



NUOVE TECNOLOGIE PER LA VALUTAZIONE DEL DEGRADO E IL CONTROLLO DI STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO PRECOMPRESSO

Edoardo Proverbio* Giuseppe Ricciardi**
Vincenzo Venturi*** Marco Venturi****
Giovanni Laganà***** Antonino Recupero*****
Gabriella Epasto***** Giuseppe Campanella*****

I concetti di affidabilità, di controllo e di durabilità sono ad oggi sempre più utilizzati 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 oggetto di intensi sforzi di riedificazione dopo i danneggiamenti della Seconda Guerra mondiale, sono stati costruiti senza alcuna considerazione verso 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 di sicurezza.

La sperimentazione

In tale contesto, la Sidercem Srl e l'Università degli Studi di Messina hanno sviluppato un'importante attività di sperimentazione nell'ambito di un progetto di ricerca di interesse europeo cofinanziato dal MIUR (Legge n° 297/99) "Nuove tecnologie per la valutazione del degrado e il controllo di strutture in calcestruzzo armato precompresso".

L'obiettivo finale è stato quello di studiare e di ottimizzare l'applicazione di metodologie innovative di indagine non distruttiva nel settore delle tecnologie di controllo delle opere in calcestruzzo; ovvero, l'obiettivo è stato quello di mettere a punto un metodo di controllo basato su tecnologie di indagini non distruttive non convenzionali al fine di definire le capacità prestazionali di una struttura soggetta a degrado.

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 di lastre potrebbe non essere sufficiente a identificare un danneggiamento in atto.

Le strutture in calcestruzzo armato precompresso sono strutture critiche per quanto riguarda l'applicabilità delle tecniche di indagine convenzionali, nel senso che le informazioni ottenute con queste ultime sono insufficienti a dare un quadro conoscitivo adeguato sulle reali condizioni di degrado. Da qui è nata l'esigenza di studiare e di sperimentare specifiche e innovative tecnologie di indagine non convenzionali. Dal momento che le strutture in c.a.p. possono raggiungere uno stato strutturale critico (precedente al collasso) senza l'apparizione di fessurazioni evidenti o deflessioni, è stato fondamentale sviluppare dei metodi di indagine che potessero determinare il reale stato di degrado di questa tipologia di strutture.



Figura 1 - L'ispezione sottoponte per la valutazione e il degrado di strutture in calcestruzzo



Le tecnologie non distruttive di Impact Echo (IE), Radar Penetrante (GPR), Emissione Acustica (AE) e le indagini di caratterizzazione statica e dinamica di strutture in calcestruzzo sono state sviluppate nell'ambito della ricerca per applicazioni specifiche nel settore della diagnosi strutturale, con particolare riferimento alla valutazione dello stato di degrado del calcestruzzo armato precompresso.

Lo sviluppo delle tecnologie ha permesso non soltanto di valutare l'applicabilità delle stesse, ma di definire i limiti e le condizioni di impiego ottimali, nonché di delinearne le procedure operative e di disporre di un adeguato database, indispensabile per l'interpretazione delle risposte strumentali e per la classificazione e la quantificazione del difetto rilevato e identificato.

Le fasi della ricerca

L'attività di ricerca ha previsto tre fasi di sviluppo: due in laboratorio per lo studio di strutture in scala (piccola e semi-reale) e una in situ per strutture in scala reale.

Durante l'ultima fase è stata messa a punto la definizione di una scala prestazionale - conseguenza dell'elaborazione dei risultati ottenuti con le varie tecniche di indagine non distruttive - da applicare alle strutture oggetto di indagine in base alla quale definire anche un livello di rischio di fruibilità o, comunque, con cui poter indicare al Gestore della struttura la ridotta capacità portante in conseguenza del danno derivante dal degrado del calcestruzzo e dalla corrosione delle armature di precompressione.

Durante il suddetto progetto di ricerca, tale procedura sperimentale è stata calibrata e perfezionata grazie alla collaborazione di un Ente Gestore (ANAS SpA) delle infrastrutture viarie che ha fornito alcune strutture reali servite come casi studio di strutture in c.a.p. a cavi post-tesi degradate.

Alcune caratteristiche salienti delle nuove tecniche nonché alcuni esempi di applicazione pratica in situ sono riportati di seguito.

Le tecniche di indagine non distruttiva

L'Impact-Echo (IE)

Nel caso delle strutture a cavi post-tesi, il problema maggiore è quello di riuscire a determinare con buona accuratezza lo stato di degrado dei fili o dei cavi di precompressione. Fessurazioni longitudinali, delaminazioni e inquinamento del calcestruzzo che costituisce il copriferro sono indici di processi corrosivi a carico dei cavi di precompressione. In questo caso la probabilità di individuare una porzione di cavo danneggiato è strettamente legata all'individuazione di zone di vuoto all'interno della guaina di protezione.



Figura 2 - L'attrezzatura per immagini di Impact-echo

Una tecnica che ha dato ottimi risultati e che può essere sulle strutture precomprese è quella dell'Impact-Echo.

La tecnica si basa sul fenomeno che si verifica quando un'eccitazione esterna, come può essere l'impatto di una sferetta d'acciaio, viene applicata istantaneamente in un punto di una superficie solida, come ad esempio una superficie di calcestruzzo. Il segnale viene riflesso da tutte le interfacce a differente impedenza acustica (superficie inferiore, vuoto, armatura, ecc.); vengono acquisite le oscillazioni superficiali prodotte dal segnale riflesso. Il segnale viene acquisito nel dominio del tempo, ma viene analizzato nel dominio delle frequenze. Il sistema può essere utilizzato a uno e a due canali. Con il sistema a un canale (Figura 3) è possibile misurare lo spessore o localizzare i difetti, dopo aver misurato la velocità delle onde elastiche, su una porzione solida del calcestruzzo di cui è noto lo spessore. Con quello a due (Figura 4) è invece possibile misurare direttamente la velocità delle onde elastiche; è spesso indispensabile quando non è noto lo spessore delle sezioni analizzate.



Figura 3 - Sistema a un canale



Figura 4 - Sistema a due canali

Quando non si conosce a priori il valore dello spessore o non è possibile effettuare il prelievo di carote passanti, il metodo a due sensori è molto utile. Si calcola il valor medio della velocità delle onde. Successivamente con il sistema a un canale è possibile calcolare lo spessore dell'elemento costruttivo in esame e localizzare i difetti (fessure, vespai, delaminazioni, vuoti all'interno delle guaine di post-tensionamento, ecc.).

Il Georadar (GPR)

Il Ground Penetrating Radar può essere considerato l'equivalente elettromagnetico delle indagini acustiche.

Il principio di funzionamento si basa sulla propagazione di onde elettromagnetiche irradiate nel solido da indagare. Le leggi di Maxwell governano tale fenomeno attraverso le relazioni che intercorrono tra la componente elettrica e quella magnetica del campo. Il GPR, o Georadar, è una strumentazione che consente di individuare la posizione di un target (riflettore) nel calcestruzzo mediante l'invio di onde elettromagnetiche; l'apparato misura il ritardo tra l'istante in cui il segnale elettromagnetico è stato trasmesso e quello necessario alle onde riflesse dal bersaglio, per tornare all'antenna ricevente. Il funzionamento del radar per controlli su strutture in calcestruzzo si basa sulla capacità dello strumento di emettere segnali aventi frequenza nominale compresa nel range 500 MHz - 2,5 GHz e di registrare quindi gli echi dagli oggetti immersi nel cls, caratterizzati da dimensioni adeguate e da proprietà elettromagnetiche diverse rispetto a ciò che li circonda.

Il componente fondamentale è l'antenna, che funge contemporaneamente da trasmettitore di impulsi elettromagnetici a larga banda e da ricevitore (antenna dipolare). L'antenna viene fatta scorrere a velocità costante lungo una linea sulla superficie del materiale in esame permettendo di analizzare la sezione verticale sottostante. L'elaborazione dei segnali riflessi relativi alle diverse posizioni di avanzamento dell'antenna consente di ottenere una immagine della sezione perpendicolare alla direzione di scorrimento dell'antenna: l'immagine radar.

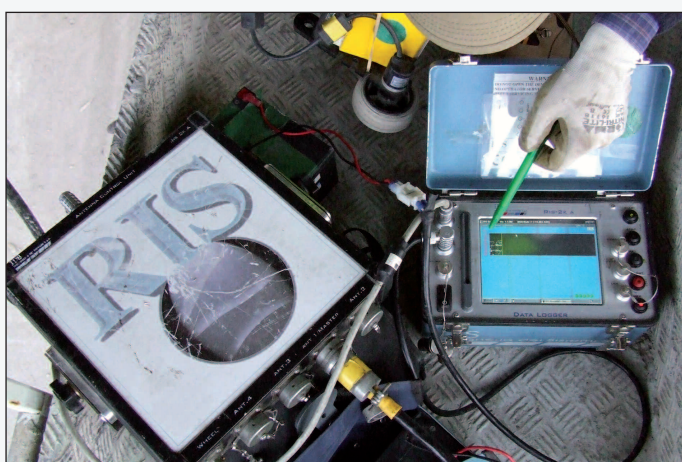


Figure 5A e 5B - Radar geologico IDS RIS: antenna (sinistra), trasduttore e sistema di acquisizione (destra)

Emissione Acustica (AE)

L'emissione acustica è una tecnica non distruttiva di controllo di difettosità e integrità delle strutture che si è sviluppata negli ultimi decenni. Tale tecnica si basa sul rilevamento di onde elastiche transitorie, originatesi da microspostamenti locali all'interno di un materiale, dovuti ad esempio alla formazione e alla propagazione di cricche. Le onde acustiche così generate sono rilevate dai sensori disposti sulla superficie dello stesso, vengono amplificati e registrati dallo strumento, che poi è in grado, se supportato dal software, di dare in uscita i parametri fondamentali delle onde acustiche registrate, quali ampiezza, tempo di arrivo al sensore, tempo di crescita, durata, numero di eventi, localizzazione delle sorgenti di onde acustiche, ecc.. Dall'analisi di tutti questi parametri è possibile avere informazione sulla causa e sulla natura dell'onda acustica.

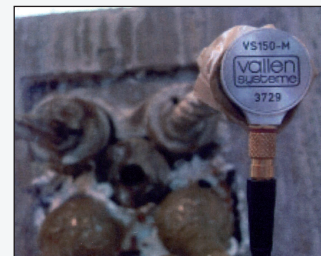
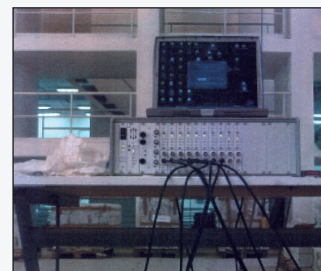
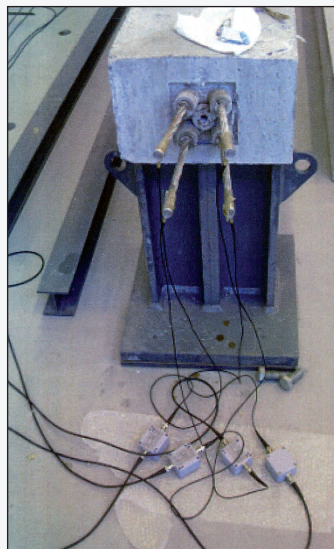


Figure 6A, 6B e 6C - L'attrezzatura per indagini di emissione acustica

La tecnica di EA è una tecnica di indagine globale e allo stesso tempo locale, nel senso che permette di ottenere degli indici di valutazione dello stato generale di degrado ma contemporaneamente rende possibile la localizzazione delle zone più critiche, dando anche informazioni sul tipo di danno.

Indagini dinamiche

Esistono anche tecniche di indagine non distruttive che, esaminando le caratteristiche dinamiche della struttura, permettono di valutare il danneggiamento della struttura stessa. Risulta tuttavia difficile ottenere informazioni sulla localizzazione spaziale del danno attraverso le sole frequenze, maggiori informazioni possono essere ottenute attraverso l'analisi delle forme modali.

Tale tipo di analisi richiede, però, un gran numero di punti di misura per caratterizzare accuratamente gli autovettori e dare sufficienti indicazioni per determinare l'ubicazione del danno.

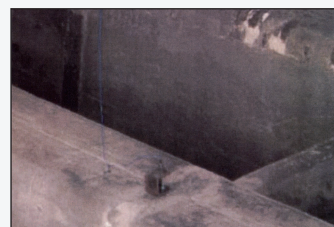
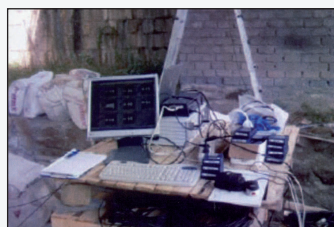


Figure 7A e 7B - La strumentazione per effettuare indagini di caratterizzazione dinamica delle strutture

Le campagne di indagine in situ

Al fine di ottenere un quadro completo della condizione dell'opera d'arte e di avere dei dati di riferimento per la verifica strutturale e per la fase di progettazione degli interventi atti a ristabilire le condizioni di sicurezza dell'opera stessa, è necessario prevedere delle campagne di indagine strumentale.

Questa fase ha lo scopo di fornire informazioni sulla struttura nella sua totalità e, nello stesso tempo, di gettare le basi per effettuare una completa caratterizzazione della stessa al fine di quantificare il degrado degli elementi strutturali (diagnosi) e definire le capacità prestazionali future (prognosi). L'intervento deve essere effettuato sulla base dei parametri da individuare. Pertanto, è di fondamentale importanza scegliere le metodologie di indagine più adatte al caso specifico.

La pianificazione dell'intervento deve includere gli obiettivi delle indagini e l'influenza dei risultati attesi sulla definizione delle capacità prestazionali residue della struttura secondo le modalità qui esposte. Una campagna su una struttura è molto onerosa, quindi la pianificazione deve essere effettuata in modo molto accurato tendendo in considerazione le seguenti specifiche:

- ♦ il tipo di test che deve essere effettuato;
- ♦ il numero di punti di misura necessari per avere risultati rappresentativi e attendibili;
- ♦ i limiti della tecnica impiegata;
- ♦ l'eventuale necessità di altre tecniche di indagine complementari.

Le tecniche di IE, GPR, AE e le indagini dinamiche sono state applicate con successo in una campagna di indagini in situ effettuate presso i viadotti Fiumedinisi e D'Agrò, ubicati lungo la S.S. 114 Orientale Sicula, a un centinaio di metri dalla costa ionica (Figure 8A e 8B). I manufatti constano rispettivamente di otto e 12 campate, in semplice appoggio a luce variabile.

Una fase preliminare ma fondamentale è la schedatura della struttura, che va effettuata con opportuni criteri [1, 2]. Individuate attraverso tale fase le zone critiche (Figura 9), si è passato all'utilizzo delle tecniche di indagine. Per effettuare le indagini su ogni trave è stato definito un sistema di riferimento locale.



Figure 8A e 8B - Vista di insieme del viadotto D'Agrò e Fiumedinisi



Figura 9 - Le lesioni in corrispondenza dei cavi

Le indagini di Impact-Echo

Le indagini di Impact-Echo effettuate hanno permesso di rilevare difetti nel calcestruzzo e di riempimento della sede in cui si trovano i cavi stessi.

Si è anche quantificato il valore della frequenza della sezione solida in base ai diversi difetti attraverso la ricostruzione dell'impactechogramma, ovvero un diagramma 2D che riporta la posizione del punto di misura in ascissa, la frequenza in ordinata e l'energia della frequenza nella terza dimensione.

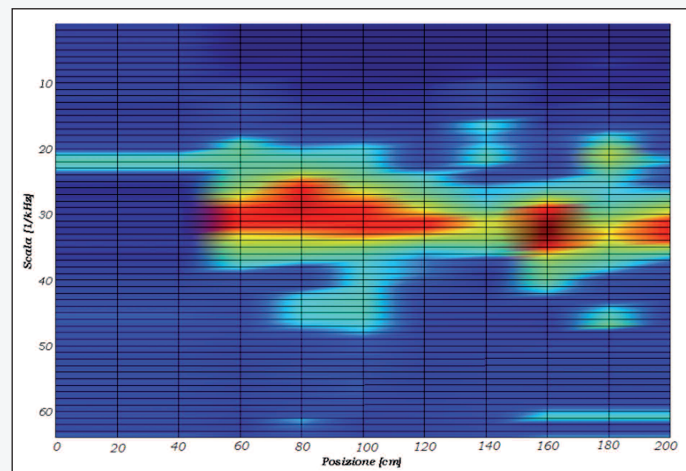


Figura 10 - L'Impactechogramma computato lungo il cavo

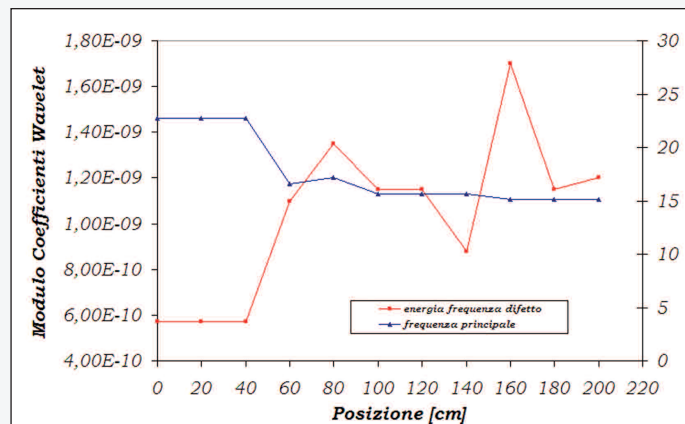


Figura 11 - Magnitudo e valore della frequenza lungo il cavo

In Figura 10 è riportato l'impactechogramma riferito a uno dei cavi appartenente alla trave di bordo (lato mare) della campata 3 del viadotto Fiumedinisi, dove in ascissa è riportato il punto di misura lungo l'asse del cavo rispetto al sistema di riferimento definito e in ordinata l'inverso della frequenza a meno di un coefficiente dipendente dall'algoritmo scelto per l'analisi dei segnali nel dominio delle frequenze. Il diagramma indica la presenza di un forte ammaloramento del calcestruzzo. Dall'analisi dettagliata dei risultati (Figura 11) si può ipotizzare la presenza combinata di ammaloramento del calcestruzzo e di assenza di malta sul cavo.

Le indagini di emissione acustica

E' stato effettuato un monitoraggio tramite AE del viadotto D'Agrò in condizioni di carico statico (prova di carico). La fase di messa a punto di tutto il sistema viene effettuata prima di eseguire la prova. Essa è legata all'individuazione delle soglie da utilizzare per poter poi eseguire il monitoraggio vero e proprio. La messa a punto di tutto il sistema ha comportato una lunga serie di prove di calibrazione. Successivamente, in base ai risultati dei test di calibrazione e messa a punto, è stata effettuata la prova di monitoraggio sul viadotto.

E' stato effettuato un monitoraggio durante una prova di carico suddivisa in cinque step, effettuati con l'ausilio di due camion da 30 t e da 20 t. E' stato possibile effettuare una valutazione dello stato di degrado della struttura con la stima del rapporto di rilassamento, definito come rapporto tra l'energia registrata durante la fase di scarico e l'energia registrata durante la fase di carico della struttura. Considerando che l'attività acustica registrata durante la fase di rimozione del carico è un indice di instabilità strutturale, un rapporto di rilassamento maggiore di 1 implica un decadimento strutturale in atto (Figura 12).

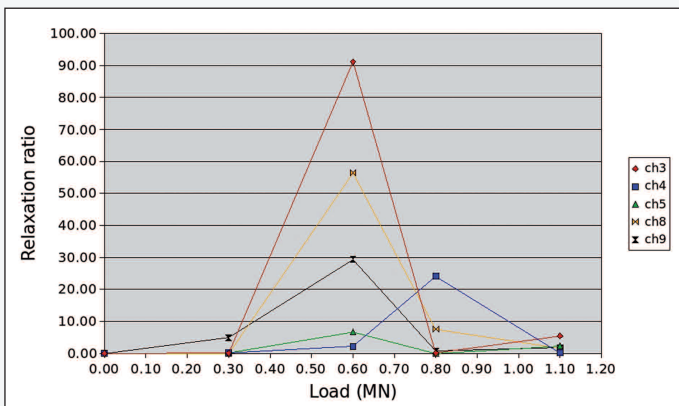


Figura 12 - Il rapporto di rilassamento per una trave dell'impalcato

Le indagini Georadar

La tecnologia radar è stata impiegata nelle indagini in situ sul viadotto D'Agrò per rilevare la posizione delle armature, lente e tese, per individuare le zone di ammaloramento del calcestruzzo e di corrosione delle armature attraverso la lettura incrociata dei radargrammi e del singolo segnale ampiezza-tempo, per misurare lo spessore del cassone della trave e per rilevare umidità o sali solubili.

Le indagini effettuate con il radar penetrante hanno rilevato che il segnale acquisito in corrispondenza di zone grave-

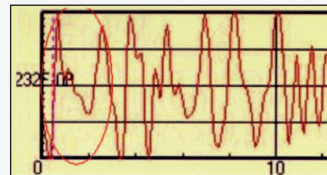
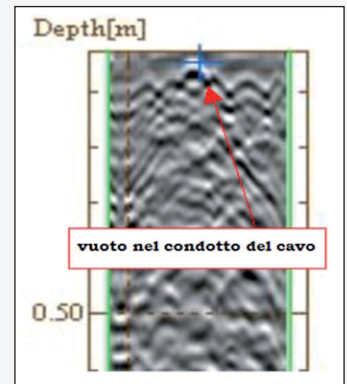


Figure 13A, 13B e 13C - A destra il segnale acquisito in una sezione in cui si è rilevata una lesione lungo il cavo e l'evidenza della presenza di un vuoto nel condotto del cavo; a sinistra il radargramma del concio

mente ammalorate era molto attenuato per l'elevata conducibilità del calcestruzzo. Il segnale e il radargramma riportati si riferiscono a una sezione trasversale della 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. Dal radargramma si possono facilmente misurare il numero, il passo dei cavi e il copriferro. In particolare, il segnale acquisito in corrispondenza di uno di essi presenta un forte assorbimento del segnale 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 si tratta di vuoto nel condotto dei cavi. Dall'analisi della singola traccia radar sembra, inoltre, che il calcestruzzo sia ammalorato, a causa d'infiltrazione d'umidità o di presenza di cloruri (elevata conducibilità e forte assorbimento del segnale).

Le indagini dinamiche

E' stata effettuata anche l'analisi modale di una campata del viadotto d'Agrò soggetta a forzante di tipo ambientale. Il solo output è stato registrato mediante accelerometri. L'analisi dei segnali registrati è stata fatta mediante il metodo Frequency Domain Decomposition (FDD), adatto alla analisi di output da forzante ignota. Sono state effettuate sette registrazioni di 2 minuti ciascuna, con intervallo di campionamento $\Delta t = 0,001$ s. Le storie temporali sono state analizzate nella banda di frequenze 0-200 Hz, per mezzo di un filtro passa-basso.

Le forme modali sono state ottenute mettendo insieme i valori di due registrazioni per volta, con diversa disposizione di un sensore. Nelle Figure 14A e 14B sono riportate tre situazioni.

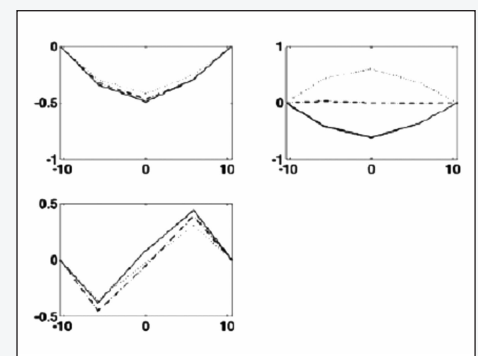
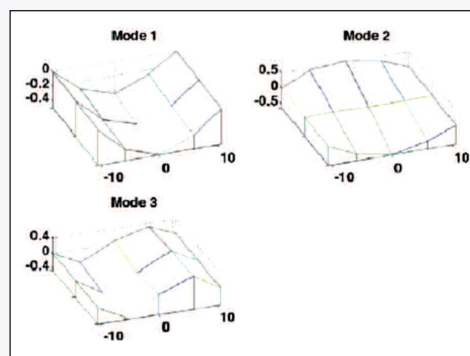


Figure 14A e 14B - Le prime tre forme modali e le sezioni: le registrazioni n° 1 e 7 (14A) e n° 3 e 6 (14B)



Le forme modali risultano ben definite e l'osservazione delle sezioni longitudinali, riportate nelle figure, mostra un comportamento che presenta delle dissimmetrie. Si osserva, infatti, che la prima forma modale risulta avere maggiore ampiezza in corrispondenza del lato monte del ponte (tratto continuo), per effetto di una non corretta risposta strutturale del viadotto. La linea tratto-punto si riferisce alla sezione centrale e quella tratteggiata al lato mare. Le forme modali e le frequenze estratte dai dati sperimentali sono state utilizzate nella procedura di identificazione del danno.

Definizione di una scala prestazionale

Una volta raccolti i dati attraverso un'ispezione visiva dettagliata ed effettuate le prove, deve essere preparato un rapporto che includa le seguenti informazioni: descrizione della struttura, ovvero tipologia, carichi statici e dinamici, dimensioni dell'elemento, tipo di fondazioni ecc.. Definizione di gruppi omogenei degli elementi tenendo in conto l'esposizione ambientale e il livello di degrado (schedatura della struttura). Descrizione del degrado osservato per ogni gruppo di elementi, ad esempio, frattura, delaminazione, spalling (redazione di un catalogo difetti). Infine, diagnosi e stato della struttura, ovvero stabilire se il degrado deriva o meno dalla corrosione e definire le caratteristiche dei processi di corrosione. Queste informazioni sono fondamentali per definire la capacità prestazionale della struttura [3]. La capacità prestazionale minima è rappresentata da un livello di degrado al di sotto del quale una struttura non deve andare (Figura 15).

Lo scopo delle indagini su una struttura è quello di individuare quale sia la sua performance, in modo da localizzare il punto di lavoro della struttura e definire se si trovi o meno in condizioni in cui la sicurezza non è assicurata. Tutte le informazioni necessarie per definire il punto di lavoro della struttura sono state ottenute mediante l'applicazione delle tecniche non distruttive suddette, che hanno permesso di avere un'idea dettagliata sullo stato di degrado delle strutture indagate.

Conclusioni

Nel presente lavoro è stata riportata una descrizione delle tecniche sviluppate e i principali risultati raggiunti con l'applicazione di tecniche non distruttive innovative su strutture reali in c.a.p. a cavi post-tesi degradate, nell'ambito di un progetto di ricerca industriale sviluppato congiuntamente tra la Sidercem Srl e la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Messina. L'attività di ricerca ha previsto tre fasi di sviluppo, due in laboratorio per lo studio di strutture in scala (piccola e semi-reale) e una in situ per strutture in scala reale. Partendo dai risultati raggiunti con le prove sui campioni in laboratorio (all'interno dei quali sono stati inseriti dei difetti noti), l'applicazione delle tecniche in situ ha permesso di individuare difetti nel calcestruzzo e nelle sedi di alloggiamento dei cavi e di definire la natura dei difetti stessi.

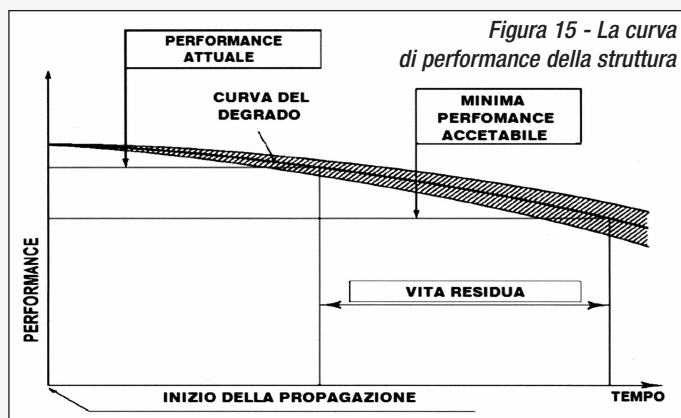


Figura 15 - La curva di performance della struttura

I risultati sperimentali acquisiti sui prototipi a difettosità nota hanno consentito di definire una sorta di "catalogo di difetti" nel quale la tipologia di segnale acquisito è stato direttamente correlato alla natura del difetto rilevato. Tale "catalogo" ha permesso di "riconoscere" successivamente difetti e anomalie rilevate dai segnali acquisiti in situ su strutture reali. Le indagini e gli studi effettuati nell'ambito del suddetto progetto di ricerca hanno anche permesso di definire delle procedure standard da seguire per le indagini in situ.

In conclusione, si può asserire che i controlli non distruttivi innovativi sono erroneamente poco utilizzati nell'ambito della diagnostica delle opere in c.a. e c.a.p. Dal successo dei risultati sperimentali conseguiti nell'ambito del progetto di ricerca, infatti, è opportuno sottolineare che l'impiego delle NDT per il controllo dei manufatti in c.a. e c.a.p. deve essere sicuramente incrementato, al fine di assicurare maggiore affidabilità delle opere in calcestruzzo, nell'assoluto rispetto della sicurezza. ■

* *Ingegnere e Professore Straordinario dell'Università degli Studi di Messina*

** *Ingegnere e Professore Associato dell'Università degli Studi di Messina*

*** *Ingegnere e Direttore Tecnico della Sede di Misterbianco di Sidercem Srl*

**** *Geologo, Direttore Tecnico della Sede di Caltanissetta di Sidercem Srl*

***** *Ingegnere e Dirigente Tecnico della Sezione Compartimentale di Catania di ANAS SpA*

***** *Ingegnere e Ricercatore dell'Università degli Studi di Messina*

***** *Ingegnere Dottoranda di Ricerca dell'Università degli Studi di Messina*

***** *Ingegnere dell'Università degli Studi di Messina*



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".

BIBLIOGRAFIA

- [1]. E. Proverbio, G. Epasto, V. Venturi, 2007 - "Il metodo dell'Impact Echo per la valutazione dello stato di degrado di strutture in c.a.p.", "Quarry & Construction", anno, XLV, n° 4, pp. 167-175.
- [2]. E. Proverbio, P. Longo, V. Venturi, 2002 - "Valutazione del degrado delle strutture in c.a. post-teso", "Strade & Autostrade", anno VI, n° 4, pp. 54-58.
- [3]. EC Innovation Programme "Contecvet - A Validated User Manual for Assessing the residual Service Life of Concrete Structures: Manual for assessing corrosion-affected concrete structures" IN30902I, Madrid, 2001.