

Analisi di alcuni casi classici di degrado presenti nelle infrastrutture in calcestruzzo armato

Emanuele Lizzori e Luca Sgambi

Email : luca.sgambi@uclouvain.be

Il calcestruzzo armato non è un materiale eterno come si credeva nella prima metà del secolo scorso. Anidride carbonica, acqua, agenti inquinanti, sali, possono diffondersi nella massa porosa di calcestruzzo sino a raggiungere le armature, causandone la corrosione. Tale corrosione, in generale, causa un aumento di volume nell'acciaio che fessura il calcestruzzo (fenomeno di splitting), il distacco del copriferro (fenomeno di spalling) e la perdita di capacità portante della struttura. Nei casi più gravi di degrado strutturale, può verificarsi il crollo della struttura. Questa pubblicazione vuole richiamare i concetti teorici che stanno alla base della modellazione dei fenomeni di corrosione del calcestruzzo armato e mostrare degli esempi classici di degrado che possono verificarsi nel caso di ponti aventi delle pile in alveo.

Analysis of some classical examples of degradation in reinforced concrete infrastructures

Reinforced concrete is not an eternal material as was believed in the first half of the last century. Carbon dioxide, water, pollutants and salts can spread through the porous mass of concrete and reach the reinforcement, causing corrosion. This corrosion generally causes an increase in volume in the steel which cracks the concrete (splitting phenomenon), the spalling of the concrete cover (spalling phenomenon) and the loss of load-bearing capacity of the structure. In severe cases of structural degradation, structure collapse may occur. The aim of this publication is to recall the theoretical concepts at the basis of the modelling of corrosion phenomena in reinforced concrete and to show classic examples of degradation that can occur in the case of bridges with piers in the riverbed.

Da circa un secolo il calcestruzzo armato è impiegato in modo generalizzato nella costruzione di strutture e infrastrutture. In Italia, anche per ragioni economiche, la maggior parte delle opere infrastrutturali ed edifici costruiti nel dopoguerra è stata realizzata in calcestruzzo armato. Tuttavia, il calcestruzzo armato non è quel materiale eterno a cui si pensava nella prima metà del secolo scorso. Molti sono gli agenti patogeni (acidi, sali, batteri, solfati, etc.) che possono essere causa di degrado. Tra i più comuni possiamo certamente annoverare l'anidride carbonica e i cloruri che sono tra le principali cause di degrado di molte infrastrutture civili.

Le recenti normative europee (UNI EN 206-1 e Eurocodice 2) richiedono di tenere conto del degrado del materiale nel tempo e dei suoi effetti sulle prestazioni della struttura. Per giungere a queste valutazioni, la letteratura scientifica ci fornisce oggi dei modelli matematici, basati su studi sperimentali, che possono essere utilizzati dagli ingegneri già in fase di progetto, per stimare la vita utile della struttura e/o per pianificarne i momenti di manutenzione.

Tuttavia, nelle costruzioni in calcestruzzo armato meno recenti, gli effetti delle azioni ambientali sulle strutture non venivano presi in considerazione poiché poco si conosceva degli effetti del degrado sul calcestruzzo e soprattutto sull'acciaio.

Lo stato di conservazione di numerosissime realizzazioni in calcestruzzo armato effettuate nella seconda metà del secolo scorso conferma che tali costruzioni hanno una durata limitata, poiché la corrosione delle armature ha un significativo effetto sul comportamento strutturale. Nella fattispecie, il calcestruzzo è un ambiente dalle caratteristiche ottimali per ospitare le armature in acciaio sino a che la sua alcalinità non scende sotto certi livelli e non è posto in ambienti che favoriscono la penetrazione dei cloruri nei pori.

La protezione delle armature, da parte del calcestruzzo, si può protrarre, nelle condizioni ambientali più comuni, fino a circa 50-70 anni, a patto che si operi in modo corretto nella definizione dello schema strutturale, dei particolari costruttivi, nella scelta dei materiali, nel mix design, nel trasporto e nella messa in opera e nella manutenzione ordinaria della struttura. Se anche solo una delle fasi del processo sopra riportato presenta difetti, o errori, il fenomeno della corrosione inizia molto prima, portando a pesanti conseguenze in termini di sicurezza strutturale e oneri di manutenzione¹.

A questo si deve aggiungere che le indicazioni fornite dalle recenti norme europee, riguardo ai valori limite del rapporto acqua/cemento e allo spessore di copriferro, possono risultare inefficaci se la struttura è inserita in un ambiente molto aggressivo, come in presenza di cloruri.

I ponti stradali, realizzati in calcestruzzo armato precompresso, su cui viene gettato sale antigelo durante i mesi invernali rientrano, purtroppo, in questa categoria di strutture. Come l'esperienza ci ha insegnato, il collasso di queste opere può infatti avvenire con una rottura fragile, per un carico inferiore al normale carico di esercizio.

Nel seguito di questa pubblicazione si esamineranno dapprima i principali agenti patogeni e i fenomeni che portano al degrado di una infrastruttura in calcestruzzo armato (anidride carbonica e cloruri), dopodiché si evidenzieranno gli effetti di questi agenti su alcune infrastrutture di attraversamento del fiume Po poste in territorio lombardo.

I fenomeni di degrado

La corrosione è un processo elettrochimico, pertanto, perché possa avere luogo, richiede la presenza di un elettrolita. Nel calcestruzzo l'elettrolita è la soluzione presente all'interno dei pori, la quale contiene idrossido di calcio, di sodio e potassio. Il suo pH è tipicamente compreso tra 12 e 13 (ambiente molto alcalino). Quando il pH è superiore ad un valore di circa 11,5 e

¹ Malerba, P.G. (2014). Inspecting and repairing old bridges: Experiences and lessons. Structure and Infrastructure Engineering, 10(4), 443-470.

non sono presenti cloruri, l'acciaio si ricopre di una sottilissima pellicola di ossido, la quale fa sì che la velocità del processo corrosivo intaccante l'acciaio sia ridotta quasi a zero. Questa condizione è conosciuta in letteratura come condizione di passività dell'acciaio.

Quindi, date le caratteristiche di un calcestruzzo correttamente messo in opera e dell'acciaio da costruzione è chiaro che, una volta messo in opera, il calcestruzzo protegge le armature al suo interno.

Tuttavia il calcestruzzo nel tempo può variare le sue caratteristiche protettive nei confronti dell'acciaio. Due processi sono le principali cause di questa variazione:

- La carbonatazione:
l'anidride carbonica proveniente dall'ambiente esterno neutralizza le proprietà alcaline del calcestruzzo, facendo scivolare il pH del conglomerato sotto un valore di 9.
- La penetrazione di cloruri:
gli ioni cloro penetrano all'interno del conglomerato in modo tale da raggiungere una concentrazione critica sulla superficie delle armature che causa la rottura della pellicola passivante.

Una volta che le armature non sono più protette dal calcestruzzo e in presenza di acqua ed ossigeno, l'acciaio inizia a corrodersi.

Da notare che, poiché l'acqua e l'ossigeno devono essere contemporaneamente presenti, la corrosione difficilmente può avere luogo in strutture riparate dalla pioggia o in strutture permanentemente immerse in acqua. La situazione peggiore è quella che vede la struttura esposta all'atmosfera, quindi sottoposta a cicli di asciutto-bagnato, grazie ai quali la diffusione degli agenti patogeni e la penetrazione nel copriferro di acqua e ossigeno sono incentivati. Questo concetto verrà messo in evidenza nella seconda parte di questa pubblicazione tramite alcuni esempi classici di degrado strutturale.

La corrosione da carbonatazione avviene in modo uniforme su tutta la barra d'armatura, qualora questa venga interessata dal fronte di carbonatazione. In genere, la corrosione da cloruri avviene invece localmente, dove il film passivante subisce la rottura. I danneggiamenti dovuti a quest'ultimo tipo di corrosione sono locali e profondi, causati da attacchi corrosivi penetranti (pitting). Questo tipo di corrosione si riscontra soprattutto nelle solette e sottostrutture di ponti.

In generale, la corrosione di un elemento di armatura genera in un elemento strutturale i seguenti fenomeni:

- Riduzione della sezione resistente delle armature, che implica una riduzione della loro resistenza ai carichi imposti;
- Riduzione della capacità di confinamento per le staffe, che può aumentare la tendenza delle barre principali all'instabilità;
- Produzione di ossidi espansivi, che occupano un volume maggiore di 4-5 volte rispetto a quello dell'acciaio impiegato nella reazione, il che provoca:
 - Sforzi di trazione nel calcestruzzo che si fessura;
 - Riduzione dell'aderenza armatura-calcestruzzo;
 - Fenomeni di splitting e spalling del copriferro, rispettivamente fessurazione radiale alla barra ed espulsione del copriferro, fenomeno che si verifica soprattutto lungo gli spigoli di una struttura.

Se la corrosione interessa l'acciaio dei cavi di precompressione, la situazione è molto più pericolosa. Benché, in generale, l'acciaio dei cavi di precompressione dovrebbe essere protetto da malte o altri materiali protettivi iniettati all'interno delle guaine, può capitare che la corrosione arrivi sino all'acciaio dei cavi per una difettosa iniezione o per una mancata manutenzione. Non sono infrequenti i casi (come vedremo) dove una mancata manutenzione dell'infrastruttura ha permesso agli agenti patogeni di degradare parti di una trave sino ad arrivare all'esposizione in atmosfera delle guaine di protezione dei cavi ed oltre.

La pericolosità di questa situazione è dovuta alla bassa tenacità alla frattura dei cavi di precompressione e agli elevati carichi a cui i cavi stessi sono soggetti. Queste condizioni possono far sì che una cricca, causata dalla corrosione, si propaghi improvvisamente, causando la rottura fragile dei trefoli costituenti il cavo.

Per una più ampia spiegazione dei fenomeni chimici che intervengono nei processi di degrado del calcestruzzo armato, si rimanda al volume del prof. Bertolini che tratta l'argomento in modo completo e dettagliato².

Per quanto riguarda la vita delle strutture in calcestruzzo armato soggette ad un degrado strutturale, questa può essere efficacemente descritta dal modello di Tuutti³, che vede il susseguirsi negli anni di un periodo di innesco e di un periodo di propagazione della corrosione. Il primo periodo è quello durante il quale l'armatura perde la sua condizione di passività, localmente (a causa di cloruri) o in modo generalizzato (a causa dell'anidride carbonica); il secondo vede il manifestarsi e l'evolversi del fenomeno corrosivo vero e proprio. I fenomeni che avvengono nelle due fasi sono di natura diversa e pertanto sono descritti da differenti leggi e sono funzione di diversi elementi. Ad esempio la qualità del calcestruzzo assume un ruolo preponderante nel periodo di innesco mentre la presenza di ossigeno è di fondamentale importanza nel periodo di propagazione.

La corrosione causata dalla carbonatazione

Con il termine "carbonatazione" del calcestruzzo si indica una reazione chimica che avviene in maniera del tutto naturale tra uno dei componenti della massa di calcestruzzo (l'idrossido di calcio) e l'anidride carbonica presente in atmosfera. Tale reazione chimica, che si svolge in presenza di soluzione acquosa, trasforma l'idrossido di calcio in carbonato di calcio abbassando il pH della parte di calcestruzzo carbonatata.

I fattori che governano il processo di carbonatazione sono lo spessore del copriferro e la velocità di penetrazione della carbonatazione, dipendente da vari fattori quali l'umidità relativa, la temperatura, la concentrazione dell'anidride carbonica in atmosfera, il tipo di cemento, il rapporto acqua-cemento, il tempo di stagionatura.

La reazione di carbonatazione inizia presso la superficie esterna del calcestruzzo e va in profondità. Il modello matematico più utilizzato per stimare la profondità della carbonatazione (modello di Tuutti) prevede che essa sia proporzionale (tramite un coefficiente di carbonatazione K) ad una radice del tempo trascorso tra la messa in opera della

² Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. & Polder, R.P., (2004). Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

³ Tuutti, K. (1982). Corrosion of steel in concrete, CBI Research Report n° 4.82, Swedish Foundation for Concrete Research, Stoccolma.

struttura e il tempo attuale. Per calcestruzzi porosi, può essere utilizzata una radice quadrata, ottenendo un'evoluzione nel tempo parabolica. Il coefficiente di carbonatazione K dipende da vari fattori, come l'umidità, la temperatura, la concentrazione di anidride carbonica, il tipo di cemento e deve essere stimato in via sperimentale. Valori plausibili per il coefficiente K vanno da 2 (calcestruzzi compatti, poca umidità, bassa concentrazione di anidride carbonica) a 9. Se il calcestruzzo risulta fessurato, la velocità di carbonatazione aumenta. In questo ambito può essere utilizzato il modello di Vesikari⁴.

I modelli menzionati sono in grado di stimare (in genere a favore di sicurezza) il periodo di tempo necessario alla carbonatazione per raggiungere le barre di armatura. Tale periodo temporale rappresenta la fase di innesco della corrosione, in quanto, una volta che il fronte della carbonatazione ha raggiunto le barre di armatura, è d'uso comune non considerarle più protette. Da questo momento in poi inizierà la fase di propagazione della corrosione.

Questa seconda fase può svilupparsi solamente se sulla superficie della barra di acciaio è presente ossigeno ed acqua. In questo caso, gli atomi di ferro possono reagire con l'ossigeno dando luogo ad una reazione di ossidazione con la formazione di vari ossidi di ferro (che compongono il composto che è comunemente chiamato "ruggine").

La velocità di corrosione dell'acciaio è governata dalla resistività elettrica del calcestruzzo. Ancora una volta il contenuto di umidità è il fattore principale per stabilire la resistività del calcestruzzo carbonatato: all'aumentare dell'umidità relativa, diminuisce la resistività del calcestruzzo e aumenta la velocità di corrosione. Valori indicativi della velocità di corrosione comunemente utilizzati variano tra i 0 micrometri (1 micrometro = 1 millesimo di millimetro) all'anno (in condizioni di umidità relativa pari al 50%) sino a 50 micrometri all'anno (in condizioni di umidità relativa pari al 95%)⁵.

La corrosione causata dai cloruri

La presenza di cloruri nella soluzione presente nei pori del calcestruzzo può provocare la corrosione localizzata e profonda delle armature. Il fenomeno della corrosione da cloruri ha inizio quando a livello della superficie delle armature si raggiunge una particolare concentrazione di ioni cloro detta concentrazione critica (0.5% secondo gli studi di Sarja e Vesikari, nota 5). Raggiunto questo livello di concentrazione il film di passività si rompe localmente.

I cloruri possono essere già presenti nell'acqua, negli aggregati o negli additivi che formano l'impasto del calcestruzzo (attualmente la normativa ne limita fortemente la quantità in ragione della loro pericolosità per le armature) o penetrare dall'ambiente esterno attraverso i pori del calcestruzzo (soprattutto nel caso di strutture esposte ad un ambiente marino o infrastrutture stradali, sulla cui piattaforma viene sparso sale disgelante durante i mesi invernali).

Il tempo che intercorre tra la messa in opera della struttura e il momento in cui sulla superficie delle barre di acciaio si raggiunge un valore di concentrazione critico di ioni cloro, definisce il periodo di innesco della corrosione. La durata di tale periodo dipende da molti fattori, quali,

⁴ Vesikari, E. (1988). Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement. Research Report NA 553, Technical Research Center of Finland (VTT), Finland.

⁵ Sarja, A. & Vesikari, E. (1996). Durability design of concrete structures, RILEM Report Series 14, RILEM Technical Committee 130-CSL, E. & F.N. Spon London, 1996.

ad esempio: la concentrazione dei cloruri sulla superficie esterna del calcestruzzo, le caratteristiche della matrice cementizia, lo spessore del copriferro, la presenza o meno di fessurazione, il valore di umidità relativa del calcestruzzo.

Il fenomeno di trasporto degli ioni cloro all'interno del calcestruzzo non è di semplice descrizione in quanto risulta dalla sovrapposizione di diversi fenomeni di trasporto (diffusione, risalita capillare, permeazione, migrazione elettrica) che intervengono a differenti scale. Anche se non corretto, dal punto di vista fisico-chimico, è comunemente accettato modellare il trasporto degli ioni cloro nel calcestruzzo tramite la seconda legge di Fick (teoricamente valida solo per il fenomeno di diffusione) in cui il coefficiente di diffusione viene stimato in via sperimentale.

Naturalmente, come nel caso della carbonatazione, un'eventuale presenza di fessurazione riduce fortemente il tempo necessario alla diffusione degli ioni cloro nel calcestruzzo. Per tenere in conto di tale incremento di velocità, il coefficiente di diffusione della seconda legge di Fick può essere modificato secondo l'approccio proposto da Boulfiza⁶.

Tramite questi modelli, gli ingegneri sono in grado di stimare il tempo necessario per avere una concentrazione di ioni cloro pari alla concentrazione critica (tempo di innesco della corrosione). Da questo momento in poi inizierà la fase di propagazione della corrosione. Questa seconda fase, rispetto alla corrosione indotta dalla carbonatazione, è caratterizzata da una velocità di corrosione sensibilmente più elevata. Valori indicativi comunemente utilizzati (secondo lo studio riportato in nota 5) variano tra i 10 micrometri all'anno (in condizioni di umidità relativa pari al 50%) sino a 120 micrometri all'anno (in condizioni di umidità relativa pari al 95%). Volendo fare un esempio, se si considera una velocità media di corrosione di 70 micrometri all'anno e una corrosione uniforme sulla superficie di una barra di acciaio, una barra di diametro 20 mm a contatto con ioni cloro avrà perso in 30 anni quasi il 40% della sua resistenza. Valore certamente non trascurabile.

L'importanza della fessurazione

I modelli menzionati nei paragrafi precedenti sono in grado di fornire una stima ragionevole sia del tempo di innesco della corrosione sia dell'andamento della sua propagazione. La modellazione dei processi di corrosione è ancora materia di studio e molti aspetti vengono trattati in maniera sperimentale. Un aspetto che non è di secondaria importanza e che è ancora tema attuale di ricerca è, appunto, l'accoppiamento tra il fenomeno di fessurazione e la corrosione. I modelli descritti difatti permettono di considerare il fenomeno della fessurazione all'interno del modello di corrosione, ma i due fenomeni rimangono indipendenti. Tale ipotesi è un'ipotesi abbastanza forte e non supportata né dalla logica né dai risultati sperimentali.

I due fenomeni sono, nella realtà, accoppiati. Se consideriamo la messa in opera di una struttura in calcestruzzo armato, questa subirà una prima fessurazione a causa del ritiro dell'impasto durante il fenomeno di indurimento, a causa dei carichi che graveranno sulla struttura, o a causa di altri fenomeni meccanici. Tale fessurazione ridurrà il tempo di innesco della corrosione e/o aumenterà la velocità di propagazione della corrosione. A sua volta, la

⁶ Boulfiza, M., Sakai, K., Banthia N. & Yoshida, H. (2003). Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete, ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 1, pp. 38-48.

corrosione, diminuendo la resistenza delle barre d'acciaio provocherà un aumento della fessurazione meccanica che produrrà di nuovo un aumento del fenomeno della corrosione. Un primo tentativo di investigare questo accoppiamento di fenomeni, tramite un approccio numerico, è stato eseguito dalla squadra di ricerca del prof. Pier Giorgio Malerba. I risultati sono stati pubblicati negli articoli in nota, a cui si rimanda per ulteriori approfondimenti^{7,8}.

Alcuni esempi di degrado nei ponti stradali

In questo paragrafo si vuole prendere in esame lo stato di degrado di alcuni ponti in calcestruzzo sul fiume Po aventi almeno uno dei due punti terminali all'interno della regione Lombardia. Tali ponti furono oggetto di un più largo studio, effettuato nel 2013, dal gruppo di ricerca del prof. Pier Giorgio Malerba per la regione Lombardia⁹. Tale ricerca (pubblicamente consultabile al link in nota 9) voleva riassumere gli aspetti di conservazione strutturale e i flussi di traffico dei principali ponti stradali sul fiume Po (Tabella 1) in gestione agli enti provinciali (sono quindi esclusi i ponti ferroviari e i ponti autostradali). Durante tale ricerca vennero domandati alle provincie dei dati di carattere generale (ente di appartenenza, anno di costruzione, presenza dei dati di progetto, presenza dei dati sulle ultime manutenzioni, etc.). Non tutte le provincie collaborarono a tale iniziativa, e non tutte le provincie riuscirono a completare in maniera esaustiva il questionario inviato. Ad esempio, come si evince dalla Tabella 1, anche i dati di carattere più generale (anno di costruzione o ente di appartenenza) risultarono, a volte, difficili da definire. Molte date di costruzione dei ponti, non comunicate dagli enti provinciali, sono state dedotte dalla lettura delle cronache delle esondazioni del fiume Po (le date riportate in blu nella Tabella 1).

ID Ponte		Denominazione	Tipologia	Ente di competenza	Anno di costruzione
1a		Valenza ferr.	Muratura / Calcestruzzo	R.F.I.	1858 / 1946
1b		Valenza strad.	Muratura / Calcestruzzo		1898 / 1946
2	*	Pieve del Cairo	Calcestruzzo		1968
3		Cornale	Acciaio		1916 (S)
4		Sull'A7			1960 (tratta aut.)
5		Bressana	Acciaio		1866 / 1949
6		Becca	Acciaio		1912
7	*	Spessa	Calcestruzzo		1973
8	*	Pieve Porto Morone	Calcestruzzo		1961

⁷ Malerba, P.G., Sgambi, L., Gotti, G. & Ielmini, D. (2012). The influence of degradation phenomena on collapse modes in prestressed concrete beams. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, 1(1):41-63. Inderscience Publishers.

⁸ Malerba, P.G., Sgambi, L., Ielmini, D. & Gotti, G. (2017). Influence of Corrosive Phenomena on the bearing capacity and failure mechanisms of RC and PC beams. *Advances in Concrete Construction*, 5(2), 117-143.

⁹ Malerba, P.G., Sgambi, L., Becciu, G., Quagliaroli, M., Basso, N., Boni, M.P., Garavaglia, E., Lualdi, M., Torta, F., Saponaro, E., Galli, G., Bruno, R., Ceriani, A. & Penatti, L., (2013). Valutazione del ciclo di vita delle infrastrutture sensibili. Eupolis Lombardia. Ricerca pubblicamente consultabile presso il sito internet di Eupolis Lombardia: <https://www.polis.lombardia.it/wps/portal/site/polis/DettaglioRedazionale/pubblicazioni/polo-documentale-giunta/incarichi-2011-2014-eupolis-lombardia/valutazione-ciclo-vita-infrastrutture-sensibili>

9a		Piacenza stradale	Acciaio		1908 / 1947 / 2010
9b		Piacenza ferroviario	Acciaio	R.F.I.	1931 (S) / 1949
10		Sull'A1			1959
11	*	San Nazzaro	Calcestruzzo		1970
12a		Cremona ferr.	Acciaio	R.F.I.	1892 / (?)
12b		Cremona strad.	Acciaio	Pr. Piacenza	1890 (S) / 1946
13		Sull'A21			1968
14	*	San Daniele	Calcestruzzo	Pr. Parma	1976
15a		Casalmaggiore ferr.	Acciaio	R.F.I.	1887 (S) / (? Ric.)
15b	*	Casalmaggiore strad.	Calcestruzzo	Pr. Cremona	1955
16	*	Viadana	Calcestruzzo		1965
17	*	Guastalla	Calcestruzzo	Pr. Mantova	1965
18a		Borgoforte ferr.	Acciaio	R.F.I.	1873
18b	*	Borgoforte strad.	Calcestruzzo	Pr. Mantova	1963
19		Sull'A22			1971 (tratta aut.)
20		San Benedetto	Calcestruzzo	Pr. Mantova	1964
21a		Ostiglia strad.	Acciaio	Pr. Mantova	1929 / 1949
21b		Ostiglia ferr.	Acciaio	R.F.I.	1911 / (dism? 2008 Ric.)
22	*	Sermide	Calcestruzzo	Pr. Mantova	1971
23	*	Ficarolo	Calcestruzzo		1970

Tabella 1. Tabella dei ponti ispezionati durante la ricerca per la regione Lombardia (vedere la nota 9) con la messa in rilievo (*) dei ponti che vengono considerati nella presente pubblicazione.

In questa sede si prenderanno in considerazione solamente i ponti con una struttura in calcestruzzo armato su cui sono effettuati dei sopralluoghi durante la precedente attività di ricerca e identificati con un asterisco in Tabella 1. Gli autori vogliono precisare che lo scopo della regione Lombardia, per la ricerca del 2013, fu di identificare le infrastrutture più bisognose di un intervento di manutenzione. A valle di tale ricerca la regione Lombardia operò effettivamente delle azioni di manutenzione. Le immagini che si mostreranno, nel seguito della presente pubblicazione, sono quindi un ritratto della situazione del 2013 non aggiornato. Tali immagini e le riflessioni ad esse legate vogliono descrivere un quadro generale di rischio di degrado legato a questa tipologia di infrastruttura stradale e non una rappresentazione dello stato attuale dei ponti.

Descrizione della tipologia dei ponti

I ponti considerati in questa pubblicazione sono stati tutti costruiti tra il 1955 e il 1976. La data di costruzione di tali opere è importante per comprendere il motivo dello stato di degrado di tali infrastrutture. Difatti, come esposto nella prima parte di questa pubblicazione, le tematiche del degrado strutturale del calcestruzzo armato cominciarono ad essere studiate in maniera approfondita dagli anni '80 (il modello di Tuutti per la carbonatazione è stato pubblicato nel 1982, il modello di Boulfiza per la diffusione degli ioni cloro è del 2003).

La mancanza di conoscenza sulla modellazione dei fenomeni di degrado, la mancanza di chiare direttive sui dettagli costruttivi, la volontà di costruire queste opere in economia, hanno portato a dei degradi strutturali, in alcuni casi, tutt'altro che trascurabili.

In Tabella 2 si è voluto riassumere alcune caratteristiche delle infrastrutture stradali analizzate: la presenza o meno di travi a mensola (chiamate in linguaggio tecnico stampelle) nello schema statico e il tipo di struttura verticale che viene utilizzato per l'appoggio in alveo. Nella quarta colonna viene utilizzato il modello matematico di Tuutti per la valutazione della profondità di carbonatazione. Il coefficiente K viene assunto pari 4 da dati presenti in letteratura scientifica. Assumendo che le barre di armatura abbiano un copriferro di 20 mm (negli anni in cui i ponti sono stati progettati non vi erano ancora obblighi di dimensionare il copriferro sulla base della vita utile della struttura e della sua importanza) viene calcolato l'anno di probabile depassivazione delle armature (innesco della corrosione) e la durata in anni, sino ad oggi, di un'eventuale fase di propagazione della corrosione.

Denominazione	Presenza di travi a mensola	Struttura verticale per l'appoggio in alveo	Profondità di carbonatazione oggi (K = 4) in mm	Innesco della corrosione (anno)	Durata della corrosione ad oggi (anni)
Pieve del Cairo	No	Pilone a sez. rett.	28.8	1993	28
Spessa	Si	4 piloni a sez. circ.	27.4	1998	23
Pieve Porto Morone	Si	6 piloni a sez. circ.	30.7	1986	35
San Nazzaro	Si	6 piloni a sez. circ.	28.3	1995	26
San Daniele	Si	6 piloni a sez. circ.	25.3	2005	16
Casalmaggiore strad.	Si	6 piloni a sez. circ.	31.5	1983	38
Viadana	Si	6 piloni a sez. circ.	29.1	1992	29
Guastalla	Si	6 piloni a sez. circ.	28.0	1996	25
Borgoforte	Si	6 piloni a sez. circ.	30.7	1986	35
Sermide	Si	6 piloni a sez. circ.	27.7	1997	24
Ficarolo	Si	6 piloni a sez. circ.	28.3	1995	26

Tabella 2. Alcune caratteristiche geometriche dei ponti considerati e valutazione dell'anno di innesco della corrosione secondo il modello matematico di Tuutti.

Come si può notare, tutte le infrastrutture considerate hanno una età tale per cui potrebbero avere delle armature su cui si è già sviluppata della corrosione da molto tempo (seguendo l'esempio fatto nella prima parte della pubblicazione, in presenza di cloruri la corrosione potrebbe avere indebolito di un 30 - 40% la resistenza di alcune armature).

Per quanto riguarda lo schema statico utilizzato per il progetto di queste infrastrutture, è uno schema isostatico, dove le travi di campata (chiamate in linguaggio tecnico travi tampone) sono appoggiate su delle travi a mensola (stampelle) che riportano il carico ai piloni verticali che lo distribuiscono in fondazione (Figura 1). Tutte le infrastrutture riportate in Tabella 2 possiedono una struttura simile, con qualche variazione nella lunghezza delle campate e nelle dimensioni delle strutture, fatta eccezione per il ponte di Pieve del Cairo che possiede dei piloni a sezione rettangolare e non ha travi a mensola e per il ponte di Spessa, i cui appoggi sono costituiti da 4 piloni a sezione circolare al posto di 6.



Figura 1. Fotografia che riprende una trave di campata, poggiante su due travi a mensola sorrette dai piloni (ponte di Spessa).

Tale schema statico risulta economico ed è lo schema statico tipico dei ponti a travata in calcestruzzo armato precompresso costruiti tra gli anni '60 ed '80. Tuttavia possiede delle debolezze che, probabilmente per mancanza di conoscenza, non sono state ben quantificate durante la progettazione delle opere.

La prima debolezza, che è legata intrinsecamente allo schema statico, riguarda il posizionamento dei piloni. Anche utilizzando dei cavi di precompressione all'interno delle travi in calcestruzzo armato, per ragioni economiche, la luce che esse arrivano a coprire rimane ridotta tra i 30 e i 40 metri. Anche aggiungendo la luce delle due travi a mensola (10 o 15 metri per ogni lato di ogni appoggio) è evidente che la distanza tra due appoggi consecutivi può difficilmente essere maggiore di 60 o 70 metri. Questo comporta la necessità, nel caso di un attraversamento fluviale di un fiume dalle dimensioni del Po, di avere degli appoggi in alveo, ovvero in quella parte del letto fluviale generalmente percorsa dall'acqua.

L'utilizzo di appoggi in alveo causa il fenomeno idraulico che viene chiamato scalzamento. Il flusso d'acqua, impattando contro i piloni del ponte, erode il terreno in fondazione scavando delle vere e proprie buche che possono "scalzare" la fondazione dalla sua sede. Tale fenomeno è noto da tempo ma il suo studio richiede notevoli sforzi, sia approcciando il fenomeno in maniera sperimentale sia tramite un approccio numerico. Se il fenomeno dello scalzamento non viene contrastato, può portare al collasso questa tipologia di ponte¹⁰.

¹⁰ Ballio, F., Bianchi, A., Pranzetti, S., De Falco, F. & Mancini, M. (1999). "Vulnerabilità idraulica dei ponti fluviali", Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Catania, Vol. 3, 69-79.

Un problema aggiuntivo, per quanto riguarda il fiume Po, è la presenza di detriti. Difatti, durante le piene, il fiume Po trascina con sé grandi quantità di rami e detriti di vario tipo che si depositano contro i piloni (Figura 2).



Figura 2. “Isole di detriti” formati contro i piloni del ponte di Pieve Porto Morone a causa della presenza dei piloni in alveo.

Tale deposito di detriti causa un incremento della sezione idraulica del pilone che porta ad un incremento considerevole della velocità di erosione del fondale. Appare evidente l'importanza di considerare la possibile presenza di detriti in una valutazione del fenomeno di scalzamento¹¹. Tuttavia, un metodo scientifico e riconosciuto non è ancora disponibile per la difficoltà di trattare le incertezze legate al fenomeno¹².

La seconda debolezza, che come la prima è legata intrinsecamente allo schema statico, riguarda il collegamento della trave di campata con le strutture verticali (appoggio diretto, come nel caso del ponte di Pieve del Cairo) o tramite una trave a mensola (come per gli altri ponti). In entrambi i casi l'appoggio della trave di campata viene operato tramite una serie di mensole tozze chiamate, in linguaggio tecnico, selle Gerber (Figura 3). Tali mensole sono delle parti strutturali di dimensioni ridotte, rispetto alle dimensioni dell'intera trave di campata ma rivestono una grande importanza. Difatti, data l'isostaticità dello schema statico, la rottura di una di queste parti strutturali porta all'immediato collasso della trave di campata.

¹¹ Malerba, P.G., Garavaglia, E. & Sgambi, L. (2011). Fuzzy-Monte Carlo simulation for the safety assessment of bridge piers in presence of scouring. 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics. Seoul, Korea, 18-22 Settembre 2011, pp. 558-606.

¹² Sgambi, L., Basso, N. & Garavaglia, E. (2018). Fuzzy Monte Carlo based reliability analysis of bridge piers subject to scour. IALCCE18 6th Int. Symp. on Life-Cycle Civil Engineering, Ghent, Belgio, 28-31 Ottobre 2018, pp. 2017-2024.



Figura 3. Immagine della sella Gerber del ponte di San Nazzaro.

Il crollo del ponte di Annone, sulla SS36, avvenuto nell'ottobre del 2016 è un esempio di crollo causato dal cedimento di una di queste mensole tozze.

Se è vero che i ponti costruiti tramite uno schema a selle Gerber risultano economici e relativamente semplici da costruire è anche vero che la sella Gerber risulta un elemento molto più sensibile al degrado strutturale rispetto ad altre parti del ponte questo perché, in corrispondenza delle selle Gerber, vengono inseriti i giunti di dilatazione del ponte. Un drenaggio delle acque non ben progettato o ostruito provoca lo sversamento delle acque piovane in corrispondenza dei giunti e quindi direttamente sopra le selle Gerber.

I fenomeni di degrado riscontrati

In questo paragrafo vengono mostrati e commentati alcuni aspetti tipici del degrado strutturale che si sono riscontrati nei ponti in calcestruzzo armato elencati in Tabella 2. Come si potrà notare, tutti i degradi che saranno messi in evidenza hanno un denominatore comune: la presenza dell'acqua.

Degrado delle selle Gerber

L'acqua proveniente dalla piattaforma stradale risulta spesso carica di sostanze inquinanti, derivanti dal dilavamento del manto bituminoso della piattaforma stradale o, peggio ancora, dai sali disciolti. È difatti comune, durante i mesi invernali, gettare del sale (cloruro) sulla strada per impedire la formazione di lastre di ghiaccio durante le ore più fredde. Il sale si scioglie (liberando ioni di cloro) nelle acque piovane raccolte sulla piattaforma e, teoricamente, viene espulso insieme all'acqua dal sistema di drenaggio.

Purtroppo, spesso accade che il sistema di raccolta delle acque non funzioni correttamente (ad esempio, le bocchette potrebbero essere ostruite da foglie e polvere) e in questo caso l'acqua di piattaforma trova un'altra via per lasciare il ponte. Poiché ad ogni estremità di ogni impalcato, costruito secondo lo schema strutturale messo in evidenza nel paragrafo precedente, vi è un giunto, l'acqua filtra attraverso il giunto per riversarsi sulle strutture che stanno al di sotto di esso: un pulvino di appoggio o una sella Gerber (Figura 4).



Figura 4. Degrado del calcestruzzo e corrosione delle armature in corrispondenza di una sella Gerber del ponte di Pieve Porto Morone.

Una minima parte d'acqua penetra all'interno del calcestruzzo a causa della porosità dello stesso e permette agli ioni cloro di diffondersi all'interno della massa. Quando la concentrazione di cloro a livello dell'armatura raggiunge un valore critico, inizia il processo di corrosione: la barra di armatura corrosa diminuisce di area resistente e il volume occupato da essa aumenta (a causa dei prodotti della corrosione). Questo aumento di volume causa la fessurazione prima e il distacco poi, del copriferro (fenomeno di spalling) e un aumento successivo della velocità di corrosione in quanto da questo momento in poi le armature sono direttamente esposte agli agenti patogeni (Figura 4).

Purtroppo non è facile quantificare il danno strutturale prodotto da questo degrado con una sola visita ispettiva al manufatto senza conoscere l'esatta posizione delle armature. Difatti

esistono due modi classici per dimensionare una sella Gerber. Il primo prevede l'utilizzo di barre disposte vicino alla superficie orizzontale della sella, il secondo prevede l'utilizzo di barre inclinate disposte all'interno della sella stessa. Nel primo caso, un degrado come quello mostrato in Figura 4 potrebbe essere preoccupante. Nel secondo caso, lo stesso degrado, potrebbe non essere indice di un pericolo strutturale.

Corrosione dei cavi di precompressione

Lo schema statico di questi ponti stradali è tipico di una struttura in calcestruzzo armato precompresso, con cavi di acciaio passanti all'interno della sezione di calcestruzzo. Tali cavi, possono avere un andamento parabolico lungo l'altezza della trave o essere disposti nella parte inferiore delle travi stesse. Appare evidente che i cavi di precompressione rappresentano una delle armature principali della trave e la loro presenza è di fondamentale importanza per equilibrare le azioni derivanti dai carichi esterni.

Per quanto detto nella prima parte della pubblicazione, i cavi di precompressione sono molto sensibili ai fenomeni di degrado. Al giorno d'oggi, travi di questo tipo, sono particolarmente curate negli aspetti di dettaglio dove si garantisce uno spessore di copriferro minimo relativamente elevato per impedire che gli agenti patogeni raggiungano in breve tempo i trefoli del cavo.

Se lo spessore di copriferro non è adeguato, se l'indurimento del calcestruzzo non viene ben curato, o se il calcestruzzo è eccessivamente poroso, un tipico fenomeno di corrosione che può verificarsi è appunto la corrosione dei cavi di precompressione (Figura 5).



Figura 5. Corrosione dei cavi di precompressione lungo il viadotto di accesso al ponte di Pieve Porto Morone.

In Figura 5 un'immagine di corrosione dei cavi di precompressione riscontrata durante il sopralluogo al viadotto di accesso al Ponte di Pieve Porto Morone. La foto è stata scattata dal basso verso l'alto ed evidenzia il distacco del copriferro sulla parte destra della trave, la corrosione dei trefoli di armatura e, in alcuni punti, la rottura degli stessi. Un degrado di questo tipo richiederebbe un intervento manutentivo immediato in quanto la capacità portante della struttura è visibilmente compromessa.



Figura 6. Corrosione dei cavi di precompressione lungo il viadotto di accesso al ponte di San Daniele.

Una situazione analoga si è presentata durante il sopralluogo ai viadotti di accesso al ponte di San Daniele. In questo caso il degrado aveva provocato il distacco di parte del copriferro inferiore della trave con la messa in esposizione delle guaine di protezione dei trefoli (Figura 6). Da notare che i viadotti di accesso al ponte di San Daniele avevano già subito interventi di riparazione per problemi analoghi (sono presenti delle piattabande in acciaio in rinforzo e in protezione della parte inferiore di molte travi).

Degrado delle pile in alveo

Sempre al ponte San Daniele è stato possibile rilevare un caso di corrosione delle pile in alveo (Figura 7). Come evidenziato nella prima parte della pubblicazione, perché ci sia corrosione delle armature sono necessari due ingredienti: l'ossigeno e l'acqua. Una struttura in calcestruzzo armato, generalmente si corrode perché l'ossigeno, presente nell'atmosfera, e l'acqua, derivante ad esempio dalla pioggia, penetrano all'interno della massa di calcestruzzo a causa della porosità e delle fessure presenti nella struttura. Una struttura in calcestruzzo armato in un ambiente molto secco o in un ambiente completamente sommerso, non soffrirà di corrosione perché mancherà uno dei due ingredienti (ossigeno o acqua) necessari a sviluppare la reazione di ossidazione delle armature.

Una struttura che a volte è immersa in acqua e a volte è esposta all'atmosfera risulta, al contrario, molto soggetta alla corrosione.



Figura 7. Corrosione delle pile in alveo al ponte di San Daniele.

Questo è il caso delle pile da ponte in alveo dove, al livello dell'acqua, si verifica proprio questa condizione. Si noti come, in Figura 7, la corrosione risulti solamente nella parte inferiore (a contatto con l'acqua) della pila. Nel caso rappresentato in figura, la corrosione è anche accentuata da un probabile spessore ridotto del copriferro.

Mancanza o rotture di un adeguato sistema di drenaggio

Le acque provenienti dalla piattaforma stradale sono pericolose per la struttura in calcestruzzo armato e devono essere evacuate in modo che non entrino in contatto col calcestruzzo. Tale evacuazione viene solitamente eseguita tramite il progetto e la realizzazione di un adeguato numero di bocchette di scolo a lato della piattaforma stradale che raccolgono le acque e le convogliano all'interno di tubi di drenaggio atti a scaricarle lontano dalla struttura.

Senza eseguire calcoli di economia, appare evidente che il costo di un sistema di drenaggio efficiente (messa in opera di tubi in PVC lungo tutto lo sviluppo del ponte) è di qualche ordine di grandezza inferiore al costo di costruzione dell'intera infrastruttura. Tuttavia la loro importanza non è per nulla trascurabile. Un sistema di drenaggio assente o mal funzionante può causare un danno alla struttura notevolmente superiore al costo stesso del sistema di drenaggio.



Figura 8. Mancanza dei tubi di drenaggio delle acque di piattaforma (?) che causa lo sversamento delle acque sul pulvino causando la corrosione delle armature e il successivo distacco di parti del copriferro presso il viadotto di accesso al ponte di Ficarolo.



Figura 9. Pluviale di scarico delle acque di piattaforma che riversa le acque su di una sella Gerber presso il viadotto di accesso al ponte di Ficarolo.

Le figure 8 e 9 si riferiscono proprio ad una situazione di questo tipo. In Figura 8 si riesce a scorgere un foro di drenaggio (l'altro lo si può ipotizzare) presente nella soletta del ponte. Tuttavia i tubi di drenaggio sono da tempo mancanti (o mai posizionati). L'acqua piovana raccolta dalla piattaforma si riversa sul pulvino sottostante causando la corrosione delle barre di armatura e il successivo distacco del copriferro. In figura 9 si riporta invece una fotografia emblematica scattata sempre durante il sopralluogo al viadotto di accesso al ponte di Ficarolo. Un tubo di drenaggio, questa volta presente, ma posizionato in modo da riversare l'acqua drenata contro una sella Gerber, realizzando una situazione paradossale. Le acque di piattaforma, pericolose per il calcestruzzo, vengono riversate contro l'elemento di struttura più delicato per la stabilità del ponte. Agli autori rimane la speranza che tale sistema di drenaggio non sia più in funzione o che il momento dello scatto della foto si sia verificato durante un intervento di manutenzione atto a riparare il sistema di drenaggio.

Conclusioni

Questa pubblicazione riprende una ricerca, condotta dal gruppo del prof. Malerba del Politecnico di Milano (di cui faceva parte uno degli autori di questo articolo), relativa allo stato di degrado di alcuni ponti sul fiume Po, presenti in territorio lombardo. Vengono riprese alcune foto, scattate durante i vari sopralluoghi effettuati e commentate alla luce di alcuni

aspetti teorici relativi ai fenomeni di degrado delle strutture, messi in evidenza nella prima parte della pubblicazione.

Tale pubblicazione non vuole rappresentare lo stato attuale delle infrastrutture ispezionate, in quanto la regione Lombardia è già intervenuta per sanare i casi di degrado più importanti, ma vuole essere un esempio di tipologie di degrado, che si verificano nei ponti stradali in calcestruzzo armato.

Questa pubblicazione intende anche essere un richiamo a non abbassare mai la guardia. Negli ultimi decenni troppo poco è stato fatto da enti pubblici e privati in ambito di manutenzione delle infrastrutture. Se negli anni '40 potevamo permetterci di pensare al calcestruzzo armato come ad un materiale eterno, oggi non ce lo possiamo più permettere. Le conoscenze si sono evolute: sappiamo che il calcestruzzo, come ogni altro materiale, si degrada. Possediamo modelli matematici in grado di predire i fenomeni di carbonatazione, di diffusione dei cloruri, di corrosione. Siamo in grado di eseguire delle simulazioni numeriche per avere, in base ai dettagli di un progetto, una stima di quando una struttura potrà avere bisogno di manutenzione e pianificarla già in fase di progetto.

Oggi abbiamo un quadro normativo molto preciso che obbliga gli enti che hanno in carico l'infrastruttura ad eseguire visite ispettive e manutenzione. Oggi? In realtà il primo quadro normativo italiano, che poneva l'accento sull'importanza della manutenzione, che obbligava gli enti a svolgere dei controlli ispettivi con scadenze temporali, che differenziava il controllo ispettivo di routine da un controllo ispettivo straordinario, che imponeva agli enti di redigere il quaderno "Controllo periodico stabilità opere d'arte", è datato 1967¹³.

Nella premessa di tale normativa si legge: "Recenti gravi avvenimenti interessanti la stabilità di opere d'arte e manufatti stradali ripropongono la considerazione della necessità di organizzare nel modo più efficiente il necessario controllo periodico delle condizioni statiche delle opere stesse".

Tale indicazione, alla luce del grave crollo del ponte Morandi del 14 agosto 2018, causato anche da mancanze in ambito manutentivo, ci fa amaramente riflettere. Ancora di più se si pensa alla beffa delle date. Il ponte Morandi venne inaugurato proprio nel 1967, lo stesso anno della pubblicazione della prima normativa, in base all'esperienza degli autori, per certi versi ancora inascoltata, sui controlli ispettivi alle opere d'arte.

In questo senso qualche cosa, in Italia, deve cambiare. Abbiamo le conoscenze, abbiamo gli strumenti di calcolo, abbiamo le normative... eppure non ci prendiamo sufficientemente cura delle nostre infrastrutture, che continuano ad invecchiare, in certi casi con conseguenze molto gravi.

¹³ Circ. Min. LL.PP., STC, n. 6736/61/Al del 19.07.1967: "Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali".

Bibliografia

- P. G. Malerba, *Inspecting and repairing old bridges: Experiences and lessons*, in "Structure and Infrastructure Engineering", 2014, volume 10, numero 4, pp. 443-470.
- L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. P. Polder, *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*, Edizioni WILEY-VCH, Weinheim, 2004.
- K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete*, in "CBI Research Report", Swedish Foundation for Concrete Research, Stoccolma, 1982.
- E. Vesikari, *Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*, in "Research Report", Technical Research Center of Finland (VTT), Espoo, 1988.
- A. Sarja, E. Vesikari, *Durability design of concrete structures*, in "RILEM Report", RILEM Technical Committee 130-CSL, E. & F.N. Spon, London, 1996.
- M. Boulfiza, K. Sakai, N. Banthia, H. Yoshida, *Prediction of chloride ions ingress in uncracked and cracked concrete*, in "ACI Materials Journal", 2003, numero 100, volume 1, pp. 38-48.
- P. G. Malerba, L. Sgambi, G. Gotti, D. Ielmini, *The influence of degradation phenomena on collapse modes in prestressed concrete beams*, in "International Journal of Lifecycle Performance Engineering", 2012, volume 1, numero 1, pp. 41-63.
- P. G. Malerba, L. Sgambi, D. Ielmini, G. Gotti, *Influence of Corrosive Phenomena on the bearing capacity and failure mechanisms of RC and PC beams*. In "Advances in Concrete Construction", 2017, volume 5, numero 2, pp. 117-143.
- P. G. Malerba, L. Sgambi, G. Becciu, M. Quagliaroli, N. Basso, M. P. Boni, E. Garavaglia, M. Lualdi, F. Torta, E. Saponaro, G. Galli, R. Bruno, A. Ceriani, L. Penatti, *Valutazione del ciclo di vita delle infrastrutture sensibili*, Eupolis Lombardia, 2013.
- F. Ballio, A. Bianchi, S. Pranzetti, F. De Falco, M. Mancini, *Vulnerabilità idraulica dei ponti fluviali*, in "Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche", 1999, volume 3, pp. 69-79.
- P. G. Malerba, E. Garavaglia, L. Sgambi, *Fuzzy-Monte Carlo simulation for the safety assessment of bridge piers in presence of scouring*, in "2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics". 2011, pp. 558-606.
- L. Sgambi, N. Basso, E. Garavaglia, (2018). *Fuzzy Monte Carlo based reliability analysis of bridge piers subject to scour*, in "IALCCE18 6th Int. Symp. on Life-Cycle Civil Engineering", 2018, pp. 2017-2024.
- Circ. Min. LL.PP., *Controllo delle condizioni di stabilità delle opere d'arte stradali*, numero 6736/61/AI, 1967.