

Studio dei fenomeni di corrosione in fessura di ponti chiodati di valenza storica

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

Verso la fine del XIX secolo sono stati realizzate in tutto il mondo numerose strutture chiodate in acciaio, culminate con la maestosa torre Eiffel di Parigi. In Italia, particolare interesse storico e culturale ha indubbiamente il ponte San Michele, costruito nel 1889 tra Paderno d'Adda, sulla sponda lecchese del fiume Adda, e Calusco d'Adda, sulla sponda bergamasca. In oltre 130 anni di esercizio, la struttura è stata soggetta a diversi fenomeni di degrado. Da diversi anni sono in corso studi per valutarne lo stato di conservazione, la resistenza strutturale residua e gli interventi di ripristino e conservazione, di cui gli ultimi sono in via di conclusione. Tra gli studi effettuati particolare importanza assume lo studio dei fenomeni di corrosione in fessura che lo caratterizzano.

L'attacco per corrosione in fessura si verifica sugli elementi "sottili" del ponte, all'interno delle fessure degli elementi chiodati. Questo tipo di attacco interessa interstizi di ampiezza da 0,1 a 3 mm, tale da permettere la penetrazione dell'acqua, ma di impedirne la fuoriuscita, ostacolando allo stesso tempo l'accesso di ossigeno verso le zone distanti dall'imbocco. In questo modo, la corrosione all'interno della fessura si somma a quella atmosferica che coinvolge le superfici esterne della giunzione stessa, fino ad arrivare a produrre una deformazione dell'elemento chiodato a causa dell'azione espansiva dei prodotti di corrosione nella fessura, secondo un fenomeno conosciuto come "pack rust". Ne consegue che la risposta strutturale dell'elemento è alterata contemporaneamente dall'assottigliamento e dalla deformazione dovuta all'accumulo dei prodotti di corrosione.

Questo meccanismo autocatalitico è difficile da bloccare con interventi esterni che non siano in grado di agire direttamente sul processo. Per questo motivo, il presente lavoro offre un inquadramento generale dei fenomeni di corrosione che si riscontrano su infrastrutture metalliche chiodate di rilevanza storica, analizza esempi significativi di strutture metalliche in relazione alle morfologie di danneggiamento caratteristiche di processi di degrado sul lungo periodo e approfondisce la forma di corrosione per «pack rust» in una logica di valutazione e previsione della progressione di questo particolare e peculiare fenomeno localizzato. In questo modo è possibile valutare eventuali modifiche del processo di corrosione avvenuto nel corso degli anni, determinare la velocità media di avanzamento dell'attacco e studiare metodi più efficaci per il suo arresto, nel rispetto del valore storico/architettonico della struttura.

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

Università di Bergamo - Dipartimento di Ingegneria e Scienze
Applicate

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

RFI, Milano

PAROLE CHIAVE: CORROSIONE DELLE INFRASTRUTTURE, CORROSIONE IN FESSURA,
CORROSIONE DEI BENI CULTURALI, CORROSIONE ATMOSFERICA

INTRODUZIONE

Nel secolo scorso sono state costruite numerose infrastrutture che hanno ancora oggi un rilevante valore storico e architettonico, oltre a svolgere tuttora le funzioni previste in sede progettuale. Queste strutture comprendono 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 in cui le esigenze sono decisamente mutate. I fenomeni di corrosione rivestono un ruolo primario per quanto riguarda il mantenimento sia dell'aspetto estetico sia funzionale dell'opera stessa. A questo sia aggiunga che, per gli esistenti stretti vincoli paesaggistici e di tutela dei beni culturali, su tali opere non è possibile operare modifiche rilevanti dell'assetto strutturale. In tal senso, diventa ancor più rilevante il ruolo della diagnostica preventiva, del monitoraggio continuo e l'approntamento di fattive strategie ispettive riguardanti specificatamente la corrosione, per poter sostenere e gestire correttamente la manutenzione di tali infrastrutture, a garanzia della sicurezza e del mantenimento dell'efficienza per periodi di vita decisamente prolungati. In aggiunta, un approccio di tipo predittivo ben supporta strategie di gestione rispetto alla valutazione delle condizioni di sollecitazione reali della struttura, così come esse derivano anche dall'inevitabile danneggiamento prodottosi durante la vita operativa trascorsa,

I FENOMENI DI CORROSIONE CHE INTERESSANO IL PONTE SAN MICHELE

Il ponte San Michele è stato costruito dal 1887 al 1889 tra Paderno e Calusco, a congiungere la sponda lecchese del fiume Adda con quella bergamasca. Il ponte ben si colloca tra le opere di rilevante valore storico e ingegneristico. È un ponte ad arco in ferro, ferroviario e stradale realizzato dalla Società Nazionale Officine di Savigliano (Cuneo), su progetto dell'Ingegnere svizzero Jules Röthlisberger. 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].

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, nel 1890. Escludendo le attività in corso, interventi di pitturazione completa successivi alla realizzazione del rivestimento iniziale risalgono all'immediato dopoguerra, nell'anno 1953. È stato poi

particolarmente lunga per le strutture di rilevanza storica. Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi relativi al comportamento statico e sui fenomeni di corrosione attivi sull'opera, per indagare sia le sue caratteristiche e funzionalità strutturali sia l'efficacia di strategie di protezione capaci di limitare o persino bloccare i processi di corrosione [2-6].

Il lavoro offre un inquadramento generale dei fenomeni di corrosione che si riscontrano su infrastrutture metalliche chiodate di rilevanza storica, analizza esempi significativi di strutture metalliche in relazione alle morfologie di danneggiamento caratteristiche di processi di degrado sul lungo periodo e approfondisce la forma di corrosione per «pack rust» in una logica di valutazione e previsione della progressione di questo particolare e peculiare fenomeno localizzato. In questo modo è possibile valutare eventuali modifiche del processo di corrosione avvenuto nel corso degli anni, determinare la velocità media di avanzamento dell'attacco e studiare metodi più efficaci per il suo arresto, nel rispetto del valore storico/architettonico della struttura. Al fine di valutare lo stato di sollecitazione nell'elemento indotto dall'espansione promossa dai prodotti di corrosione è stata condotta uno studio mediante simulazioni agli elementi finiti.

iniziato un intervento di ripristino nel 1992, tuttavia i lavori si sono interrotti e l'intervento è stato limitato solo ad alcune campate della travata, con un ciclo ad alte prestazioni, dopo sabbiatura della superficie.

Nei fatti, quindi, la protezione della struttura nel corso degli anni si è basata essenzialmente sull'adozione di un iniziale elevato sovrappessore di corrosione, dato dal sovradimensionamento degli elementi strutturali rispetto allo spessore necessario a fini strutturali. Questo ha consentito al ponte di sostenere l'assottigliamento degli elementi nelle zone lasciate scoperte dal decadimento del ciclo di pitturazione, durante la lunga vita di servizio dell'opera. Oggi, la definizione di tale sovrappessore è ricompresa nelle norme tecniche sulle strutture metalliche. Nel passato era di fatto assicurato dalla ridondanza della struttura, quindi spesso realizzato in modo non del tutto consape-

vole. Le problematiche di corrosione, ai tempi della realizzazione del ponte, di certo, non erano note o prevedibili come oggi.

La corrosione avvenuta nel corso della lunga vita di servizio del ponte ha inevitabilmente ridotto nel tempo questo sovrappessore di corrosione rendendo così oggi necessari interventi con sistemi e strategie di protezione differenti dal passato, in grado di continuare ad assicurare una piena affidabilità della struttura per i compiti che sarà chiamata ad assolvere.

Sul ponte si sono potute evidenziare diverse forme di corrosione, tutte riferibili a morfologie caratteristiche ma che hanno avuto modo di esplicarsi per un periodo di tempo rilevante. Le principali sono riconducibili alla corrosione generalizzata non uniforme, alla poultrice corrosion o corrosione in zone di raccolta di sporcizia e di ristagno dell'acqua e alla corrosione in fessura.

Tra le tre morfologie, quella in fessura è la più rilevante in termini di conseguenze (Fig. 1). Interessa specialmente gli elementi "sottili" del ponte, dove è avvenuta tra gli

elementi chiodati. L'attacco interessa interstizi di ampiezza 0.1-3 mm, che permettono la penetrazione di acqua, ma ne impediscono poi la fuoriuscita, e ostacolano l'accesso di ossigeno verso le zone distanti dall'imbocco. La corrosione all'interno della fessura determina da un lato l'ulteriore assottigliamento dell'elemento coinvolto nella giunzione, che si aggiunge a quello generato all'esterno, a opera diretta dell'atmosfera umida. Dall'altro, può produrre una deformazione dell'elemento chiodato da parte dei prodotti di corrosione espansivi generati nella fessura, determinando il fenomeno della cosiddetta "pack rust". Ne consegue che la risposta strutturale dell'elemento non solo è alterata dall'assottigliamento, ma anche dalla deformazione indotta nell'elemento stesso, dovuta alla crescita dei prodotti di corrosione nella fessura.



Fig.1 Esempi di corrosione in fessura tipo "pack rust" riscontrati su elementi sottili del ponte San Michele di Paderno d'Adda.

Il meccanismo di corrosione in fessura si avvia con la penetrazione di acqua che, per capillarità, penetra e origina un modesto attacco iniziale. I prodotti di corrosione che ne derivano si compattano nella fessura e di fatto la sigillano,

bloccando così ogni ulteriore prosecuzione dell'attacco al suo interno. Questo accade nel caso di elementi chiodati di elevato spessore, nei quali la corrosione avviene unicamente all'esterno e rimane trascurabile nella fessura così

sigillata. Questo non avviene negli elementi sottili, fissati con chiodi troppo distanziati tra loro, nei quali la formazione di prodotti di corrosione espansivi può invece sviluppare un'azione deformante, creando il caratteristico imbozzamento degli 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; fungono da elettrolita "solido" che permette la corrosione di agire con continuità. La conformazione della fessura, poi, induce una coppia galvanica (Figura 2) 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. La macrocoppia che si sviluppa determina, così, un attacco localizzato in un'area distante dall'imbocco di circa una volta, una volta e mezzo l'apertura della fessura. È in quest'area che l'assottigliamento può raggiungere un'entità rilevante. Il pH dell'ambiente all'anodo diminuisce e aumenta la solubilità degli ioni ferro alla superficie del metallo ove questo si corrode, senza che si possano generare patine protettive. Si ha così un meccanismo autocatalitico difficile da bloccare con interventi esterni che non siano in grado di agire direttamente sul processo.

L'entità della corrosione per "pack rust" sulle opere chiodate e imbullonate è usualmente valutata in base all'allargamento indotto nella fessura. Nel Nord America [7, 8] si utilizza una scala che lega l'apertura della fessura alla severità del fenomeno. Sulla struttura del ponte si possono osservare diversi esempi di corrosione con formazione di "pack rust", sempre nelle zone in cui vi sono collegamenti di profili a diversa geometria che, accoppiati, generano fessure predisponenti questo meccanismo di corrosione (Fig. 1). Ovviamente, non è visibile l'entità dell'assottigliamento derivante da questa forma di corrosione; ciò che è visibile

sono solo i prodotti di corrosione nelle zone immediatamente prossime all'imbocco. L'imbozzamento degli elementi, che si traduce su alcuni elementi in una caratteristica "festionatura", 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. In condizioni di rilevante spaziatura fra i chiodi, su elementi a ridotto spessore e con geometrie che riducono l'effetto di confinamento, il fenomeno è decisamente più rilevante. Elementi di elevato spessore, di valore sufficiente in relazione alla distanza tra i chiodi, come per le parti più importanti dell'arco e per gli elementi delle pile, l'imbozzamento resta assente e non si sono osservati fenomeni di attacco in fessura.

Tali fenomeni diventano significativi ai fini strutturali qualora possano portare all'assottigliamento localizzato della sezione resistente, alla modifica della risposta statica e dinamica della struttura, a modifiche nella distribuzione degli sforzi tra zone a differente assottigliamento, alla distorsione degli elementi (inarcamento, imbozzamento, ecc.) fino ad esporre, in casi estremi, al rischio di cedimento della giunzione chiodata. In tale contesto appare decisamente importante la valutazione dell'importanza di tali fenomeni che, seppure poco manifesti, possono concorrere a produrre situazioni di rischio da prevenire.

ANALISI SUGLI ELEMENTI ESTRATTI DALLA STRUTTURA

L'entità della "pack rust" sul Ponte San Michele è stata valutata su campioni significativi prelevati dagli elementi chiodati durante i lavori di manutenzione dell'opera. Nel presente lavoro si riportano alcuni risultati su un elemento estratto dalla struttura di sostegno dei camminamenti, con funzione non strutturale, e un elemento prelevato nella zona bassa della struttura reticolare a traliccio di uno dei

due archi gemelli (Fig. 2). Per quanto riguarda i fenomeni di corrosione generalizzata, i rilievi condotti mediante analisi dello spessore in sezione hanno permesso di quantificare una perdita omogenea pari a circa 0.82 mm, stimata considerando lo spessore delle lamiere originali pari a quello misurato in corrispondenza dei chiodi, dove le lamiere non presentavano questa forma di degrado.

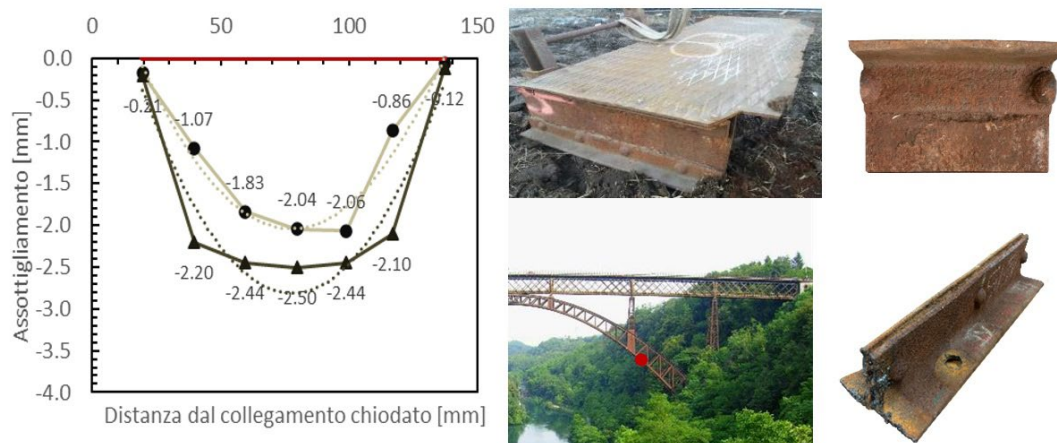


Fig.2 Provini prelevati dalla struttura e misure di spessore in corrispondenza della fessura

Per quanto attiene l'assottigliamento e l'apertura nelle zone interessate dal fenomeno del "pack rust", tale fenomeno è risultato ben più rilevante e le misure condotte su sezione metallografica hanno permesso di individuare perdite di spessore fino a circa 2,5 millimetri nella zona centrale, più del doppio della corrosione generalizzata osservata sulle superfici esposte all'atmosfera senza protezione. In questa zona, intermedia rispetto alla distanza tra un chiodo e l'altro, è stata rilevata la massima apertura della fessura. Gli elementi sono anche stati misurati utilizzando sistemi a scansione tridimensionale laser al fine

di descrivere in modo più completo possibile e puntuale l'entità dell'apertura della fessura nei diversi punti di interesse nonché confermare le misure ottenute sulle sezioni metallografiche. Da un semplice calcolo, è stato possibile individuare una relazione semplice tra la perdita di sezione per assottigliamento e il volume dei prodotti di corrosione all'interno della fessura, e quindi dell'apertura della stessa; tale relazione ha fissato in un rapporto pari a tre tra il volume di ossido e il volume metallo disciolto ed è circa costante per le condizioni indagate nel presente lavoro.

MODELLAZIONE FEM E STIMA DELLA PRESSIONE ESERCITATA DAI PRODOTTI DI CORROSIONE

Le misure di imbozzamento sono state utilizzate per un modello agli elementi finiti al fine di valutare lo stato di sollecitazione nell'elemento indotto dall'espansione promossa dai prodotti di corrosione. Le condizioni al contorno hanno previsto dapprima l'applicazione ai nodi dell'estremo libero della fessura uno spostamento fisso pari all'apertura misurata sull'elemento, tenendo in considerazione che i prodotti di corrosione hanno potuto esplicare completamente la loro azione espansiva nell'arco di tempo relativo alla vita di esercizio del ponte, all'interno di una geometria confinata dalla chiodatura. Una seconda serie di simulazioni ha poi previsto l'applicazione all'interno della zona della fessura di una pressione tale da riprodurre una deformata confrontabile con quella ottenuta nel modello a spostamenti imposti. I chiodi sono stati modellati come elementi infinitamente rigidi. Le geometrie sono state semplificate considerando una spaziatura tra le due

giunzioni di 150 mm per un primo elemento e 250 mm per il secondo, una profondità complessiva rispettivamente di 105 mm e 130 mm e i chiodi aventi un gambo di diametro di 16 mm e 20 mm, rispettivamente per il componente con interasse tra i chiodi di 150 e 250 mm. La definizione delle proprietà meccaniche del materiale si è basata sul rilievo sperimentale della curva di trazione da campioni prelevati dai profili analizzati. Dalla curva di trazione sperimentale è stata ottenuta la curva di flusso del materiale, assumendo un modulo di Young di 210000 MPa e un valore di coefficiente di Poisson pari a 0,33. Dalle prove di trazione eseguite si è ottenuta una tensione di snervamento di 270 MPa e di rottura di 380 MPa, con una deformazione al carico massimo pari a 0,075.

Il valore della pressione che produce valori di deformazione degli elementi confrontabili con quelli misurati sui campioni estratti dalla struttura è stato pari a circa 6 MPa

per entrambi gli elementi considerati. Sono state quindi condotte simulazioni impostando tale pressione all'interno della fessura tra elementi con medesima geometria ma

diverse combinazioni di spessore e distanza tra i chiodi per valutarne l'effetto sull'apertura massima della fessura per "pack rust".

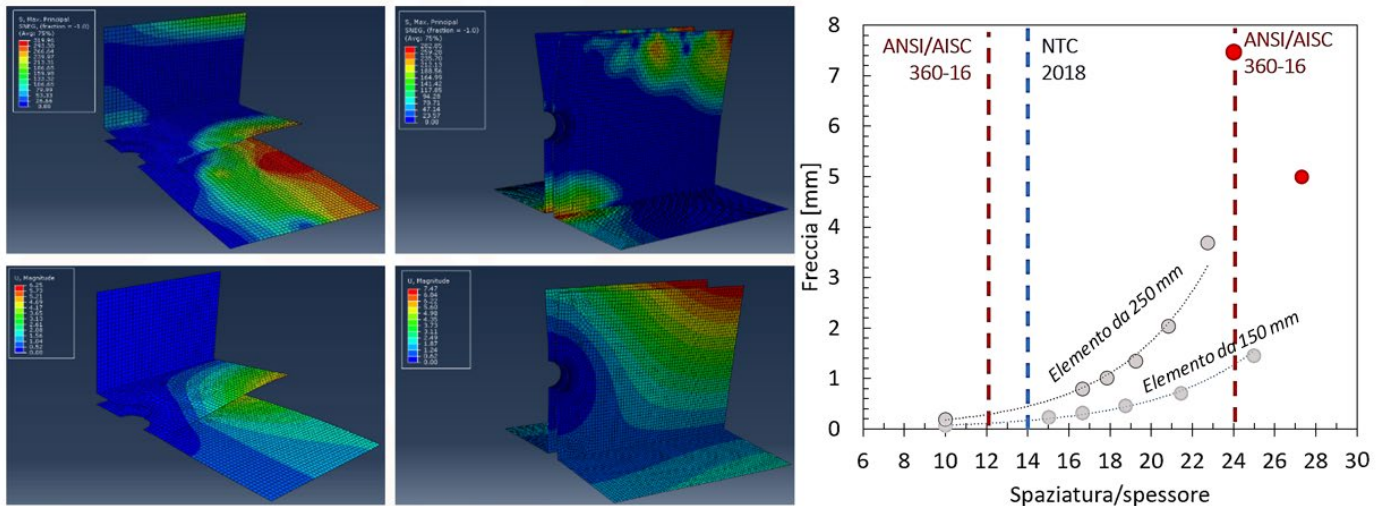


Fig.3 Analisi FEM delle condizioni di sollecitazione indotte dalla presenza dei prodotti di corrosione nella fessura e effetto della spaziatura dei chiodi rapportata allo spessore degli elementi sull'apertura della fessura (in rosso i valori ottenuti dalla misurazione diretta degli elementi prelevati dal ponte San Michele)

I risultati sono stati confrontati con le normative vigenti NTC 2018 e ANSI/AISC 360-16 (Fig. 3). Le attuali normative impongono limiti ineludibili che legano la spaziatura dei collegamenti chiodati e lo spessore dei profili che compongono gli elementi. Dal confronto è emerso che i limiti più stringenti sono imposti dalla ANSI/AISC 360-16, che prescrive per le strutture soggette a fenomeni di corrosione, una spaziatura minima di 12 volte lo spessore dei profili rispetto alle NTC 2018 che spostano il limite a 14 volte lo spessore.

La Fig. 3 riporta in sintesi i dati delle simulazioni interpolati nelle curve e le frecce massime misurate sperimentalmente sugli elementi prelevati dal ponte. Le due curve tratteggiate che uniscono i punti grigi rappresentano i risultati delle simulazioni eseguite sulle due diverse geometrie che caratterizzano i due diversi elementi prelevati dal ponte San Michele. In rosso sono rappresentate le misure effettuate direttamente sugli elementi stessi. È possibile osservare una buona continuità tra le misure sperimentali e i risultati delle simulazioni, che appaiono distribuiti sulla medesima curva interpretativa. Un certo scostamento si può osservare nel caso in cui il rapporto spaziatura spesso-

re diventa ben superiore a 27, indice di un limitato effetto di confinamento esercitato dalla giunzione rispetto all'azione espansiva dei prodotti di corrosione. Gli elementi analizzati sono quindi in linea con la previsione del modello e mostrano valori del rapporto spaziatura/spessore maggiori di 24, valore indicato da ANSI/AISC 360-16 come limite nel caso di elementi verniciati o non verniciati, non soggetti a corrosione.

In tali condizioni il fenomeno del "pack rust" è quindi da ritenere rilevante, cosa del resto palese dalla situazione reale rilevata sul ponte. D'altra parte, ne possono derivare dei criteri utili per l'individuazione di situazioni potenzialmente critiche che possono insorgere nel tempo e per pianificare in modo efficace e predittivo interventi manutentivi che dovessero rendersi ulteriormente necessari.

Per questi elementi si rileva, l'esigenza di attivare attività di monitoraggio finalizzate alla valutazione della progressione di questi fenomeni per garantire la durabilità degli interventi di manutenzione e la sicurezza di una struttura capace ancora oggi di operare, seppure con esigenze decisamente mutate rispetto a quelle definite nell'originario progetto.

CONCLUSIONI

Sono stati individuati i fenomeni di corrosione che si riscontrano su un'infrastruttura metalliche di rilevanza storica, alla luce delle particolari morfologie di danneggiamento caratteristiche di processi di degrado sul lungo periodo. Tra le forme di corrosione osservate, quella più rilevante e caratterizzante della struttura analizzata è quella per «pack rust», capace di sostenere velocità di corrosione sicuramente maggiori di quella atmosferica. Gli effetti indotti da questa forma di corrosione possono causare notevoli riduzioni di sezione resistente dei profili chiodati e con una localizzazione del danno in una particolare zona interna della fessura. L'entità dell'imbozzamento rilevato sugli elementi prelevati dalla struttura è strettamente correlata all'altezza degli elementi stessi, allo spessore e alla distanza tra i chiodi. Si conferma il ruolo determinante della geometria della giunzione sull'efficacia nel contrastare l'instaurarsi e il progredire della corrosione in fessura. Un'elevata spaziatura dei chiodi e uno spessore sottile dei componenti permettono l'instaurarsi di meccanismi di corrosione che, sul lungo periodo, si esplicano come intensi fenomeni di corrosione localizzata. Dal confronto con la normativa tecnica di riferimento per le giunzioni chiodate e bullonate è emerso che le scelte progettuali attuate in termini di spaziatura delle chiodature e spessore dei profili agevolano l'effetto espansivo della scaglia contenuta nelle fessure. Si rileva, quindi, l'importanza della diagnostica, del monitoraggio e di un protocollo condiviso di ispezione e intervento per la corrosione, necessario per la gestione delle opere per il loro mantenimento in efficienza.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Ferrari R., Cocchetti G., Rizzi E. (2019) Evolutive and kinematic Limit Analysis algorithms for large-scale 3D truss-frame structures: comparison application to historic iron bridge arch. *International Journal of Computational Methods*, Accepted 18 Aug 2019, doi:10.1142/S0219876219400206.
- [6] T. Pastore, M. Cabrini, S. Lorenzi; E. Rizzi, R. Ferrari, G. Spirolazzi, G. Pisanelli, C. Cioffi, E. Lizzori, Corrosion phenomena of historic metallic infrastructures | Fenomeni di corrosione delle infrastrutture metalliche di rilevanza storica, *Metallurgia Italiana*, 2020, 112(4), pp. 43-48
- [7] FHWA, Corrosion Protection of Steel Bridges Publication No. FHWA-HIF-16-002 - VoL. 19 Steel Bridge Design Handbook, December 2015.
- [8] Chintan Hitesh Patel, M. D. Bowman, Pack Rust Identification and Mitigation Strategies for Steel Bridges, SPR-4121, Report FHWA/IN/JTRP-2018/16.

Pack rust corrosion evaluation on historical riveted steel bridges

Several riveted steel structures were built around the world towards the end of the 19th century. One of the most famous is surely the Eiffel Tower in Paris. In Italy, the San Michele bridge has undoubtedly a relevant historical and cultural interest. It was built in 1889 to connect Paderno d'Adda to Calusco d'Adda over the Adda river. Unfortunately, degradation phenomena occurring during its more than 130 years' service life have interested this infrastructure. Several research and studies have been carried out in the last years to assess its conservation, the residual structural strength and the restoration and maintenance operations efficiency. Corrosion is surely one of the damaging morphologies that has been affecting the bridge and its rate deserves particular interest.

Corrosion attack mainly occurs on the "thin" elements of the bridge, inside the gaps between the riveted elements typically of width in the range between 0.1 to 3 mm sufficient to allow the penetration of water and to prevent its exit. At the same time, the access of oxygen restricted to the areas far from the fissure mouth. In this way, corrosion occurring inside the crevice sums to atmospheric corrosion that involves the external surfaces of the joint, thus producing deformation in the riveted elements due to the expansive action of the corrosion products. This corrosion form is known as "pack rust" and the structural response of the element modifies due to the simultaneous effects of thinning and deformation due to the accumulation of corrosion products.

This autocatalytic mechanism is difficult to block with external interventions that are not able to act directly on the process. For this reason, the present work offers a general overview of the crevice corrosion phenomena found on metal historical infrastructures to better understand the damaging morphologies occurring at long-term and it examines the "pack rust" corrosion to evaluate and predict the evolution of the unique localized phenomenon. In this way, it is possible to evaluate any changes in the corrosion process that have occurred over the years, determine the average propagation rate of the corrosion attack and study most effective protective strategies for stopping it, while respecting the historical and architectural value of the structure.

KEYWORDS: CORROSION OF INFRASTRUCTURES, CREVICE CORROSION, CORROSION OF CULTURAL HERITAGE, ATMOSPHERIC CORROSION