

VULNERABILITÀ DEI PONTI E PIANIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI DI MANUTENZIONE

UNO STUDIO DI MONITORAGGIO STRUTTURALE E RICERCA INDUSTRIALE SU NUOVI MATERIALI AD ELEVATE PRESTAZIONI AL FINE DI OTTIMIZZARE, RENDERE PIÙ CELERI E PIÙ PERFORMANTI GLI INTERVENTI DI DIAGNOSI DEL DEGRADO E QUELLI DI MANUTENZIONE DEI PONTI ESISTENTI

Le recenti "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti" [1], edite dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, definiscono una dettagliata procedura, ponderata per monitorare lo stato di salute, prevenire livelli inadeguati di degrado e gestire la sicurezza dei ponti esistenti. Come naturale conseguenza di questo processo conoscitivo, l'azione successiva conduce alla pianificazione degli interventi di riparazione e di manutenzione straordinaria che - quando gestiti e programmati secondo strategie ottimali - consentono di estendere nel tempo la vita nominale delle strutture. L'analisi approfondita delle strutture, del loro degrado e della vulnerabilità dei ponti esistenti apre nuovi scenari di ricerca su prodotti da ripristino innovativi, ad elevate prestazioni, sia per

interventi di messa in sicurezza d'emergenza che di manutenzione straordinaria.

Un gruppo di ricerca dell'Università degli Studi di Brescia, in sinergia con due Aziende private - la Società Laboratorio Tecnologico Lombardo Srl, specializzata nella diagnostica strutturale e nelle prove su materiali da costruzione, e Azichem Srl nella produzione di prodotti speciali -, sta unendo e facendo colloquiare il monitoraggio strutturale con la ricerca industriale su nuovi materiali ad elevate prestazioni, al fine di ottimizzare, rendere più celeri e più performanti gli interventi di diagnosi del degrado e quelli di manutenzione dei ponti esistenti.

LINEE GUIDA E SCHEDE DI ISPEZIONE

Le Linee Guida, emanate nell'Aprile 2020 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), nascono in risposta alle principali problematiche che caratterizzano la gestione del patrimonio infrastrutturale presente sul nostro territorio e trattano una tematica complessa che richiede attenzione su diversi aspetti: tecnici, sociali ed economici.

Esse si configurano come un approccio multilivello attraverso il quale vengono date indicazioni riguardo la metodologia di:

- censimento e classificazione delle opere;
- valutazione della sicurezza;
- pianificazione dell'attività di sorveglianza e monitoraggio.

Il territorio del nostro Paese è caratterizzato da un elevato numero di ponti che variano molto tra loro per i materiali e le tecniche costruttive adottate, oltre che per le diverse epoche storiche alle quali risalgono.

Buona parte del patrimonio infrastrutturale risulta essere datato o addirittura a fine vita, spesso con carichi e flussi di traffico più consistenti di quelli previsti da progetto; su tali manufatti, inoltre, vi è stata carenza di gestione e manutenzione e l'insie-



1. L'analisi della distribuzione e dei processi di rottura, snervamento e sfilamento delle fibre

me di questi fattori ha determinato, in molti casi, una condizione caratterizzata da fenomeni di degrado anche significativi. La rete stradale risulta essere gestita da enti molto diversi tra loro e tra questi, spesso, vi sono piccole realtà amministrative (comunali o provinciali), le quali si trovano, nella maggior parte dei casi, ad avere a disposizione limitate risorse economico-temporali.

Un approccio completo per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti richiederebbe una prima fase conoscitiva, composta da un'analisi storico-critica di tutte le strutture componenti l'opera, seguita da campagne di indagini necessarie per poter effettuare tutte le verifiche del caso; tuttavia, questo procedimento risulta essere oneroso e difficilmente percorribile, in quanto comporterebbe indagini approfondite su tutti i ponti. Per questo motivo, è stato introdotto un approccio multilivello, con l'idea di procedere per livelli di analisi e approfondimento successivi, concentrando le indagini più dettagliate, attraverso un sistema di prioritizzazione, soltanto laddove risulti necessario.

UN APPROCCIO MULTILIVELLO

Come già commentato in modo esteso nel recente articolo di "Strade & Autostrade" [2], al quale si rimanda per un'analisi più approfondita sull'argomento, l'approccio delle Linee Guida è suddiviso in sei livelli di indagine: i primi tre (livello 0, livello 1 e livello 2) prevedono valutazioni estese su scala territoriale

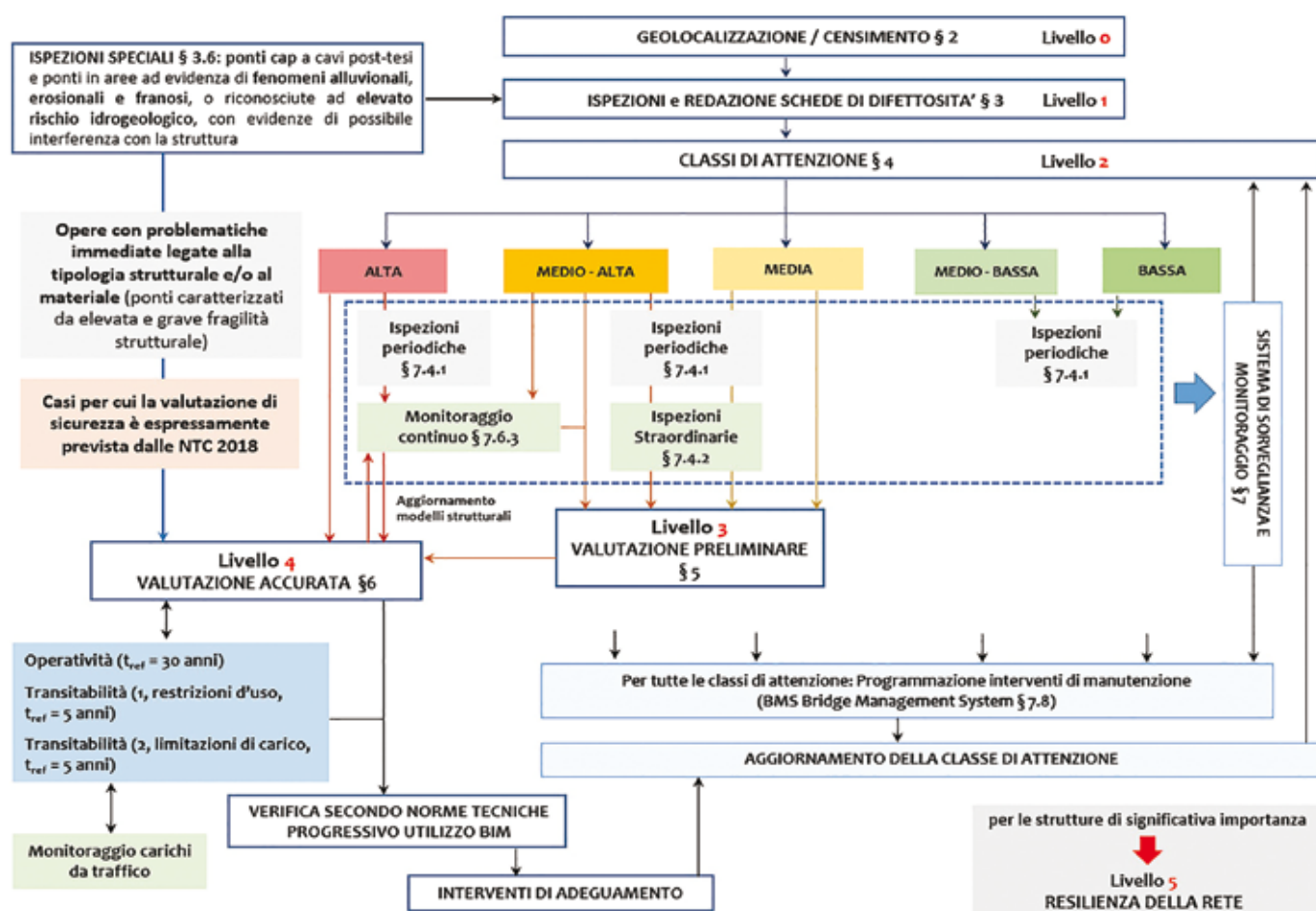
a tutti i manufatti in gestione all'Ente; combinando i risultati di questi primi tre livelli si arriva alla definizione della cosiddetta Classe di Attenzione (CdA) del manufatto, sulla base della quale si procede eventualmente con l'esecuzione di valutazioni accurate (livello 3 e livello 4).

Solo per ponti considerati di significativa importanza all'interno della rete stradale vengono effettuati studi approfonditi relativi alla rilevanza trasportistica (livello 5), anche se il procedimento in quest'ultimo caso non è ancora normato.

L'iter predisposto dalle Linee Guida prevede che, a seguito della compilazione delle schede difettologiche, vi sia il passaggio al livello 2, vale a dire alla fase di definizione della CdA da attribuire all'opera, con però alcune eccezioni.

È il caso, ad esempio, dei ponti in c.a.p. a cavi post-tesi per i quali risulta difficile valutare l'effettivo stato di degrado tramite una semplice ispezione visiva e diventa quindi necessario effettuare indagini diagnostiche più accurate. Per questo motivo le Linee Guida hanno introdotto le "Ispezioni speciali", ovvero verifiche finalizzate a determinare la necessità di un eventuale passaggio dell'opera direttamente a valutazioni di livello 4. Nel caso in cui, invece, il manufatto versi in buone condizioni questo verrà classificato mediante il medesimo procedimento previsto per le altre tipologie strutturali.

L'approccio multilivello può essere convenientemente schematizzato in Figura 2.



2. Lo schema logico dell'approccio multilivello

TECNICHE DI INDAGINE E ISPEZIONI SPECIALI

L'esecuzione di indagini speciali previste dalle linee guida, su opere con sistemi di precompressione a cavi post-tesi, sono finalizzate alla valutazione del loro effettivo stato di conservazione e richiedono saggi e misurazioni con l'impiego di maestranze qualificate e attrezzature quali il by-bridge (Figura 3). Le informazioni fornite da tali indagini consentono all'Ingegnere di esprimere e quantificare il margine di sicurezza dell'opera e la massima capacità portante.

Gli impalcati da ponte con travi in c.a.p. a cavi post-tesi vengono considerati particolarmente vulnerabili a causa di diversi fattori. A partire dalla metà degli anni Cinquanta fino alla metà degli anni Settanta, le Imprese italiane sfruttarono la tecnica della precompressione a cavi post-tesi per realizzare un elevato numero di ponti di grande luce, riuscendo a contenere le dimensioni delle travi.

L'adozione di questa tecnica portò però la mano d'opera, spesso non specializzata, a scontrarsi con lavorazioni particolarmente complesse impiegando inoltre procedure non del tutto adeguate e materiali non sempre idonei. Gli elementi che risalgono a questo periodo storico sono dunque spesso interessati da difetti costruttivi, i quali possono incidere in maniera importante sulla durabilità di tali opere. La prassi progettuale del passato prevedeva infatti spessori ridotti rispetto a quelli necessari a proteggere adeguatamente i trefoli dalla corrosione. Questo perché la tendenza del tempo era quella di minimizzare i costi di produzione richiesti dall'industrializzazione dei processi costruttivi, e ciò avveniva attraverso l'ottimizzazione spinta delle sezioni resistenti.



3. Vista d'insieme delle prove diagnostiche con by-bridge

A questo si aggiungeva spesso una scarsa cura nella realizzazione dei getti e dei sistemi di protezione dei cavi, portando dunque ad avere copriferro e spessori delle anime già ridotti in partenza.

Il problema principale, per il quale si rendono necessarie le ispezioni speciali su impalcati costruiti con questa tecnologia, risiede nel fatto che l'eventuale corrosione dei cavi da post-tensione potrebbe portare a una loro rottura fragile e improvvisa, trattandosi di acciai ad alta resistenza, senza dunque che si manifestino segnali di sofferenza della struttura quali ad esempio quadri fessurativi progressivi sulla superficie. Va tenuto in conto, inoltre, che il rischio di corrosione dei cavi dipende principalmente dalla qualità e dalla compattezza dell'iniezione delle guaine, le quali non possono essere valutate mediante una semplice ispezione visiva e richiedono perciò indagini approfondite.

Non va dimenticato, infine, che il contributo resistente fornito dalla precompressione consente di ridurre la quantità di armatura lenta a cui affidare la resistenza a flessione e al taglio. La corrosione dei trefoli e le fisiologiche perdite di precompressione potrebbero dunque ridurre notevolmente la capacità portante di queste strutture per le quali diventa fondamentale risalire, attraverso le ispezioni speciali, alla definizione del loro stato di salute.

La programmazione di un'attività di diagnostica approfondita risulta essere importante, in generale, anche per poter realizzare un progetto di rinforzo ottimale; nel caso dei ponti in Calcestruzzo Armato Precompres-



4A e 4B. Dettaglio (4A) e vista d'insieme (4B) della prova di rilascio tensionale su filo di precompressione



5. La prova secondo la EN 14651:2007: microcalcestruzzo con fibre metalliche e valutazione del limite di proporzionalità (LOP) e delle resistenze residue

so (c.a.p.) possono giocare un ruolo importante le prove di rilascio tensionale sul calcestruzzo (o sui trefoli stessi), atte a quantificare lo stato di precompressione residua (Figure 4A e 4B).

Oltre a tecniche diagnostiche parzialmente distruttive, possono essere particolarmente utili anche campagne di indagini eseguite con metodi del tutto non distruttivi, quali ad esempio le acquisizioni dinamiche, attraverso le quali cercare di associare il livello di precompressione e/o di danno della struttura a una sua variazione della frequenza propria.

PRODOTTI DA RIPRISTINO E TECNICHE DI CALCOLO INNOVATIVE

L'analisi approfondita delle strutture, del loro degrado e della vulnerabilità dei ponti esistenti apre nuovi scenari di ricerca su prodotti da ripristino innovativi, a elevate prestazioni, sia per interventi di messa in sicurezza d'emergenza che di manutenzione straordinaria.

All'interno del panorama molto ampio delle tecniche di rinforzo, un ruolo importante è ricoperto da malte, betoncini e calcestruzzi fibrorinforzati [3 e 4] ad alte prestazioni (High Performance Fiber Reinforced Concrete - HPFRC), utili soprattutto per incamiciature e rinforzi locali, in particolar modo per rinforzi a taglio. L'aggiunta delle fibre conferisce ai conglomerati cementizi, in campo fessurato, una significativa resistenza residua a trazione (tenacità).

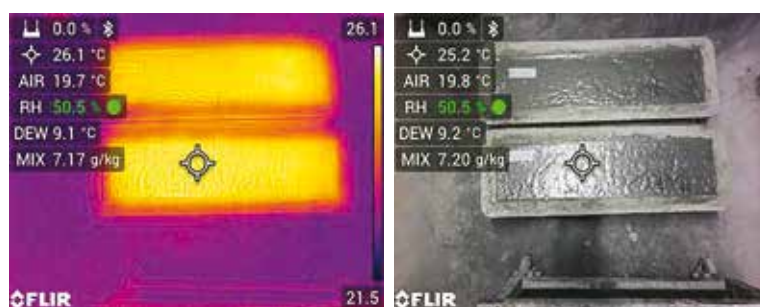
L'incremento di tenacità è un aspetto particolarmente rilevante nei conglomerati cementizi HPC (High Performance Concrete), materiali che, notoriamente, in assenza di fibre, denotano un comportamento fragile. Il conferimento di tenacità agli HPC dipende da molteplici fattori, tra i quali:

- la forma, il rapporto di aspetto (ovvero il rapporto lunghezza/diametro equivalente della fibra), la percentuale volumetrica e le caratteristiche fisico meccaniche della fibra;
- la compattezza della matrice legante;
- la distribuzione granulometrica, la morfologia e le caratteristiche fisico-chimiche degli aggregati, questi ultimi parte preponderante del conglomerato.

Il team di ricerca sta studiando e sviluppando materiali innovativi con valutazioni particolarmente accurate riguardanti l'energia di frattura [5], lo sviluppo delle prestazioni fisico-meccaniche durante tutto il processo di maturazione, la durabilità degli HPFRC (Figura 5).

Dal punto di vista formulativo, la ricerca si sta concentrando sulla valutazione di mix di fibre con diversi rapporti d'aspetto (lunghezza/diametro della fibra) e sull'utilizzo di quote importanti di materie prime seconde (mps), derivanti dal riciclo di scarti di produzioni industriali.

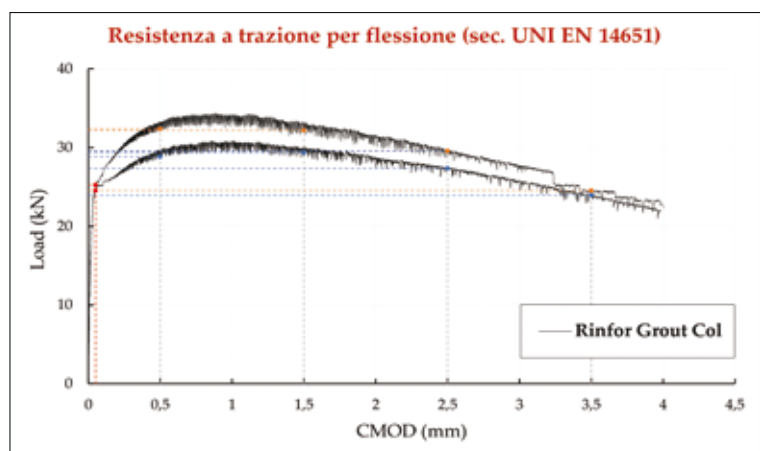
I risultati fin qui ottenuti stanno dimostrando che determinate mps, quando opportunamente selezionate e analizzate, permettono di raggiungere importanti traguardi di ecosostenibilità e, contemporaneamente, interessanti incrementi prestazionali su malte e betonci-



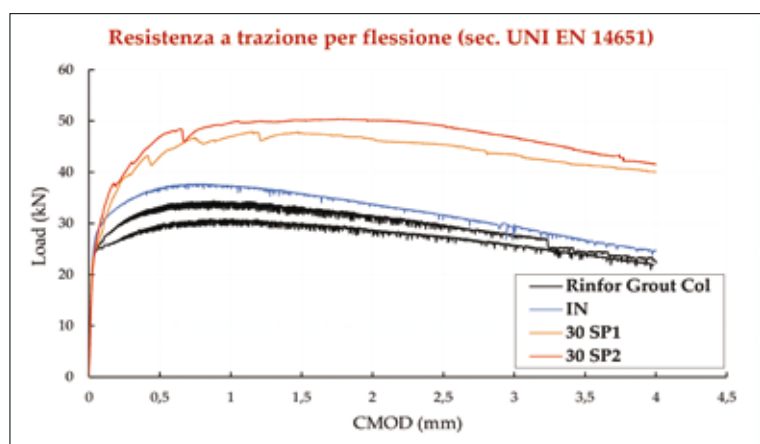
6A e 6B. La valutazione del processo esotermico con termocamera

ni colabili a elevatissime prestazioni. I riscontri fin qui ottenuti risultano molto stimolanti nei riguardi dei seguenti aspetti:

- la possibile riduzione del contenuto di leganti idraulici con l'associata riduzione del calore di idratazione (Figure 6A e 6B);
- lo sviluppo di prestazioni meccaniche estremamente elevate alle brevi stagionature, con traguardi di resistenza meccanica a compressione, dopo solo 24 ore di maturazione, che superano abbondantemente i 60 MPa;
- incrementi di resistenza all'abrasione e di modulo elastico;
- incrementi nelle resistenze di picco e nella tenacità, valutati su prove a flessione trazione con il metodo della trave pre-intagliata (in accordo alla Normativa EN 14651 - Figure 7 e 8).



7. LOP e resistenze residue del formulato Rinfor Grout COL



8. LOP e resistenze residue, cfr. Rinfor Grout COL/formulati sperimentali

CONCLUSIONI

Queste risposte preliminari consentono già di delineare sviluppi di questa ricerca estremamente interessanti. I test ovviamente continuano e i risultati saranno oggetto di aggiornamenti e specifiche presentazioni.

Le particolari prestazioni fisico-meccaniche dei materiali, insieme a tecniche di calcolo innovative e più raffinate, si prefiggono lo scopo di implementare procedure d'intervento finalizzate a risanare, rinforzare e allungare il tempo di esercizio di strutture esistenti.

Il Laboratorio Tecnologico Lombardo

Laboratorio Tecnologico Lombardo è una Società specializzata nella diagnostica strutturale e nello studio dei materiali da costruzione, che fornisce consulenze, prove di laboratorio e supporto tecnico durante i processi di edificazione e verifica delle opere finite.

La Società Azichem

Azichem è un'Azienda produttrice di elevata professionalità ed esperienza, certificata secondo EN ISO 9001 ed EN ISO 45001, costantemente impegnata nella ricerca e nello sviluppo di tecnologie e prodotti innovativi per l'edilizia specializzata. Produce e commercializza i propri formulati sin dal 1987 ed è da sempre impegnata nel settore delle malte strutturali e delle fibre di rinforzo per il calcestruzzo armato.

Il raggiungimento di questi obiettivi eviterebbe, in determinati contesti, la completa sostituzione dei manufatti che - come inevitabile conseguenza - comporterebbe l'interruzione del traffico per periodi molto prolungati, con grosso impatto e conseguenti problemi economici sulla comunità, in particolar modo su aree produttive o su territori con viabilità già di per sé disagiata o sottodimensionata. ■

⁽¹⁾ Dottorando del Dipartimento DICATAM di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica presso l'Università degli Studi di Brescia

⁽²⁾ Direzione Tecnica di Azichem Srl

⁽³⁾ Direzione Tecnica del Laboratorio Tecnologico Lombardo Srl

⁽⁴⁾ Professore Ordinario del DICATAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica presso l'Università degli Studi di Brescia

Bibliografia

- [1]. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - "Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti", 04/2020.
- [2]. L. Merendi - "Ponti esistenti: novità e grandi questioni (ancora) aperte", "Strade & Autostrade" n° 157 Gennaio/Febbraio 2023, pag. 202.
- [3]. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - "Linea Guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)", 01/2019.
- [5]. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - "Linee Guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche", 07/2022.
- [5]. EN 14651/2007 "Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [Limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua]", 2007.