

L'approccio integrato alla valutazione del danno delle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi. Un esempio pratico di applicazione di tecniche di indagine innovative: impact echo, emissione acustica, geo-radar (GPR).

Edoardo Proverbio (1), Vincenzo Venturi (2), Paolo Longo (2), Domenico Santacroce (2),
Marco Venturi (2)

(1) Università di Messina, Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali DCIIM, Salita Sperone 31, Sant'Agata di Messina (ME), tel. 090/3977243, fax:090/3977471, e-mail: proverbi@ingegneria.unime.it

*(2) Sidercem S.r.l. Istituto di Ricerca e Sperimentazione,
Sede Legale e Laboratorio di Caltanissetta: C.da Calderaro Z.I. C.P. 287 Caltanissetta (CL), tel. 0934/565012, fax: 0934/575422, e-mail: info@sidercem.it;
Laboratorio di Misterbianco: Via G. Agnelli 22, 95045 Misterbianco (CT), tel. 095/476942; fax: 095/475003, e-mail: 095/475003*

KEYWORDS

*Precompresso, Eco da Impatto (IE), Emissione Acustica (AE), Geo-radar (GPR)
Prestressed Concrete, Impact Echo (IE), Acoustic Emission (AE), Geo-radar (GPR)*

SOMMARIO

Il monitoraggio e la diagnosi dei fenomeni di degrado delle strutture in cemento armato, ordinario e precompresso, finalizzati alla valutazione della vulnerabilità ed alla determinazione della residua capacità di prestazione dei manufatti è oggi un argomento di grande attualità. Nel caso delle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi, alle prove non distruttive correntemente utilizzate, si devono associare metodiche tecnologicamente innovative che forniscono informazioni sullo stato di intasamento delle guaine, sulla presenza di cricche nei cavi e di lesioni nel calcestruzzo, sulle condizioni di tesatura dei cavi, sulla presenza di difetti esecutivi.

Gli autori, nell'ambito del più ampio progetto di ricerca cofinanziato dal MIUR "Nuove tecnologie per la valutazione del degrado ed il controllo di strutture in calcestruzzo armato precompresso", hanno potuto verificare sulle strutture del ponte "D'Agrò" sulla s.s. 114, progettato nei primi anni cinquanta dal prof. ing. Riccardo Morandi, la coerenza delle risultanze sperimentali ottenute in opera con quelle teoriche, di riferimento, determinate in laboratorio su prototipi. Nella presente nota verranno illustrati i risultati delle seguenti tecniche: impact-echo, emissione acustica, geo-radar (GPR).

INTRODUZIONE

I primi esempi di applicazione della precompressione ad elementi strutturali in calcestruzzo risalgono agli inizi degli anni quaranta [1] ed un notevole impulso nell'impiego di questa tecnica in Italia si è avuto con la realizzazione, negli anni settanta, delle grandi opere autostradali. Tuttavia, tali grandi opere richiedono attualmente continui interventi di consolidamento strutturale che comportano costi rilevanti per l'Ente gestore e notevoli disagi per l'utenza. È pertanto, necessaria una riflessione sul comportamento nel tempo delle strutture post-tese nei confronti della durabilità. Nonostante la qualità del calcestruzzo impiegato in precompressione sia generalmente ottima, il degrado del calcestruzzo e la corrosione dell'armatura (sia lenta sia tesa) possono generare grossi problemi di affidabilità delle strutture. La capacità portante degli elementi precompressi o post-tesi è affidata interamente alla capacità dell'armatura (cavi o trefoli in acciaio ad alto limite elastico) di mantenere compressa la sezione resistente in calcestruzzo. La mancanza o l'insufficienza del copriferro e della protezione alcalina del calcestruzzo e/o della malta di iniezione (dall'inizio od in conseguenza di fenomeni di carbonatazione e/o di depassivazione dell'acciaio per elevate concentrazioni di cloruri) sono le principali cause del danneggiamento dell'armatura. Le strutture post-tese a conci prefabbricati sono state usate frequentemente nel passato per la loro facilità di esecuzione, la loro flessibilità, per la loro struttura modulare e per alcuni vantaggi economici rispetto ad altre scelte progettuali. Tali strutture sono, però, soggette ad una serie di problemi legati alla possibile presenza di vuoti all'interno delle guaine di alloggiamento dei cavi di post-tensionamento, nonché alla criticità dei giunti tra un concio e l'altro. Il riempimento non completo delle guaine può favorire la raccolta ed il ristagno di acqua nei vuoti, che a sua volta favorisce l'innescare di pericolosi fenomeni corrosivi dei cavi e può essere la causa del collasso dell'intera struttura [2].

Il problema non è solo italiano ma è largamente diffuso in tutto il mondo. Il Dipartimento dei Trasporti Americano ha dichiarato che oltre il 40% dei ponti presenti negli Stati Uniti può essere considerato a rischio, con costi previsti per il ripristino dell'ordine dei miliardi di dollari [3].

Nel tempo sono state proposte diverse metodologie per il monitoraggio ed il controllo di ponti in c.a.p., quali ad esempio indagini visive, meccaniche, elettrochimiche e chimiche. Tali tecniche presentano, però, alcuni svantaggi: sono laboriose, distruttive, richiedono che l'armatura sia scoperta e talvolta necessitano l'impiego di attrezzature poco agevoli da utilizzare *in situ*. Tra le tecniche non distruttive più utilizzate negli Stati Uniti per il controllo delle strutture post-tese si menzionano l'Impact Echo (IE) ed il Ground Penetrating Radar (GPR).

Il principio di funzionamento dell'Impact Echo è basato sull'analisi di un'onda elastica transiente generata dall'impatto di una sfera d'acciaio sulla superficie della struttura. L'analisi nel dominio delle frequenze delle onde di pressione, tipo P, che si propagano in direzione normale all'applicazione della sollecitazione consente rilevare vuoti nelle guaine di alloggiamento dei cavi e difetti correlati alla scadente qualità del calcestruzzo, come vespai, delaminazioni e cavità.

Il GPR si basa sul meccanismo propagazione e riflessione di onde elettromagnetiche. La trasmissione e ricezione dei segnali, aventi frequenza nominale ricadente nel range 500 MHz – 2.5 GHz (radiofrequenza) è operata da antenne che vengono fatte scorrere sulla struttura da indagare. La presenza di una discontinuità nel materiale (armature, guaine) o

di difetti interni nel calcestruzzo provoca riflessioni dell'onda raccolte dall' antenna ricevente; l'elaborazione dei segnali riflessi relativi alle diverse posizioni di avanzamento dell'antenna consente di ottenere un'immagine della sezione perpendicolare a quella di scorrimento dell'antenna (radargramma).

La metodologia d'indagine basata sull'Emissione Acustica (AE) si basa sul rilevamento di onde elastiche transitorie, prodotte da microspostamenti interni, conseguenti a fenomeni di deformazione plastica o di propagazione di cricche, utilizzando opportuni trasduttori, che consentono di trasformare impulsi meccanici in segnali elettrici, suscettibili ad amplificazione e filtraggio, prima di essere analizzati. Tale tecnica è indicata per la caratterizzazione dei meccanismi di propagazione di cricche sui cavi interessati da processi corrosivi [4].

Nel presente lavoro viene illustrata l'attività di indagini in situ eseguita su un viadotto in c.a.p. a conci prefabbricati, denominato "D'Agrò", sito lungo la S.S. 114; le tecniche dell'IE e del GPR sono state utilizzate durante le usuali condizioni di esercizio per definire il livello di degrado della struttura indotto dai fenomeni corrosivi.

La tecnica d'AE è stata invece utilizzata per caratterizzare, previa valutazione su prototipi realizzati in laboratorio il comportamento della struttura durante l'esecuzione di una prova di carico statica.

DESCRIZIONE DELLE INDAGINI

Il Viadotto D'Agrò, sito sulla S.S. 114 nella tratta che collega la città di Messina con Catania, è stato progettato nel luglio 1954 dall'Ing. Riccardo Morandi e costruito nel corso dell'anno successivo. Il manufatto, realizzato in cemento armato precompresso, è costituito da 13 campate, poggianti su 12 pile e 2 spalle, per una lunghezza complessiva dell'opera pari a 287 m. L'impalcato, del tipo a travata semplicemente appoggiata, è costituito da 5 travi a cassone chiuso in c.a.p. a sezione cava trapezoidale ed è irrigidito da 4 trasversi in c.a. e da una soletta superiore di sutura costituente il piano stradale che si protende a sbalzo sui marciapiedi. In opera sono stati realizzati i condotti di alloggio dei cavi, di diametro pari a 40 mm; i cavi di precompressione sono stati realizzati assemblando fili aventi diametro di 5 mm. A seguito di una dettagliata ispezione



Figura 1 - Vista generale del viadotto.

visiva, è stato evidenziato lo stato di degrado degli elementi strutturali, riconducibile all'aggressività ambientale (classe d'esposizione XS1 secondo UNI EN 206-1).

Il quadro fessurativo è caratterizzato da lesioni longitudinali (Figura 2), spesso accompagnate dalla presenza di efflorescenze carbonatiche, localizzate in corrispondenza degli alloggiamenti dei cavi di post-tensionamento.

In alcuni punti si è rilevato anche spalling con la conseguente esposizione diretta dei cavi agli agenti atmosferici (Figura 3).



Figura 2 – Spalling ed esposizione dei cavi.



Figura 3 – Particolare delle lesioni.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Impact echo

L'ispezione visiva appena descritta ha permesso di localizzare, soprattutto in due campate, alcune zone gravemente ammalorate in corrispondenza dei conci appartenenti alle travi di bordo; su tali conci sono stati eseguite le indagini con IE e GPR. L'attrezzatura utilizzata per l'IE, prodotta dalla German Instruments A/S, (Figura 4) consta di una scheda PCMCIA a due canali di tipo NI 5102, con convertitore analogico digitale a 8-bit, montata su un notebook. Nell'attrezzatura sono anche compresi due trasduttori, i cavi di connessione, il supporto che sostiene i due trasduttori durante la prova (LONGSHIP), il supporto a stella con tre impattori (aventi diametro 5, 8 e 12.5 mm) ed altri accessori (Figura 5). In considerazione dello spessore del cassone l'impattore scelto è stato quello avente diametro pari a 5 mm, cui corrispondono i seguenti valori caratteristici di durata d'impatto $t_c=22 \mu s$ e frequenza massima rilevabile $f_{max}=57 \text{ kHz}$. Ciascun concio è stato schematizzato con una griglia avente passo di 20 cm in direzione longitudinale (Figura 6); in ciascun punto sono state eseguite da 3 a 7 acquisizioni per accertarsi che lo spettro fosse effettivamente caratteristico della sezione esaminata. A seguito dell'elaborazione dei dati, sono state create delle mappature di frequenza per ciascun concio.



Figura 4 – Impact Echo System.



Figura 5 - IE, metodo ad un sensore

La presenza di difetti o delaminazioni provoca lo spostamento del picco principale a frequenze inferiori; l'individuazione di un picco secondario a frequenze maggiori può essere associato alla profondità del difetto, attraverso l'equazione (1), che correla la frequenza delle onde f_T alla velocità delle onde V_p ed allo spessore del solido T .

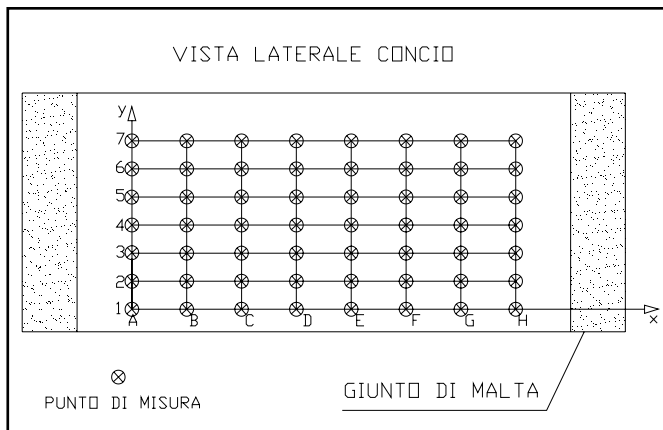


Figura 6 – Schema della griglia di misura.

deteriorata compresa tra il 14% ed il 43% e che il degrado non dipendeva dall'esposizione della parete della trave rispetto al mare.

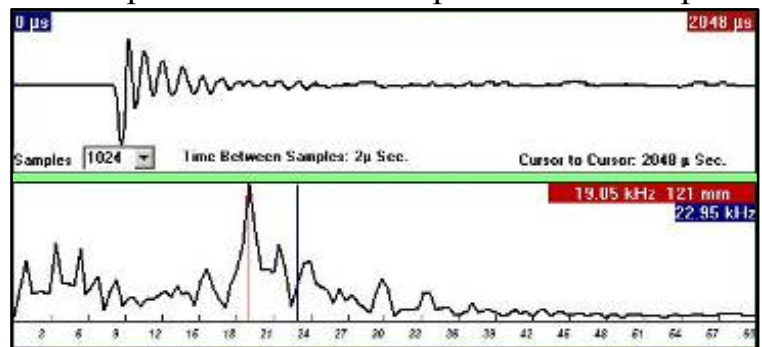


Figura 7 – Segnale relativo ad una sezione lesionata.

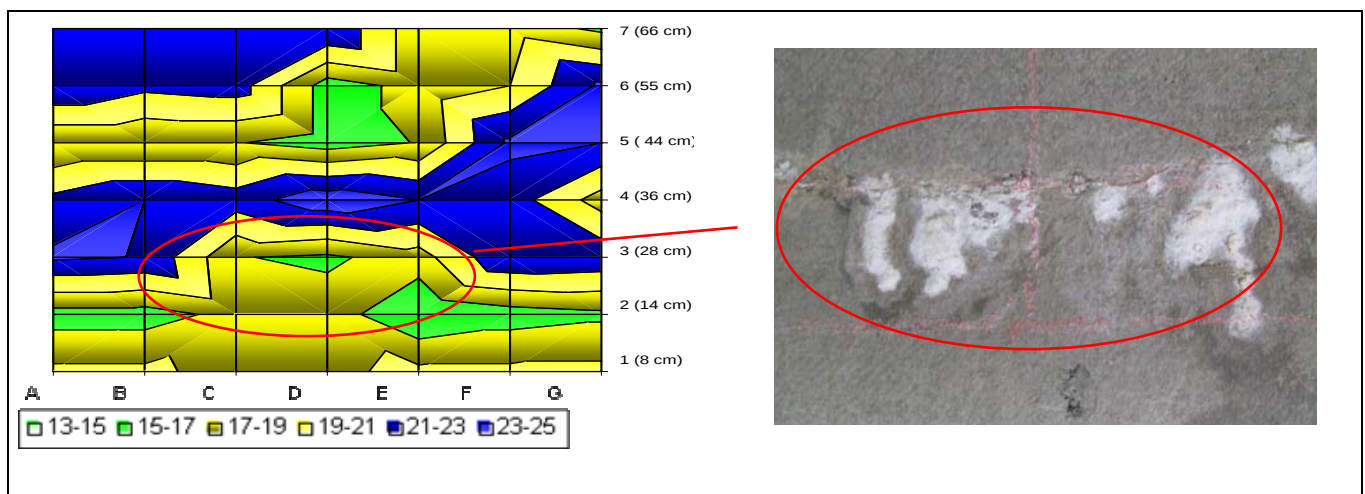


Figura 8 - Mappatura relativa ad una delle travi lato monte.

GPR

L'attrezzatura utilizzata per il GPR (Figura 9), fornita dalla IDS S.p.A., è costituita dai seguenti elementi: l'apparato di acquisizione e controllo, sistema di elaborazione dati, ovvero il software IDSgrede il sensore di posizione collocato lateralmente all'antenna. Tale sensore, dotato di una ruota metrica avente una risoluzione di 2 cm, ha la funzione di segnalare al laptop la posizione occupata dall'antenna durante una scansione per consentire la perfetta localizzazione dei dati acquisiti. Il sensore utilizzato per eseguire la campagna ha una frequenza di 1,6 GHz (Figura 10) e consente una profondità massima di scansione nel cls pari ad 1 m.



Figura 9 – Radar geologico IDS RIS.



Figura 10 – Antenna da 1.6 GHZ.

In ciascuna zona di indagine, la superficie laterale della trave è stata suddivisa in una griglia ad 20 cm lungo la progressiva longitudinale (Figura 11), facendo in modo che la linea fosse coincidente con gli assi dei cavi; le scansioni sono state eseguite impostando un tempo di andata e ritorno del segnale TT pari a 18 ns/m.

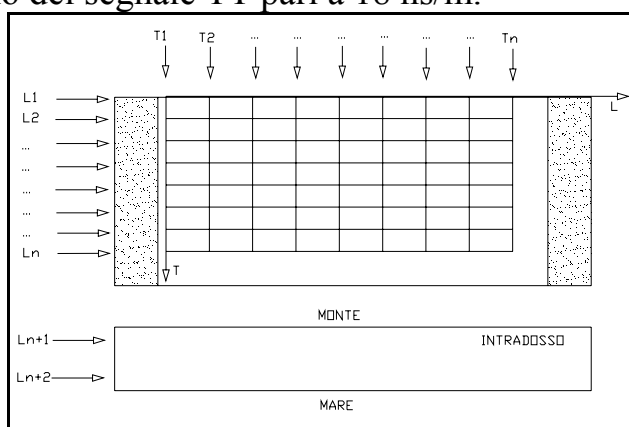


Figura 11 – Indicazione delle linee di scansione sul concio

L'indagine ha permesso di localizzare numerose zone ammalorate, interessate da fenomeni di delaminazione, efflorescenze, vespai e fratture del calcestruzzo (Figura 12).

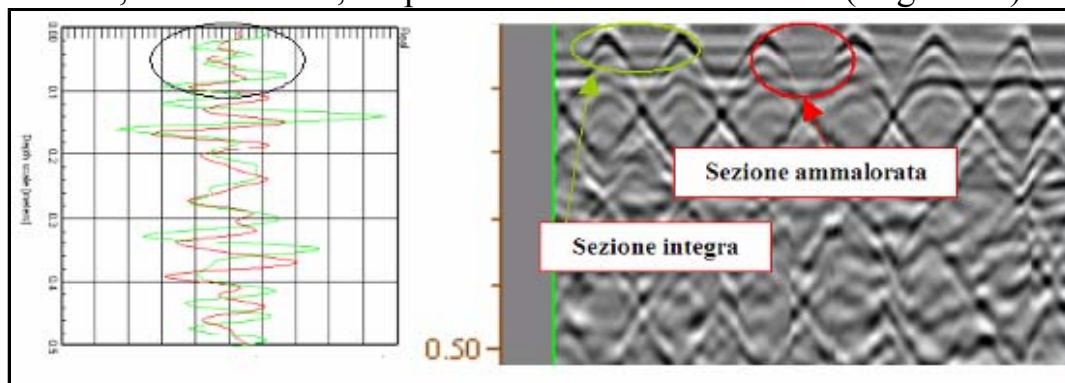


Figura 12 - Segnale e radargramma della parete di un concio.

Il segnale ed il radargramma di Figura 13 si riferiscono ad una sezione trasversale di una trave in cui dalle indagini visive è emersa una lesione lungo l'asse del cavo e, quindi, possibile ammaloramento del calcestruzzo all'interfaccia calcestruzzo-cavo: il segnale acquisito in corrispondenza di uno di essi presenta un forte assorbimento e nella sezione radar si rileva la presenza di un target avente un forte contrasto dielettrico, simile a quello che si rileva per i vuoti; probabilmente riconducibile ad un fenomeno di delaminazione.

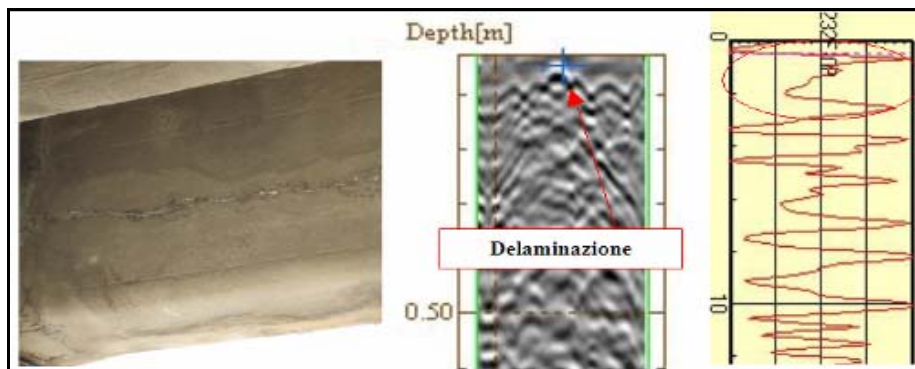


Figura 13 – segnale acquisito in una sezione caratterizzata da lesione lungo il condotto .

L'analisi della traccia radar (Figura 14) fornisce delle informazioni di fondamentale importanza per quel che concerne l'interno del cassone. La forma dell'onda riflessa lascia intendere che il cassone sia pieno d'acqua all'interno, probabilmente a causa di una non corretta impermeabilizzazione della soletta, come confermato dalle estese macchie di umidità riscontrate all'intradosso della trave.

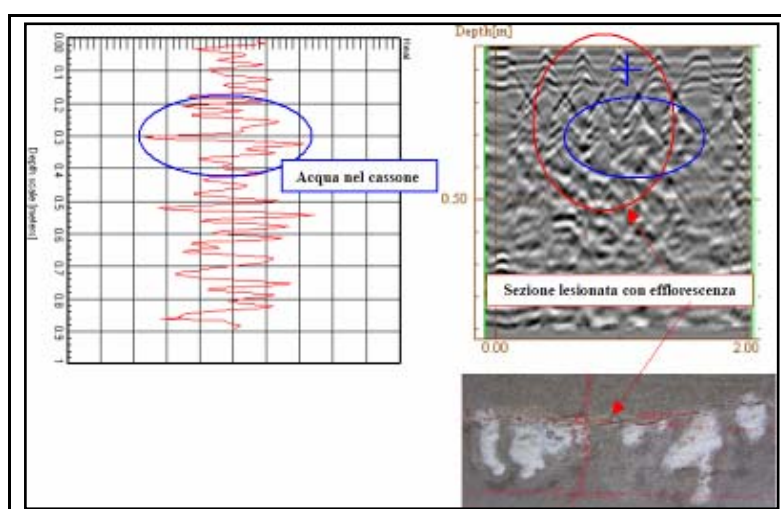


Figura 14 - Segnale e radargramma in una sezione in cui si è rilevata efflorescenza.

Emissione Acustica

L'attrezzatura utilizzata per l'Emissione Acustica è costituita da un sistema d'acquisizione a 10 canali, (Vallen AMSYS – 5), corredato da trasduttori piezoelettrici del tipo VS30-V a banda piatta compresa tra 23 – 80 kHz per il monitoraggio del calcestruzzo, mentre i trasduttori posizionati direttamente a contatto con i cavi d'acciaio hanno frequenza di risonanza pari a 150 kHz. L'attività sperimentale eseguita è stata suddivisa in due fasi: una fase di laboratorio è consistita nell'esecuzione di una prova a flessione su quattro punti eseguita su un prototipo, costituito da una trave in c.a.p. a sezione rettangolare avente lunghezza di 6,3 metri, sottoposta a 3 cicli di carico fino al raggiungimento dello stato limite di fessurazione.

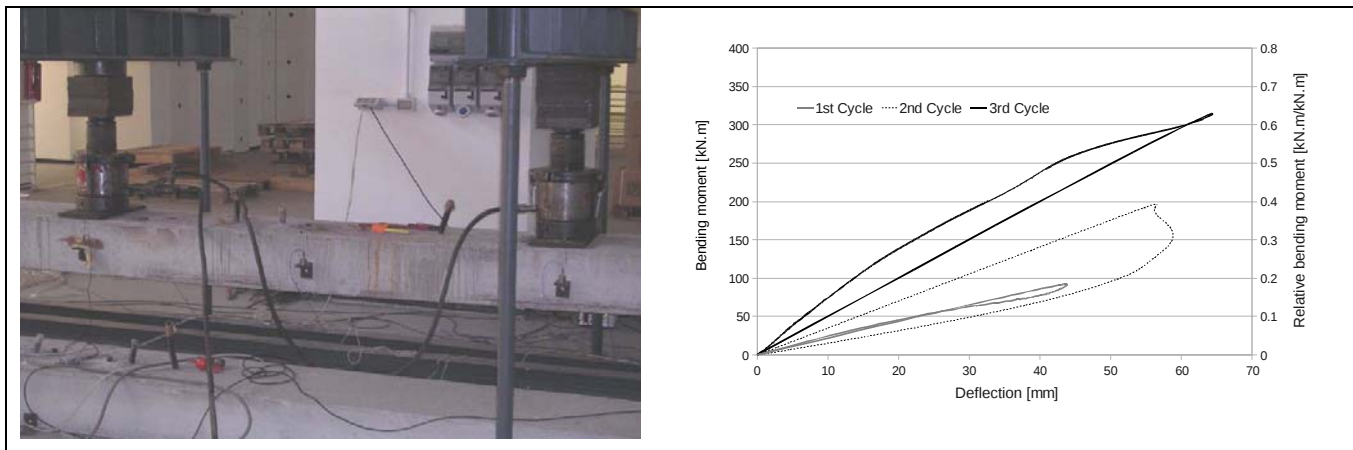


Figura 15 - Prova di flessione su 4 punti: curva momento flettente – cedimento per 3 cicli.

Per l'interpretazione dei segnali, sono stati adottati i seguenti parametri di controllo: il *b-value* che rappresenta il coefficiente angolare della funzione di Gutenberg – Richter [6]:

$$\log N = a - b \cdot \left(\frac{A_{dB}}{20} \right) \quad (2)$$

e che correla il numero di eventi N aventi un'ampiezza superiore ad una prefissata soglia A_{dB} e l'*improved b-value* I_b proposto in [7] che prescinde dall'intervallo d'ampiezza e dal numero di eventi considerati, e viene definito utilizzando parametri statistici rappresentativi, quali media μ e deviazione standard σ della magnitudo della distribuzione relativa ad uno stesso gruppo di eventi.

$$I_b = \frac{\log[N(w_1)] - \log[N(w_2)]}{\alpha_1 + \alpha_1 \cdot \sigma} \quad (3)$$

Le variazioni dei parametri di controllo (Figura 16) sono state correlate ai differenti meccanismi di frattura che si sono manifestati nel calcestruzzo; il parametro b ha raggiunto i valori massimi in corrispondenza del primo ciclo di carico, quando si osserva l'apertura di micro fessure. All'incrementare della sollecitazione esterna, tale parametro è diminuito mostrando la massima dispersione durante il ciclo intermedio ed i valori minimi in corrispondenza dell'ultima fase di carico, quando il livello di sollecitazione è tale da provocare la propagazione di cricche macroscopiche; il parametro I_b , ha subito invece un incremento del valor medio concorde con il livello di sollecitazione applicata, tale

tendenza è risultata però in contraddizione con i risultati di letteratura, ottenuti su provini in c.a. semplice, secondo cui l'incremento dei valori I_b sembra essere correlato alla concentrazione locale degli sforzi, in corrispondenza delle zone di innesco di microfessure, mentre la diminuzione può essere spiegata con il rilascio

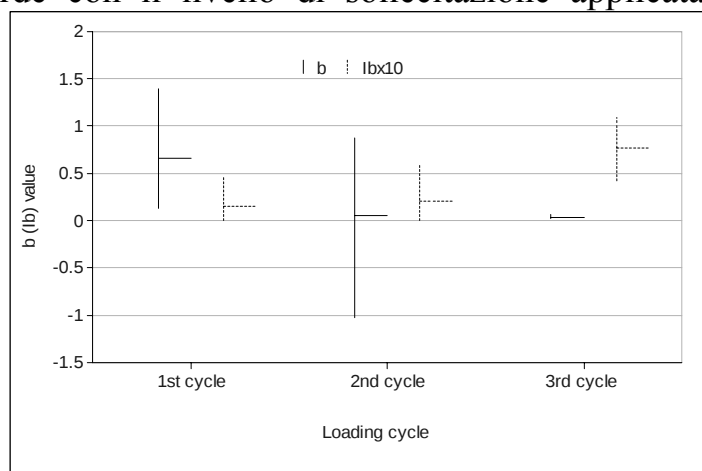


Figura 16 – Evoluzione dei parametri b e I_b durante i cicli.

delle tensioni determinato dalla formazione di macro – cricche. Nel caso di propagazione di fessure dovute a taglio, si dovrebbe comunque osservare un picco di valori di I_b .

L'attività di monitoraggio in situ con AE è stata eseguita durante una prova di carico statica su una delle campate che, a seguito delle menzionate indagini eseguite con IE e GPR, mostrava il maggior livello di degrado. La sollecitazione è stata generata applicando due cicli di carico: durante il 1° ciclo è stato posizionato un autocarro avente massa pari a 30 t nel centro della campata ed un automezzo di 20 t nella corsia parallela; dopo lo scarico, è stata posizionata una colonna costituita da 2 autocarri aventi massa di 30 t ciascuno in mezzzeria, affiancata da una colonna formata da 2 camion aventi massa di 20 t. Il monitoraggio è stato eseguito collocando 10 sensori sulle pareti dei cassoni delle travi (Figura 17), adottando, a seguito della calibrazione, una soglia pari a 35 dB.



Figura 179 – Posizionamento dei sensori sulle travi.

In Figura 18 si riporta l'andamento dei parametri b ed I_b relativi ai segnali registrati in corrispondenza di un canale. Per quanto riguarda il parametro b , il raggiungimento dei valori più alti durante il 1° ciclo è stato correlato all'insorgenza della propagazione di micro – cricche, cui ha fatto seguito un abbassamento conseguente allo scarico. Il 2° ciclo è stato caratterizzato da una larga dispersione di valori.

Il parametro I_b ha subito un incremento durante la fase di scarico; tale risultato può essere associato al contemporaneo evento di evoluzione di cricche per taglio e scorrimento delle superfici di fessure che tendevano a richiudersi. La forte dispersione dei dati durante il secondo ciclo indica una varietà dell'attività di AE dovuta all'innescio di micro – fessure e cricche macroscopiche.

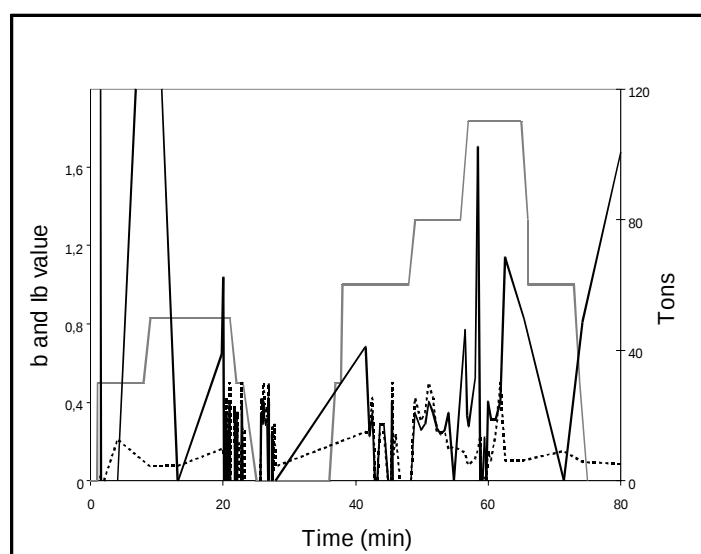


Figura 18 - Diagramma b (nera continua) I_b (nera tratteggiata) e carico (grigia) – tempo.

CONCLUSIONI

Nella presente memoria è stata illustrata l'attività di diagnosi e monitoraggio eseguita su una viadotto precompresso a cavi post-tesi, realizzato con conci prefabbricati, le cui travi presentavano evidenti segni di ammaloramento del calcestruzzo e di corrosione delle armature. Sono stati eseguiti controlli non distruttivi, adottando la tecnica dell'Impact Echo e del GPR, tali tecniche sono risultate di particolare utilità nella localizzazione delle disomogenità presenti nel calcestruzzo, quali difetti, lesioni e delaminazioni. L'IE ha permesso inoltre di localizzare e caratterizzare i difetti di riempimento all'interno dei condotti di alloggio dei cavi, evidenziando le porzioni di cavi più interessate da attacchi corrosivi.

Le campate risultate maggiormente a rischio sono state sottoposte successivamente a prove di carico statiche; integrate da una campagna di monitoraggio con la tecnica di Emissione Acustica, preventivamente calibrata a mezzo di prove a flessione su 4 punti eseguite su prototipo. Con riferimento ai parametri di controllo, b value e I_b value, è stato possibile identificare l'attività acustica registrata durante le variazioni delle sollecitazioni meccaniche, con i meccanismi di innesco e propagazione delle cricche nel calcestruzzo.

BIBLIOGRAFIA

1. A.H. Allen - "An introduction to prestressed concrete", Cement and Concrete Association, 1981.
2. R.W. Poston, J.P. Vouters - "Durability of precast segmental bridges", NCHRP Web Document 15 (Project 20-7/Task 92), 1998.
3. K. Bunker, B.G. Rabbat - "Highway Bridge Type and Performance Patterns", Journal of Performance of Constructed Facilities", Vol. 4, N° 3, 1990.
4. L. Golasky et al. - "Diagnostic of reinforced concrete bridges by acoustic emission", Journal of Acoustic Emission, Vol. 20, 2002.
5. E. Proverbio et al. - "Il Collasso del Ponte S. Stefano" l'Edilizia, No. 3, Anno XV.
6. Colombo S. et al. - "Assessing damage of Reinforced Concrete Beam using "b-value" Analysis of Acoustic Emission Signals", Mat. In Civil Engineering, Vol. 15, 2003.
7. T. Shiotani et al. - "Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation", Constr. And Build. Mat., Vol 5, 2001.
8. J.H. Kurz et al. - "Stress Drop and Stress Redistribution in concrete quantified over time by the b-value analysis", Structural Health Monitoring, Vol. 5, 2006.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del Progetto di Ricerca Industriale n° 12278 del 13/11/2001, cofinanziato dal MIUR "Nuove Tecnologie per la Valutazione del Degrado ed il Controllo di Strutture in Calcestruzzo Armato Precompresso".