in realtà carente di riferimenti normativi e può essere affrontata solo sfruttando modelli matematici, consolidati per tempi limitati, ma estrapolabili con sicurezza anche fino a 100 anni ed oltre, purché si assumano conservativamente le condizioni più sfavorevoli alla integrità dell'opera.

3. PRESCRIZIONI DI UNA DURABILITA' SECOLARE

Gli ambienti che possono promuovere le cause più severe di degrado e compromettere la integrità di una struttura in calcestruzzo armato sono distinguibili in:

- ambienti aggressivi per le armature metalliche;
- ambienti aggressivi per la matrice cementizia e gli inerti.

4. COME RALLENTARE O IMPEDIRE LA CORROSIONE DELLE ARMATURE

Gli ambienti nei quali si manifesta la corrosione dei ferri di armatura sono:

- A)** opere fuori terra esposte all'aria per la presenza di anidride carbonica (CO₂), ossigeno (O₂) ed umidità (H₂O);
- B)** opere esposte in ambienti marittimi per la presenza dei cloruro (Cl⁻) nell'acqua di mare;
- C)** opere esposte in ambienti di media ed alta montagna dove strade e soprattutto autostrade sono esposte a salatura (cloruro nei periodi invernali per sciogliere il ghiaccio);
- D)** opere in ambienti industriali esposti a lavorazione con sali a base di cloruri.

Si tratta di ambienti (aria-mare-monti) che in Italia non difettano certamente. Ci sono sostanzialmente due strategie per ritardare la corrosione dei ferri di armatura annegati nel calcestruzzo [4]:

- miglioramento del comportamento corrosivo delle barre in acciaio;
- miglioramento del copriferro per proteggere le barre in acciaio.

5. LA STRATEGIA DEI CORROSIONISTI

In favore della prima strategia sono schierati soprattutto i cosiddetti “corrosionisti”, cioè esperti di corrosione. L’obiettivo può essere raggiunto attraverso l’impiego di:

- **inibitori di corrosione a base di nitriti** [5];
- **inibitori a base di sostanze organiche** [6-7];
- **rivestimento delle barre metalliche con vernici epossidiche** [8];
- **modifica della composizione delle armature metalliche: acciaio inossidabile o zincato** [9];
- **prevenzione catodica della corrosione** [10].

6. LA STRATEGIA DEL CALCESTRUZZO DI QUALITÀ

La seconda strategia per proteggere i ferri dalla corrosione si basa sull’ impiego di:

- **calcestruzzo a bassa porosità** che rallenta o impedisce l’ingresso dei composti responsabili della corrosione (CO_2 , Cl^- , ecc.) e
- **adozione di un copriferro spesso** per allungare il cammino e quindi il tempo di percorrenza dei composti aggressivi per arrivare ai ferri di armatura.

Poiché si conosce la legge matematica che regola la penetrazione della CO_2 e del Cl^- attraverso il calcestruzzo nella diverse condizioni ambientali si può adottare un copriferro di spessore e qualità tali che l’arrivo della CO_2 e del Cl^- ai ferri di armatura avvenga solo dopo un determinato tempo: per esempio 100 anni o anche più.

In questo articolo, per ragioni di spazio, ci si limiterà all’esame della corrosione promossa dalla carbonatazione, rinviando ad altri articoli i fenomeni di corrosione che possano intaccare la vulnerabilità secolare delle strutture in c.a., quali il cloruro e per le barre di armatura ed i sali che possano intaccare la matrice di cemento o gli aggregati lapidei.

Tornando al processo della carbonatazione, il fenomeno procede in accordo a questa legge matematica:

$$x = K\sqrt{t} \quad (1)$$

dove x è lo spessore di calcestruzzo penetrato dall’ anidride carbonica in un tempo t e K è un coefficiente che dipende dai seguenti parametri:

- 1) qualità del calcestruzzo ed in particolare il rapporto acqua-cemento (a/c) adottato: più è basso a/c , minore è la porosità della matrice cementizia e minore è il coefficiente di carbonatazione K ;
- 2) stagionatura del calcestruzzo prima della esposizione all’aria: un calcestruzzo ben stagionato con acqua o comunque trattato con membrane anti-evaporanti è meno

penetrabile dalla CO_2 perché la matrice cementizia ben idratata diviene meno porosa;

- 3) umidità relativa (UR) dell'ambiente: la penetrazione della CO_2 avviene con la massima velocità se l'UR è intorno al 60-70% (Fig. 4).

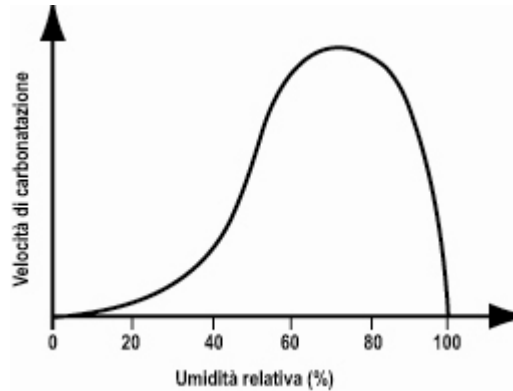


Figura 4: Influenza dell'umidità relativa sulla velocità di carbonatazione (P. Pedferri e L. Bertolini, "La durabilità del calcestruzzo armato", McGraw Hill, Milano, 2000).

Val la pena di ricordare che quando lo spessore di carbonatazione ha superato il copriferro, i ferri di armatura si depassivano, cioè diventano vulnerabili dalla corrosione (acciaio==> ruggine) alimentata dall'ossigeno e dall'umidità.

I parametri sui quali si può agire per limitare la penetrazione della CO_2 e quindi l'innesco della corrosione sono la composizione del calcestruzzo e la sua stagionatura successiva alla scasseratura.

Per quanto attiene alla umidità relativa durante la fase di esposizione a lungo termine - quella capace, cioè, di far avvenire la carbonatazione - conviene adottare il parametro più favorevole alla penetrazione della CO_2 (UR=65%) per calcolare conservativamente il tempo impiegato dalla carbonatazione per attraversare tutto il copriferro.

E' stata eseguita una sperimentazione condotta su vari provini di calcestruzzo confezionati tutti con un comune cemento CEM II A/L 32.5R, e con diverso rapporto acqua-cemento (da 0.30 a 0.50), tutti stagionati a umido per 7 giorni prima di essere esposti all'aria termostata a 20°C con UR del 65%; si è misurato lo spessore x di calcestruzzo penetrato dalla CO_2 , dopo tempi (t) diversi fino a oltre 10 anni di esposizione all'aria.

Sfruttando la linearità della equazione (1), se si riporta lo spessore del calcestruzzo carbonatato x in mm, in funzione della radice quadrata del tempo (anni) è possibile calcolare il coefficiente di carbonatazione attraverso la pendenza della retta x contro \sqrt{t} .

Nella Fig. 5 sono riportati i risultati della carbonatazione, nelle condizioni ad essa più favorevoli: UR =65% a 20 °C) .

a/c	R _{ck} (MPa)	K (mm√anno)	x (mm) carbonatato in 100 anni
0.50	35	7.0	70
0.40	45	5.0	50
0.33	60	3.0	30
0.30	65	1.5	15

Tabella 1 - Coefficiente di carbonatazione K in funzione della qualità del calcestruzzo

Nella Tabella 1 sono riportati i valori caratterizzanti il calcestruzzo (a/c ed R_{ck}) ed valori di K caratterizzanti la resistenza del calcestruzzo alla carbonatazione. In particolare si sono calcolate nella Fig. 5 le pendenze delle varie rette, cioè i valori di K, espressi in mm √anno). Una volta determinato K, si calcola agevolmente attraverso l'equazione [1] quale è lo spessore x di calcestruzzo attraversato in 100 anni di esposizione; dal calcolo appare anche che questo spessore corrisponde a 10 volte (cioè √100) il valore di K.

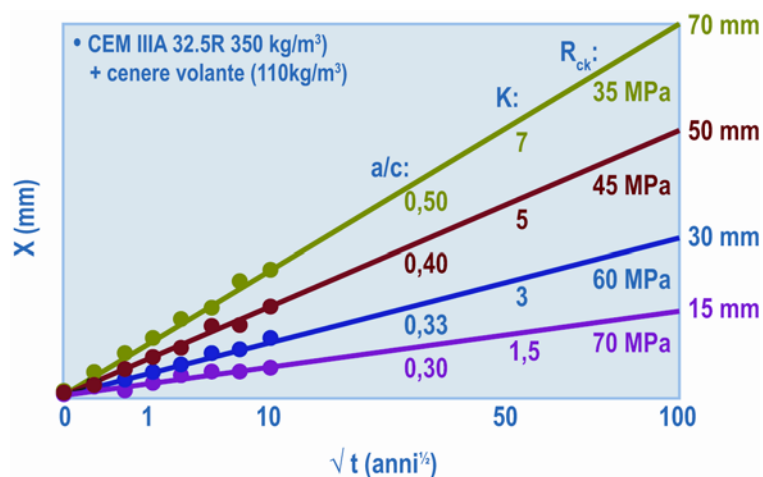


Figura 5: Carbonatazione in funzione del rapporto a/c del calcestruzzo.

Nella Tabella 2 sono riportate le composizioni delle quattro 4 miscele di calcestruzzo adottate:

a/c	0.50	0.40	0.33	0.30
Acqua (kg/m ³)	154	155	154	155
Cemento (kg/m ³)	308	376	467	513
Aggregato (kg/m ³)	1976	1917	1836	1798
SPC* (kg/m ³)	3	3	3	3
Splump** (mm)	180	175	185	180

*Superfluidificante a base di polycarbossilato

** Misurato dopo 30 min. di agitazione a 20°C

Tabella 2 - Composizione del calcestruzzi tutti con inerte alluvionale ($D_{max}=25$ mm)

Dalla Tabella 1 si evince - come anche si vede nella Fig. 5 - che al minor valore di K corrisponde un copriferro di spessore minore per essere attraversato dalla CO₂ in un periodo di 100 anni. Per esempio, con un rapporto a/c di 0.30 il calcestruzzo è così denso ed impermeabile che occorrono 100 anni per attraversare un copriferro di soli 20 mm. D'altra parte, con un rapporto di 0.50, in 100 anni di esposizione all'aria umida la carbonatazione coinvolge uno strato corticale di 70 mm. Dalla Tabella 2 si deduce che l'impiego di un calcestruzzo confezionato con CEM A-L 32.5R, adottando un rapporto acqua-cemento di 0.33 ed uno slump di 180 mm grazie all'impiego di un superfluidificante SPC, consente di ottenere una R_{ck} di 60 MPa, resistenza che rientra ampiamente nell'intervallo delle alte resistenze meccaniche (55-85 MPa) permesse dalle nuove NTC.

Con un calcestruzzo di 60 MPa, che equivale ad un coefficiente di carbonatazione K = 30 mm^{1/2}/anno è sufficiente che il copriferro (cf) rispetti la seguente condizione:

$$cf \geq 30 \text{ mm} \quad (2)$$

Si tratta, in sostanza, dello stesso copriferro minimo (30 mm) che occorre adottare secondo l'Eurocodice 2 per impedire che la carbonatazione arrivi ai ferri di armatura entro 50 anni come previsto dalla EN 206-1.

7. CONCLUSIONI TECNICO ECONOMICHE

La strategia del calcestruzzo impermeabile alla CO₂ e di un copriferro di adeguato spessore, finalizzata alla progettazione di opere in c.a. di durata centenaria, offre diverse soluzioni, quattro delle quali sono state sperimentalmente studiate su un calcestruzzo caratterizzato da:

- consistenza fluida (slump 180 mm) con inerti alluvionali e D_{max} di 25 mm;
- a/c compreso tra 0.50 e 0.30;
- R_{ck} compreso tra 35 e 70 MPa;
- coefficiente di carbonatazione K compreso tra 7 e 1.5 mm^{1/2}/anno.

Tra le possibili scelte qui prospettate, quella che appare tecnicamente più interessante coincide con il calcestruzzo con R_{ck} di 60 MPa e $K = 30$ mm; questo coefficiente di carbonatazione equivale allo spessore di copriferro che si carbonata dopo 100 anni di esposizione all'aria in condizioni igrometriche favorevoli alla carbonatazione ($UR=65\%$) e conservativamente adottate in favore di sicurezza.

Un calcestruzzo con R_{ck} di 40 MPa, previsto dalle UNI 11104 in classe di esposizione XC4 per proteggere dalla corrosione i ferri di armatura per **50 anni** con un copriferro minimo di 30 mm (**Strutture in classe 1** secondo la terminologia delle NTC) ha un costo unitario di circa 65 €/m³ MPa in classe di consistenza fluida.

A parità di tutti gli altri parametri (tipo e dimensione degli aggregati, classe di consistenza, tipo e classe di cemento, spessore di copriferro) il calcestruzzo con R_{ck} di 60 MPa (che è capace secondo la modellazione adottata in questo lavoro di proteggere i ferri di armatura dalla corrosione per almeno 100 anni : Strutture in classe 2) presenta un costo di circa 80 €/m³. L' incremento di costo unitario del calcestruzzo per passare da 50 a 100 anni di vita utile di servizio senza restauro delle strutture è di circa 20-25%. Se si assume per semplicità che il costo del calcestruzzo incida per il 10% sul costo di tutta l'opera, si può concludere che con un incremento del 2-2.5% si può trasformare la classe di struttura 1 in 2.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Neville - *Properties of Concrete* – Pearson Education Limited, 2004.
- [2] V. A. Rossetti - *Il calcestruzzo. Materiali e Tecnologia* – McGraw Hill, 1997.
- [3] M. Collepari - *Il Nuovo Calcestruzzo* – Ed. Tintoretto, 2005.
- [4] M. Collepari - *Ordinary and long term durability of reinforced concrete structures* - Proceedings of the Nagasaki Symposium, Tokushima (Japan), pp.87-106,1992.
- [5] M. Kavamura, S. Tanikawa, R.N. Swamy and H. Koto - *Pore solution composition and electrochemical behavior of steel bars in mortars with nitrite corrosion inhibitors* - Proceedings of the International CANMET-ACI Conference on

- Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, Editor V.M. Malhotra, Rome (Italy), 1997, pp.35- 53.
- [6] D. Rosignoli - *Anticorrosion Repair and Prevention Systems for Reinforced Concrete Structures: Effectiveness and Durability* - Proceedings of the Sixth International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Bucharest, Rumania, Editor V.M. Malhotra, pp 421-430, 2003.
- [7] G. Batis, E. Rakanta, B. Theodoridis, K.K. Sideris, K. Psomas, and X. Barvari - *Influence of N,N'-dimethylaminoethanol corrosion inhibitor on carbonation and chloride-induced corrosion of steel* - Proceedings of the CANMET-ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, Editor V.M. Malhotra, Berlin (Germany), 2003, pp. 469-482.
- [8] P. Schiessel, N. Brauer, and C. Gehlen - *Investigations on the effectiveness of the corrosion protection of epoxy-coated reinforcement* - Final Report No. F48, Institut für Bauforschung Aachen (Germany), 1996.
- [9] D.B McDonald, M.R. Sherman, D.F. Pfeiffer and Y.P. Virmani - *Stainless steel Reinforcing as corrosion protection* - Concrete International, May, 1995, pp.65-70.
- [10] P. Pedferri - *Cathodic protection and cathodic prevention* - Construction and Building Materials, Vol.10, No.5, 1996, pp.391-402.