

Building and Construction for Engineers

L'Edilizia

INGEGNERIA MATERIALI TECNOLOGIA

SPECIALE DURABILITA'

N. 31 Giugno/Luglio - anno XV - Spedizione in a.p. - 45% art. 2 comma 20/b legge 662/96 - Poste di Milano

de lettera editore

Il collasso del ponte S. Stefano



Un esempio estremo di degrado delle strutture in calcestruzzo armato precompresso

Il collasso improvviso, dopo circa 50 anni di servizio, di un ponte realizzato in calcestruzzo precompresso lungo la litoranea S.S. n° 114 in Sicilia, richiama, ancora una volta, il problema della sicurezza di esercizio delle opere civili e rilancia con forza l'esigenza della valutazione del degrado e della stima delle residue capacità portanti delle strutture in esercizio in ambienti aggressivi.

Strutture in calcestruzzo armato precompresso (c.a.p.), realizzate in prossimità del mare (ambienti marini: classe di esposizione S4-UNI 9858), risultano particolarmente sensibili all'aggressione dei cloruri. Tali strutture possono, infatti, a volte essere soggette a frattura dei cavi di precompressione in seguito a corrosione localizzata, tensocorrosione o corrosione a fatica.

In alcuni casi, l'impiego di tecniche di precompressione ancora non ben consolidate all'epoca della costruzione (40 o 50 anni fa) ha portato a scelte progettuali improprie o ad errori di costruzione, che possono essere considerati la causa di alcuni collassi catastrofici registrati negli ultimi anni in Europa.

Il degrado delle strutture in c.a.p.

La maggioranza delle strutture in calcestruzzo armato della rete viaria italiana, così come quella della maggior parte dei Paesi Europei che sono stati oggetto di fidi di intensa ricostruzione dopo la Seconda Guerra Mondiale, sono stati costruiti senza alcuna considerazione di concetti quali durabilità e affidabilità. Il tempo di vita di un ponte autostradale è stimato in media circa 70 anni e, generalmente, un intervento riabilitativo importante è necessario quando tale struttura raggiunge circa metà della propria vita media. È evidente che tale constatazione, insieme all'importante considerazione che la maggior parte dei ponti è stato costruito dopo il 1945, porta ad una prospettiva futura non particolarmente felice.

Le strutture in calcestruzzo precompresso costruite negli anni 50-60, con una tecnologia ancora non matura, sono a tale proposito le strutture più critiche. Sebbene, infatti, le strutture in c.a.p. siano generalmente fabbricate con calcestruzzo di resistenza relativamente alta, il tempo ha mostrato che esse sono soggette agli stessi ef-

*di Edoardo Proverbio
Università di Messina,
Dip. di Chimica Industriale e
Ingegneria dei Materiali
(proverbio@ingegneria.unime.it)*

*Giovanni Legnani
ANAS Sezione Compartimentale
di Genova*

*Vincenzo Venturi
STRACOM Srl, Collovratte*



fetti dannosi della corrosione delle armature come lo sono le strutture in calcestruzzo armato. Dal momento che la resistenza delle strutture in c.a.p. è affidata interamente alla resistenza dei cavi o trefoli in acciaio ad alto limite elastico, anche la perdita di pochi elementi metallici può risultare catastrofica.

Tali strutture sono, in effetti, caratterizzate dalla quasi totale mancanza di riserva plastica: negli istanti precedenti il collasso non sono generalmente evidenziali indizi di cedimento strutturale. Inoltre, in conseguenza della diversa funzione cui debbono assolvere gli elementi metallici nelle strutture in c.a.p., gli effetti della corrosione sono accelerati. Anche piccoli attacchi localizzati (pits) possono causare la rottura di un trefolo, contrariamente a quanto accade per le armature "lente" che devono corrodersi completamente prima di rompersi. Anche se la corrosione inizia in maniera identica a quella sull'armatura lenta vi è una differenza sostanziale tra i due tipi di armatura: dal momento che i cavi di precompressione hanno generalmente una sezione minore di quella dell'armatura lenta, la sezione

1 (pagina precedente). Il ponte subito dopo l'inaugurazione avvenuta nel 1966.

2 (sopra). Il ponte S. Stefano dopo il crollo avvenuto il 25 aprile del 1988.

3 (destra). Il crollo ha interessato solamente la prima delle quattro carregiate (direzione nord-sud) della struttura.





IL PONTE IN COSTRUZIONE



4 (sopra). Fasi della prefabbricazione dei conci travi con cui verranno realizzate le travi portanti con cui è stato costruito il ponte S. Stefano.

5. Trave a conci prefabbricati dopo l'assemblaggio e la tesatura dei cavi di precompressione.

dei cavi di precompressione andrà incontro più facilmente alla frattura o al completo consumo per effetto della corrosione.

La frattura dell'armatura di precompressione nelle strutture in c.a.p., pertanto, è generalmente indotta dalla corrosione. Il caso più semplice si presenta quando l'acciaio ad alto limite elastico si rompe, perché si supera il carico di rottura in presenza di un intaglio nella zona ove sono presenti dei *pits* di corrosione. In questo caso la frattura ha un carattere fragile. Nella pratica questo tipo di frattura puramente fragile è però abbastanza rara. Un fenomeno di danneggiamento che più frequentemente può portare al crollo delle strutture è quello dell'irraggimento da idrogeno. Numerosi collassi di strutture in c.a.p. avvenuti in anni recenti in Germania [1] sono stati causati da irraggimento da idrogeno dell'acciaio di precompressione.

Il recente crollo di un ponte in c.a.p. a conci prefabbricati situato lungo la strada statale 114 in Sicilia, dopo circa 50 anni di servizio, rappresenta un'opportunità ideale per analizzare in dettaglio il problema del degrado e della gestione del rischio di eventi catastrofici delle infrastrutture stradali.



Il ponte di S. Stefano

Il giorno 23 Aprile 1999 avveniva, senza preavviso, il crollo del ponte sul torrente S. Stefano al km 11+0,50 della S.S. n°114 (figure 1, 2). Al momento del crollo, sul manufatto non transitava alcun veicolo, cosicché non si sono verificati danni né a persone né a cose. Il ponte fu progettato nel luglio 1954 dall'Ing. Riccardo Morandi e costruito nel corso dell'anno 1956 (figura 3). Il manufatto, realizzato in cemento armato precompresso, era costituito da quattro campate con luci di m 18,50 ciascuna, poggianti su n° 3 pile e n° 2 spalle, per una lunghezza complessiva dell'opera pari a m 78,00.

L'impalcato, del tipo a travata semplicemente appoggiata, era costituito da n° 7 travi a cassone chiuso in c.a.p., di sezione cava pressoché trapezoidale avente altezza di m 1,10, irrigidito da n° 6 trasversi in c.a. e da una soletta superiore di satura costituente il piano stradale che si protendeva a sbalzo sui marciapiedi.

La larghezza della sede viaria era di m 10,50, più n° 2 marciapiedi a sbalzo di m 1,00 ciascuno per una larghezza complessiva dell'impalcato di m 12,50.

Per quanto attiene al sistema di costruzione dell'opera si riportano in stretto ordine cronologico le fasi di realizzazione previste dal progettista meglio note come "sistema Morandi" di precompressione a cavi post-tesi. Il sistema prevedeva l'esecuzione fuori opera in serie di conci cavi prefabbricati, della lunghezza di circa 1,5 m (figura 4). Successivamente, e prima dell'assemblaggio, si ricavano nei setti verticali e nella soletta inferiore i fori di alloggiamento dei fili di precompressione (ϕ circa 40 mm); tale operazione veniva realizzata mediante dei mandrini sfilabili. Assemblaggio e sigillatura dei



Da sinistra

6. La struttura del ponte S. Stefano dopo il crollo. Apertura delle travi nelle zone di giunzione dei conci prefabbricati.

7. La struttura del ponte S. Stefano dopo il crollo. Distacco dei conci di prefabbricazione ed estrazione dei cavi di precompressione. Da notare che la frattura dei fili non è avvenuta solamente nella zona di giunzione dei conci.

conci con un getto di cls in opera precedevano il getto in opera della testate, dei trasversi e della soletta (figura 5). La tesatura dei fili, eseguita con martinetti idraulici avveniva in due fasi: la prima mediante la tesatura graduale di tre fili per volta, il successivo bloccaggio mediante spine e canali conici in acciaio dello stesso diametro dei fili; la seconda, a tre mesi dall'ultimazione della prima fase, serviva a controllare la tesatura e a riportare questa ai valori di progetto, in modo tale da compensare le cadute di tensione negli acciai per rilas-

8 (ovale). Circa longitudinale corrispondente ad uno dei condotti di alloggiamento dei cavi di precompressione riscontrata su una delle travi del ponte. La foto mostra anche la localizzazione di uno dei siti di estrazione delle carote utilizzate per la valutazione delle proprietà meccaniche del cls.

9 (sotto). La struttura del ponte dopo il collasso. È evidente l'estensione della zona dell'espansione del copriferro in conseguenza della corrosione delle staffe e del successivo attacco dei cavi di precompressione.

10 (pagina a lato). Aspetto dei cavi di precompressione dopo il distacco del copriferro. Si notano gli attacchi corrosivi localizzati e soprattutto la mancanza della malta d'iniezione negli alloggiamenti dei cavi stessi.

samento dei fili e/o per le deformazioni viscosi nel cls (*creep-fluage*).

A ritrattatura avvenuta, si procedeva ad iniettare la malta di cemento (boiaccia) nei fori dove alloggiava l'armatura di precompressione, eseguita dalle due estremità delle testate delle travi; operazione intesa a proteggere i cavi di precompressione nei rispettivi alloggiamenti. La buona riuscita di quest'ultima delicata operazione dipendeva essenzialmente dall'aver fatto combaciare perfettamente le facce dei conci, prima saldati con un getto in opera di cls.

Le strutture a conci prefabbricati sono state usate frequentemente nel passato per la loro facilità di costruzione, la loro flessibilità e per alcuni vantaggi economici rispetto ad altre scelte progettuali, grazie alla struttura modulare. Tali strutture sono però soggette ad una serie di problemi legati alla possibile presenza di vuoti all'interno dei condotti di alloggiamento dei cavi di post-tensionamento. Il riempimento non completo dei

condotti può favorire la raccolta ed il ristagno di acqua nei vuoti, che a sua volta favorisce l'innescio di fenomeni corrosivi dei cavi e può essere la causa potenziale del collasso dell'intera struttura [2].

Il crollo del ponte pedonale Bickton Meadows nell'Hampshire (UK) nel 1967, avvenuto in conseguenza della corrosione dei cavi di precompressione, e quello del ponte Ynys-y-Gwas nel West Glamorgan (UK) nel 1985 [3], insieme a tutta una serie di problemi relativi alle strutture in calcestruzzo post-teso [4] ha portato difatti il Ministero dei Trasporti britannico ad emanare il 22 settembre 1992 una moratoria per la costruzione di ponti in calcestruzzo post-teso [5], poi parzialmente ridotta nel 1996 [6] alle sole strutture a conci prefabbricati, apparentemente per le persistenti problematiche relative alla protezione della corrosione dei cavi che passano attraverso i giunti tra i conci stessi.

Il collasso: analisi e considerazioni

Il collasso del ponte, avvenuto senza alcun segno premonitore, e in assenza di condizioni di carico critiche, è stato caratterizzato dall'apertura dei giunti tra i conci prefabbricati dalla fuoriuscita dei cavi di precompressione dagli alloggiamenti (figure 6, 7). Il crollo è avvenuto in corrispondenza della prima campata nord, in maniera asimmetrica e a circa 1/3 della lunghezza. Ad un'ispezione preliminare della struttura collassata è emersa la mancanza di riempimento in parte dei condotti ove erano alloggiati i cavi di precompressione.

Il calcestruzzo con cui erano stati fabbricati i conci è risultato, dopo prove di schiacciamento su campioni carotati, di buona qualità con un valore di resistenza meccanica di circa 50 MPa, così come prove di rottura a trazione sui fili di precompressione (acciaio trafilato a freddo) hanno fornito valori di resistenza elevati (snervamento allo 0,2% e rottura pari rispettivamente a 1640 e 1800 MPa).

L'ispezione dei conci collassati e delle campate del ponte ancora in opera ha evidenziato la presenza di un sistema di fessurazioni pregresso molto esteso, in generale longitudinale e associato ai condotti di post-tensionamento (figura 8). In alcuni punti è stato osservato il distacco del copriferro e l'esposizione dei cavi (figura 9). Ciò in corrispondenza della parte inferiore dei cassoni, ove la presenza di staffe superficiali ed il ridotto copriferro, in più punti caratterizzato da uno spessore inferiore al centimetro, ha favorito la precoce fessurazione del calcestruzzo e la predisposi-



zione per una via di accesso rapida all'acqua e agli agenti inquinanti (fondamentalmente cloruri).

L'osservazione della superficie dei cavi estratti dai condotti ha permesso di constatare che gli attacchi corrosivi erano localizzati in alcuni punti, interessando in gran parte della sezione dei fili, mentre la maggior parte della superficie era immune da attacchi corrosivi (figura 10).

L'analisi del collasso del ponte di S. Stefano mette in luce alcuni punti fondamentali riguardanti il problema della durabilità delle strutture in calcestruzzo pre-compresso o post-teso. Sebbene tali strutture siano costruite con calcestruzzo di buona qualità, la tipologia stessa delle costruzioni, che affida unicamente all'armatura di precompressione il carico ammissibile, porta tali strutture ad essere particolarmente sensibili agli attacchi corrosivi. L'unica protezione dei cavi nelle strutture post-tese è la malta di iniezione. La presenza di vuoti o zone a riempimento parziale dei condotti è particolarmente pericolosa. Purtroppo, le tecnologie d'ispezione non distruttiva, atte all'individuazione di tali difetti [7,8], non sono molto diffuse o, addirittura, in considerazione del loro recente sviluppo, sono assolutamente sconosciute.

Le strutture a conci prefabbricati risentono, inoltre, del problema della sigillatura delle giunzioni, via principale di ingresso degli inquinanti ai cavi di precompressione. In effetti, la giunzione con malta gettata in cantiere è stata vietata dal 1992 dalle normative britanniche e, sebbene non bandita in modo specifico [9], è ormai in disuso negli Stati Uniti d'America e soppiantata da giunzioni di Tipo A (giunzione con collante epossidico) e giunzioni a secco Tipo B (per strutture con precompressione esterna).

Conclusioni

Le strutture in calcestruzzo armato post-teso, ed in particolar modo le strutture a conci prefabbricati, si sono dimostrate particolarmente sensibili ai fenomeni di corrosione, sebbene tale osservazione sembra sia valida fondamentalmente per l'Europa e meno per gli Stati Uniti d'America. Qui, infatti un'indagine sponsorizzata dall'American Segmental Bridge Institute su 109 ponti a conci prefabbricati [2], ha evidenziato che la maggior parte delle strutture non sembravano presentare problemi corrosivi significativi, anche se è da tener presente, che le valutazioni erano basate solamente su ispezioni visive. In letteratura sono comunque reperibili numerosi rapporti riguardanti problemi di degrado di strutture in calcestruzzo post-teso riscontrati soprattutto in Canada [10-12].

Le cause del degrado precoce delle strutture in c.a.p. sono, comunque, abbastanza chiare. Resta tuttora aperto il problema della gestione delle strutture ammalorate e, soprattutto, delle metodologie d'indagine

utilizzabili per l'ispezione delle strutture stesse [13].

Nel caso delle strutture precomprese, ma in particolare per le strutture post-tese, il problema maggiore è quello di riuscire a determinare con buona accuratezza lo stato di degrado dei fili o cavi di precompressione. Tale valutazione può essere fatta in modo diretto con tecniche di indagine complesse, di difficile applicabilità su vasta scala, quali la radiografia penetrante o le tecniche di induzione magnetica.

E' possibile peraltro valutare lo stato dei cavi di rinforzo in modo indiretto. Nel caso di strutture precomprese, fessurazioni longitudinali, delaminazioni e inquinamento del calcestruzzo di copriferro sono indici di processi corrosivi a carico dei cavi di precompressione, la quantificazione dell'attacco corrosivo resta il problema maggiore solo in parte affrontabile con tecniche elettrochimiche classiche, quali quelle applicate per le strutture in calcestruzzo armato ordinario. Più difficoltoso è effettuare valutazioni di questo tipo in strutture post-tese, che costituiscono la maggior parte delle strutture di grosse dimensioni, e tutte quelle costituite da conci prefabbricati (numerossimi ponti stradali di ampia luce sono costruiti con questa tecno-



logia). In questo caso, la probabilità di individuare una porzione di cavo danneggiato è strettamente legata all'individuazione di zone di vuoto all'interno della guaina (metallica o polimerica che sia). A tal scopo possono essere utilizzate tecnologie d'indagine non distruttiva del tipo "echo da impatto", radar penetrante, ultrasuoni. Tali tecniche, benché sofisticate, sono affette da alcuni limiti: esse non sono semplici da usare e richiedono personale altamente specializzato. L'analisi dei risultati è generalmente una fase critica e richiede una grande esperienza e molto criticismo. Dal momento che le tecniche non sono equivalenti tra loro, devono essere generalmente accoppiate per ottenere un'adeguata valutazione dello stato delle strutture ispezionate.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nünberger U. "Corrosion related failures in prestressed concrete structures and preventive measurements", *Otto Graf Journal*, 9, 1998.
- [2] Poston R.W. and Waters J.P., "Durability of Prestressed concrete bridge", NCHRP Web Document 15 (Project 20-7/Task 92), June 1998.
- [3] Woodward R.J., "Collapse of a Segmental Post-Tensioned Concrete Bridge", *Transportation Research Record*, Vol. 1211, TR Board, National Research Council, Washington, D.C. 1989.
- [4] Concrete Society Technical Report No. 47, "Durability of Post-Tensioned Concrete Bridges", Concrete Society, 1996.
- [5] Clark G., "Prestressed prestressing cables in duct", *Concrete*, July/August, 1995, pp.27-28.
- [6] Levin A., "A mysterious split", *Concrete*, November/December, 1996, pp. 25-27.
- [7] Woodward R., Hill M., Critchington D., "Non-Destructive Methods for Inspection of Post-Tensioned Concrete Bridges", *FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures*, 1996, Vol. 1, pp. 295-304.
- [8] Proverbio E., "Non-destructive evaluation of steel tendons in post-tensioned concrete structures", *Materials Engineering*, 12, 1, 2001, pp.7-22.
- [9] AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 16th Edition, 1996.
- [10] Freyermuth C., "Durability of Post-Tensioned Prestressed Concrete Structures", *Concrete International*, October 1991, pp. 58-65.
- [11] Novokshchenov, V., "Condition Survey of Prestressed Concrete Bridges", *Concrete International*, September 1989, pp. 59-68.
- [12] Novokshchenov, V., "Prestressed Concrete Bridges in Adverse Environments", *Concrete International*, May 1991, pp. 43-48.
- [13] Washer G. A., "Developing NDE Technology for Infrastructure Assessment", *Public Roads*, V. 63, N° 4, 2000.