Grandi tappe nello studio della corrosione delle armature

F. Bolzoni, M. Ormellese, E. Proverbio, MP. Pedeferri

La corrosione delle armature nel calcestruzzo è stata a lungo trascurata nella letteratura scientifica e tecnica e il calcestruzzo armato era considerato "eterno". Fino agli anni '50 l'attenzione ai problemi di durabilità delle strutture in calcestruzzo armato era focalizzata prevalentemente sull'attacco del calcestruzzo. Solamente alla fine degli anni '50 si inizia a studiare la corrosione delle armature, ma il salto di qualità è arrivato tra gli anni '70 e gli anni '80. Un contributo importante è stato dato anche dai gruppi di ricerca italiani, attivi nelle Università degli Studi di Roma, Ancona, Ferrara e al Politecnico di Milano, dove il professor Pedeferri e la sua scuola si interessarono in particolare allo studio della protezione e prevenzione catodica, delle armature in acciaio inossidabile e degli inibitori di corrosione.

PAROLE CHIAVE: CORROSIONE NEL CALCESTRUZZO, CORROSIONE DA CARBONATAZIONE, CORROSIONE DA CLORURI, INFRAGILIMENTO DA IDROGENO, METODI DI PROTEZIONE AGGIUNTIVA, PROTEZIONE E PREVENZIONE CATODICA

INTRODUZIONE

La corrosione delle armature è stata a lungo trascurata nella letteratura scientifica e tecnica. Fino agli anni '50 e in parte '60 del Novecento l'attenzione ai problemi di durabilità delle strutture in calcestruzzo armato era focalizzata prevalentemente sull'attacco del calcestruzzo; il salto di qualità nello studio della corrosione delle armature avviene a partire dagli anni '70, ma soprattutto negli anni '80 e '90 [1-5].

Nell'articolo si trattano alcuni argomenti: la corrosione delle armature dovuta a carbonatazione e ai cloruri, l'infragilimento da idrogeno degli acciai a elevata resistenza, la prevenzione della corrosione e i metodi di protezione aggiuntiva, in particolare le armature in acciaio inossidabile e la protezione catodica, con un cenno alle altre tecniche. Per ragioni di spazio non si trattano i metodi di ispezione e controllo e la valutazione della vita utile, per i quali si rimanda ai testi [6-8] e alla bibliografia in essi citata. Sono richiamati i contributi importanti a livello internazionale, soprattutto in ambito europeo, e si ricorda il ruolo della scuola italiana (Politecnico di Milano, Università di Roma, Napoli, Ancona, Ferrara, Bergamo, Messina). La bibliografia consultata è stata soprattutto quella utilizzata nei libri [6-9], ai quali si rimanda per approfon-

F. Bolzoni
Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, materiali e ingegneria chimica G. Natta (fabio.bolzoni@polimi.it)

M. Ormellese
Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, materiali e ingegneria chimica G. Natta (marco.ormellese@polimi.it)

E. Proverbio
Università degli Studi di Messina, Dipartimento di Ingegneria (eproverbio@unime.it)

MP. Pedeferri
Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, materiali e ingegneria chimica G. Natta (mariapia.pedeferri@polimi.it)

dimenti. Riferimenti utili sono stati i numeri speciali di riviste dedicati a Pietro Pedeferri [10, 11] e l'articolo di Carmen Andrade [12].

L'articolo, che nel titolo ne richiama uno precedente di Pietro Pedeferri sulla rivista "Pianeta inossidabili", è dedicato alla memoria di Pietro Pedeferri (1938-2008) e Luca Bertolini (1966-2017), per il loro contributo alla comprensione del meccanismo di corrosione delle armature, ai metodi di protezione e prevenzione, e alla divulgazione delle conoscenze, sia nell'ambito accademico istituzionale sia nella formazione permanente dei tecnici del settore delle costruzioni. Pietro Pedeferri a partire dagli anni '80, divenne uno dei principali punti di riferimento sull'argomento a livello internazionale. Luca Bertolini, migliore allievo di Pietro Pedeferri, prematuramente scomparso, ancora oggi è tra i 10 ricercatori più presenti nei database internazionali alla voce "corrosion AND concrete".

La corrosione delle armature

Le armature di acciaio al carbonio nel calcestruzzo sono protette dalla corrosione grazie alle condizioni di passività che si instaurano a contatto con la soluzione alcalina (pH in genere compreso tra 13 e 14) contenuta nei pori della pasta cementizia: questo effetto è stato riconosciuto già alla fine degli anni '50 e razionalizzato meglio nei due decenni successivi [1-8]. La corrosione delle armature può essere indotta dalla carbonatazione del calcestruzzo o dalla presenza di cloruri. Nel primo caso, l'anidride carbonica presente nell'atmosfera può reagire con i composti alcalini presenti nella soluzione dei pori del calcestruzzo (NaOH, KOH) e nella matrice cementizia sotto forma di $Ca(OH)_2$ (portlandite). La carbonatazione diminuisce il pH della soluzione dei pori a valori prossimi alla neutralità, per cui l'acciaio nel calcestruzzo carbonatato non è più passivo. La corrosione da cloruri avviene quando questi ioni raggiungono alla superficie dell'armatura una concentrazione superiore a un valore critico. In questo articolo non si approfondisce la corrosione dovuta alle correnti disperse, meno importante rispetto ai terreni.

Nel seguito si farà riferimento, per la vita utile delle strutture in calcestruzzo armato interessate dalla corrosione delle armature, al modello di Tuutti, proposto nel 1982, che considera due fasi: innesco e propagazione della corrosione [13]. Il tempo di innesco è pari al valore necessario perché gli agenti aggressivi arrivino alla profondità delle armature e provochino la loro depassivazione, e dipende principalmente dalle caratteristiche del calcestruzzo, in particolare dalla sua permeabilità (e quindi dalla porosità) e dallo spessore di copriferro. Sono importanti anche le condizioni ambientali, in particolare l'umidità relativa, la temperatura e la concentrazione delle specie aggressive (anidride carbonica o cloruri). Dopo l'innesco, l'acciaio si corrode con una velocità che dipende dalle condizioni di esposizione ambientale, in particolare il contenuto di ossigeno e la resistività del calcestruzzo. Questo periodo, detto tempo di propagazione, termina quando è raggiunto uno stato limite, ad esempio la fessurazione o il distacco del copriferro [8]. Nel caso della corrosione da cloruri, che avviene in forma localizzata la sezione resistente si può ridurre a livelli inaccettabili in tempi brevi. Il tempo di propagazione è molto ridotto e con un approccio conservativo si può considerare che la vita utile coincida con il tempo di innesco [8].

Per quanto riguarda la corrosione da carbonatazione, contributi importanti sono stati forniti soprattutto a partire dagli anni '80, da Bakker, Parrott e Page tra gli altri [8, 14]. La ricerca si è focalizzata sia sulla determinazione di un'equazione per modellare il trasporto dell'anidride carbonica, sia sull'influenza dei principali fattori. Per quanto riguarda la velocità di corrosione dopo l'innesco sono stati molto importanti anche i contributi della scuola di Madrid [8].

Nel caso dei cloruri, degno di nota è sicuramente il contributo pionieristico di Strattfull, che analizzando un ponte in c.a. mediante misure di potenziale e di resistività, individuò il ruolo importante della permeabilità del calcestruzzo, dello spessore di copriferro e delle condizioni ambientali (contenuto di cloruri e umidità relativa) [15]. La comprensione del meccanismo di corrosione è stata raggiunta solo in seguito. Il trasporto dei cloruri può essere modellato con la seconda legge di Fick della diffusione non stazionaria, come proposto per la prima volta da Collepardi e coautori nel 1972 [16]. A partire da allora è stata messa in luce la presenza di altri meccanismi (assor-

bimento capillare, ...) e il ruolo dei diversi tipi di cemento, in particolare pozzolanici o d'altoforno [8]. Il contenuto critico di cloruri è stato studiato a partire dagli anni '60, inizialmente mediante prove in soluzione, per merito di ricercatori come Haussmann e Gouda [8]. Negli anni successivi, soprattutto a partire dagli anni '80, l'argomento è stato studiato mediante prove di laboratorio e analisi su strutture reali e questo ha portato a razionalizzare l'influenza dei diversi fattori [8]. Un valore di concentrazione critica di cloruri spesso riportato è compreso tra 0,4% e 1% rispetto alla massa di cemento.

Corrosione sotto sforzo delle armature a elevata resistenza

L'applicazione della tecnologia del calcestruzzo armato precompresso nelle strutture civili è relativamente recente. Pertanto, i problemi di corrosione e deterioramento del calcestruzzo associati a questo tipo di strutture sono diventati evidenti solo all'inizio degli anni '80. A causa della natura delle strutture in calcestruzzo armato precompresso, i fenomeni di corrosione hanno frequentemente portato al cedimento improvviso e catastrofico delle strutture stesse. Studi sistematici su queste problematiche sono stati sviluppati soprattutto dopo il collasso della copertura del centro congressi di Berlino avvenuto nel maggio del 1980 [17]. Un contributo importante in questo settore è stato dato dall'Università di Stoccarda, dal gruppo di Ulf Nürnberger [18] e dal BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing di Berlino (gruppo di Bernd Isecke). Particolare attenzione è stata indirizzata in questi studi alla correlazione tra suscettibilità all'infragilimento da idrogeno e microstruttura degli acciai. In Italia i primi studi su queste problematiche risalgono alla fine degli anni '80 ad opera di Mario Arpaia (Università degli Studi di Napoli Federico II) sino alla sua prematura scomparsa [19]. Successivamente ulteriori contributi sono stati dati dall'Università di Bergamo e dell'Università di Messina. Quest'ultima a partire dai primi anni 2000 ha approfondito lo studio dell'avanzamento delle cricche di tensocorrosione con la tecnica dell'emissione acustica [20].

Prevenzione della corrosione

Oggi sono disponibili normative nazionali e internazionali, proposte a partire dagli anni '90, che, in funzione dell'ambiente, propongono limiti sulla composizione del calcestruzzo (rapporto acqua/cemento), sullo spessore minimo del copriferro e sull'esecuzione delle strutture (stagionatura) [21, 22]. Il rispetto di queste normative eliminerebbe, per vite di servizio usuali, comprese tra 50 a 75 anni e anche più lunghe nel caso di corrosione da carbonatazione, la grande maggioranza dei casi di corrosione.

Vi sono alcuni casi di grande importanza pratica nei quali il rispetto degli standard, secondo l'opinione di molti studiosi, non può garantire la vita utile della struttura. Questo accade in presenza di ambienti molto aggressivi, in particolare per la presenza di cloruri (ambiente marino o sali antigelo) e/o di vite di servizio molto lunghe. In questi casi, è possibile fare ricorso alle cosiddette "protezioni aggiuntive" che possono modificare le caratteristiche del calcestruzzo, delle armature e dell'ambiente esterno. Nel seguito si farà riferimento all'uso di armature in acciaio inossidabile e alla prevenzione catodica, con un cenno alle altre tecniche (armature in acciaio zincato, inibitori di corrosione, rivestimenti del calcestruzzo).

Protezione e prevenzione catodica. Dagli anni '70 del novecento la protezione catodica è stata utilizzata per bloccare la corrosione delle armature in strutture contenenti cloruri in concentrazione superiore a quella critica, soprattutto nelle solette dei ponti sui quali è sparso sale antigelo nelle stagioni fredde [23]. L'attività sperimentale del gruppo di ricerca coordinato dal prof. Pietro Pedeferri al Politecnico di Milano è iniziata negli anni '80 in collaborazione con Tommaso Pastore, Luciano Lazzari, Alberto Bazzoni e De Nora e ha riguardato inizialmente il comportamento elettrochimico degli anodi. Negli anni '90 Pietro Pedeferri propose l'applicazione della tecnica alle strutture nuove, che chiamò "prevenzione catodica" [24]. Quest'ultima consiste nell'applicazione di una bassa densità di corrente catodica alle armature passive, come illustrato nella sequenza 1-2-3 della Figura 1, dove si vede come l'abbassamento del potenziale di circa 200 mV porta a un aumento notevole della concentrazione di cloruri necessaria per innescare la corrosione (che corrisponde al raggiungimento della zona A). Le condizioni di protezione delle armature sono state definite a partire dalla definizione di passività perfetta e imperfetta basandosi

sul contributo teorico di Pourbaix che aveva definito le condizioni di passività perfetta e imperfetta negli anni '70 [25], utilizzando sia risultati ottenuti presso i laboratori del Politecnico di Milano sia esperienze precedenti di altri ricercatori italiani, Università di Roma [26] e internazionali. La prevenzione catodica è stata recepita nelle normative EN ISO 12696 [27] e la sua efficacia è stata verificata anche con prove di medio-lungo termine e con l'esperienza di campo [28]. La prevenzione catodica consente anche di rendere più semplice l'applicazione alle strutture in c.a.p., evitando gli intervalli di potenziale pericolosi per l'insorgenza dell'infragilimento da idrogeno [29].

Armature in acciaio inossidabile. Il loro uso è stato proposto principalmente nel caso di ambienti contaminati da cloruri, come il ponte di Progreso, in Messico, costruito negli anni '30 del secolo scorso. In alcuni casi, come nella Guild Hall Yeast a Londra e nella chiesa Dives in Misericordia a Roma sono state usate anche in ambiente interessato solo dalla carbonatazione, per garantire vite di servizio molto lunghe. Fino a oggi le applicazioni sono limitate, probabilmente a causa del costo elevato dell'armatura in acciaio inossidabile (8-10 volte rispetto a quelle usuali in acciaio al carbonio).

I primi studi sul comportamento di acciai inossidabili in calcestruzzo contaminato da cloruri sono stati pubblicati negli anni '70 da gruppi di ricerca britannici [30], danesi [31] e tedeschi [32]. Sulla base dei risultati ottenuti nei laboratori del Politecnico di Milano da Pietro Pedeferri, Tommaso Pastore, Luca Bertolini e collaboratori, confrontati con quelli ottenuti presso altre istituzioni e con l'esperienza di campo sono stati messi a punto dei diagrammi (Figura 2) che indicano i campi di applicabilità dei diversi materiali (acciaio comune o diversi tipi di acciaio inossidabile) in funzione dell'aggressività ambientale [8]. La concentrazione massima di cloruri tollerabile dai diversi tipi di armatura diminuisce sensibilmente con l'aumento della temperatura (quindi in ambiente tropicale) e al diminuire del pH (calcestruzzo carbonatato). La presenza di ossidi di saldatura peggiora il comportamento a corrosione [8]. È stato chiaramente dimostrato dagli studi condotti dal gruppo di ricerca del prof. Pedeferri che le armature di acciaio inossidabile non aumentano il rischio di corrosione per contatto galvanico con acciaio al carbonio [33].

Armature in acciaio zincato. Le armature in acciaio zincato sono state studiate a partire dagli anni '80 ed è stato dimostrato che sono efficaci in calcestruzzo carbonatato senza cloruri e in calcestruzzo alcalino possono consentire un aumento del tenore critico di cloruri fino al 1-1,5% [8, 34, 35]. Nello studio di questo tipo di armature è stato notevole il contributo dell'Università di Ancona (ora Politecnica delle Marche) [36].

Inibitori di corrrosione. Sono stati utilizzati prevalentemente come metodo di prevenzione, aggiunti all'impasto. Gli inibitori più efficaci sono quelli a base nitrito di calcio, studiati già negli anni '50 e commercialmente disponibili dagli anni '70 [37, 38]. Inibitori organici a base di ammine e alcanolammine sono stati proposti negli anni '80-'90 [39]. Se aggiunti in concentrazione sufficiente gli inibitori possono aumentare la concentrazione critica di cloruri dai valori di 0,4-1% rispetto alla massa di cemento, tipici delle armature in acciaio al carbonio, fino a valori 2-2,5% per i dosaggi più elevati nel caso del nitrito e 1-1,5% nel caso degli inibitori organici [39]. Un contributo importante è stato dato dai gruppi di ricerca italiani, attivi presso le Università di Ancona (Politecnica delle Marche), Ferrara, Bergamo e il Politecnico di Milano [40-42].

Rivestimenti e trattamenti superficiali del calcestruzzo. Sono stati utilizzati anche per la protezione delle armature dalla corrosione e sono classificati in quattro categorie: rivestimenti organici che formano un film continuo, trattamenti idrorepellenti, trattamenti di sigillatura dei pori e malte cementizie-polimeriche. L'effetto principale dei rivestimenti è ridurre la velocità di penetrazione delle specie aggressive (cloruri) e quindi aumentare il tempo di innesco della corrosione. Sono caratterizzati in genere da una bassa permeabilità all'acqua e quindi possono ridurre l'umidità all'interno dei pori del calcestruzzo e quindi la velocità di corrosione, aumentando il tempo di propagazione [8]. Anche in questo campo ci sono stati contributi delle scuole italiane, Università di Ancona (Politecnica delle Marche) e Politecnico di Milano, che hanno studiato sia rivestimenti di tipo idrorepellente sia malte cementizie modificate con polimeri [43, 44].

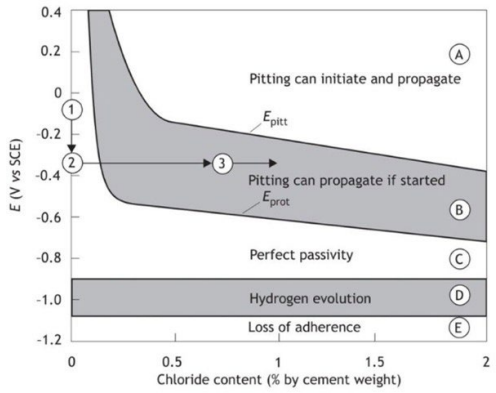

Fig.1 - Diagramma Pedeferri per la prevenzione catodica / Pedeferri diagram for the cathodic prevention of steel in concrete [8]

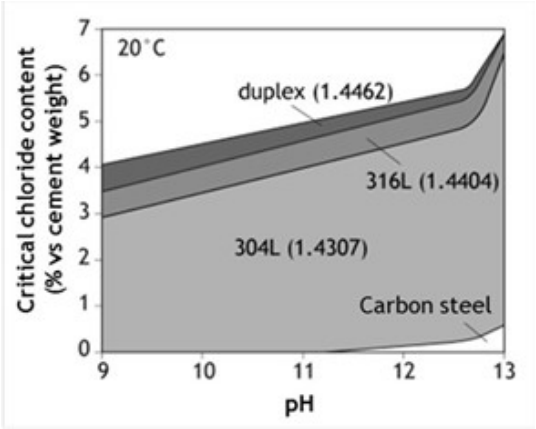

Fig.2 - Applicabilità dei diversi acciai inossidabili (senza ossidi di saldatura) in ambienti contenenti cloruri a temperatura di 20° / Application of different type of stainless steel (without welding oxides) in chloride rich environments at 20°C [8]

BIBLIOGRAFIA

[1] Draft CEB Guide to Durable Concrete Structures N° 166, 1985. Durable Concrete Structures - CEB Design Guide, Second Edition. N°182, 1989. Durable Concrete Structures N°183, 1992.
[2] Schiessl P (ed.), Corrosion of steel in concrete, Report of the technical committee 60-CSC RILEM. London: Chapman and hall, 1988.
[3] Crane AP (ed.), Corrosion of reinforcement in concrete construction. Chichester: Society of chemical industry/Ellis Horwood Limited, 1983.
[4] Page CL, Treadaway KWJ, Bamforth PB (ed.), Corrosion of reinforcement in concrete. London: Society of chemical industry, Elsevier, 1990.
[5] European Cooperation in Science and Technology COST 509 (1991-1996). COST 521 - (1997-2002). COST 534 - (2002-2007).
[6] Pedeferri P, Bertolini L, La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali. Milano: Mc-Graw Hill, 1996.
[7] Pedeferri P, Bertolini L, La durabilità del calcestruzzo armato. Milano: McGraw-Hill, 2000.
[8] Bertolini L, Elsener B, Pedeferri P, Redaelli E, Polder R, 2013, Corrosion of Steel in Concrete (2nd ed) Weinheim: Wiley-VCH, 2013 (1° edizione 2004).
[9] Pedeferri P. Corrosion science and engineering, ed L. Lazzari and MP. Pedeferri. 2018. Cham, Switzerland: Springer Nature.
[10] APCE NOtizie, dicembre 2010, n°42. Structural/L'Edilizia 2010 Speciale durabilità delle strutture in c.a., Structural n. 186, marzo/aprile 2014.
[11] Bertolini L, A tribute to Pietro Pedeferri's contribution to the knowledge on corrosion of steel in concrete and its prevention, Materials and corrosion. 2011; 62(2): 96-97.
[12] Andrade C, Some historical notes on the research in corrosion of reinforcements, Hormigon y acero. 2019; 69 (S1): 21-28.
[13] Tuutti K, Corrosion of steel in concrete. Stockolm: Swedish foundation for concrete research, 1982.
[14] Page CL "Nature and properties of concrete in relation to reinforcement corrosion", atti del corso "Corrosion of steel in concrete", Aachen, 17-19 febbraio 1992.
[15] Stratfull RF, The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge, Corrosion-NACE. 1957; 13: 173t-178t.
[16] Collepardi M, Marcialis A and Turriziani R, Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes, Journal of American Ceramic Society 1972; 55: 534-535.
[17] Isecke B, Failure analysis of the collapse of the Berlin congress hall, in [3], p. 79-89.
[18] Nurnberger U, Corrosion induced failure mechanisms of prestressing steel, Materials and corrosion. 2002; 53: 591-601.
[19] Arpaia M, Orsini PG, Pernice, P, Hydrogen Embrittlement of Concrete Prestressing Steel Wires: Susceptibility Tests, Metallurgia Italiana, 1988; 80 (1): 33-37.
[20] Proverbio E, Longo P, Sub critical crack growth in hydrogen assisted cracking of cold drawn eutectoid steel, Corrosion Science, 2007; 49 (6): 2421-2435.
[21] EN 206 Concrete – Specification, performance, production and conformity, European Committee for Standardisation
[22] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: general rules and rules for buildings. European Committee for Standardisation
[23] Stratfull RF, Cathodic protection of a bridge deck, Materials performance 1974; 13 (4): 24.
[24] Pedeferri P, Protezione catodica e prevenzione catodica delle armature nel calcestruzzo, L'edilizia 1993; 10: 69-83. Pedeferri P,

Cathodic protection and cathodic prevention, Construction and building materials. 1996; 10: 391-402.
[25] Pourbaix M, Lectures on electrochemical corrosion; New York: Plenum press 1973.
[26] Cigna R and Fumei O. Sulla protezione catodica dei ferri del calcestruzzo armato, Industria Italiana del Cemento 1981; 9: 595-600
[27] EN ISO 12696 Cathodic protection of steel in concrete European Committee for Standardisation
[28] Bertolini L, Bolzoni F, Gastaldi M, Pastore T, Pedeferri P & Redaelli E, Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete. Electroch. Acta. 2009; 54: 1452–1463.
[29] Hartt WH, A Critical evaluation of cathodic protection for prestressing steels in concrete, in [4], 515-524.
[30] Treadaway KWJ, Cox RN, Brown BL, Durability of corrosion resisting steel in concrete, Proc. Institute of Civil Engineers, 1989; 305-331.
[31] B.Sorensen, P.B.Jensen, E.Maahn, The corrosion properties of stainless steel reinforcement, in [4], pp.601-605.
[32] Nurnberger U, Beul W, Onuseit G "Corrosion behaviour of welded stainless reinforced steel in concrete", Otto-Graf-Journal, FMPA BW stuttgart, 1993; 4: 225-259
[33] Bertolini L, Gastaldi M, Pastore T, Pedeferri MP, Pedeferri P, "Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcement in Concrete", Int. Conf. on "Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures", F.H.W.A., Orlando, 7-11 December 1998.
3[4] Maahn E, Sorensen B, The influence of microstructure on the corrosion properties of hot-dip galvanized reinforcements in concrete, Corrosion. 1986; 42 (4): 187-.
[35] Macias A, Andrade C, Corrosion of galvanized steel reinforcements in alkaline solutions, British corrosion Journal. 1987; 22 (2): 119-.
[36] Fratesi R, Moriconi G & Coppola L 1996 The influence of steel galvanization on rebar behaviour in concrete, in Corrosion of Reinforcement in Construction, Ed. By C.L.Page, P.B. Bamforth, J.W. Figg. Cambridge: The Royal Society of Chemistry) 630–641.
[37] Andrade C., Alonso C. & Gonzalez J.A. Some laboratory experiments on the inhibition effect of sodium nitrite on reinforcements corrosion, Cement, Concrete and Aggregates 1986; 8(2): 110.
[38] Berke NS, Weil TG, World-wide review of corrosion inhibitors in concrete; advances in concrete technology, in: Int. Conf. CANMET, Athens, Greece, 1992, pp. 899-924.
[39] Elsener B, Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete – State of the Art Report, EFC Publications n.35, London: The institute of materials, 2001.
[40] Collepardi M, Coppola L, Corradetti C, Fratesi R, Moriconi G, "Use of Nitrite Salt as Corrosion Inhibitor Admixtures in Reinforced Concrete Structures Immersed in Sea-Water", Proc. of RILEM Symposium "Admixtures for Concrete. Improvement of Properties", Barcelona (1990), p. 279-288, University Press, Cambridge, Chapman and Hall London.
[41] Monticelli C, Frignani A, Brunoro G, Trabanelli G, Zucchi F, Tassinari M, Corrosion Inhibition Of Steel In Alkaline Chloride Solutions, Corrosion science 1993; 35 (5-8): 1483-1489.
[42] Ormellese M, Bolzoni F, Lazzari L, Pedeferri P., Effect of corrosion inhibitors on the initiation of chloride-induced corrosion on reinforced concrete structures, Mater Corros. 2008, 59 (2): 98–106.
[43] Coppola L, Pistolesi C., Zaffaroni P., Collepardi M. (1997). Properties of polymer-cement coatings for concrete protection, Proc. of Fifth Canmet-ACI Int. Conf. "Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete", ACI SP 173, Roma, Italy, 267-286.
[44] Brenna A, Bolzoni F, Beretta S & Ormellese M (2013). Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings, Construction and Building Materials 48: 734–744.

Big milestones in the study of rebar corrosion

Rebars corrosion in concrete has been neglected for a long time in the scientific literature and reinforced concrete was considered as an "eternal" material. The first relevant papers appeared at the end of the years '50; only during the sixties, and more during the '70s and the '80s, several research groups gave important contributions. An important contribution was also given by italian researchers thanks to Universities of Roma, Ancona, Ferrara and Politecnico di Milano, where Professor Pietro Pedeferri and its school contributed to the study of cathodic protection and prevention, stainless steel reinforcements and corrosion inhibitors.

KEYWORDS: CORROSION IN CONCRETE, CARBONATION INDUCED CORROSION, CHLORIDES INDUCED CORROSION, HYDROGEN EMBRITTLEMENT, PREVENTATIVE METHODS, CATHODIC PREVENTION AND PROTECTION