

Ispezioni speciali di opere in CAP a cavi post-tesi

Filippo Ferrari - Davide Guglielmo - Michele Mori *SINA (Gruppo ASTM)*

DA UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE, FRUTTO DELLA COLLABORAZIONE CON UNIVERSITÀ E TAVOLO TECNICO DEL CSLLPP, ALLA SUA APPLICAZIONE INDAGINI MULTILIVELLO SU OLTRE 70 OPERE DELLA RETE ASTM. COSÌ SINA STA ATTUANDO, SUL CAMPO, I DETTAMI DELLE LINEE GUIDA MINISTERIALI. L'OBIETTIVO: LA SICUREZZA DELLE INFRASTRUTTURE.

Le strutture precomprese a cavi post-tesi e iniettati possono essere soggette a pericolose situazioni di degrado legate a fenomeni di corrosione dei cavi. Questa tipologia di struttura risulta critica in quanto le tecniche di indagine convenzionali e/o le ispezioni visive non consentono di fornire un quadro conoscitivo sulle reali condizioni di degrado. Dal punto di vista normativo, le *Linee Guida* MIMS/MIT (aprile 2020) prevedono che, nel caso di ponti costruiti in calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi, preliminarmente alle valutazioni approfondite e di dettaglio di Livello 4, occorre eseguire ispezioni speciali atte a verificarne l'effettivo stato di conservazione. L'indicazione di eseguire ispezioni speciali, descritta al §3.6 delle *Linee Guida* e operativamente al §7.4.3.1., rappresenta solo un punto di partenza, in quanto non vengono fornite indicazioni specifiche su quantità da indagare e meto-



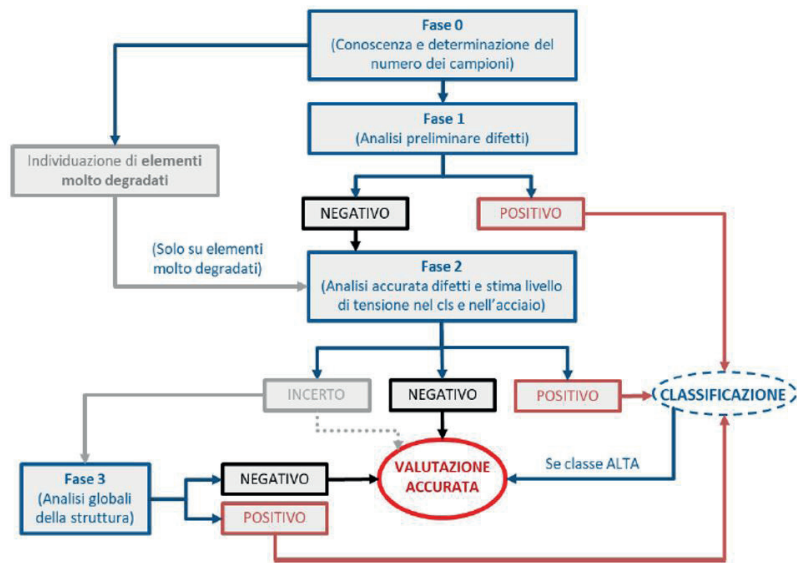
1. Tracciamento cavi post-tesi (in bianco), aree evidenziate dal tomografo (in rosso) e fori per le videoispezioni



dologie. Il gruppo ASTM gestisce circa 1.000 opere a cavi-post tesi per un totale di circa 7.200 campate e 32.200 travi: è evidente quindi la necessità di sviluppare un sistema di controllo multilivello efficace sia in prima fase di controllo di rete (*Network Level*), sia nel successivo approfondimento locale (*Project Level*) ove si fosse rinvenuta la possibile presenza di anomalie più o meno occulte. In questo contesto, SINA si è attivata, in collaborazione con diversi Enti Universitari (nell'ultimo triennio: Università di Pisa, Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, Università di Padova, Consorzio FABRE), per la migliore definizione di metodologie e processi attuativi. SINA, inoltre, ha partecipato al tavolo tecnico del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici che ha prodotto il manuale: "Ispezioni speciali su ponti esistenti in c.a.p. a cavi scorrevoli ai sensi delle Linee Guida: la classificazione e la valutazione accurata".

METODOLOGIA

Di fondamentale importanza nell'individuazione della metodologia da adottare per le ispezioni speciali, è stata la collaborazione iniziale avviata nel 2021 tra SINA e UniPI in cui sono state condotte attività sperimentali su campioni progettati presso il Laboratorio Ufficiale per le Esperienze sui Materiali da Costruzione del Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'ateneo pisano, nonché attività sperimentali *in situ* su diversi viadotti della rete ASTM. L'esecuzione di prove su campioni caratterizzati da difetti precostituiti ha permesso di verificare effettivamente quali fossero le strumentazioni più idonee a ottenere gli obiettivi prefissati,



2. Schema della metodologia

mentre la successiva esecuzione di campagne di indagine su alcuni casi studio reali ha permesso di testare se l'attività svolta in condizioni ideali fosse replicabile *in situ*. Nel manuale prodotto dal tavolo tecnico CSLLPP, che ha visto SINA - come anticipato - partecipare attivamente, è descritto nel dettaglio il processo da adottare per l'esecuzione delle ispezioni speciali. La metodologia proposta si basa su un approccio multilivello, le cui fasi sono rappresentate in fig. 2. La **Fase 0** prevede analisi i cui risultati, facendo riferimento a principi statistici visto l'impatto alla fruibilità della rete viaria dovuto alle indagini, portano alla definizione del quantitativo di elementi da indagare. La selezione degli elementi da indagare viene invece effettuata sulla base delle risultanze dell'attività ispettiva di sorveglianza di SINA. Passando all'attività in campo, la procedura prevede una **Fase 1** in cui viene eseguita un'analisi preliminare dei difetti per mezzo di prove non di-

struttive o semi-distruttive. Si parte con l'individuazione del tracciato dei cavi, attraverso indagini con antenna GPR, su cui vengono in seguito effettuate indagini tomografiche per l'individuazione delle zone di guaine con potenziali difetti di riempimento. L'ultimo step consiste nella verifica e quantificazione dei difetti rilevati per mezzo di videoispezioni. La **Fase 2** prevede invece la determinazione delle tensioni del calcestruzzo per mezzo di rilasci tensionali, la quantificazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio attraverso prove di durezza sui fili/trefoli costituenti i cavi e la quantificazione della tensione residua sui cavi tramite un diffrattometro a raggi X. Nel caso in cui, a seguito di questo set di prove, l'opera risultasse meritoria di valutazione accurata di Livello 4, allora la numerosità delle prove verrà ulteriormente incrementata secondo tabelle che fanno riferimento sempre a principi statistici come il metodo *t-Student*.



Fig. 3, 4. Video-ispezioni

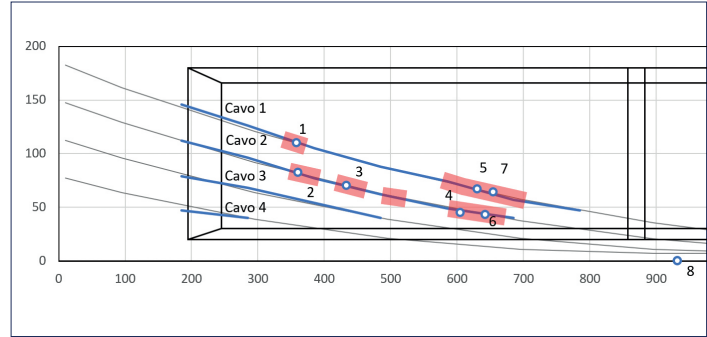


Fig. 5. Rilevamento dati Fase 1

RISULTANZE

La campagna d'indagine è iniziata nel febbraio 2022 e ad oggi ha interessato oltre 70 opere localizzate sulle varie tratte ASTM. Nella quasi totalità si è trattato di viadotti con impalcato a graticcio costituito da travi con sezione ad I semplicemente appoggiate e cavi di post-tensione a fili paralleli. Su oltre 30 di queste 70 opere è stata eseguita un'analisi dei risultati.

Fase 1. L'individuazione del tracciato dei cavi con antenna GPR (fig. 1, pag. precedente) è risultata in generale efficace e ha sempre confermato il tracciato di progetto. Le scansioni con tomografo per la localizzazione dei possibili difetti all'interno dei cavi hanno evidenziato zone potenzialmente difettose su circa 400 m dei 2.000 m indagati (20%). Per l'analisi dei dati relativi alle video-ispezioni (figg. 3, 4, 5), al

fine di correlare informazioni ripetute su travi dalle luci differenti e localizzare le eventuali zone di trave maggiormente soggette a difetti, si è proceduto con la creazione di una trave di dimensioni "standardizzate" su cui sono state collocate tutte le video-ispezioni effettuate. Gli istogrammi (figg. 6, 7) rappresentano la distribuzione delle difettosità relative a stato di iniezione nelle guaine e stato di conservazione dei cavi lungo i 5 quadranti in cui è stata divisa la trave. Relativamente allo stato di iniezione, i casi in cui il riempimento risulta totalmente assente tendono a concentrarsi nei pressi delle zone di testata. Nella parte di mezzeria si sono tuttavia riscontrati casi di iniezione incompleta e proprio in queste zone i fenomeni ossidativi dei cavi sono risultati maggiormente diffusi. È stata inoltre osservata una buona correlazione tra stato di iniezione nelle guaine e stato di conserva-

zione dei cavi: nelle zone in cui la guaina è risultata correttamente iniettata è stato rilevato un buono stato di conservazione dei cavi, sottolineando la già nota importanza dell'operazione di iniezione durante la fase costruttiva (fig. 8).

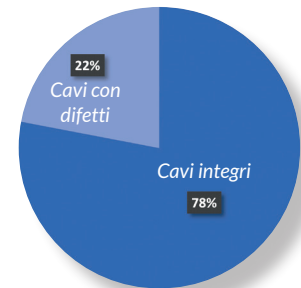
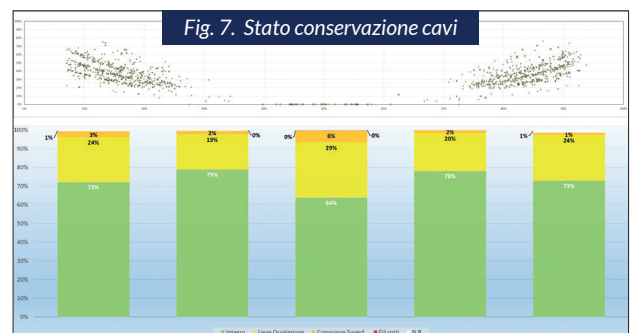
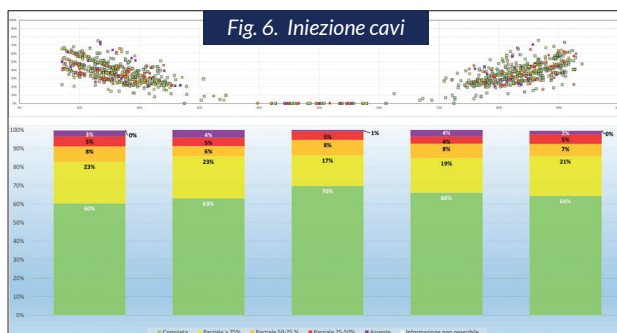


Fig. 8. Stato di conservazione dei cavi in guaine correttamente iniettate

Confrontando in fine le evidenze tomografiche con i risultati delle video-ispezioni, è stato possibile osservare che seppur il tomografo tenda a "sovrastimare" le zone potenzialmente difettose, fornisce



comunque una buona indicazione per l'identificazione delle aree su cui effettuare le video-ispezioni (fig. 9).



Fig. 9. Stato di iniezione in guaine in zone rilevate potenzialmente diftose dal tomografo

Fase 2. L'esecuzione di saggi diretti (fig. 11) ha consentito un'analisi più accurata dello stato di conservazione del cavo e l'esecuzione di prove di durezza Vickers sullo stesso. Analizzando la distribuzione dei risultati ottenuti da queste ultime, è stata osservata una media dei risultati delle prove attorno all'85% del valore di progetto e, in ogni caso, i valori di tensione stimati sono sempre risultati maggiori del 70% di quest'ultimo (fig. 12). Realtivamente alle prove diffrattometriche si è osservato che nel 75% dei casi i valori di tensione residua misurati sui fili risultano inferiori ai valori di tensione residua a tempo infinito indicati sul progetto. Tuttavia, si sottolinea che i risultati ottenuti dalle prove presentano un valore medio che si attesta attorno al 90% del valore di progetto. Circa l'accuratezza dei risultati è interessante il fatto che per prove eseguite su uno stesso filo di un cavo, il coefficiente di variazione risulta molto contenuto (CV medio pari al 5%); per prove eseguite su fili diversi tale parametro presenta valori più elevati, permettendo di dedurre che la prova

è molto sensibile alle condizioni in cui si presenta il singolo filo (fig. 13) (fig. 10). Le prove di rilascio tensionale (fig. 14), eseguite sulle travi in CAP, per caratteristiche proprie della metodologia sono risultate di più difficile interpretazione. Si specifica che i risultati delle prove sono ad oggi fortemente legati alla sensibilità dell'operatore in campo e permettono quindi di valutare solo qualitativamente l'eventuale presenza di precompressione sul cls. Le stime delle tensioni a partire dalle deformazioni misurate e dal modulo elastico forniscono infatti valori inferiori a quelli attesi (fig. 15, pag. seguente). Dal confronto dei risultati di rilascio con quelli delle prove diffrattometriche, si è osservata in generale una buona correlazione: ai valori più elevati delle deformazioni misurate sul cls corrispondono tensioni residue più elevate misurate sull'acciaio.



Fig. 10. Prova diffrattometrica



Fig. 11. Saggio diretto su cavo di post-tensione

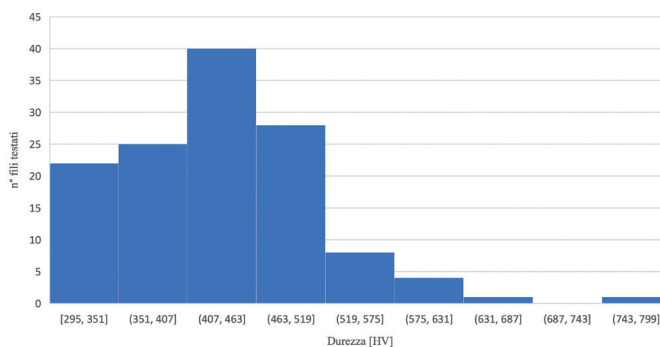


Fig. 12. Valori prove di durezza

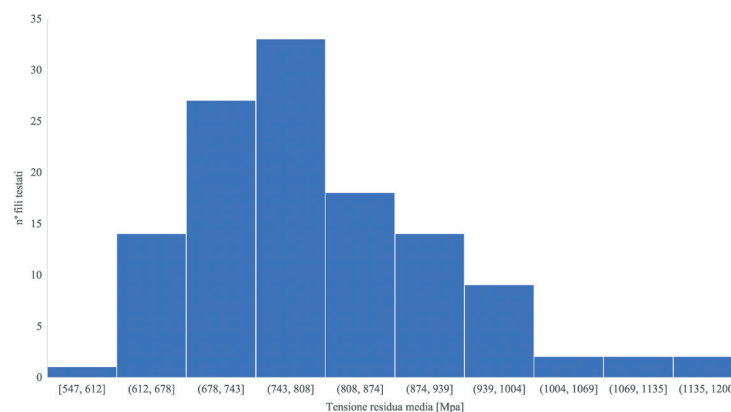


Fig. 13. Valori prove differometriche

CONCLUSIONI

Le attività di ricerca interuniversitarie e le campagne di indagine hanno permesso di raccogliere i primi dati utili ad aumentare il livello di conoscenza di ogni singola opera ed eseguire una prima analisi statistica relativamente all'efficacia delle varie tecnologie utilizzate, permettendo anche di evidenziarne le eventuali criticità. Ad esempio, la tomografia si è dimostrata uno strumento utile per le indagini ma ad oggi tende ancora a "sovrastimare" troppo le zone potenzialmente difettose. A tale proposito SINA sta collaborando con il Politecnico di Milano per migliorare la metodologia di applicazione di questo strumento in campo. Quanto alle prove di Fase 2 si è rilevata in generale una sottostima delle resistenze ultime e delle tensioni residue sugli acciai da pre-compressione. Per quanto riguarda le prove di durezza si è osservato che su elementi di piccolo diametro, come i fili dei cavi post-tesi, le tecniche di misura basate sulla valutazione della perdita di energia di un corpo impattante sul campione,

non risultano essere attendibili in quanto il campione non presenta caratteristiche di massa e peso idonee. Quindi attualmente si è optato per l'esecuzione di prove di durezza per mezzo di un durometro portatile a penetrazione di tipo Vickers che fornisce risultati migliori continuando tuttavia a restituire una sottostima del valore atteso. Si sottolinea inoltre che attualmente la conversione da HV a MPa è eseguita attraverso la tabella di correlazione per acciai basso legati fornita dalle UNI EN ISO 18265, in quanto non è disponibile una tabella apposita per gli acciai di tipo armonico. SINA, in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa, è attiva nella conduzione di ricerche volte ad affinare le curve di taratura per questo tipo di acciai.

Per le indagini future è stata programmata l'esecuzione di prelievi di fili d'acciaio da testare in laboratorio mediante prove di trazione a rottura. Nel frattempo, le prove

di durezza potranno comunque essere utilizzate per estendere i risultati all'intera opera, effettuando una verifica dell'omogeneità dei risultati stessi. Per quanto riguarda invece le prove diffrattometriche a raggi X per la stima delle tensioni residue, SINA si è fatta promotrice della progettazione di un innovativo strumento, in collaborazione con GNR Analytical Instruments Group, che verrà realizzato ad hoc per l'esecuzione di prove in situ, portando in ambito civile una prova comunemente eseguita esclusivamente in ambito industriale/meccanico, con l'obiettivo di ottenere risultati migliori più accurati in campo. Infine, vista la difficoltà nell'interpretazione e nell'utilizzo dei dati ottenuti mediante rilascio tensionale sul cls, sono in atto diverse sperimentazioni, anche all'interno dei laboratori di SINA, per migliorare le modalità operative di questa prova: dall'esecuzione dei tagli per realizzare lo scarico del materiale all'applicazione degli estensimetri per le letture di deformazione. ■



14. Prova di rilascio tensionale sul cls e diagramma di acquisizione delle deformazioni nel tempo

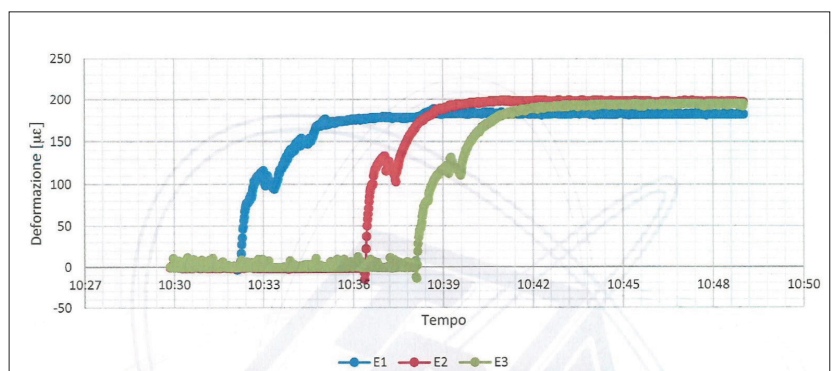


Fig. 15. Prova di rilascio tensionale su calcestruzzo.