



CORROSIONE DELLE ARMATURE IN CALCESTRUZZO ARMATO ALLO STADIO G. MEAZZA DI MILANO

Il monitoraggio delle strutture del primo e del secondo anello

Vittorio Angeleri

Direzione centrale Tecnica, Comune di Milano
vittorio.angeleri@comune.milano.it

Luca Bertolini

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica
"Giulio Natta"
luca.bertolini@polimi.it

Matteo Gastaldi

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica
"Giulio Natta"
matteo.gastaldi@polimi.it

Massimiliano Papetti

Direzione centrale Tecnica, Comune di Milano
massimiliano.papetti@comune.milano.it

Fernando Romito

Direzione centrale Tecnica, Comune di Milano
fernando.romito@comune.milano.it

Fabiana Stefanoni

Direzione centrale Tecnica, Comune di Milano
fabiana.stefanoni@comune.milano.it

SOMMARIO

Le strutture dei tre anelli che costituiscono lo stadio "Giuseppe Meazza" di Milano, realizzate in fasi successive dal 1926 fino al 1990, sono una notevole testimonianza dell'impiego del calcestruzzo armato e precompresso nell'ultimo secolo. Se, da un lato, queste strutture rappresentano un'icona per le potenzialità di questo materiale, dall'altro lato ne evidenziano anche la vulnerabilità. Le strutture in calcestruzzo armato del primo e del secondo anello hanno un'età superiore a 60 anni e risentono degli effetti della corrosione delle armature. Il Comune di Milano, proprietario dello stadio, ha avviato una collaborazione con il laboratorio Materiali cementizi e durabilità (mCD) del Politecnico di Milano per la valutazione dello stato di conservazione delle strutture e la pianificazione degli interventi necessari per preservare e, allo stesso tempo, garantire la corretta fruizione di questa importante opera. Questa nota descrive le indagini effettuate sulle strutture del primo e del secondo anello (del 1926-37 e del 1955 rispettivamente), attraverso le quali è stato possibile definire il quadro della carbonatazione del calcestruzzo e dello stato di corrosione delle armature. Si è inoltre verificata l'opportunità di tenere sotto controllo l'avanzamento della corrosione sulle armature, con l'obiettivo di programmare gli interventi di riparazione. A tale scopo, è in corso di realizzazione un sistema di monitoraggio basato su sonde per la misura del potenziale di corrosione delle armature e di resistività elettrica del calcestruzzo.

ABSTRACT

MONITORING OF STEEL REINFORCEMENT CORROSION IN THE CONCRETE STRUCTURES OF 1ST AND 2ND RING OF THE G. MEAZZA STADIUM IN MILAN

The structures of the three rings of the stadium "Giuseppe Meazza" in Milan, built in different stages from 1926 until 1990, is a remarkable evidence of the use of reinforced and prestressed concrete in the last century. If, on the one hand, these structures represent an icon for the potential of this material, on the other hand they also highlight its vulnerability. Reinforced concrete structures of the first and second rings are more than 60 years old and suffer from the effects of corrosion of the steel reinforcement. The municipality of Milan, being the owner of the stadium, has set up a collaboration with Politecnico di Milano aimed at the assessment of the conservation condition of the structures and planning of remedial works necessary to preserve and, at the same time, ensure the correct use of this important infrastructure. This paper describes the investigations carried out on the structures of the first and second ring (dating to 1926-37 and 1955 respectively), which allowed the definition of the extension of carbonation of concrete and the state of corrosion of the reinforcement. The opportunity to monitor the progress of the reinforcement corrosion was also highlighted in order to plan repair works. For this purpose, a monitoring system based on probes for measuring the corrosion potential of the reinforcement and electrical resistivity of concrete is under development.

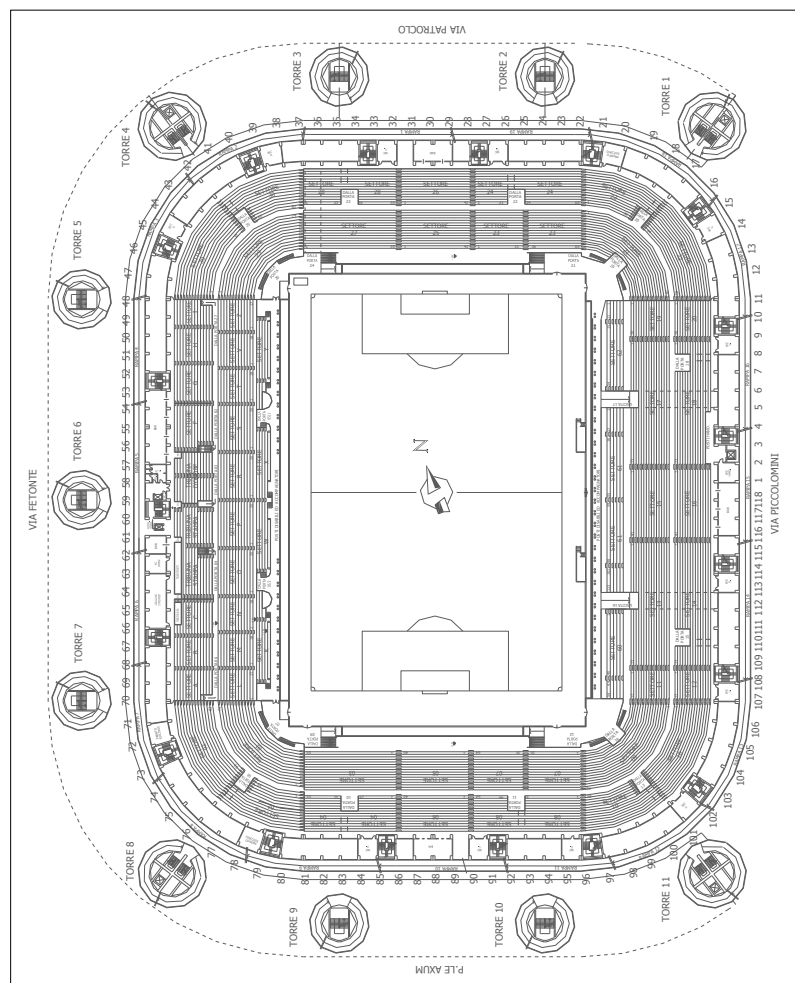
PAROLE CHIAVE | KEYWORDS

Calcestruzzo armato, corrosione, carbonatazione, conservazione, monitoraggio
Reinforced concrete, corrosion, carbonation, preservation, monitoring

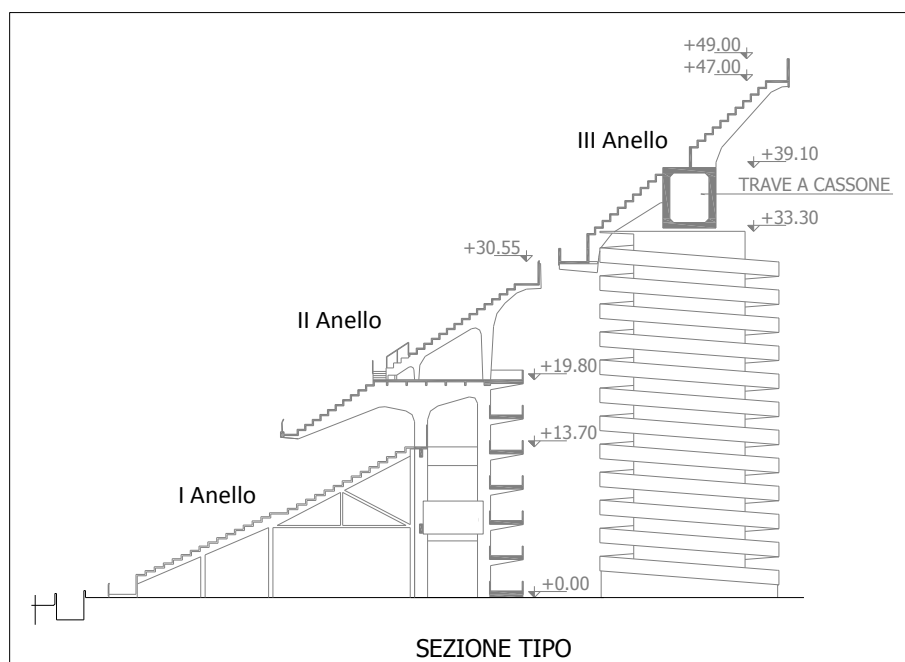
INTRODUZIONE

La costruzione del primo anello dello stadio Meazza di Milano è iniziata nel 1925-26 con la realizzazione di quattro tribune di altezza diversa sui lati del campo (16 gradinate nei tratti corti, 27 gradinate nella tribuna coperta e 31 nella tribuna popolare) ed è stata ultimata nel 1939, con la costruzione delle tribune curve di raccordo e la sopraelevazione delle gradinate nei tratti corti (fino al livello delle tribune principali). La sua struttura è costituita da un sistema di travi, pilastri e tribune a gradinate, in calcestruzzo armato che si estendono dalla quota stradale (quota 0,00 m) fino a una quota di 13.70 m. Il secondo anello è stato realizzato nel 1954-55, con una struttura indipendente che segue la stessa articolazione del primo anello con 118 portali in calcestruzzo armato. Questa struttura sostiene un sistema di gradinate a sbalzo e una serie di rampe d'accesso che partono dalla quota stradale e arrivano al corsello centrale a quota 19.80 m. Lo stadio si completa con il terzo anello e la copertura che sono stati realizzati in occasione dei mondiali di calcio del 1990 e sono sostenuti da undici torri in calcestruzzo armato (figura 1). Per approfondimenti sulle strutture dello stadio si rimanda alla nota di R. De Col [1].

Le strutture del primo e del secondo anello negli anni hanno manifestato una serie di problemi di degrado, prodotti principalmente dalla corrosione delle armature e dal distacco del copriferro (figura 2a). Per garantire la fruizione della struttura vengono spesso realizzati onerosi interventi di riparazione (figura 2b).



1a. Pianta delle strutture dei tre anelli.



1b. Sezione tipo (b) delle strutture dei tre anelli.



(a)



(b)

2. Esempio di corrosione delle armature e distacco del copriferro (a) e intervento di riparazione all'intradosso delle strutture del secondo anello (b).

Il Comune di Milano, proprietario dello stadio, nell'ambito di una convenzione con il Politecnico di Milano, ha chiesto al laboratorio Materiali cementizi e durabilità del Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" di valutare lo stato di conservazione delle strutture e stimare l'evoluzione del degrado. Questa nota descrive le indagini svolte sulle strutture in calcestruzzo armato del primo e del secondo anello e la procedura sviluppata per il monitoraggio della corrosione. In questo contributo non vengono prese in esame le strutture in calcestruzzo armato e precompresso del terzo anello e le strutture metalliche della copertura, che saranno trattate in futuri contributi.

ANALISI DELLE CAUSE DI DEGRADO

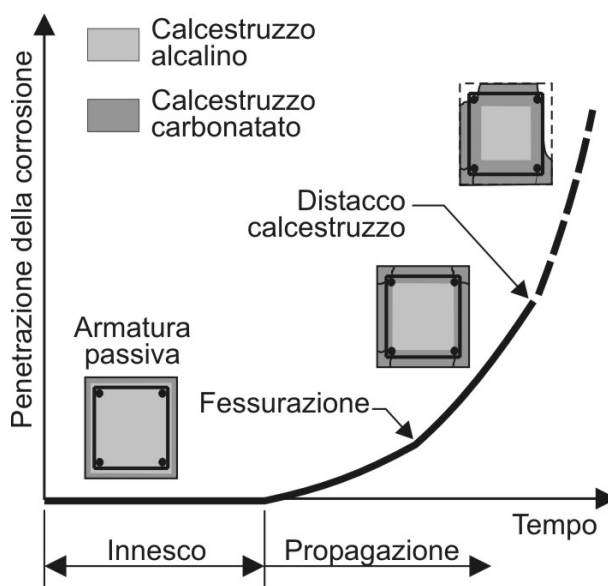
La prima fase dello studio ha riguardato la valutazione globale delle condizioni delle strutture in calcestruzzo armato dei due anelli. Si sono raccolte le informazioni di archivio sulla realizzazione delle strutture e sugli interventi di ispezione e di manutenzione effettuati in passato. Si è, quindi, effettuata un'ispezione visiva generale di tutte le strutture e una serie di misure preliminari. Al termine di queste prime indagini è stato possibile individuare come unico serio fenomeno di degrado la corrosione delle armature indotta dalla carbonatazione¹ del calcestruzzo.

Quando questa arriva alla superficie delle armature, interessando l'intero strato di calcestruzzo che le ricopre (spessore di copriferro), provoca la distruzione del film di passività presente su di esse e quindi l'innescò della corrosione (*tempo di innesco della corrosione*, figura 3). La successiva propagazione della corrosione delle armature, favorita da condizioni di umidità del calcestruzzo, può portare nel tempo alla fessurazione e al distacco del copriferro a causa delle tensioni generate dai prodotti di corrosione (*tempo di propagazione*, figura 3) [2-4].

L'osservazione visiva delle strutture del primo e del secondo anello ha consentito di verificare diversi gradi di avanzamento della corrosione nelle varie parti della struttura. In alcune zone il copriferro originale è ancora integro, in poche zone erano presenti fessurazioni o distacchi dovuti alla corrosione e in molte altre zone sono state effettuate riparazioni con malte specifiche (questi interventi sono frequenti non solo per mantenere la capacità statica della struttura, ma anche per garantire la sicurezza delle persone e prevenire il rischio di distacco di frammenti di calcestruzzo).

NOTA

1. La carbonatazione è la reazione dell'anidride carbonica presente in atmosfera con i costituenti alcalini del calcestruzzo. L'alcalinità presente nella soluzione nei pori del calcestruzzo (pH pari circa a 13) è la responsabile delle iniziali condizioni di protezione delle armature (se il calcestruzzo correttamente confezionato, messo in opera e privo di cloruri); infatti grazie ad essa si forma sulla superficie delle barre un sottilissimo film protettivo (film di passività) che ne impedisce la corrosione. La carbonatazione nel calcestruzzo causa una diminuzione del pH a valori prossimi alla neutralità.



3. Tempo di innesco e tempo di propagazione della corrosione da carbonatazione (diagramma di Tuutti modificato); il tempo di propagazione finisce nel momento in cui viene raggiunta la condizione limite che determina la necessità di un intervento di riparazione (in genere la fessurazione del copriferro o il suo distacco) [4].

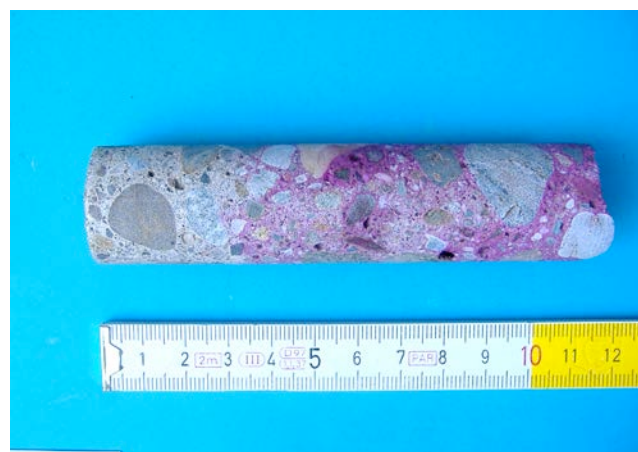
Al fine di programmare gli interventi di manutenzione è necessario stimare i tempi di innesco e di propagazione della corrosione. Per la stima del tempo d'innesco è stato necessario analizzare l'avanzamento della carbonatazione nel calcestruzzo e lo spessore del copriferro. Per la valutazione del tempo di propagazione, notevolmente influenzato dalle condizioni locali di umidità del calcestruzzo, è stato sviluppato un sistema di monitoraggio basato su misure di potenziale di corrosione delle armature [5] e di resistività elettrica del calcestruzzo [6].

INDAGINI SULL'AVANZAMENTO DELLA CARBONATAZIONE

Per individuare le zone in cui è già avvenuto l'innesco della corrosione è necessario verificare localmente se la profondità di carbonatazione ha superato lo spessore di copriferro. Tuttavia, sia la profondità di carbonatazione sia lo spessore di copriferro presentano in genere una variabilità molto alta. Vista la notevole estensione delle strutture, non è stata possibile una verifica puntuale di queste due grandezze. Si sono quindi individuate delle aree omogenee e accessibili che fossero rappresentative sia dei vari periodi costruttivi sia delle diverse condizioni di esposizione; sono state individuate circa trenta zone dei due anelli. L'omogeneità del calcestruzzo all'interno di ciascuna zona è stata verificata attraverso misure sclerometriche (ad esempio, sulle strutture del 1926 si sono ottenuti valori di resistenza sclerometrica un valore medio di 25-30 MPa, mentre sugli elementi del 1939 il valore medio è pari a circa 40 MPa). In queste zone sono state prelevate delle carote sulle quali è stata misurata la profondità di carbonatazione attraverso la prova alla fenoltaleina (figura 4), un indicatore di pH che assume una colorazione rosa nelle zone alcaline e rimane incolore dove il calcestruzzo è carbonatato (a pH inferiori a 9), e si è misurato lo spessore di copriferro con uno strumento di tipo magnetico [2-4].



(a)

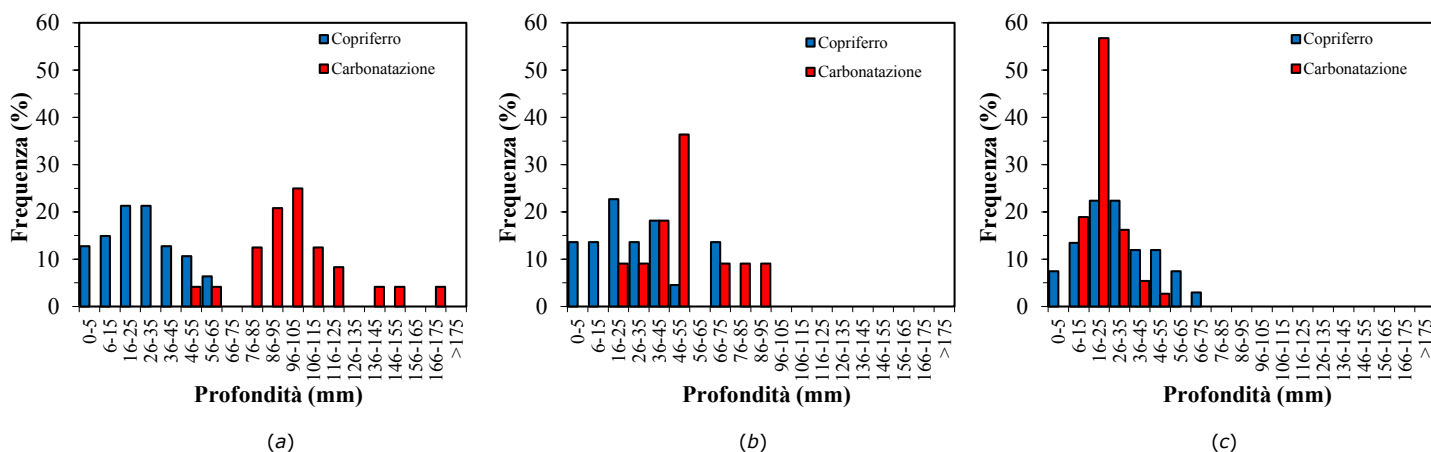


(b)

4. Prelievo di carota (a) e analisi alla fenoltaleina (b) sulle strutture del primo anello.

Nella figura 5 sono riportati i valori di profondità di carbonatazione misurati; è stata effettuata separatamente l'analisi di frequenza delle misure realizzate sulle parti realizzate nel 1926 e nel 1939 del primo anello e di quelle relative al secondo anello. Per quanto riguarda il primo anello, la carbonatazione del calcestruzzo realizzato nel 1926 raggiunge valori compresi tra 50 e 167 mm.

L'elevata variabilità nei risultati è da attribuire alla differenza nella qualità dei calcestruzzi utilizzati (evidenziata anche dalle analisi sclerometriche) e alle differenti condizioni di esposizione presenti nei diversi punti in cui sono state effettuate le analisi (la carbonatazione avanza più velocemente nelle zone più asciutte rispetto a quelle che subiscono bagnamento).



5. Analisi di frequenza delle misure di carbonatazione e copriferro effettuate sugli elementi: a) del primo anello relativi alle zone realizzate nel del 1926, b) del primo anello nelle zone realizzate nel 1939 e c) del secondo anello.

Le strutture del 1939 presentano profondità di carbonatazione comprese tra 25 e 93 mm, mentre quelle del secondo anello hanno mostrato valori 8 e 46 mm. Queste differenze sono dovute anche ai diversi tempi di esposizione; per confrontare le prestazioni dei diversi calcestruzzi, è possibile considerare la classica relazione che descrive il legame tra il tempo (t) e la penetrazione della carbonatazione (s) [2,3]:

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

Il coefficiente di carbonatazione K espresso in $\text{mm}/\text{anno}^{0.5}$ è risultato di 5-19 (valore medio 11) per le parti del 1926, 3-11 (media 6) per le parti del 1939 e 1-6 (media 3) per il secondo anello. A parità di umidità del calcestruzzo, valori di K più elevati sono rappresentativi di un calcestruzzo più poroso e quindi di minore qualità. Le differenze nei valori di K evidenziano le differenze nelle caratteristiche dei calcestruzzi realizzati nei diversi periodi, in accordo anche alle misure sclerometriche effettuate (non riportate per brevità). Le strutture del 1926, che presentano i valori di K più elevati, sono state realizzate con un calcestruzzo più poroso rispetto a quello delle strutture dei tratti curvi del 1939; le strutture più recenti del secondo anello presentano valori di K caratteristici di un calcestruzzo ancor meno poroso.

Nella figura 5 sono riportate anche le distribuzioni di frequenza dei valori di spessore di copriferro rilevati (riferiti alle armature più esterne, le staffe) nelle zone in cui sono state effettuate le misure di avanzamento della carbonatazione. Appare evidente come nel caso del primo anello, considerato anche il tempo trascorso, lo spessore di copriferro sia in generale nettamente inferiore alla profondità di carbonatazione. Analizzando statisticamente le distribuzioni di frequenza delle figure 5a e 5b e assumendo che queste siano rappresentative rispettivamente delle strutture del 1926 e del 1939, si può stimare che l'innesco della corrosione sia avvenuto in circa il 99% e l'80% delle superfici di queste strutture (ovviamente questa stima si riferisce alle zone in cui non sono già stati effettuati gli interventi di riparazione con la sostituzione del copriferro). Nel caso delle strutture del secondo anello, la profondità di carbonatazione è minore e la sua distribuzione di frequenza si sovrappone a quella dello spessore di copriferro (figura 5c). Anche in queste zone, tuttavia, la percentuale di aree in cui si è innescata la corrosione è stata stimata a circa 40%.

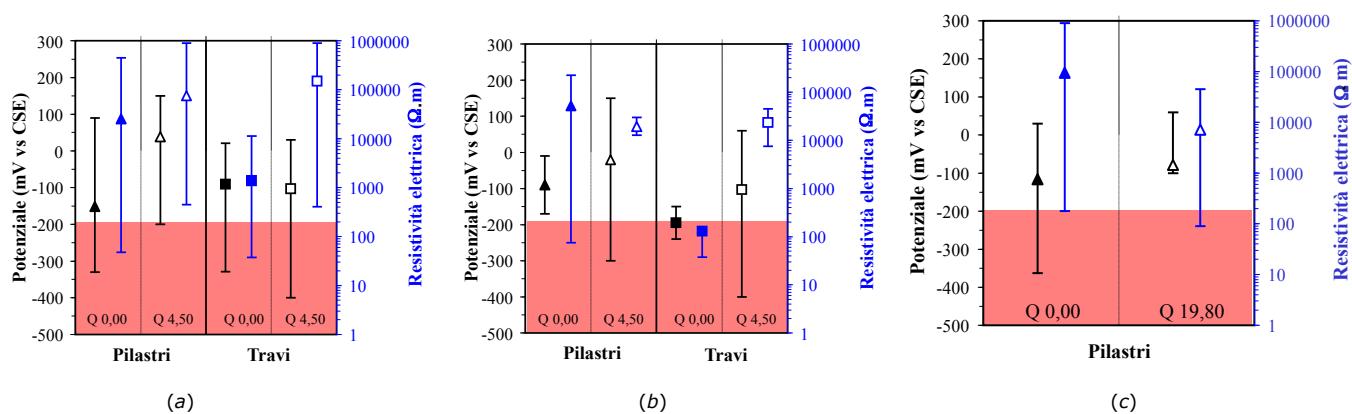
MONITORAGGIO DELLA CORROSIONE

Le misure descritte nel paragrafo precedente mostrano come la maggior parte delle armature delle parti non ancora riparate delle strutture del primo e del secondo anello sono in condizioni di attività, in quanto raggiunte dalla carbonatazione.

Le effettive condizioni di corrosione, e quindi le conseguenti necessità di interventi di ripristino, sono fortemente influenzate dalle condizioni di esposizione e, in particolare dalle condizioni locali di umidità del calcestruzzo; la corrosione può propagare a velocità apprezzabili solo se il calcestruzzo è umido. Le condizioni di umidità sono fortemente variabili da zona a zona, in quanto dipendono dalla condizione di esposizione agli agenti meteorologici (ad esempio, molte zone sono parzialmente riparate dalla pioggia, grazie alla copertura realizzata nel 1990), ma anche dalle operazioni periodiche di lavaggio delle tribune. Inoltre, le condizioni microclimatiche dipendono dalla geometria stessa delle strutture (alcune parti proteggono dalla bagnatura altre parti), ma anche dagli interventi di riparazione già effettuati. Ad esempio, la quasi totalità delle gradinate del primo anello è stata ripristinata all'estradosso e la superficie esterna è ricoperta da malte da ripristino; in alcuni punti lo spessore della malta è di diversi centimetri, in altri casi si limita a una rasatura di pochi mm. Questi strati di malte poco permeabili possono proteggere, almeno in parte, dall'umidità l'intradosso delle gradinate. La situazione di distribuzione dell'umidità nelle strutture è quindi molto complessa.

Per individuare le zone critiche per l'avanzamento della corrosione, sono state effettuate misure di tipo elettrochimico. Queste misure, non distruttive, forniscono informazioni utili per valutare le condizioni di corrosione delle armature. In particolare il potenziale di corrosione delle armature [5] e la resistività elettrica del calcestruzzo [6] sono indicatori importanti per una stima della velocità di corrosione delle armature nel calcestruzzo carbonatato. Indicativamente si può ritenere che la velocità di corrosione assuma valori trascurabili quando il potenziale di corrosione ha valori superiori a -200 mV rispetto all'elettrodo rame/solfato di rame (CSE). Analogamente una resistività elettrica del calcestruzzo superiore a 1000 $\Omega\cdot m$ indica che il calcestruzzo è asciutto e la velocità di corrosione è trascurabile anche se la carbonatazione ha raggiunto le armature.

In figura 6 sono riportati i valori medi e gli intervalli di variazione delle misure del potenziale di corrosione delle armature e di resistività elettrica del calcestruzzo effettuate in corrispondenza alle zone in cui si sono prelevati i campioni di calcestruzzo e si sono misurati gli spessori di copriferro.



6. Potenziale di corrosione delle armature e resistività elettrica del calcestruzzo rilevati sugli elementi del primo anello del 1926 (a), del primo anello del 1939 (b) e del secondo anello (c). Sono riportati i valori medi e l'intervallo di variazione dei risultati.

Considerando congiuntamente le due informazioni che forniscono le misure si possono identificare le zone in cui la corrosione si è innescata e propaga in modo non trascurabile; queste zone sono quelle caratterizzate da valori del potenziale e della resistività bassi, identificati con una fascia rossa in figura 6. Si può osservare che i valori medi delle misure di potenziale e resistività non sono nella zona critica. Tuttavia, l'attenzione deve essere data alle effettive condizioni locali; in alcune zone il calcestruzzo è molto umido (con valori di resistività minori di $200 \Omega \cdot m$) e in queste zone si sono misurati i valori di potenziali di corrosione inferiori a -200 mV vs CSE. Questa situazione è stata riscontrata ad esempio alla base dei pilastri a quota 0.00 m, interessati da risalita capillare, e nelle strutture poste vicino all'estradosso dei gradoni (che si bagnano quando piove o a causa delle operazioni di pulizia con acqua). Si deve considerare, però, che i dati riportati in figura 6 si riferiscono al periodo in cui è stata fatta l'ispezione (nello specifico in inverno in un periodo piovoso). Le effettive condizioni di umidità del calcestruzzo possono cambiare nel tempo al variare delle condizioni di atmosferiche.

Una stima della propagazione della corrosione, e del tempo necessario per avere la fessurazione e il distacco del copriferro, può essere attuata attraverso la misura in continuo dei parametri legati alla corrosione [7-9]. A questo scopo è in fase di realizzazione un sistema di monitoraggio basato su misure di potenziale di corrosione delle armature e resistività elettrica del calcestruzzo attraverso sonde fisse inserite nel calcestruzzo.

Una prima serie di sonde è stata inserita in elementi in calcestruzzo del primo e secondo anello dello stadio, in alcuni punti rappresentativi delle diverse condizioni di esposizione (figura 7).

In attesa che venga predisposto un sistema di acquisizione dati automatico, sono state effettuate periodicamente delle misure. In figura 8 sono riportati, a titolo d'esempio, i valori di potenziale di corrosione e di resistività elettrica rilevati attraverso misure manuali con alcune delle sonde inserite nei portali del secondo anello a quota 19.80 m, in posizione riparata dalla pioggia (per le misure di potenziale si è utilizzato un elettrodo di titanio attivato, MMO).

Le variazioni nei valori rilevati del potenziale e della resistività sono dovute alle condizioni atmosferiche nei diversi periodi dell'anno; i valori più elevati di potenziale e resistività si sono misurati durante il periodo estivo più secco (in questo periodo a Milano l'umidità relativa si è mantenuta, in genere, al di sotto del 70%), mentre nel periodo invernale, più umido (l'umidità relativa a Milano è stata solitamente superiore a 80%), si è osservata una diminuzione nei valori ottenuti.

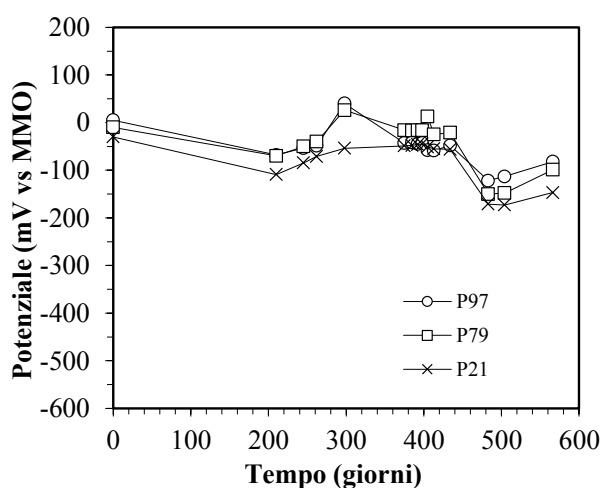


7(a)

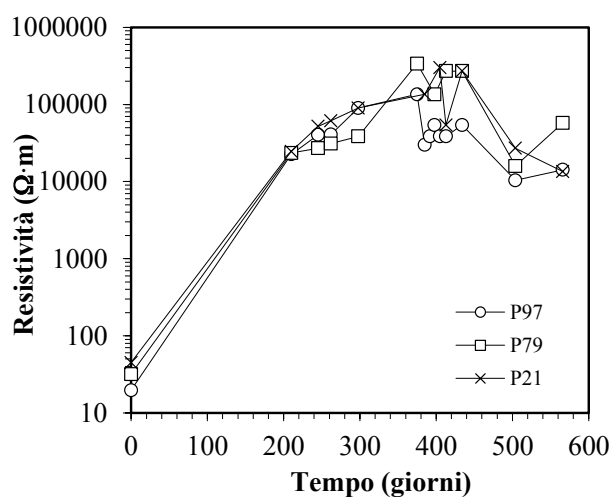


(b)

7a,b. Esempi di installazione delle sonde per il monitoraggio dei parametri legati alla corrosione sugli elementi del primo (a) e del secondo anello (b).



(a)

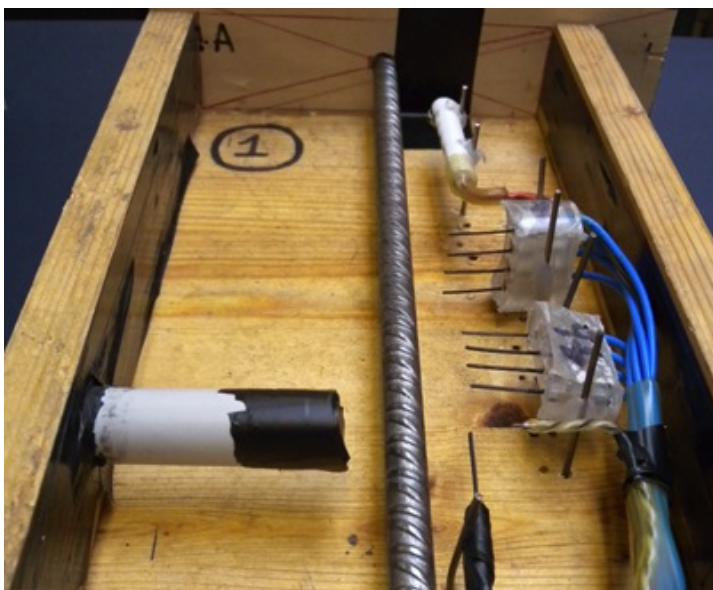


(b)

8. Esempio di monitoraggio del potenziale di corrosione (a) e della resistività elettrica (b) rilevate con le sonde inserite nei portali del secondo anello.

Tuttavia, ad eccezione di un periodo iniziale successivo all'installazione delle sonde (che ha comportato la bagnatura del calcestruzzo), i valori di resistività elettrica sono sempre stati superiori a 1000 $\Omega\cdot m$ e quindi indicativi di condizioni di non aggressività nei confronti delle armature. Sulla base di queste misure preliminari, sono in corso studi di laboratorio per l'individuazione di nuove tipologie di sonde (che, ad esempio, consentano di rilevare le variazioni di umidità in funzione della profondità e pertanto di stimare la velocità di corrosione di armature con diverso spessore di copriferro). La figura 9, mostra ad esempio un provino di laboratorio strumentato con le diverse tipologie di sonde (prima del getto del calcestruzzo). Questi provini consentiranno anche la determinazione delle correlazioni dei parametri misurati con le sonde (potenziale e resistività) con l'effettiva velocità di

corrosione. Successivamente si installeranno ulteriori sonde nelle strutture dello stadio che permetteranno di tenere sotto controllo l'andamento della corrosione. Il sistema di monitoraggio potrà essere impiegato anche per valutare l'innescò della corrosione negli elementi in cui le armature sono ancora passive.



9. Provino strumentato con diverse tipologie di sonde (prima del getto del calcestruzzo).

In particolare potrà essere utilizzato per valutare la protezione offerta dagli interventi di riparazione effettuati (non sempre rivelatisi efficaci in passato) e per verificare gli effettivi vantaggi dei trattamenti superficiali eseguiti sul calcestruzzo. In questo modo sarà possibile attuare, da un lato, una più efficiente pianificazione degli interventi da realizzare e, dall'altro, lato verificare l'efficacia sia di quelli già eseguiti che di quelli attualmente in corso [9].

BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] De Col R., "Le strutture del terzo anello (1988-1990). Lo Stadio Meazza a San Siro", in questo numero della rivista.
- [2] Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Redaelli E., Polder R., Corrosion of steel in concrete. Prevention, diagnosis, repair, 2nd ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2013.
- [3] Gastaldi M. "Carbonatazione e corrosione delle armature", Structural 180, DELETTERA, paper 18, luglio 2013, pp.1-10.
- [4] Bertolini L., Materiali da costruzione - Volume II: degrado, prevenzione, diagnosi, restauro, Seconda edizione, CittàStudi edizioni, Novara, 2012.
- [5] Elsener B., Andrade C., Gulikers J., Polder R., Raupach M., "Recommendation on half-cell potential measurements", Materials and structures, 36, 2003.
- [6] Polder R., Andrade C., Elsener B., Vennesland O., Gulikers J., Weydert R., Raupach M., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete", Materials and structures, 33, 2000, pp.603-611.
- [7] Raupach M., Gulikers J., Reichling K. "Condition survey with embedded sensors regarding reinforcement corrosion", Materials and Corrosion, WILEY-VCH, 64, No. 2, 2013, pp.141-146.
- [8] F. Hunkeler, "Monitoring of repaired reinforced concrete structures by means of resistivity measurements", in Repair of concrete structures, Svolvaer, A. Blankvoll (Ed.), Norwegian Public Roads Administration, 1997, pp.223-232.
- [9] Polder R.B., Peelen W.H.A., Raupach M., Reichling K. "Economic effects of full corrosion surveys for aging concrete structures", Materials and Corrosion, WILEY-VCH, 64, No. 2, 2013, pp.105-110.