

Quando collassano le strutture in precompresso

Negli ultimi vent'anni, sono stati registrati crolli eclatanti di strutture in c.a.p. in Europa ma anche negli Stati Uniti ed in Asia. È pertanto indispensabile, in considerazione del fatto che le strutture in c.a.p. possono raggiungere la condizione strutturale limite, senza la preventiva comparsa di fessurazioni o di altri segni premonitori, disporre durante l'esercizio del manufatto di metodi di indagine specifici che consentano di quantificare il livello di degrado raggiunto.

Edoardo Proverbio, Giuseppe Ricciardi, Vincenzo Venturi

Le strutture in cemento armato precompresso realizzate in ambiente urbano ed extraurbano (ponti e viadotti, coperture di grande luce per capannoni industriali, hangar ed infrastrutture urbane, silos, serbatoi, ecc.) fin dal 1950 hanno messo in evidenza una certa vulnerabilità, in particolare nei riguardi dei cavi di precompressione, agli agenti aggressivi, ambientali ed antropici, con ripercussioni evidenti in termini di durabilità, di efficienza, di capacità di prestazione. Si è trattato per lo più di strutture esposte a severe condizioni ambientali ed a condizioni limite di esercizio. Quest'ultimo aspetto diviene particolarmente rilevante se correlato all'esigenza di garantire all'utenza l'esercizio dell'opera durante gli interventi di riparazione, rinforzo e consolidamento strutturale.

LA CORROSIONE NELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO PRECOMPRESSO

I primi esempi di applicazione della precompressione ad elementi strutturali in calcestruzzo è dei primi anni cinquanta, un notevole impulso nell'impiego di questa tecnica si è avuto con la realizzazione, negli anni sessanta, delle grandi opere autostradali, A1 Milano - Roma, A3 Salerno - Reggio Calabria; proprio su queste opere però, fin dal 1980, è stato necessario intervenire con consistenti interventi di consolidamento strutturale che hanno comportato costi rilevanti per l'Ente gestore e notevoli disagi per l'utenza. Alla luce di quanto accaduto è stata necessaria una riflessione sul comportamento nel tempo delle strutture in c.a.p. nei confronti della durabilità, infatti nonostante la qualità del calcestruzzo impiegato in precompressione sia generalmente ottima, il degrado del calcestruzzo e la corrosione dell'armatura, lenta e tesa, può avere effetti catastrofici. La capacità di resistere degli elementi in c.a.p. è affidata interamente alla capacità dell'armatura tesa, cavi o trefoli in acciaio ad alto limite elastico, di mantenere la sezione resistente in calcestruzzo compressa. Pertanto anche la rottura di pochi elementi può determinare il collasso dell'opera.

Inoltre in conseguenza dell'elevato carico a cui sono soggetti 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 si innesca in maniera identica tanto sull'acciaio dolce dell'armatura lenta che sull'acciaio dell'armatura tesa, esiste una sostanziale differenza degli effetti indotti dalla corrosione dei due tipi di armatura infatti, la maggiore velocità di corrosione e la ridotta sezione dei cavi o trefoli di precompressione determinano una minore riserva di sicurezza nei confronti della rottura o consumo per effetto della corrosione.

La mancanza o l'insufficienza del copriferro e della protezione alcalina del calcestruzzo e/o della malta di iniezio-



ne, dall'inizio od in conseguenza di fenomeni di carbonatazione e/o di depassivazione dell'acciaio per elevate concentrazioni di cloruri, possono essere tra le principali cause del danneggiamento dell'armatura e del crollo del manufatto, anche molto tempo dopo la messa in esercizio dello stesso. La responsabilità dei fenomeni di degrado sopra descritti si può ricondurre ad errori progettuali, relativi alle condizioni di esercizio, ambientali, costruttive e di posa in opera (tabella 1). Si può incorrere in difetti di esecuzione od errori di costruzione nei seguenti casi:

- nelle strutture post tese il non corretto intasamento della malta nei condotti (guaina parzialmente iniettata o vuota) espone, grazie all'ingresso di umidità, acqua ed ossigeno, l'acciaio di precompressione ad un elevato rischio di corrosione;

- specifiche di progetto inadeguate, (copriferro insufficiente, calcestruzzo di qualità non conforme alle condizioni ambientali di esercizio) possono determinare una insufficiente protezione dei fili o dei cavi di precompressione;

- assenza di opportune specifiche esecutive di protezione (sigillatura con impermeabilizzante, realizzazione di opere di drenaggio e smaltimento delle acque meteoriche) che possono portare ad una elevata concentrazione di sali nel calcestruzzo e, più raramente, allo sviluppo di fessurazioni all'interno ed all'esterno dei giunti di accoppiamento dei ponti in precompresso.

L'esempio più famoso e spettacolare di collasso conseguente ad errori in fase di costruzione è il crollo parziale, avvenuto nel 1980, della copertura del Congress Hall di Berlino avvenuta appena 23 anni dopo la sua costruzione. Il collasso era stato determinato principalmente dalle condizioni favorevoli allo sviluppo di attacchi corrosivi delle parti in acciaio degli elementi in precompresso della copertura.

I casi più frequenti di danneggiamento per corrosione delle armature tese, nelle strutture da ponte, per i difetti sopra esposti, di esecuzione o di progettazione, si sono verificati in strutture in c.a.p. a cavi post-tesi ed a conci prefabbricati.

Il primo serio problema di corrosione in un ponte a cavi post tesi, interni avviene in Gran Bretagna a metà degli anni sessanta con il collasso di una passerella pedonale nell'Hampshire (Bickton Meadows Footbridge). Il ponte in oggetto consisteva in una struttura in c.a.p. del tipo a conci prefabbricati, il cui crollo, dopo pochi anni di esercizio, con il solo peso proprio avvenne senza alcun preallarme. Le cause accertate furono ricondotte all'intensa corrosione dei cavi di pretensionamento superiori, oltre alla qualità estremamente scarsa del calcestruzzo dei conci e della malta impiegata nei giunti di sutura. I conci prefabbricati, fin dalla messa in opera, avevano evidenziato fessurazioni e vistosi vespai, dai quali era fuoriuscita la malta d'iniezione durante le operazioni di intasamento dei condotti dei cavi. Inoltre fu applicata una tensione di precompressione eccessiva.

Successivamente, sempre in Gran Bretagna, negli anni ottanta seri problemi di corrosione furono riscontrati in altri due ponti: il Taf Fawr Bridge sulla A470 in Galles e l'Angel Road Bridge sulla circonvallazione nord di Londra A406. Successivamente ulteriori problemi furono identificati in altre strutture da ponte, il più importante fu quello che portò al collasso l'Ynys-y-Gwas Bridge, un ponte a conci prefabbricati ad unica campata, nel 1985 nel Galles. Il collasso del ponte fu causato dalla corrosione dei cavi longitudinali in corrispondenza dei giunti. La malta utilizzata per i giunti risultò molto permeabile e permise l'accesso di acqua e la concentrazione di cloruri lungo i cavi. La struttura era in servizio da 32 anni e non era stato segnalato, prima del collasso, casi di perdita di tensionamento. In seguito a questo collasso nove ponti a conci prefabbricati furono esaminati: in sette di questi furono riscontrati vuoti nei condotti,

TAB. 1 CAUSE PRINCIPALI DI DANNEGGIAMENTO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSE

Causa del danneggiamento	Rimedi
Progettazione deficitaria	<ul style="list-style-type: none"> • Rafforzamento della struttura • Miglioramento degli standard delle raccomandazioni per la progettazione ed esecuzione dei lavori • Ispezione di strutture analoghe • Demolizione degli elementi difettosi e ricostruzione
Esecuzione incorretta del progetto e impiego errato dei materiali da costruzione	<ul style="list-style-type: none"> • Come sopra • Addestramento ed educazione accurata del personale • Impiego di armatura supplementare per evitare il crollo della struttura
Scelta errata dei materiali cementizi da costruzione	<ul style="list-style-type: none"> • Limitazione del contenuto dei cloruri nell'acqua, nel cemento e negli aggregati • Proibizione di cemento, additivi ed acceleranti che favoriscono la corrosione e l'evoluzione di idrogeno sul metallo
Acciaio di precompressione inadatto (sensibile all'idrogeno)	<ul style="list-style-type: none"> • Proibizione dell'impiego di acciai che soffrono di forme di tensocontrollo (SCC) nelle condizioni di impiego • Sviluppo di altri tipi di acciaio più resistenti all'idrogeno • Limitazione dello stato di sollecitazione • Uso di test di SCC a lungo termine (>2000 a) nelle condizioni di lavoro

e cavi profondamente corrosi furono trovati in due punti su uno di questi ponti. In seguito a tali riscontri il 25 settembre 1992 il Dipartimento dei Trasporti Britannico emanò un bando di proibizione per tutta la Gran Bretagna dell'impiego della tecnica di costruzione di strutture post tese a cavi inguainati e iniettati con malta. La moratoria fu parzialmente sollevata solo nel 1996 ad eccezione che per le strutture a ponte a conci prefabbricati a causa dei perseveranti problemi di protezione dei cavi nei punti di attraversamento dei giunti [Lewis A., "A moratorium lifted", Concrete November/December, 25-27, 1996].

Problemi di questo tipo non sono stati riscontrati nella sola Gran Bretagna. Un esempio ne è il crollo del Melle Bridge sul fiume Schelda in Belgio nel 1992. Il collasso fu ricondotto anche in questo caso alla corrosione dei trefoli di precompressione all'interno delle guaine. E' da evidenziare come in questo caso l'intera struttura fosse stata sottoposta a ispezione, prova di carico positiva, ripristino e re-impermeabilizzazione appena due anni prima.

Anche negli Stati Uniti d'America il problema della corrosione delle strutture in calcestruzzo precompresso inizia ad essere sentito in maniera sempre maggiore, anche se le strutture a ponte in calcestruzzo precompresso rappresentano sola una ridotta frazione (circa il 18%) del totale. Ne è una riprova la recentissima pubblicazione da parte dell'ACI Committee 222 (2R-01) riguardante proprio la "Corrosion of Prestressing Steels". Da citare anche il rapporto del dicembre 2000 dell'American Segmental Bridge Institute riguardante le problematiche della corrosione dei cavi inguainati e iniettati con malta).

DUE ESEMPI NOTEVOLI

E' interessante a questo punto illustrare con maggior dettaglio due casi esemplari di crollo di strutture precomprese conseguenti a fenomeni corrosivi sorti a causa di errori di progettazione ed errori di costruzione, il primo riguardante il crollo del ponte di S.Stefano in Sicilia avvenuto dopo 43 anni dalla costruzione, ed il secondo il collasso del ponte pedonale sulla Lowe's Motor Speedway avvenuto dopo soli 5 anni dalla messa in opera.

Edoardo Proverbio,
Ingegnere,
Professore dell'Università di Messina,
Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali.

Giuseppe Ricciardi,
Professore del Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate dell'Università di Messina.

Vincento Venturi,
Ingegnere, Istituto di Ricerca e Sperimentazione Sidercem, Caftanissetta - Catania.

1. Trave a conci prefabbricati dopo l'assemblaggio e la tassatura dei cavi di precompressione.

Il Ponte di S. Stefano

Il giorno 23 Aprile 1999 avveniva, senza preavviso, il crollo del ponte sul torrente S. Stefano al km 11+050 della SS 114. Al momento del crollo, sul manufatto non transitava alcun veicolo, per cui 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. 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 sutura 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.

Le fasi di realizzazione previste dal progettista e meglio note come "sistema Morandi" di precompressione a cavi post-tesi prevedevano l'esecuzione fuori opera in serie di conci cavi prefabbricati, della lunghezza di circa 15 m.

Successivamente, e prima dell'assemblaggio, si ricavano nei setti verticali e nella soletta inferiore i fori di alloggiamento dei fili di precompressione, di diametro pari a circa 40 mm, tale operazione veniva realizzata mediante dei mandrini sfilabili. L'assemblaggio e la sigillatura dei conci con un getto di calcestruzzo in opera, precedevano il getto in opera della testate, dei trasversi e della soletta (figura 1).

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 post-tensionamento dagli alloggiamenti (figure 2, 3).

Il crollo è avvenuto sulla prima campata nord in maniera asimmetrica a circa 1/3 della lunghezza. Ad una ispezione preliminare della struttura collassata è emersa la mancan-

za di riempimento in parte dei condotti ove erano alloggiati i cavi di post-tensionamento.

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. In alcuni punti è stato osservato il distacco del copriferro e l'esposizione dei cavi. 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 predisposizione 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 ivi gran parte della sezione dei fili, mentre la maggior parte della superficie era immune da attacchi corrosivi.

L'analisi del collasso del ponte di S. Stefano [Proverbio, E., Lagana, G., Venturi, V., "Il collasso del ponte di S. Stefano: un esempio estremo di degrado delle strutture in calcestruzzo armato precompresso", L'Edilizia, 3, giugno-luglio 2001] mette in luce alcuni punti fondamentali riguardanti il problema della durabilità delle strutture in calcestruzzo 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.

Il ponte pedonale sulla Lowe's Motor Speedway

Il 20 maggio 2000, uno dei ponte pedonali sulla Lowe's Motor Speedway nel Concord, North Carolina, progettato per sostenere in sicurezza il traffico pedonale sulla Hi-

2, 3. La struttura del ponte S. Stefano dopo il collasso. Distacco dei conci di prefabbricazione ed estrazione dei cavi di precompressione.



ghway 20 è crollato ferendo 107 spettatori che abbandonavano il circuito motoristico (figura 4).

Il ponte, costato circa 1 milione di dollari e costituito da otto elementi prefabbricati a doppia T con una sezione totale di 5 x 24 m ed una lunghezza di 98 m, era stato costruito nel 1995, insieme ad un secondo posizionato a circa 460 m di distanza, secondo le specifiche del Dipartimento dei Trasporti del North Carolina (NCDOT) e le specifiche federali riguardanti i ponti pedonali che attraversano arterie autostradali [Goins, D. "Motor speedway bridge collapse caused by corrosion", *Materials Performance*, 36 (7) 18-19, 2000].

Il ponte pedonale era gestito da una società privata e non era stato sottoposto ad ispezione periodica, contrariamente alle indicazioni del NCDOT che prescrive un controllo ogni due anni. Il secondo ponte, ispezionato successivamente al crollo del precedente, è stato chiuso dopo il riscontro di segni di possibili attacchi corrosivi.

Le indagini successive al crollo hanno evidenziato evidenti segni di corrosione a carico dei cavi di pretensionamento delle strutture prefabbricate in una sezione limitata che era stato oggetto di sigillatura con malta successivamente alla fase di pretensionamento (figura 5). Successivamente è stato riscontrato che la malta utilizzata conteneva una quantità molto elevata di cloruro di calcio.

Il fenomeno di intensa corrosione che ha portato al crollo della struttura è fortemente connesso con la tecnologia costruttiva utilizzata. Durante la prefabbricazione delle strutture a doppia T, prima dell'indurimento del calcestruzzo, al fine di aumentare lo stato dei tensioni dei cavi, era stato utilizzato un punzone per flettere i cavi stessi come indicato in figura 6.

Dopo la maturazione del calcestruzzo il punzone veniva rimosso ed il foro lasciato veniva riempito con malta, che in questo caso conteneva un'elevata percentuale di cloruro di calcio, probabilmente impiegata come accelerante per la maturazione della malta stessa. Ciò ha portato inevitabilmente all'innescarsi di intensi fenomeni corrosivi a carico dei cavi di precompressione (figura 7).

Il problema del controllo delle strutture danneggiate

I concetti di affidabilità, controllo e durabilità sono piuttosto recenti nel settore delle costruzioni civili. La maggior parte delle strutture viarie in calcestruzzo armato (ponti, pile, ecc.) nella rete stradale italiana, così come in altri paesi europei che sono stati oggetto di intensi sforzi di riqualificazione dopo i danneggiamenti della Seconda Guerra mondiale, sono stati costruiti senza alcuna considerazione di tali concetti. Ora che l'età media di queste costruzioni si avvicina ai 40-50 anni i gestori di tali strutture (Enti pubblici e privati, Comuni, Regioni e Province) iniziano a richiedere assicurazioni sempre maggiori sul grado di affidabilità e sicurezza di tali strutture.

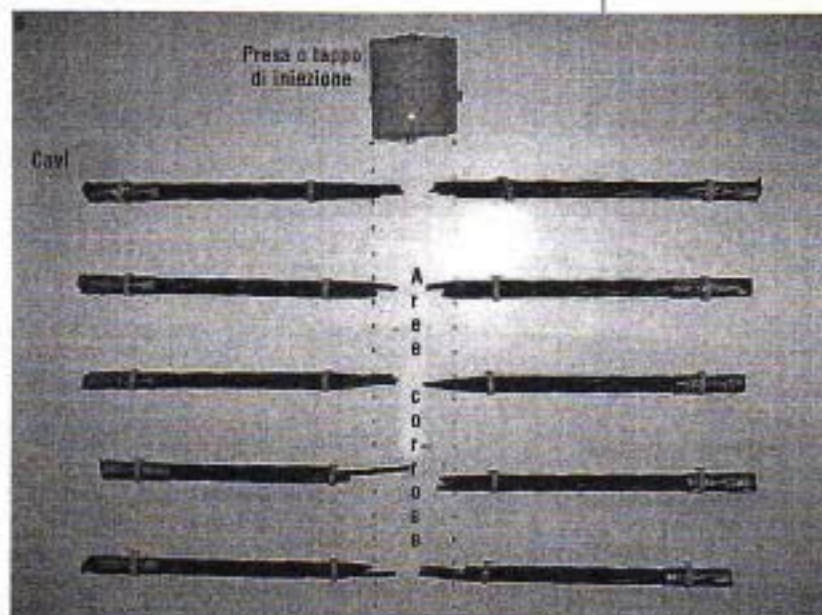
Le procedure per il controllo delle strutture in calcestruzzo precompresso sono considerevolmente differenti da quelle utilizzate per le strutture in c.a. convenzionali. In generale vi è una ridotta evidenza esterna dei danni o del deterioramento della struttura. La fuoriuscita occasionale di qualche cavo dagli ancoraggi o dalla superficie di travi o lastre potrebbe non essere sufficiente ad identificare un danneggiamento in atto. Dal momento che le strutture in c.a.p. possono raggiungere uno stato strutturale critico (precedente il collasso) senza l'apparizione di fessurazioni evidenti o deflessioni, è fondamentale sviluppare dei metodi di indagine che possano determinare il reale stato di degrado di questa tipologia di strutture.

Attualmente le tecnologie di indagine tecnologicamente più avanzate e offerte sul mercato forniscono infor-



4. Uno dei due ponti pedonali sulla Lowe's Motor Speedway crollati nel maggio 2000.

5. Corrosione dei trefoli in corrispondenza della sigillatura con malta.



mazioni indirette sullo stato di degrado delle strutture. Tra queste si trovano le indagini sclerometriche (UNI 9189 e ASTM C 805) e le indagini ultrasonore (UNI 9524/89 e ASTM C 597) che permettono di valutare indirettamente il modulo elastico del calcestruzzo, eventuali zone a densità differente e la presenza di discontinuità di grosse dimensioni, misure elettrochimiche quali mappature di potenziale (UNI 9535, UNI 10174 e ASTM C 876) e mappature di resistenza di polarizzazione (tale tecnologia è in realtà applicata in Italia solo a livello sperimentale, mentre ha una discreta affermazione negli altri Paesi Europei). Questi ultimi tipi di indagine sono però utilizzabili solo per l'armatura semplice o l'armatura di precompressione a fili aderenti (non per l'armatura di post-compressione).

Per la valutazione dello stato di degrado dei trefoli di precompressione, le tecnologie sono ancora a livello di spe-

rimentazione e la loro diffusione è limitata a quei Paesi in cui centri di ricerca o Università hanno dato impulso allo sviluppo tecnologico delle apparecchiature stesse (Danimarca, Olanda, Germania e USA). Tra queste le più importanti sono le indagini con Radar Penetrante (BAM Berlin, Germania), le indagini radiografiche ad alta energia (FORCE Institute, Copenhagen, Danimarca).

La tecnica del Echo Impulsivo è una tecnica recentemente sviluppata per le indagini su strutture piane in calcestruzzo (determinazione dello spessore e delaminazioni) che solo recentemente è stato oggetto di normativa specifica (ASTM C1383-98). L'impiego per il controllo di strutture in c.a.p. è ancora in fase di studio sebbene sia stata applicata in più casi soprattutto in Germania e Danimarca.

L'applicazione di tecniche di induzione magnetica, normalmente utilizzate per l'ispezione di funi metalliche, per le indagini su strutture in c.a.p. è stata oggetto ripetuto di attenzione negli anni recenti per la caratteristica fondamentale di poter dare un segnale direttamente correlato con lo stato di degrado dell'armatura metallica. Negli Stati Uniti d'America tale tecnologia è stata oggetto di un brevetto nel 1982 e recentemente è stata ripresa come oggetto di un progetto di ricerca specifico dalla Federal Highway Administration. In Europa una tecnologia simile, basata sull'impiego di sensori magnetici SQUID è stata sviluppata dal Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg (FMPA) di Stoccarda e dal Forschungszentrum Jülich, uno strumento sperimentale di simili prestazioni è tuttora oggetto di studio da parte della Technische Universität di Berlino.

L'applicazione della tecnologia di EA nel settore civile è attualmente limitata ad un numero ristretto di applicazioni su strutture in acciaio (ponti metallici), mentre un numero crescente di attività di ricerca è volta all'applicazione dell'EA per lo studio di fenomeni di fessurazione del calcestruzzo sotto carico o per la valutazione di fenomeni di movimenti relativi tra componenti di una struttura. Alcuni risultati di un certo interesse sono stati riportati in letteratura circa l'applicazione dell'EA per la rilevazione di fenomeni corrosivi sull'acciaio in strutture in calcestruzzo armato e durante test di pull-out. Un monitoraggio in continuo di strutture in calcestruzzo armato precompresso è applicato con successo in Canada dal 1994, mentre negli Stati Uniti è stato finanziato recentemente (1998) un progetto per l'impiego dell'EA per il controllo di strutture in calcestruzzo armato post-teso.

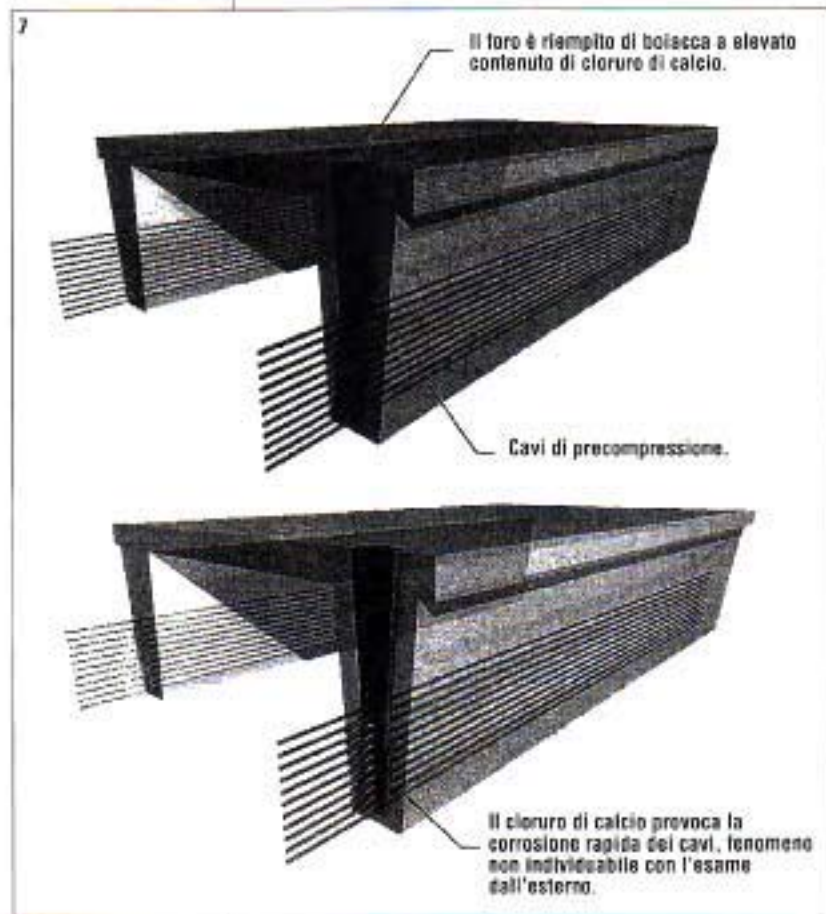
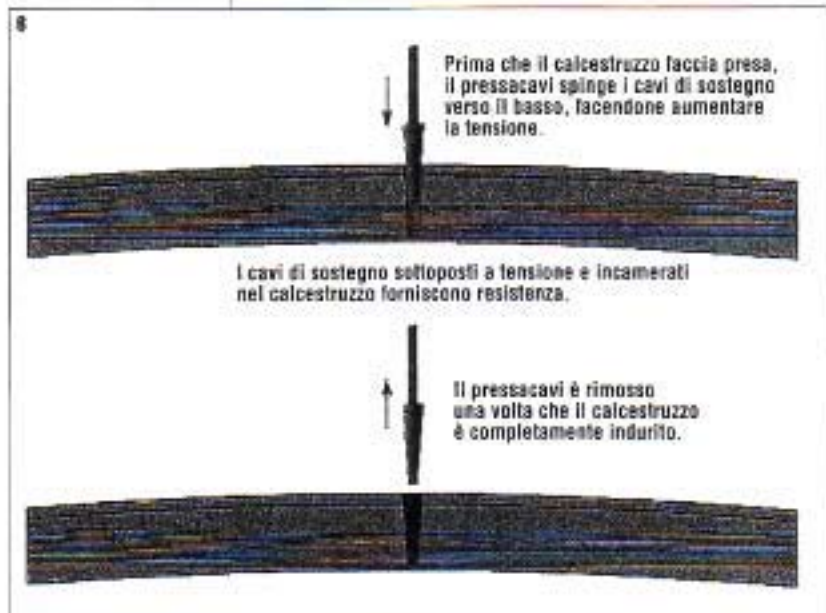
L'inconveniente più significativo di tutte queste tecniche consiste comunque nel fatto che la zona danneggiata sia localizzata a priori e che tali zone siano facilmente accessibili per la collocazione dei sistemi di misura e monitoraggio.

A causa di tali limitazioni, i metodi di indagine non distruttivi consentono di quantificare un danno già localizzato (ad esempio mediante indagine visiva) soltanto in prossimità della superficie esterna della struttura.

L'utilizzo di tali metodi per la localizzazione e la conseguente quantificazione del danno diventa improponibile per strutture estese e alquanto complesse, richiedendo in alcuni casi tempi di indagine proibitivi. I metodi di identificazione del danno basati sull'analisi del comportamento dinamico della struttura possono rappresentare in taluni casi una valida alternativa ai metodi di indagine locale suddetti e hanno il grande vantaggio di costituire un approccio quantitativo globale di identificazione del danno, che consente di analizzare anche strutture complesse e di una certa estensione (questo è spesso il caso delle strutture da ponte).

L'impiego delle tecniche di identificazione modale del danno possono farsi risalire ai primi anni 50, soprattutto con riferimento ad applicazioni in campo aerospaziale e nello studio di strutture off-shore. L'estensione di tali tecniche nelle analisi sperimentali condotte sulle strutture da ponte sono più recenti e sono state adottate sia per la individuazione e la quantificazione del danno che per la caratterizzazione dinamica di strutture oggetto di sistematici interventi di riparazione [Sulawu, O., S., Williams, C., "Review of full scale dynamic testing of bridge structures", Engineering structures, 17 (2), 113-121, 1995]. L'impiego di tali tecniche nella pratica sperimentale più recente ne ha evidenziato i notevoli vantaggi, considerato che esse costituiscono l'unico approccio di tipo non invasivo capace di determinare in modo oggettivo le condizioni strutturali globali di molte tipologie di infrastrutture civili (compresi i ponti).

Per la determinazione dei parametri dinamici deformate,



frequenze e smorzamenti modali di strutture viarie in c.a.p. è necessario acquisire una serie di grandezze cinematiche sperimentali (spostamenti, tensioni, accelerazioni). I parametri dinamici così individuati possono essere utilizzati per valutare la durata a fatica dell'opera, per tarare modelli di calcolo agli elementi finiti su cui effettuare le verifiche, per analizzare effetti dinamici anomali. In particolare, il confronto tra i dati rilevati in tempi diversi, segnala una eventuale riduzione di efficienza strutturale, nonché la presenza di eventuali anomalie. Attualmente le modalità di esecuzione delle prove prevedono le seguenti operazioni:

- misura delle accelerazioni indotte dal traffico veicolare a mezzo di accelerometri di sensibilità adeguata in almeno 6 punti di ciascuna campata e registrazione di accelerogrammi con unità di acquisizione, condizionamento ed amplificazione dei segnali stessi;
- controllo in sito delle frequenze contenute nei segnali al fine di escludere disturbi e rumori di fondo;
- elaborazione dei segnali via FFT e, ove necessario di ulteriori algoritmi (Hilbert, Laplace, ecc...) per una completa identificazione dei parametri modali quali frequenze proprie e smorzamenti.

Il cambiamento nelle proprietà strutturali determina in generale uno "shift" delle frequenze naturali del sistema e poiché un danno è caratteristico di una riduzione di rigidità della struttura, le frequenze naturali tendono in particolare a diminuire. Purtroppo un metodo di identificazione basato su queste misure presenta notevoli limitazioni con riferimento alle strutture dell'ingegneria civile.

È stato infatti mostrato che variazioni "misurabili" delle frequenze naturali di una struttura da ponte si possono osservare solo in presenza di alti livelli di danno, mentre per modesti livelli di danno spesso le variazioni non sono apprezzabili. Attualmente il metodo di identificazione del danno basato su una misura dello "shift" in frequenza può essere impiegato nei casi in cui è possibile effettuare misure accurate mediante apposite strumentazioni ad alta sensibilità, procedura che può essere messa in atto ad esempio nel controllo di qualità della produzione di componenti meccanici. Un altro aspetto da tenere in conto è legato al fatto che le frequenze naturali di una struttura costituiscono soltanto delle proprietà dinamiche globali e non è ben chiaro come un accertamento di una variazione di esse possa andare oltre l'identificazione di una semplice presenza generica di danno. In altre parole, tale approccio non fornisce alcuna informazione sulla localizzazione del danno dovuto a modifiche strutturali.

Un'eccezione a tale limitazione si ha se si fa riferimento alle alte frequenze, che sono generalmente associate a forme modali locali, ma le difficoltà insorgono in relazione alla possibilità di attivare questi modi con opportune eccitazioni e alla loro difficile identificazione, causata dalla alta densità delle alte frequenze. Variazioni multiple nelle frequenze naturali della struttura possono dare informazioni sulla localizzazione del danno poi che modifiche strutturali in punti diversi possono causare differenti combinazioni delle variazioni delle frequenze naturali. Tuttavia, nelle pratiche applicazioni non si ha mai a disposizione un sufficiente numero di frequenze con significative variazioni che consenta di determinare in modo univoco la localizzazione del danno.

Conclusioni

Recenti casi di crolli di strutture da ponte ripropongono ancora una volta, il problema della sicurezza di esercizio delle opere civili e rilanciano con forza l'esigenza della valutazione del degrado e della stima delle residue capacità portanti delle strutture in esercizio in ambienti aggressivi.

La maggioranza delle strutture in calcestruzzo armato precompresso della rete viaria italiana, così come quella della maggior parte dei Paesi Europei che sono stati oggetto di fasi 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.

In generale le cause dell'insorgenza dei fenomeni corrosivi sono generalmente da adurre ad errori nella progettazione o durante la messa in opera - così come l'esecuzione di misure di prevenzione dei fenomeni corrosivi inaccurate o inefficienti. Ambienti particolarmente aggressivi quali quelli marini o montani possono accelerare notevolmente l'intensità dei fenomeni sino a ridurre drasticamente la vita utile di una struttura.

Le strutture in calcestruzzo precompresso costruite negli anni 50-60 con una tecnologia ancora non matura sono a tal 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 effetti 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 evidenziabili indizi di cedimento strutturale.

Uno degli aspetti che causa maggior sconforto tra i gestori delle strutture viarie è la difficoltà nell'ispezione degli elementi portanti nelle strutture in c.a.p.. Uno dei problemi maggiori durante l'ispezione delle strutture post-teso è ad esempio quello di determinare se i condotti, nelle strutture in calcestruzzo post-teso, siano riempiti completamente con la malta e se questa protegga perfettamente l'acciaio. È infatti frequente l'osservazione di condotti con estese sezioni vuote o parzialmente riempite. Problema di pari importanza è quello conseguente alla difficoltà di valutare lo stato delle zone di ancoraggio.

Negli ultimi dieci anni sono state sviluppate a tal proposito numerose tecniche di indagine non distruttive sia per le valutazioni del grado di riempimento dei condotti che per stimare il grado di danneggiamento da corrosione dei cavi di precompressione.

Tra queste emergono la tecnica dell'eco da impatto (impact echo), gli ultrasuoni (ultrasound), il radar penetrante (ground penetrating radar), la radiografia ad alta energia (high energy radiography), la valutazione della distorsione del flusso magnetico (magnetic flux leakage), la tecnica ad impulso riflettometrico (reflectometric impulse measurement technique) e l'emissione acustica (acoustic emission).

Tali tecniche sono comunque affette da vari limiti. Non sono facili da impiegare e richiedono personale altamente specializzato. L'analisi dei dati costituisce generalmente la fase critica nella valutazione del danno e richiede una notevole dose di esperienza e criticismo.

Dal momento che le tecniche non sono tra loro equivalenti è spesso utile impiegarle in modo accoppiato al fine di avere una visione comprensiva quanto più accurata dello stato della struttura. ■

6. Tesatura dei cavi nella struttura prefabbricata del ponte sulla Lowe's Motor Speedway.

7. Riempimento dei loro dopo maturazione del calcestruzzo con malta inquinata da cloruri.