

La valutazione della velocità di corrosione nei cavi post-tesi delle strutture in calcestruzzo armato precompresso

E. Proverbio, M. Giglio, A. Gennari Santori

La precompressione a cavi post-tesi è ampiamente utilizzata per la costruzione di ponti e viadotti grazie all'opportunità di maggiori scelte progettuali offerte dalla tecnologia di costruzione. La protezione della corrosione dei fili o trefoli inseriti all'interno di guaine metalliche o polimeriche è affidata alla malta da iniezione. I difetti di intasamento portano spesso all'innescio di fenomeni corrosivi. La presenza di una guaina metallica e la difficoltà di accesso ai fili o ai trefoli di acciaio all'interno del condotto riduce notevolmente la possibilità di utilizzare le procedure standard comunemente adottate per la valutazione della velocità di corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato ordinario. Di particolare interesse le problematiche legate ad ambienti completamente saturi d'acqua in totale assenza di malta di intasamento. I risultati preliminari di alcune indagini volte ad utilizzare l'uso combinato di indagini analitiche e misure elettrochimiche vengono qui riportati al fine di ottenere una stima delle condizioni di stato limite ultimo dell'elemento teso.

PAROLE CHIAVE: CALCESTRUZZO PRECOMPRESSO, CORROSIONE, CAVI, TECNICHE DI INDAGINE, VELOCITÀ DI CORROSIONE

INTRODUZIONE

I sistemi di post-tensione (PT) sono ampiamente utilizzati per la costruzione di ponti e viadotti grazie all'opportunità di maggiori scelte progettuali offerte dalla tecnologia di costruzione e alla capacità di costruire strutture efficienti con luci libere più lunghe. La protezione dalla corrosione dei fili o trefoli inseriti all'interno di una guaina metallica o polimerica è affidata alla malta da iniezione (impasto cementizio con specifiche proprietà reologiche e bassissimo ritiro). La presenza di difetti di intasamento porta spesso all'innescio di fenomeni corrosivi [1]. La corrosione è favorita dall'ingresso di acqua che può accedere a causa di perdite nei condotti, discontinuità nei condotti o difetti di sigillatura nelle testate di ancoraggio [2]. L'acqua può essere già presente nei condotti dei cavi di post-tensione prima dell'iniezione o originata dai processi di segregazione della boiaccia [3].

La difficoltà di accesso ai fili o ai trefoli di acciaio all'interno del condotto riduce notevolmente la possibilità di utilizzare le procedure standard comunemente adottate per la valutazione della velocità di corrosione nelle ordinarie strutture in cemento armato. Tali difficoltà si riflettono in una difficile previsione della vita utile delle condizioni che portano la struttura agli stati limite ultimi

E. Proverbio, M. Giglio
Università degli Studi di Messina

A. Gennari Santori
AGS ING Srl, Roma

[4]. Molte delle tecniche di indagine impiegate per il controllo delle strutture non sono in grado di fornire indicazioni sull'effettivo stato di corrosione dei cavi, sebbene la tecnica della dispersione del flusso magnetico possa dare informazioni sull'area della sezione trasversale dell'acciaio è limitata ai casi in cui sia presente una guaina metallica [5]. Solo le tecniche elettrochimiche possono fornire una corretta indicazione della velocità di corrosione effettiva. Recentemente è stato proposto l'uso di misure di impedenza indiretta per rilevare la corrosione di trefoli di acciaio all'interno di condotti in materiale polimerico [5]. Se è possibile accedere e rimuovere il condotto metallico è possibile utilizzare molti metodi per la stima della velocità di corrosione utilizzati per il calcestruzzo armato [6]. La più interessante di queste tecniche è quella della misura della resistenza alla polarizzazione lineare (LPR) [7], sebbene restino aperte tutta una serie di problematiche legate all'interazione guaina cavo e alla definizione dell'area di misura. Lo scopo del lavoro è quello di valutare una procedura per stimare la velocità di corrosione dei cavi post-tesi e tentare un'extrapolazione provvisoria della vita utile dell'elemento strutturale partendo dalla combinazione di informazioni ottenute sul campo, tecniche di analisi standardizzate e test elettrochimici modificati eseguiti in laboratorio.

SPERIMENTAZIONE

L'utilizzo di geometrie di ancoraggio complesse, andamenti dei condotti non lineari ed un eccessivo

affollamento dei condotti ha portato con una certa frequenza, in particolar modo nelle strutture più vecchie ad una difficoltà di intasamento con il risultato di lasciare interi tratti di condotti primi di malta. Pur tuttavia le condizioni di isolamento dei condotti, la ridotta umidità relativa portano, in alcuni casi, i fili a lavorare in un contesto di "corrosione" atmosferica in ambiente blandamente aggressivo. Una volta individuate con tecniche di tomografia acustica la presenza di cavità non intasate, l'accesso ai condotti attraverso microfori e l'utilizzo endoscopie a fibra ottiche ha permesso di osservare lo stato di conservazione dei cavi che in taluni casi si mostra sorprendentemente buono dopo quasi 50 anni di vita. (Fig. 1). La stima della velocità di corrosione in questo contesto non è facile e richiede una conoscenza adeguata delle condizioni effettive in cui si trovano i cavi che sono rapidamente modificate nel momento stesso in cui viene effettuato l'accesso al condotto. È comunque la possibilità di formare acqua condensata che promuove in maniera significativa l'innesco e la propagazione della corrosione [8].

In assenza di tale condizione anche dopo tempi di esposizione relativamente lunghi (sebbene sempre compatibili con una sperimentazione in laboratorio) non sono stati osservati attacchi corrosivi significativi e il comportamento meccanico dei trefoli oggetto di indagine è risultato immutato [9].



Fig.1 - Stato di conservazione dei cavi post-tesi in condotti non intasati. Rilievo effettuato su alcune strutture della metà degli anni '70. / Surface condition of post-tensioned wires in ungrouted ducts. Observations carried out on structures built in the half of the '70s.

In presenza di una malta di intasamento ancorché poco protettiva è viceversa ipotizzabile l'utilizzo adattato di alcune tecniche di indagine elettrochimica. A tal proposito sono stati impiegati alcuni spezzoni di un condotto estratti da una trave PT parte del viadotto "Ritiro", un'infrastruttura dell'autostrada A20 Messina-Palermo originariamente realizzata alla fine degli anni '60. La trave, alta 2,70 m e lunga 43 m, era compressa da 6 cavi con 40 fili di 7 mm di diametro, racchiusi in un tubo di acciaio corrugato di 70 mm di spessore 0,8 mm. Precedenti ispezioni in loco hanno evidenziato danni da corrosione limitati o quasi assenti sui fili di acciaio, senza perdita di forza di precompressione [10]. Dopo la demolizione, gli elementi sono stati stoccati in pellicola HDPE in ambiente asciutto. Per stimare la probabilità di corrosione subito dopo l'apertura di finestre 60x60 mm sul condotto in acciaio, sono stati valutati il contenuto d'acqua, la composizione

mediante XRF e XRD e il pH della malta [11]. Su una finestra a parte dopo aver valutato mediante verifica sulla sezione trasversale alle estremità del provino che fosse presente una quantità significativa di boiaccia, sono state impiegate tecniche elettrochimiche. Prima dell'impiego è stato effettuato un controllo di un eventuale cortocircuito tra il filo d'acciaio e il condotto d'acciaio. Il potenziale di corrosione è stato valutato mediante Ag/AgCl (soluzione satura di KCl), mentre la velocità corrosione è stata stimata mediante il metodo LPR [7] e la tecnica dell'impulso galvanostatico (GPT) [12] (Fig. 2). In entrambi i casi è stata utilizzata come contro elettrodo una piastra curva in acciaio inossidabile da 50 x 50 mm. Il contatto elettrochimico è stato assicurato da una spugna bagnata. La procedura è stata precedentemente testata e calibrata su piccoli campioni di calcestruzzo tipo lollipop realizzati nell'ambito di un precedente progetto di ricerca.



Fig.2 - Set-up di misura della velocità di corrosione. / Corrosion rate measurement set up.

RISULTATI

Non sono state osservate differenze tra la composizione della malta esterna e quella interna. La malta era piuttosto asciutta e di colore grigio chiaro. Sono state osservate alcune tracce di prodotti di corrosione sulla malta a contatto con il condotto in acciaio. La quantità totale di ione solfato (come SO_4^{--}) è risultata inferiore al 2% in peso e al di sotto della quantità massima consentita per la malta per intasamento. Il contenuto di cloruro (da XRF) era tra 0,090-0,095% in peso. Gli spettri XRD hanno mostrato la presenza di composti tipici dell'idratazione del cemento Portland (non sono state rilevate fasi estranee). Il pH della boiaccia è risultato di circa 12,7 in prossimità della superficie (quasi a contatto con il condotto in acciaio) e di circa

13,3 a 2 cm di profondità. I fili erano posizionati eccentricamente e l'elevato numero di fili rispetto al diametro del condotto impediva il completo riempimento dell'intero volume libero. Sono stati osservati alcuni piccoli vuoti tra i fili interni. Una volta rimossa la malta, sul filo d'acciaio sono stati rilevati lievi attacchi di corrosione per lo più concentrati lungo la linea di contatto tra i fili (Fig. 3). Il potenziale di corrosione, misurato (cinque ripetizioni) su due siti diversi, a causa della posizione disomogenea del filo e dello spessore della malta, era leggermente diverso. Il basso contenuto di umidità nella malta ha comportato un'elevata influenza della caduta ohmica (maggiore per il metodo LPR). L'area di riferimento dell'elettrodo di lavoro (fili di acciaio) è stata calcolata dall'involuppo

della superficie dei fili direttamente esposta alla "vista" del controelettrodo per una lunghezza di 50 mm (il lato del controelettrodo). I risultati sono riportati nella Tabella 1. La malta liquida era probabilmente originariamente contaminata da cloruro durante la miscelazione in loco (il sale antigelo non è mai stato utilizzato sul viadotto e la contaminazione da cloruro da aerosol marino attraverso il copriferro di calcestruzzo e il condotto in acciaio è altamente improbabile). Tuttavia, le buone proprietà passivanti e il contenuto di cloruri relativamente basso, nonché l'ambiente secco, hanno contribuito a limitare gli attacchi

di corrosione sui fili di acciaio, nonostante la scarsa capacità di intasamento. Sulla superficie dei fili di acciaio sono stati osservati solo pochi punti di corrosione di profondità limitata, essendo la maggior parte dell'attacco corrosivo (sebbene limitato in profondità) ristretto all'area di contatto tra filo e filo. Tale situazione si rifletteva sulle misurazioni elettrochimiche, nonostante il potenziale di corrosione relativamente basso (inferiore a $-0,350$ V vs Cu/CuSO_4) la velocità di corrosione media era piuttosto bassa.

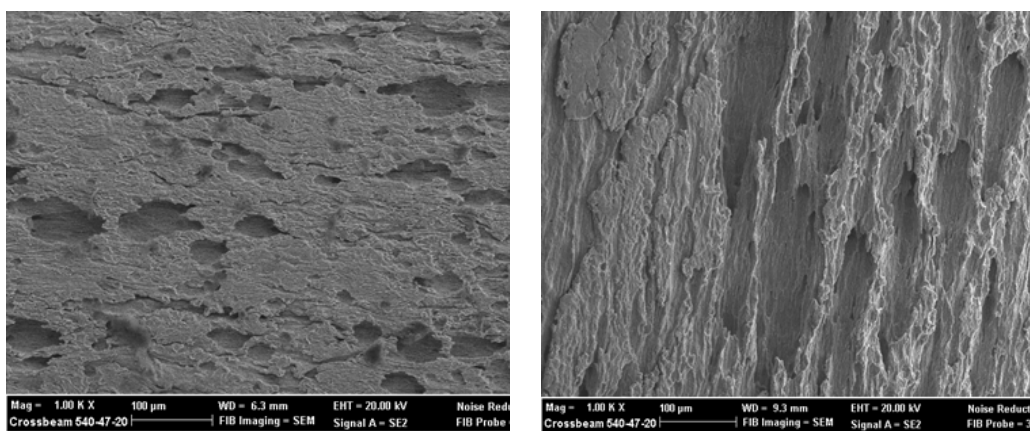


Fig.3 - Attacchi corrosivi osservati sulla superficie dei fili estratti dal condotto di una trave del viadotto Ritiro (A20). / Corrosion attacks observed on steel wire extracted from a beam of the Ritiro viaduct (A20 highway).

Tab.1 - Valori medi delle determinazioni elettrochimiche effettuate sullo spezzone di cavo estratto dal viadotto Ritiro. / Mean values of the electrochemical measurements carried out on the tendon duct extracted from the Ritiro viaduct.

Posizione	OCP (V vs Ag/Ag/Cl) [Cu/CuSO ₄]	R _p LPR kΩ·cm ²	R _p GPT kΩ·cm ²	i _{corr} LPR µA/cm ²	i _{corr} GPT µA/cm ²
1	-0.266 [-0.382]	94.3	63.4	0.27	0.41
2	-0.185 [-0.301]	192.7	76.7	0.15	0.34

Le misure sono state inoltre influenzate dal basso contenuto di acqua nella boiaccia (in particolare per LPR, in misura minore per GPT). La riduzione della sezione trasversale per corrosione omogenea su tutta la superficie del filo è cautamente stimata in circa $8 \mu\text{m}/\text{anno}$ (cioè circa $160 \mu\text{m}$ in 20 anni); tuttavia, se limitiamo, come osservato, l'attacco corrosivo alla piccola porzione di superficie del filo nel punto di contatto con altri fili, stimato sulla base

dell'osservazione visiva in circa 1/10 dell'intera superficie laterale, la riduzione del diametro lungo la linea di contatto filo-filo arriverebbe a circa 1,6 mm in 20 anni.

È chiaro che l'applicazione di tecniche elettrochimiche per valutare la velocità di corrosione e la perdita di massa sui cavi nelle strutture PT potrebbe essere di grande interesse nella stima della vita utile residua; tuttavia, diverse

questioni ne limitano in alcuni casi l'applicabilità. È fondamentale accedere ai cavi all'interno del condotto in acciaio e mentre il cortocircuito con il condotto in acciaio (o condotto in acciaio zincato) potrebbe essere un problema per una corretta distribuzione del flusso di corrente (e misura del potenziale di corrosione), la presenza di un adeguato spessore di malta è obbligatoria per la corretta applicazione dei metodi elettrochimici. La discontinuità nella malta, così come la perdita di contatto su fili o trefoli di acciaio o il vuoto interno influenzano notevolmente le misure e il loro significato. D'altra parte, la conoscenza della superficie reale coinvolta nelle misure elettrochimiche nonché la presenza di aree di corrosione localizzate devono essere prese in considerazione nella stima della vita utile residua della struttura.

CONCLUSIONI

La previsione della vita utile delle strutture post-tese non può prescindere dalla conoscenza dello stato di corrosione dei cavi in acciaio. I condotti in acciaio limitano l'applicazione di tecniche non distruttive nella stima della riduzione della sezione trasversale dovuta alla corrosione. Solo le tecniche elettrochimiche possono permettere di stimare la velocità di corrosione effettiva; tuttavia, diversi problemi ne limitano ancora l'applicazione, come la necessità di un accesso diretto all'ambiente e una corretta conoscenza della reale superficie di acciaio in esame. La valutazione delle caratteristiche fisiche e compositive della malta può, invece, fornire un ulteriore supporto nella previsione della corrosione e nella proiezione del cedimento dei cavi PT.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lau K, Lasa I, Paredes M. Corrosion failure of post-Tensioned tendons in presence of deficient grout. *NACE Corros.* 2013, 2013.
- [2] Menga A, Kanstad T, Cantero D, Bathen L, Hornbostel K, Klausen A. Corrosion-induced damages and failures of posttensioned bridges: A literature review. *Struct Concr* 2022. doi:10.1002/suco.202200297.
- [3] Permeh S, Vigneshwaran KKK, Echeverría M, Lau K, Lasa I. Corrosion of post-tensioned tendons with deficient grout, part 2: Segregated grout with elevated sulfate content. *Corrosion* 2018;74:457–67. doi:10.5006/2568.
- [4] Hartt WH, Lee SK. Modeling and projecting the onset and subsequent failure rate of corroding bridge post-tension tendons arising from deficient grout. *Corrosion* 2018;74:241–8. doi:10.5006/2465.
- [5] Azari H, Lee S-K. Magnetic flux methods detecting corrosion in post-tensioned bridges. *Public Roads* 2021;85:25–7.
- [6] Permeh S, Lau K. Review of Electrochemical Testing to Assess Corrosion of Post-Tensioned Tendons with Segregated Grout. *Constr Mater* 2022;2:70–84. doi:10.3390/constrmater2020006.
- [7] Andrade C, Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mater Struct* 2004 379 2004;37:623–43. doi:10.1007/BF02483292.
- [8] Ponechal R, Koteš P, Michálková D, Kralovanec J, Bahleda F. Effect of Water Condensate on Corrosion of Wires in Ungrouted Ducts. *Materials (Basel)* 2021;14:7765. doi:10.3390/ma14247765.
- [9] Lau K, Karins FC, Sagues AA. Corrosion Characteristics of Post-Tensioning Strands in Ungrouted Ducts. Tampa, Florida: 2011.
- [10] Proverbio E, Recupero A, Venturi V. Integrating destructive and non-destructive inspection techniques in evaluating tendon corrosion in post-tensioned concrete beams. *fib Symp.*, 2021, p. 263–6.
- [11] Behnood A, Van Tittelboom K, De Belie N. Methods for measuring pH in concrete: A review. *Constr Build Mater* 2016;105:176–88. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.12.032.
- [12] Elsener B, Klinghoffer O, Frolund T, Rislund E, Schiegg Y, Böhni H. Assessment of reinforcement corrosion by means of galvanostatic pulse technique. *Repair Concr Struct* 1997.

Evaluation of corrosion rate of post tensioned tendons in prestressed concrete structures

Prestressing by post tensioned tendons is widely used to build bridges and viaducts due to the opportunity for greater design choices offered by the construction technology. The corrosion protection of wires or strands inserted inside metal or polymeric sheaths is entrusted to injection mortar. Grouting defects often lead to the triggering of corrosive phenomena. The presence of a metal duct and the difficulty of accessing the steel wires or strands considerably reduces the possibility of using the standard procedures commonly adopted for the evaluation of the corrosion rate in ordinary reinforced concrete structures. Of particular interest the problems related to environments completely saturated with water in the total absence of grouting mortar. The preliminary results of some investigations aimed at using the combined use of analytical investigations and electrochemical measurements are reported here and aimed to obtain an estimate of tendon ultimate limit state conditions.

KEYWORDS: PRESTRESSED CONCRETE, CORROSION, TENDON, INSPECTION TECHNIQUES, CORROSION RATE

[TORNA ALL'INDICE >](#)