

Metodologie Sperimentali

# Ispezioni speciali su ponti a cavi post-tesi

Walter Salvatore, Francesco Morelli,  
Andrea Piscini, Isabella Mazzatura,  
Alice Mazzei, Ivan Panzera  
Dipartimento di Ingegneria Civile  
e Industriale Università di Pisa

Michele Mori, Massimo Gammino  
Sina SpA

**Nell'ambito della collaborazione tra l'Università di Pisa e SINA SpA è stata definita una prima metodologia sperimentale - integrale - per l'esecuzione di indagini speciali sugli elementi strutturali precompressi a cavi post-tesi e iniettati, in accordo alle indicazioni delle Linee Guida Ponti del MIMS. Tutti i dettagli in questo articolo curato direttamente dal team che sta lavorando all'iniziativa.**

**I** ponti e viadotti con elementi precompressi a cavi post-tesi e iniettati, fra i quali, in particolare, quelli realizzati negli anni '60/'70, sono caratterizzati da strutture particolarmente sensibili a pericolosi fenomeni di degrado. In particolare, i fenomeni di corrosione dei cavi possono influire negativamente sulla resistenza della

struttura e provocare collassi improvvisi, anche in assenza dei carichi di esercizio. Tali situazioni di pericolo sono in prevalenza generate da difetti nelle iniezioni dei cavi che possono costituire zone preferenziali di innesco della corrosione. La fragilità di tale tipologia costruttiva è evidenziata anche nelle recenti "Linee Guida per la classifi-

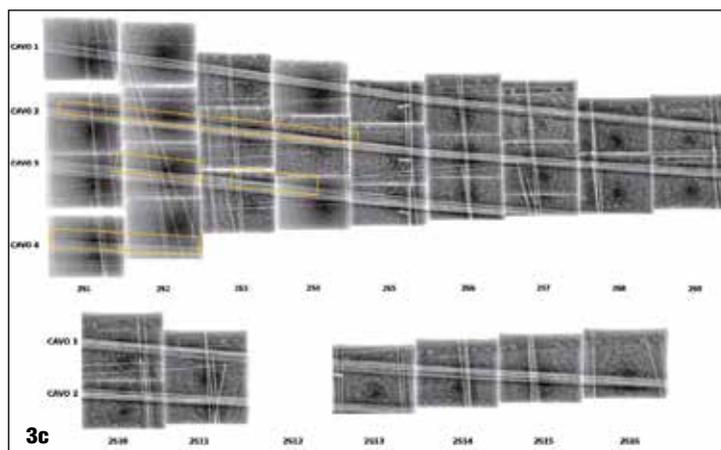
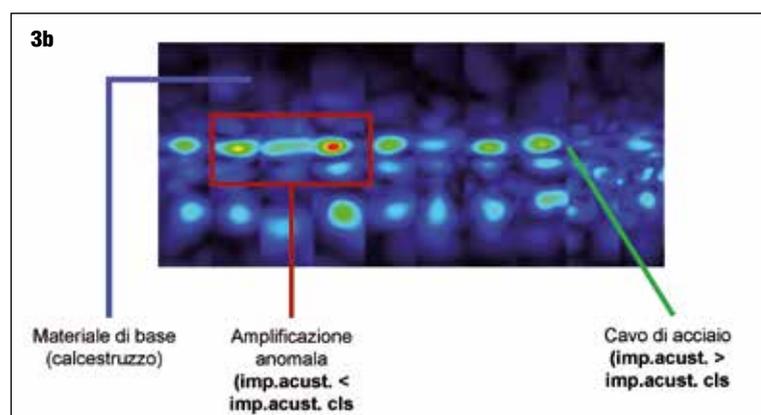
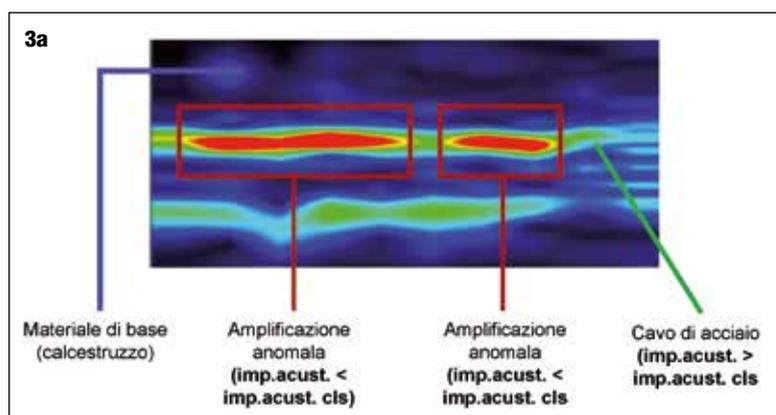
cazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti" emanate dal MIMS. In tale documento, infatti, i ponti di calcestruzzo armato precompresso sono definiti come strutture "particolarmente critiche" sottolineando "l'estrema importanza della valutazione di durabilità dei cavi da precompressione nel sistema post-teso, tramite indagine di integrità delle guaine e dello stato di corrosione in sezioni critiche per flessione o taglio e nelle zone di ancoraggio". Le stesse Linee Guida definiscono in maniera generale, al §7.4.3.1, le tecniche di indagine speciale che possono essere utilizzate applicate per studiare lo stato di conservazione



di tali ponti, senza però indicare una metodologia organizzata in maniera organica e completa. Nell'ambito di una collaborazione di ricerca tra Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa e SINA SpA, in collaborazione con Boviari Srl, Evolvea Srl, IDS Georadar Srl, In Situ Srl, Tecno Piemonte SpA, 2EFFE En-

**1. Esempio di rilievo tramite Georadar 2 GHz**

**2. Confronto del tracciato di progetto con quello di fatto di una trave di un viadotto esistente. Si può notare come non siano presenti scostamenti accentuati**



**3. Esempi di indagine mediante tomografo 3a) lineare e 3b) matriciale, 3c) raggi X, 3d) endoscopie e 3e) saggi diretti**

gineering Srl e 2EFFE Lab Srl è stata impostata una metodologia per l'esecuzione delle ispezioni speciali che include l'analisi delle principali caratteristiche geometriche, meccaniche e dello stato di conservazione necessarie per una valutazione affidabile del livello di sicurezza. Tale metodologia prevede che dette ispezioni speciali si declinino nelle seguenti fasi:

- Individuazione del tracciato dei cavi
- Localizzazione degli eventuali difetti
- Quantificazione dei difetti
- Valutazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio costituente il cavo
- Valutazione dello stato tensionale del calcestruzzo e dell'acciaio.

### La metodologia

La metodologia è stata sviluppata conducendo attività sperimentali primariamente su campioni opportunamente progettati e realizzati, presso il Laboratorio Ufficiale per le Esperienze sui Materiali da Costruzione del Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa e quindi attività sperimentali in situ su alcuni viadotti esistenti. Per ognuna delle sopracitate fasi sono stati paragonati diversi metodi di indagine, considerando principalmente metodi non distruttivi o semi-distruttivi, che non influenzino quindi in maniera sensibile la capacità resistente degli

elementi strutturali ma che necessitano, al massimo, di piccoli interventi di riparazione (nel caso di indagini semi-distruttive). L'efficacia di ciascun metodo è stata valutata e validata attraverso indagini in laboratorio in cui i vari strumenti e metodi sono stati applicati per indagare le caratteristiche (posizione dei cavi, difetti, etc.) di provini opportunamente realizzati e quindi perfettamente noti. L'individuazione del tracciato dei cavi è una delle informazioni fondamentali nella verifica di un elemento precompresso e può essere in generale essere eseguita mediante diversi approcci. Nell'ambito della metodologia proposta è eseguita attraverso l'utilizzo di un georadar che consenta di individuare, in diverse sezioni, i punti in cui passano i vari cavi (fig. 1). Le informazioni ottenute tramite georadar possono essere quindi paragonate con quanto riportato nei documenti di progetto (se disponibili), fig. 2.

Una volta individuato il tracciato dei cavi, è possibile localizzare e quantificare gli eventuali difetti presenti attraverso una procedura, organizzata su più livelli, che permette via via di affinare e dettagliare la ricerca. La metodologia, dunque, prevede le seguenti operazioni (fig. 3):

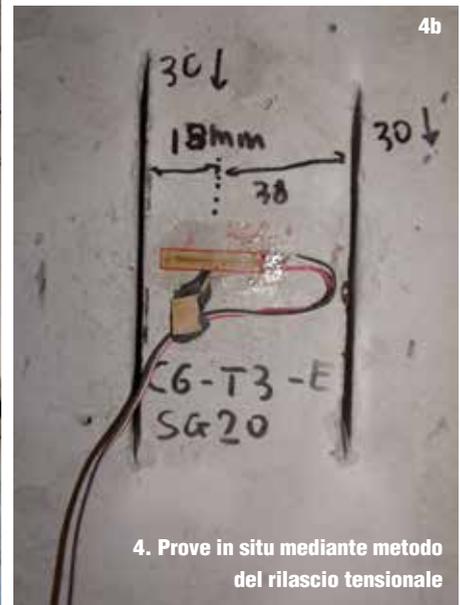
- Individuazione preliminare della possibile localizzazione dei difetti attraverso tomografo lineare.
- Approfondimento dell'analisi nei punti in cui il tomografo lineare ha evidenziato possibili difetti



attraverso tomografia matriciale.

- Approfondimento dell'analisi nelle sezioni "critiche" e "singolari" (e.g. sezione di mezzeria).
- Eventuale esecuzione di indagini con raggi X dove ritenuto necessario in base ai risultati della tomografia matriciale.
- Quantificazione dei difetti tramite indagini endoscopiche e saggi diretti (ove possibile e necessario).

Tale approccio consente quindi di limitare le indagini maggiormente onerose o semi-distruttive (saggi diretti) ai punti in cui la presenza di difetti rilevanti è maggiormente probabile. L'utilizzo di metodi di indagine diversi permette inoltre di incrementare l'affidabilità del processo di ricerca in quanto i vari metodi tendono a compensare le rispettive inefficienze per limiti di applicabilità.



4. Prove in situ mediante metodo del rilascio tensionale

La valutazione delle proprietà meccaniche dell'acciaio è stata eseguita mediante un durometro Vickers. Sono stati provati, sia in laboratorio sia in situ, anche diversi tipi di durometri quale il durometro di Leeb, che basa stima delle proprietà meccaniche sul rapporto tra la velocità di rimbalzo e la velocità di impatto della massa mobile contenuta nella sonda, e il durometro a ultrasuoni, che basa la lettura della profondità di indentazione sulla frequenza di risonanza dell'insieme filo-strumento. Questi ultimi due durometri hanno dimostrato una bassa ripetibilità dei risultati: il primo principalmente a causa della mancanza di un supporto rigido dietro al cavo di acciaio per un corretto contrasto, della difficoltà di battere con perfetta ortogonalità rispetto alla superficie non piana dei fili; il secondo a causa della notevole influenza della posizione in cui si eseguono le misurazioni. Infatti, le condizioni morfologiche della superficie influiscono molto sul risultato della prova, portando anche in questo caso ad una sottostima generale delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio da precompressione. Le prove atte a quantificare le tensioni residue possono essere in generale eseguite sia sul calcestruzzo precompresso, sia sull'acciaio dei cavi da precompressione. In entrambi i casi hanno lo scopo di definire lo stato tensionale attualmente presente sugli elementi costituenti il sistema strutturale. Nel caso del calcestruzzo l'obiettivo è valutare la tensione di compressione; all'opposto, nei cavi da precompressione si valuta la tensione residua di trazione nei trefoli o nei fili paralleli.

I risultati delle prove consentono infatti di eseguire un confronto tra le previsioni progettuali, quando reperibili, e lo stato tensionale effettivamente presente allo stato attuale e costituiscono inoltre un importante dato di base per l'eventuale successiva verifica della struttura oggetto dell'ispezione.

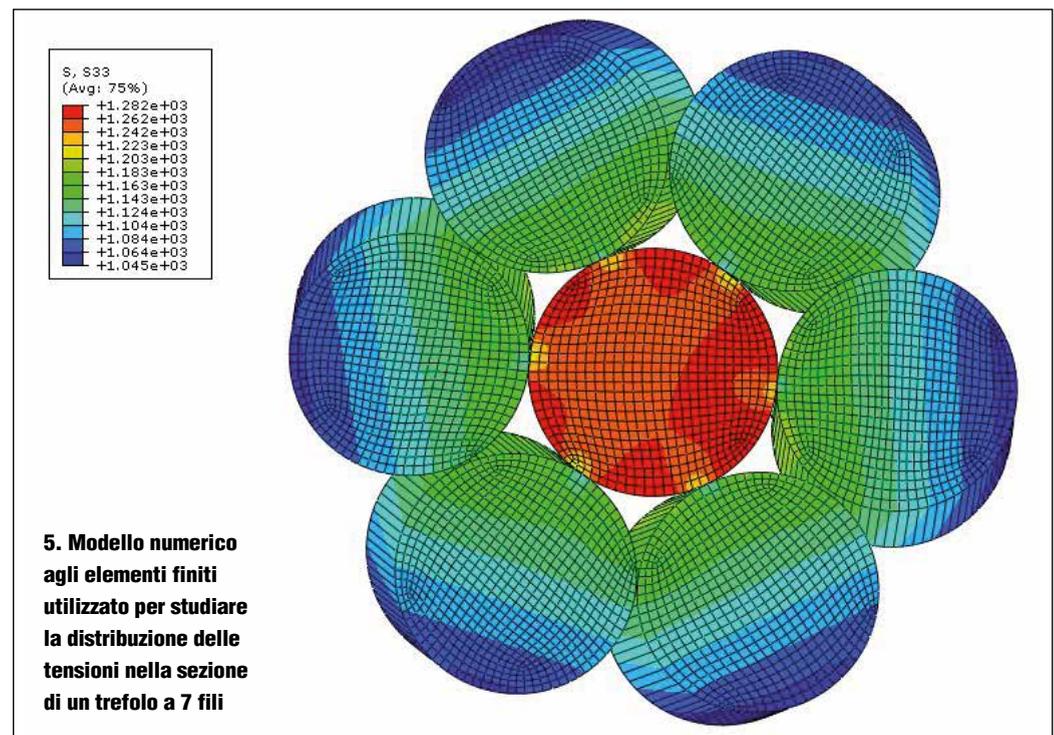
## Tensione sul calcestruzzo e sui cavi da precompressione

Nella ricerca sono state studiate e applicate due metodologie di prova per la fase di quantificazione delle tensioni residue:

1. *Rilascio tensionale per la misura della tensione sul calcestruzzo.* Il metodo consiste nell'isolare, mediante l'esecuzione di tagli, una porzione di un elemento strutturale di calcestruzzo. La deformazione subita dall'elemento a seguito dei tagli, misurabile con estensimetri elettrici, è corrispondente in modulo alla deformazione indotta dai carichi preesistenti ed ha segno contrario. Attraverso la legge di Hooke, una volta definito

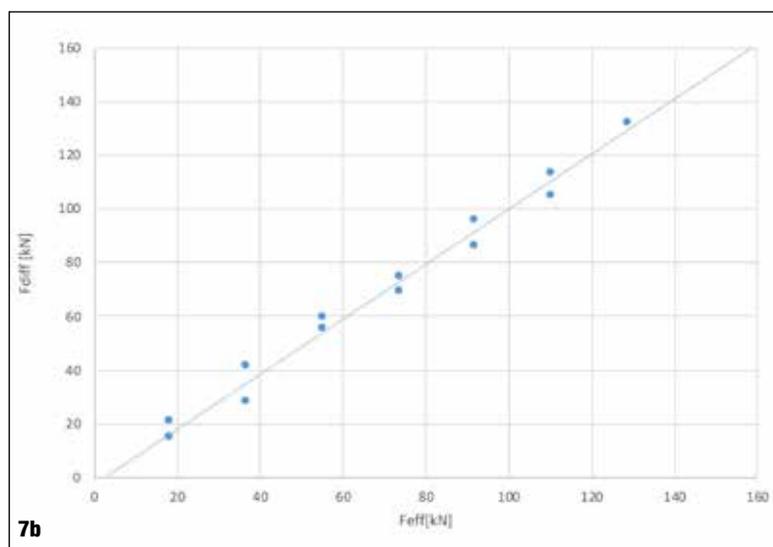
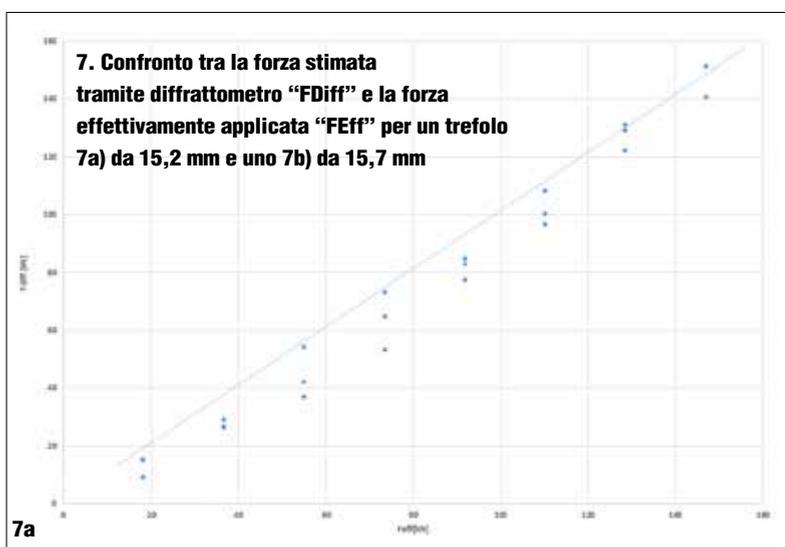
il modulo elastico del calcestruzzo, è possibile risalire alla tensione agente sull'elemento isolato prima dei tagli.

2. *Diffrazione a raggi X per la misura della tensione sui cavi da precompressione.* Si tratta di una tecnica che permette di definire il livello di tensione presente nel materiale cristallino in funzione della distanza tra piani reticolari adiacenti. La diffrazione a raggi X, spesso denominata "Powder X Ray Diffraction" (Diffrazione a Raggi X a Polveri) a causa dei suoi primi utilizzi nell'ambito della discriminazione dei diversi materiali cristallini presenti in forma dispersa in una polvere, è attualmente utilizzata in ambito me-





6. Letture della tensione su trefoli in provini di laboratorio di diverse geometrie (6a-6b) e applicazione in situ (6c)



tallurgico e meccanico ed esistono pochissimi, se non nessun, esempi di applicazioni rilevanti nell'ambito dell'ingegneria civile.

Il metodo del rilascio tensionale necessita l'esecuzione di tagli di ridotte dimensioni sulla superficie esterna del calcestruzzo e si differenzia quindi dai metodi generalmente impiegati che richiedono l'esecuzione di carotaggi nel calcestruzzo. Per l'esecuzione delle misure della tensione sull'acciaio dei cavi da precompressione, normalmente impiegata in ambito industriale e meccanico, è invece necessario accedere direttamente ai fili o ai trefoli che compongono i cavi, mentre la prova è completamente non distruttiva nei confronti delle armature tese stesse. Le prove di rilascio tensionale possono essere eseguite con diverse configurazioni geometriche dei tagli e degli estensimetri e forniscono risultati attendibili soprattutto laddove il materiale presenti una buona omogeneità. Pertanto, nel caso del calcestruzzo, è im-

portante scegliere opportunamente la dimensione degli estensimetri e la profondità dei tagli, in modo da ottenere risultati affidabili. La fig. 4 mostra un'applicazione in sito di tale tecnica.

L'applicazione della diffrattometria a raggi X per la misura delle tensioni in elementi geometricamente complessi quali i trefoli ha richiesto un'estensiva campagna di ricerca teorico-sperimentale finalizzata, da una parte, a calibrare i coefficienti di correlazione tra la tensione misurata e il tiro totale e, dall'altra, a stimare l'errore massimo commesso. Sono stati quindi realizzati numerosi modelli numerici volti a valutare la distribuzione delle tensioni nella sezione di un trefolo (si veda ad esempio la fig. 5) in maniera tale da poter correlare la tensione letta sulla superficie esterna di uno dei cavi di avvolgimento con il tiro totale. I risultati ottenuti sono stati quindi validati tramite una estensiva campagna sperimentale (fig. 6) che ha permesso, allo stesso tempo,

di valutare l'errore massimo commesso. I risultati ottenuti hanno evidenziato un'ottima correlazione tra le misure del diffrattometro ed il tiro totale applicato al trefolo come mostrato in fig. 7.

## Conclusioni

Nell'ambito del contratto di ricerca pluriennale tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa e SINA SpA è stato possibile definire una prima metodologia sperimentale per l'esecuzione di indagini speciali per gli elementi strutturali precompressi a cavi post-tesi e iniettati. La ricerca sta proseguendo e proseguirà volendo da un lato affinare il metodo sperimentale con l'applicazione delle procedure individuate a un impalcato da ponte esistente in disuso e dall'altro estenderlo ad altri casi specifici quali le barre da precompressione tipo dywidag e allo sviluppo di modelli atti ad analizzare l'influenza di diversi scenari di danno. ■