

Fenomeni di corrosione delle infrastrutture metalliche di rilevanza storica

T. Pastore, M. Cabrini, S. Lorenzi, E. Rizzi, R. Ferrari, L. Coppola, G. Spirolazzi, G. Pisanelli, C. Cioffi, E. Lizzori

La memoria presenta una panoramica sui fenomeni di corrosione di una infrastruttura metallica chiodata di importanza storica. Si analizzano le morfologie dei processi di degrado di lungo periodo, in relazione alla conformazione degli elementi strutturali, alle soluzioni di giunzione adottate, alla selezione dei sistemi di protezione e manutenzione.

PAROLE CHIAVE: CORROSIONE NEL CALCESTRUZZO, CARBONATAZIONE DEL CALCESTRUZZO, INIBITORI DI CORROSIONE, NITRATO, NITRITO.

INTRODUZIONE

In tutto il mondo, e anche in Italia, sono tuttora in servizio ponti metallici di rilevante importanza storica ed infrastrutturale, chiamati ancora oggi a soddisfare i requisiti di sicurezza e di gestione originariamente previsti, in un contesto decisamente differente. Per queste infrastrutture, i fenomeni di corrosione rivestono un ruolo determinante, sia riguardante il mantenimento dell'aspetto estetico - sicuramente fondamentale per opere di rilevanza storica - sia verso la preservazione funzionale dell'opera stessa, senza poter apportare, peraltro, modifiche significative dell'assetto strutturale, per gli esistenti stretti vincoli paesaggistici e di tutela dei beni culturali, cui tali opere sono generalmente sottoposte. La diagnostica, il monitoraggio continuo e l'attuazione di un protocollo efficace di ispezione della corrosione rappresenta il supporto necessario alla gestione della manutenzione di tali infrastrutture, alla definizione delle strategie di gestione più opportune e alla valutazione delle condizioni di sollecitazione reali della struttura, così come esse derivano anche dall'inevitabile danneggiamento prodottosi durante la lunga vita operativa trascorsa.

Tra le opere di maggiore interesse in tale ambito vi è indubbiamente il ponte San Michele (1889) tra Paderno d'Adda, sulla sponda lecchese del fiume Adda, e Calusco d'Adda, sulla sponda bergamasca. Il ponte condivide con altre strutture analoghe di dimensione transnazionale sociale, culturale, la testimonianza dello sviluppo tecnolo-

**T. Pastore, M. Cabrini, S. Lorenzi, E. Rizzi,
R. Ferrari, L. Coppola**

Dip. di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli Studi di Bergamo

G. Spirolazzi, G. Pisanelli, C. Cioffi, E. Lizzori

RFI, Milano

gico e industriale della società moderna italiana ed europea, affiancandosi, in importanza, ad altri ponti ad arco del XIX secolo, tra i quali il viadotto di Garabit (Eiffel 1984), in Francia, il ponte di Münstereifel (von Rieppel, 1897), in Germania, i ponti portoghesi di Maria Pia (Seyrig, 1877) e Dom Luís I (Seyrig, 1886) di Porto.

Il lavoro descrive le principali forme di corrosione che oggi si rilevano sul Ponte San Michele, discutendo le caratteristiche principali di tali fenomeni, che dovranno essere necessariamente considerate per il recupero, il ripristino, la manutenzione e la gestione di un sistema di protezione dalla corrosione.

IL PONTE SAN MICHELE E IL SUO SISTEMA DI PROTEZIONE

Il ponte San Michele è un ponte ad arco in ferro, ferroviario e stradale, costruito in soli due anni, tra il 1887 e il 1889, anno di apertura, dalla Società Nazionale Officine di Savigliano (Cuneo), su progetto dell'Ingegnere svizzero Jules Röthlisberger. Costruito su di una gola del fiume Adda, è alto 85 metri sul livello del fiume, lungo 266 m, costituito da 2515 t di ferro pudellato, oltre a 110 t di ghisa [1]. Il ponte è stato fatto oggetto di campagne di studio, nei tempi più recenti, ai fini di indagare le sue caratteristiche e funzionalità strutturali [2]–Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.. Durante la sua lunga vita operativa, di 130 anni, la protezione del ponte San Michele è stata attuata con l'applicazione di un rivestimento protettivo, completato immediatamente dopo la fine della costruzione e il suo rifacimento, solo con intervalli molto lunghi, dopo il distacco pressoché completo dello stato protettivo. L'approccio di fatto seguito si basa su rivestimenti di alta durabilità, in modo da prevedere una lunga azione protettiva, e la contemporanea adozione di un adeguato sovrappessore di corrosione, cioè uno spessore degli elementi strutturali maggiore rispetto a quello strettamente necessario per la sussistenza dell'opera. La definizione di tale sovrappessore è oggi ricompresa nelle norme tecniche sulle strutture metalliche; per il passato, era di fatto assicurato dalla ridondanza della struttura, in modo non del tutto consapevole, soprattutto in un'epoca, quella di costruzione del ponte, in cui i processi di corrosione non erano certamente noti come oggi. Tale approccio, basato su di una ridotta manutenzione del rivestimento, riduce

nel tempo il sovrappessore di corrosione degli elementi strutturali e, alla lunga, limita inevitabilmente la vita residua dell'opera.

Gli unici interventi certi di pitturazione risalgono all'ultimazione dell'opera, nel 1890, e all'immediato dopoguerra, quando è stato realizzato l'ultimo intervento completo di ripristino, nell'anno 1953. Nel 1992, l'interruzione dei lavori mentre era in corso il rifacimento con un ciclo ad alte prestazioni, dopo sabbiatura della superficie, ha limitato l'intervento solo ad alcune campate della travata, lato Calusco, che oggi appaiono di colore diverso.

LE FORME DI CORROSIONE ATTIVE SUL PONTE

Le principali forme di corrosione riscontrabili oggi sul ponte di Paderno d'Adda appaiono riconducibili alla corrosione generalizzata non uniforme, alla *Poultice corrosion* o corrosione in zone di raccolta di sporcizia e di ristagno dell'acqua e alla corrosione in fessura.

La morfologia di corrosione più evidente riscontrata sul ponte è quella di tipo generalizzato, legata essenzialmente all'esposizione ambientale della struttura all'atmosfera umida, su di una superficie lasciata scoperta dal progressivo danneggiamento del rivestimento protettivo. In zone singolari, la corrosione assume un carattere spiccatamente non uniforme, con assottigliamenti più marcati di quelli osservabili in media sulla struttura, come nell'esempio riportato in

Fig. 1a. La corrosione generalizzata risulta direttamente osservabile su tutti gli elementi della struttura, fatta eccezione per la porzione sottoposta agli interventi del 1992, dove il rivestimento, ancora relativamente continuo, lascia visibili tracce di corrosione solo in corrispondenza delle fessure tra le parti chiodate, dove la rottura del rivestimento mostra segni del procedere dell'attacco al loro interno. Nell'impossibilità di operare valutazioni sperimentali, a causa della lunga durata richiesta da queste prove, la stima della corrosività ambientale è stata ottenuta mediante le relazioni empiriche riportate nelle norme tecniche UNI EN ISO 9223 e EN ISO 9224, che legano la velocità di corrosione attesa nel primo anno ai parametri ambientali di temperatura, umidità relativa media, deposizione sulla superficie del metallo di cloruri e di SO₂ [8]. In base a questa valutazione ambientale si possono assumere condizioni di aggressività medio-bassa.

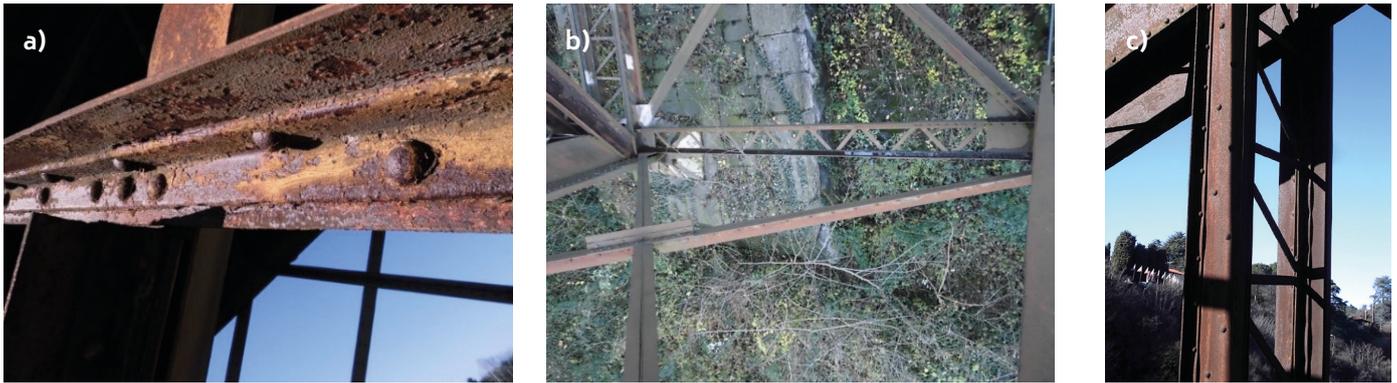


Fig.1 - Corrosione generalizzata a); poulitice corrosion in elementi obliqui con sezione a "L" b); e verticali c) – General corrosion a); poulitice corrosion in oblique "L" shaped elements b); and vertical elements c).

In zone particolari della struttura, il danneggiamento è più accentuato per l'instaurarsi di un particolare microclima. Per un design non adeguato, in queste zone si manifesta un ristagno di acqua per periodi prolungati e, soprattutto, si presentano condizioni favorevoli alla condensazione di umidità per capillarità nei depositi che vi si accumulano, il tutto aggravato dalla raccolta di sali e inquinanti atmosferici. Tali sostanze possono accumularsi nel tempo e il loro dilavamento ad opera delle precipitazioni meteoriche non avviene in modo efficace. La

Fig. 1(b e c) mostra una tipica situazione in corrispondenza di elementi obliqui o, ancora di più, di quelli orizzontali, ove la raccolta e l'accumulo di detriti e sporcizia è inevitabile per profili con geometria a "L" e a "U" con concavità rivolta verso l'alto. La stessa situazione si riscontra anche su elementi verticali. La formazione di uno strato di "sporcizia" a diretto contatto con la superficie metallica costituisce un mezzo poroso, con interstizi di dimensione capillare tra una particella e l'altra, in cui può avvenire la condensazione "per capillarità", a livelli di umidità di molto inferiore a quella di saturazione. Questo porta alla presenza continua di un elettrolita a contatto con il metallo, con una condizione di bagnamento più accentuato, del tutto differente da quello delle parti esterne, a diretto contatto con l'aria. La presenza di sali igroscopici all'interno del particolato solido facilita ancor di più tale bagnamento continuo, dando inoltre luogo a una fase ac-

quosa salina e aggressiva. A questo si può aggiungere poi anche l'azione di polveri elettroattive (quali quelle carboniose prodotte dai processi di combustione dei motori) che stimolano la corrosione per accoppiamento galvanico, poiché costituiscono catodi efficaci per i fenomeni di riduzione dell'ossigeno. In questo contesto si possono raggiungere velocità di corrosione decisamente rilevanti, favorisce la formazione di coppie galvaniche sulla superficie del metallo, tra aree con differente areazione, conducendo così ad attacchi fortemente disomogenei e localmente più accentuati.

Sugli elementi "sottili" del ponte, all'interno delle fessure degli elementi chiodati, l'attacco avviene per corrosione in fessura (Fig. 2). Questo tipo di attacco interessa interstizi di ampiezza 0.1-3 mm, tale da permettere la penetrazione di acqua, impedirne poi la fuoriuscita e ostacolare l'accesso di ossigeno verso le zone distanti dall'imbocco. La corrosione all'interno della fessura si somma a quella atmosferica che coinvolge le superfici esterne della giunzione stessa. Inoltre, può produrre una deformazione dell'elemento chiodato a opera dei prodotti di corrosione espansivi generati nella fessura, determinando il "pack rust". Ne consegue che la risposta strutturale dell'elemento non solo può risultare alterata dall'assottigliamento, ma anche dalla deformazione indotta nell'elemento stesso, dovuta all'accumulo dei prodotti di corrosione nella fessura.

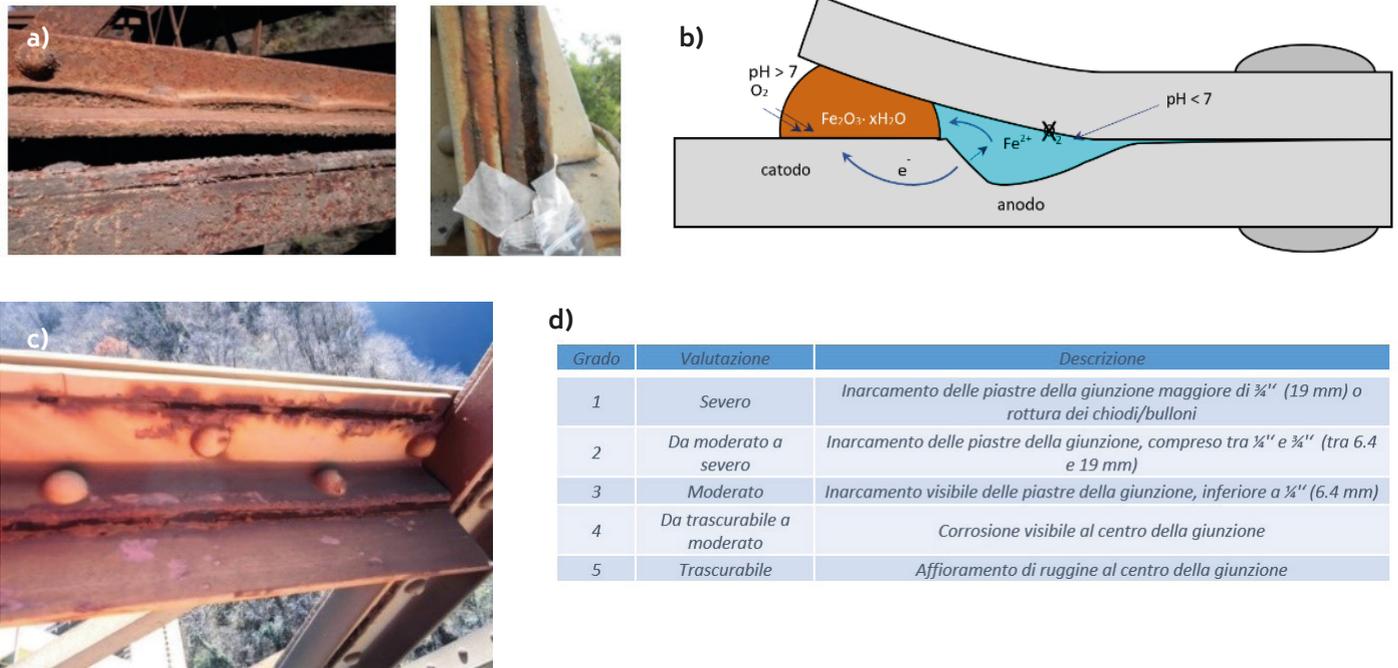


Fig.2 - Deformazione degli elementi chiodati dovuta alla corrosione in fessura a) e meccanismo di corrosione nelle zone di giunzione o schermate b). Effetto dell'applicazione di sigillanti all'imbocco delle fessure c) e gradi di danneggiamento d) – Riveted elements deformation due to crevice corrosion a); corrosion mechanism at riveted joints b). Effect of sealers applied at crevice mouth c) and damage ranking d).

Il meccanismo di corrosione in fessura si avvia con la penetrazione di acqua e, in condizioni favorevoli, i prodotti di corrosione che ne derivano si compattano nella fessura e di fatto la sigillano. In questa evenienza, la corrosione avviene unicamente all'esterno e rimane trascurabile nella fessura. In elementi sottili, fissati con chiodi troppo distanziati tra loro, questo non accade e la formazione di prodotti di corrosione espansivi può invece imbozzare gli elementi affacciati. La fessura si allarga, favorendo così un'ulteriore penetrazione di acqua e ossigeno dall'esterno. Quando ciò avviene, sono gli stessi prodotti di corrosione che facilitano, per la loro natura porosa, la condensazione dell'umidità, trattengono l'acqua e le specie aggressive in essa disciolte; in tale elettrolita, composto da una rilevante componente solida, l'attacco per corrosione può agire con continuità. La conformazione della fessura, poi, induce una coppia galvanica (Fig. 2b) tra le aree catodiche poste in prossimità dell'imbocco, dove l'ossigeno arriva in modo agevole, e le zone anodiche poste più in profondità, dove l'accesso è impedito. Si produce un attacco localizzato in un'area distante dall'imbocco di circa una volta, una volta e mezzo l'apertura della fessura. L'assottigliamento può raggiungere un'entità rilevante. Il pH dell'ambiente nella zona anodica diminuisce e au-

menta la solubilità degli ioni ferro alla superficie del metallo ove questo si corrode. Si ha così un meccanismo autocatalitico difficile da bloccare con interventi esterni che non siano in grado di agire direttamente sul processo. Quest'ultimo aspetto è ben evidenziato dalle immagini che si hanno della parte del ponte sottoposta agli interventi di manutenzione del 1992 (Fig. 2c). In questi interventi, quantunque si sia scelto un ciclo ad elevate prestazioni, applicato su di un substrato preparato in modo accurato per sabbiatura, non si è bloccata la corrosione in fessura e, oggi, appaiono evidenti i segni esterni dell'attacco. L'intervento di pitturazione effettuato a quell'epoca mostra traccia dell'applicazione di un sigillante non penetrante nella fessura, tuttavia insufficiente per estendere la durata della protezione.

L'entità del "pack rust" sulle opere chiodate e imbullonate è usualmente valutata in base all'allargamento indotto nella fessura. Nel Nord America [9-10] si utilizza la scala riportata in Fig. 2d. Sulla struttura del ponte si possono osservare diversi esempi di corrosione con formazione di "pack rust" (Fig. 2c). Ovviamente, non è visibile l'entità dell'assottigliamento derivante da questa forma di corrosione.

L'imbozzamento degli elementi, che si traduce su alcu-

ni elementi in una caratteristica "festonatura" (Fig. 2a), è il risultato dell'accumulo dei prodotti di corrosione che, rigonfiandosi, provocano la deformazione degli elementi snelli nelle zone lontane dai chiodi, che agiscono come punti di chiusura che contrastano tale processo. Tali fenomeni assumono una particolare intensità qualora la spaziatura limiti l'effetto di confinamento. Viceversa, negli elementi di elevato spessore e adeguata spaziatura tra i chiodi, come per le parti più importanti dell'arco e per gli elementi delle pile, l'imbozzamento resta assente e l'attacco in fessura non riesce a svilupparsi (Fig. 2a).

CONCLUSIONI

La volontà di prolungare la vita di servizio del ponte pone

la necessità di attuare un approccio differente di gestione e manutenzione rispetto a quanto avvenuto in passato, necessariamente basato su cicli di manutenzione del rivestimento a intervalli ravvicinati, tanto più frequenti quanto più sottile sarà la stima del reale sovrappessore di corrosione residuo, in relazione alla velocità di corrosione attesa. Da qui, la necessità di valutare da un lato lo stato di danneggiamento e stimare e monitorare dall'altro la corrosività atmosferica agente sul ponte, rimuovendo le situazioni di alta aggressività connesse all'insorgenza di particolari microclimi e intervenendo sul design nelle zone di difficile accesso per l'applicazione del rivestimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nascè V., Zorgno A.M., Bertolini C., Carbone V.I., Pistone G., Roccati R. (1984). Il ponte di Paderno: storia e struttura - Conservazione dell'architettura in ferro. *Restauro*, Anno XIII, n. 73-74, 215 pagine.
- [2] Cabrini, M., Lorenzi, S., Marcassoli, P., Pastore, T. Effect of hydrogen diffusion on environmental assisted cracking of pipeline steels under cathodic protection [Effetto della diffusione dell'idrogeno sui fenomeni di environmental assisted cracking di acciai per pipeline in condizioni di protezione catodica] (2008) *Metallurgia Italiana*, 100 (2), pp. 15-22.
- [3] Pipinato A., Modena C. (2010) Structural analysis and fatigue reliability assessment of the Paderno Bridge. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, May 2010:109-124, doi:10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000037.
- [4] Gentile C., Saisi A. (2011) Ambient vibration testing and condition assessment of the Paderno iron arch bridge (1889). *Construction and Building Materials*, 25 (2011):3709-3720, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.019.
- [5] Ferrari R., Cocchetti G., Rizzi E. (2016) Limit Analysis of a historical iron arch bridge. Formulation and computational implementation. *Computers and Structures*, 175(15 October 2016):184-196, doi:10.1016-/j.compstruc.2016.05.007.
- [6] Ferrari R., Cocchetti G., Rizzi E. (2018) Computational elastoplastic Limit Analysis of the Paderno d'Adda bridge (Italy, 1889). *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18(1):291-310, doi:10.1016-/j.acme.2017.05.002.
- [7] Ferrari R., Cocchetti G., Rizzi E. (2019) Reference structural investigation on a 19th-century arch iron bridge loyal to design-stage conditions. *International Journal of Architectural Heritage*, Received 14 Jan 2019, Accepted 23 Apr 2019, Published online: 05 Jul 2019, doi.org/10.1080/15583058.2019.1613453.
- [8] Pedefferri P., Bertolini L., Pastore T., *Atmosfera*, in P. Pedefferri, L. Bertolini, *La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali*, McGraw-Hill, pp. 241-260, Milano, 1996.
- [9] FHWA, Corrosion Protection of Steel Bridges Publication No. FHWA-HIF-16-002 - Vol. 19 Steel Bridge Design Handbook, December 2015.
- [10] Chintan Hitesh Patel, M. D. Bowman, Pack Rust Identification and Mitigation Strategies for Steel Bridges, SPR-4121, Report FHWA/IN/JTRP-2018/16.

Corrosion phenomena of historic metallic infrastructures

The paper presents a general overview on typical corrosion phenomena of riveted metallic infrastructures of historic importance. A significant example is analyzed, in relation to the morphologies of long-term degradation processes, with respect to the design of the structural elements, the peculiarities of the joining solutions, the selection of protection and maintenance systems.

KEYWORDS: CORROSION, PROTECTION, METALS, HISTORIC INFRASTRUCTURES.