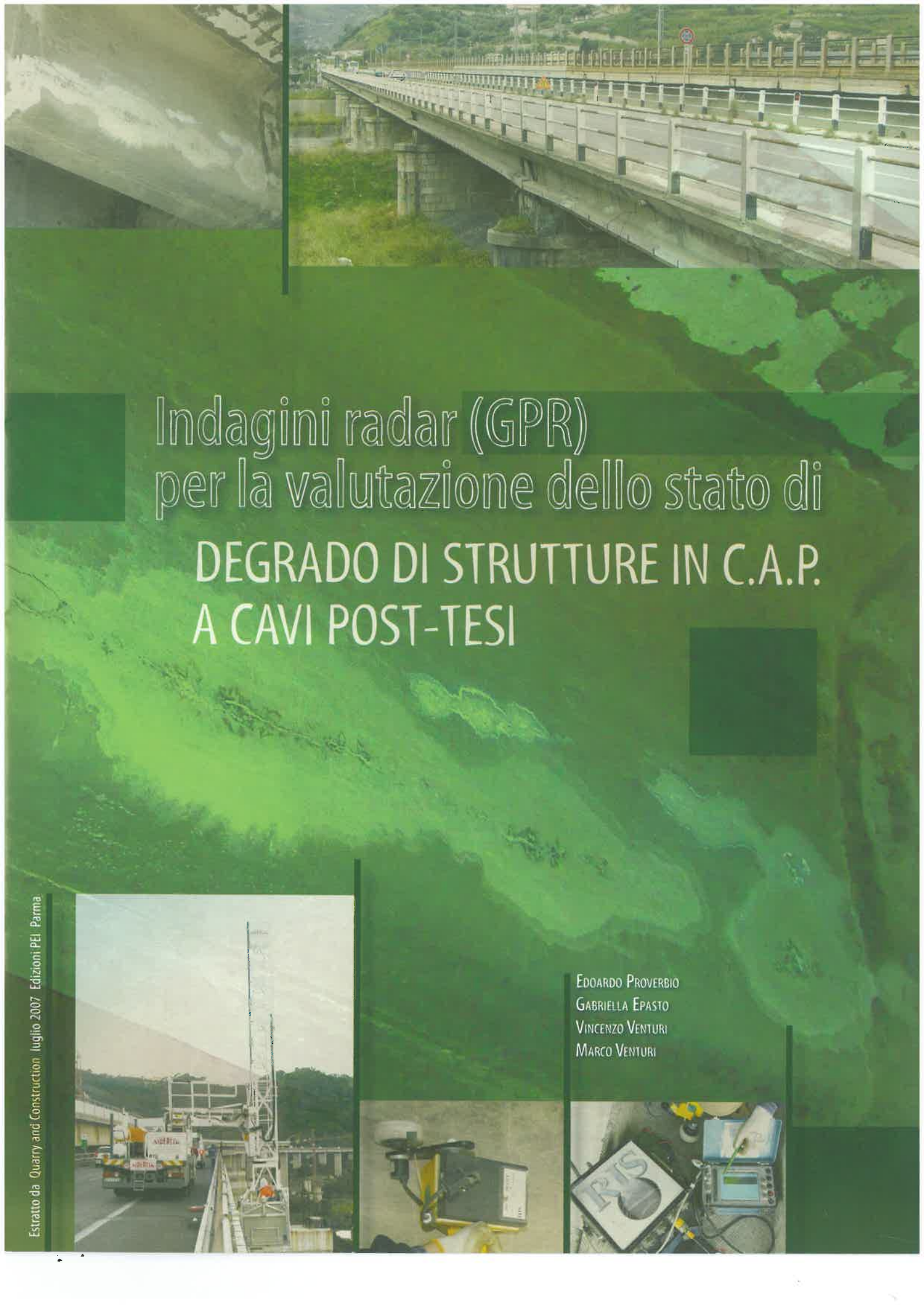




Indagini radar (GPR) per la valutazione dello stato di DEGRADO DI STRUTTURE IN C.A.P. A CAVI POST-TESI

EDOARDO PROVERBIO
GABRIELLA EPASTO
VINCENZO VENTURI
MARCO VENTURI





Diagnostica

Diagnosi del degrado
Analisi strutturale
Collaudi statici e dinamici
Ispezione e sorveglianza
Monitoraggi strutturali

CSA

Da **25 anni** al servizio della ricerca e della sperimentazione sui materiali da costruzione.

Laboratorio di Caltanissetta
C/da Calderaro (Z.I.) - C.P. 287
93100 Caltanissetta
tel. 0934 565012 P&X - fax 0934 575422
e-mail: sidercemci@sidercem.li

Laboratorio di Misterbianco
Via Agnelli, 22 (Z.I.)
95045 Misterbianco (CT)
tel. 095 476942 P&X - fax 095 475003
e-mail: sidercemci@sidercem.li

SIDERCem
S.r.l.

Istituto di Ricerca e Sperimentazione
sui Materiali da Costruzione

www.sidercem.it

Indagini radar (GPR) per la valutazione dello stato di DEGRADO DI STRUTTURE IN C.A.P. A CAVI POST-TESI

EDOARDO PROVERBIO, GABRIELLA EPASTO, VINCENZO VENTURI, MARCO VENTURI

La diagnostica ed il controllo dei manufatti in calcestruzzo, ed in particolare delle strutture post-tese, richiede l'utilizzo di tecniche non distruttive affidabili e semplici da eseguire *in situ*. Questa esigenza è importante non solo per le strutture di nuova costruzione, ma anche per il monitoraggio di opere d'arte già esistenti. Il Ground Penetrating Radar è una tecnica non distruttiva che ben si adatta al controllo delle strutture post-tese, poiché associa ad un'elevata risoluzione spaziale, l'assenza d'interventi invasivi sulla struttura.

Il GPR, rispetto alle altre tecniche non distruttive, è rapido da effettuare anche su superfici estese ed è ripetibile in qualsiasi momento. Nel presente lavoro la tecnica è stata applicata nell'ambito di una campagna d'indagine volta a rilevare differenti tipologie di difetti nel calcestruzzo di un viadotto a cavi post-tesi: disomogeneità, vuoti, lesioni, delaminazioni e possibile concentrazione di sali o umidità

Introduzione

Il Ground Penetrating Radar (detto anche Surface Penetrating Radar, georadar o semplicemente radar) è una tecnica elettromagnetica non distruttiva ad alta risoluzione, utilizzata inizialmente in campo prettamente militare per il monitoraggio e la diagnostica dei terreni. I settori di utilizzo sono molteplici: si va dalla scienza forense all'ingegneria; dall'archeologia alla geologia, fino ad arrivare alla ricerca di armi, mine o residui bellici inesplosi. Le prime applicazioni nel campo dell'ingegneria civile si ebbero durante gli anni 80 [1]. Inizialmente tale tecnica venne applicata per la valutazione dei manti stradali e delle fondazioni delle strutture in calcestruzzo; le applicazioni al calcestruzzo strutturale si ebbero principalmente nel controllo delle solette dei ponti. Recentemente la tecnica è stata applicata nelle indagini sulle strutture post-tese. Il Ground Penetrating Radar (GPR) risulta, infatti, una tecnica non distruttiva che ben si adatta al controllo delle strutture post-tese, poiché associa ad un'elevata risoluzione spaziale (la più alta tra tutte le tecniche ad immagini) l'assenza d'interventi invasivi sulla struttura. Tale tecnica, inoltre, è assolutamente sicura per l'operatore che effettua le indagini e non richiede alcuna schermatura (contrariamente a quello che accade con la gammagrafia).

A tutto ciò si sommano gli enormi progressi effettuati nello sviluppo di software utilizzati durante la fase di post-processing, che hanno reso questa tecnica sempre più apprezzata e sfruttata per le indagini *in situ*. Recenti studi sul calcestruzzo strutturale effettuati in USA ed in Europa hanno messo in evidenza quest'importante aspetto. In UK è stata pubblicata un'importante linea guida dalla "Concrete Society" nel 1997 [2]. L'American Society for Testing and Materials (ASTM) ha pubblicato delle linee guida nello standard ASTM D 4748-87. Una

normativa più recente (ASTM D6432-99) fornisce le indicazioni per una vasta gamma di applicazioni, fra le quali anche le indagini sulle strutture in calcestruzzo. La tecnica GPR può essere sfruttata per la capacità di rilevare l'evoluzione di cedimenti strutturali o per monitorare il deterioramento delle strutture nel tempo. La tecnica è stata utilizzata con successo sulle grandi opere d'arte in calcestruzzo e molti autorevoli autori hanno dimostrato l'efficacia e l'attendibilità dei

risultati. È stata utilizzata sui viadotti per rilevare la delaminazione indotta dalla corrosione delle armature (Hubbard et al., 2003), per misurare il copriferro (Al-Qadi, 2006) o per effettuare estese campagne d'indagine non distruttive (Gehrig et al., 2003; Hugenschmidt et al., 2006). Nella figura 1 sono riportate le applicazioni della tecnica in relazione all'attendibilità dei risultati.

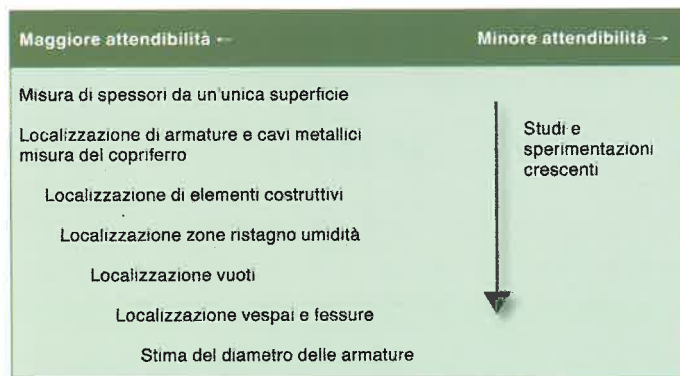


Figura 1 - Alcune applicazioni del GPR al calcestruzzo strutturale [1]

Nel presente lavoro sono illustrati i principi di funzionamento della tecnica GPR, con evidenza dei pregi, ma anche dei limiti rispetto ad altre tecniche di indagine. Sono, inoltre, illustrati a titolo di esempio, i risultati ottenuti durante una campagna d'indagine volta a valutare lo stato di degrado di un viadotto in c.a.p. a conci prefabbricati. È stata scelta tale metodologia per la semplicità d'impiego *in situ*, perché esistono protocolli ben definiti e soprattutto perché è assolutamente non distruttiva.

La tecnologia radar è stata utilizzata per rilevare la posizione delle armature, lente e tese, per individuare le zone di possibile ammaloramento del calcestruzzo e/o di corrosione delle armature attraverso la lettura incrociata dei radargrammi e del singolo segnale ampiezza-tempo (*sweep*), per misurare lo spessore del cassone della trave e per rilevare zone con possibile concentrazione di umidità o di sali solubili.

Le strutture post-tese a conci prefabbricati sono soggette ad una serie di problematiche legate alla possibile presenza di vuoti all'interno dei cavi di post-ten-



sionamento, che possono determinare la raccolta ed il ristagno di acqua, in conseguenza dei quali si può verificare l'innescio di pericolosi fenomeni di ossidazione, che degradano i materiali, aumentano la vulnerabilità della struttura fino, in casi particolari, a causarne il collasso [3, 4]. Le strutture in c.a.p., oltre agli specifici fenomeni di degrado suddetti, sono interessate dal degrado comune e diffuso che affligge in generale le opere in c.a.: ammaloramento, vespai, dilavamento, ingresso e concentrazione di cloruri e di umidità e corrosione delle armature.

Sfortunatamente il decadimento strutturale delle strutture post-tese (indotto da fenomeni corrosivi) non è sempre rilevabile con le indagini visive. Per questa ragione è opportuno che le PP.AA., proprietarie o concessionarie di infrastrutture viarie o di manufatti edili di interesse storico e non, provvedano ad investire risorse umane ed economiche che consentano il controllo ed il monitoraggio di beni il cui stato di "salute" sarebbe altrimenti ignoto.

I vantaggi e gli svantaggi di tale tecnica sono riassunti nella tabella 1 [1].

La tecnica

Il Ground Penetrating Radar può essere considerato l'equivalente elettromagnetico delle indagini acustiche. Il principio di funzionamento è ben noto e 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 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

VANTAGGI	SVANTAGGI
È possibile investigare superfici molto estese da un'unica via di accesso, in modo rapido ed efficace.	Attrezzatura costosa
Non richiede l'apporto di alcun materiale per l'accoppiamento.	L'interpretazione dei risultati richiede esperienza
Absolutamente non-distruttivo e non-invasivo.	Richiede un compromesso tra risoluzione e profondità massima di penetrazione del segnale
Rappresentazione in tempo reale dei risultati attraverso il radargramma	Il segnale non riesce a penetrare i metalli o armature con passo molto piccolo (armatura fitta)
Digitalizzazione dei dati e possibilità di elaborare i segnali acquisiti	La tecnica non è ancora conosciuta da molti professionisti nel campo dell'ingegneria civile
Sensibile a variazioni locali delle proprietà del calcestruzzo inclusa la presenza di umidità	
Non richiede alcuna schermatura di sicurezza o accorgimenti specifici per la salute dell'operatore	
Attrezzatura portatile	

Tabella 1

capacità dello strumento di emettere segnali aventi frequenza nominale compresa nel range 500 MHz – 2,5 GHz (in radiofrequenza) e di registrare quindi gli echi dagli oggetti immersi nel cls, carat-

namente elaborati, sono memorizzati e rappresentati su una unità di controllo. Generalmente l'interfaccia aria-calcestruzzo genera una forte riflessione del segnale, mentre altre riflessioni sono generate da altre interfacce al di sotto della superficie. 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: il *radargramma*.

Nel radargramma l'asse verticale rappresenta l'asse dei tempi, che può essere opportunamente trasformato

Figura 3 - Riflessione di un segnale radar provocata dalla presenza dell'armatura [5]

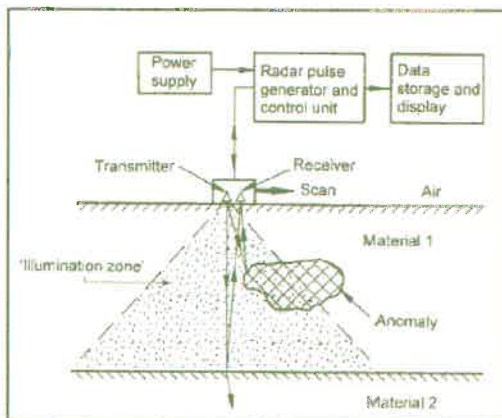
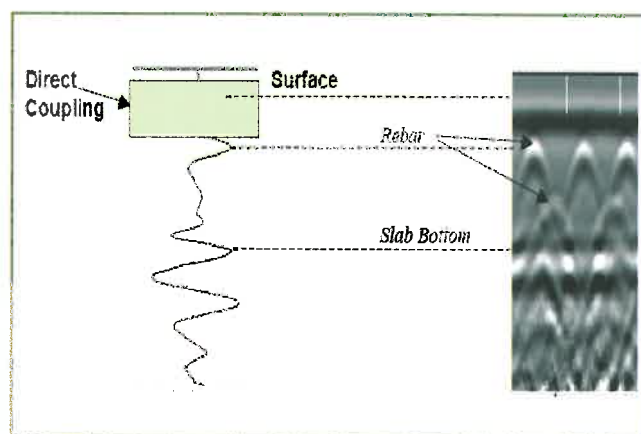


Figura 2 [2]

terizzati da dimensioni adeguate e da proprietà elettromagnetiche diverse rispetto a ciò che li circonda (fig. 2).

La trasmissione e la ricezione dei segnali è operata da una o più antenne che vengono fatte scorrere sul materiale che si desidera indagare. I dati raccolti, opportu-



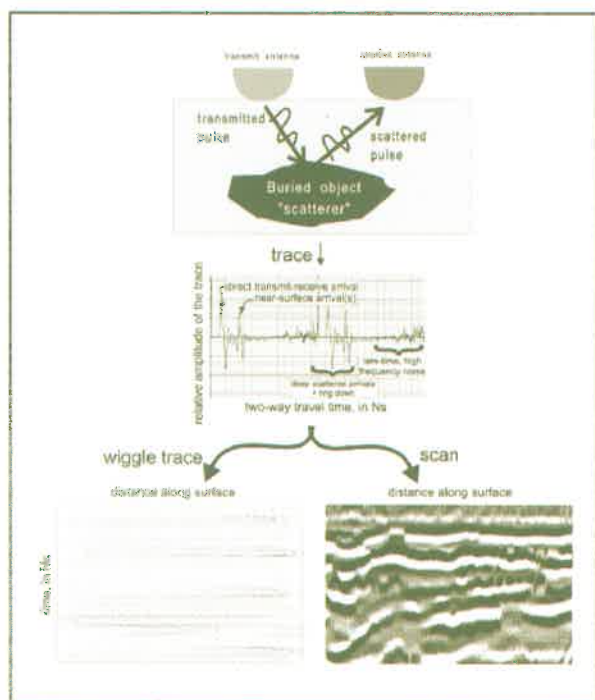


Figura 4 - Funzionamento del georadar. Generazione della mappa radar a partire dai singoli sweep acquisiti [6]

e dell'antenna utilizzata. Le caratteristiche dell'antenna (frequenza centrale e larghezza di banda) determinano quindi il tipo di eccitazione applicata al materiale in esame e la forma reale dell'impulso trasmesso. È riflettente un corpo le cui dimensioni siano comparabili o maggiori della lunghezza dell'onda elettromagnetica nel mezzo in cui il corpo è immerso e le cui proprietà elettromagnetiche siano differenti dal materiale che li contiene (contrasto dielettrico). In Tabella 2 è riportata una stima qualitativa del contrasto dielettrico e della riflessione prodotta per differenti interfacce.

La profondità della sezione esplorata dipende innanzitutto dalla frequenza di impulso immessa nel cls e dalla durata del tempo di registrazione degli "echi" (riflessioni) restituiti dagli strati del materiale in esame. Un tempo di registrazione maggiore offre una maggior profondità della sezione investigata. La profondità di investigazione dipende, tuttavia, anche dalla natura del materiale, ossia dalla sua costante dielettrica. I parametri che regolano la trasmissione di un'onda elettromagnetica in un qualsiasi mezzo, infatti, sono la permittività magnetica (μ), la costante dielettrica relativa (ϵ) e la conducibilità (σ).

La permittività magnetica è un parametro che spesso ha valore unitario; solitamente viene trascurata poiché è difficile incontrare calcestruzzi magnetici. La costante dielettrica relativa (CDR) è il para-

elettromagnetica (c) e la radice quadrata della CDR:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

La velocità è una grandezza che si deve conoscere necessariamente per trasformare, nel radargramma, l'asse dei tempi in asse delle profondità.

La conducibilità è un parametro che può influenzare negativamente le indagini radar.

Maggiore è la conducibilità e maggiore è l'assorbimento del segnale. Pertanto, in calcestruzzi con conducibilità alta (dovuti, ad esempio alla presenza di sali in soluzione o di umidità) c'è l'elevato rischio che i segnali immessi perdano subito l'energia e vengano attenuati, dando una riflessione contenuta. Si ritiene che l'attenuazione del segnale trasmesso possa essere un ottimo indice di fenomeni corrosivi o della presenza di umidità [7]. Infatti, attraverso la lettura incrociata dello spettro in ampiezza del segnale

in profondità; per le indagini sui ponti, generalmente il tempo di andata/ritorno del segnale (TT, two-way travel time) viene scelto minore di 30 nanosecondi (ns).

Eventuali oggetti presenti nel materiale in esame (tubi, armature, ecc.) sono visualizzati nelle immagini radar secondo la caratteristica "hyperbola" (fig. 3); essa si genera poiché l'antenna rileva l'oggetto in un intorno che precede e segue la perpendicolare rispetto allo stesso, nel quale la distanza tra antenna e oggetto prima diminuisce e poi aumenta nuovamente. Il segnale inviato all'antenna dall'apparato trasmittente è costituito da un impulso della durata di pochi nanosecondi; il tempo di registrazione del sistema è variabile a scelta dell'operatore, in funzione della profondità che si vuole esplorare

Tabella 2 [5]

Interfaccia	Contrasto Dielettrico	Riflessione
Asfalto - CIs	Medio	Media
CIs - Aria	Alto	Intensa
Solaio - Trave in CIs	Nessuno	No riflessione
CIs - Metallo	Alto	Intensa
CIs - Acqua	Alto	Intensa
CIs - PVC	Da Basso a Medio	Debole

Figura 5 - Vista d'insieme del ponte



radar (i singoli *sweep*), del radar-gramma stesso e delle indagini visive, si può accertare non solo la presenza di fenomeni corrosivi, ma anche rilevare la presenza di delaminazione o di ammaloramento del calcestruzzo.

Un esempio di applicazione

La tecnica GPR è stata utilizzata con successo in una campagna di indagini effettuate sul viadotto D'Agrò. Il viadotto, 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 1955. Il manufatto, realizzato in calcestruzzo armato pre-compresso, è costituito da 13 campate, poggianti su 12 pile e 2 spalle, per una lunghezza complessiva dell'opera pari a 287 m.



Figura 6 - Particolare dei conci prefabbricati.

L'impalcato, del tipo a travata semplicemente appoggiata, è costituito da 5 travi a cassone chiuso in c.a.p. a sezione cava pressoché trapezoidale con altezza di 0.90 m ed è irrigidito da 4 trasversali in c.a. e da una soletta superiore di sutura costituente il piano stradale che si protende a sbalzo sui marciapiedi.

Le travi degli impalcati interni sono costituite da 9 conci prefabbricati (fig. 6), mentre quelle della prima e ultima campata da 7 conci. Per quanto attiene al sistema di costruzione dell'opera, essa è stata realizzata con il cosiddetto "sistema Morandi" di precompressione a cavi post-tesi [4].

Lo spessore dell'intradosso e dell'anima delle travi non era noto. Non si avevano informazioni precise né sul diametro né sul numero dei cavi di post-tensionamento. Informazioni qualitative

sono state ricavate da alcune foto d'epoca della fase di posa in opera delle travi.

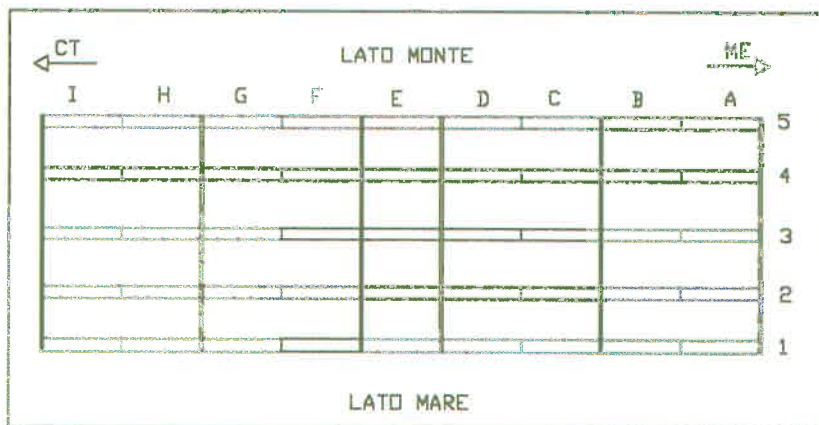
Metodologia sperimentale

Un sopralluogo sul ponte ha permesso di evidenziare lo stato di degrado in cui versano gli elementi strutturali dello stesso. L'ambiente in cui è posta la struttura è particolarmente aggressivo e riconducibile alla classe d'esposizione XS1 secondo la UNI EN 206-1.

Grazie alle ispezioni visive precedentemente effettuate, sono state localizzate delle zone gravemente ammalorate su cui si è deciso di effettuare la campagna d'indagine. In particolare, sono stati oggetto d'indagine alcuni conci appartenenti alle travi di bordo ed a quelle adiacenti, site in due campate che durante la fase d'ispezione sono risultate essere particolarmente a rischio. Per studiare tale struttura è stata preliminarmente definita la numerazione degli elementi e la suddivisione degli stessi in elementi omogenei (fig. 7).

Per eseguire la campagna d'indagine radar sui campioni suddetti, è stata seguita una procedura svolta secondo il seguente ordine: definizione della modalità di esecuzione della scansione (sulla superficie laterale, fig. 8); scelta del sensore; definizione del sistema di riferimento ed, infine, elaborazione dei dati ottenuti nella fase campale. Il sistema di riferimento è stato costruito su due assi ortogonali, definiti L e T. Tale sistema di riferimento

Figura 7 - Schematizzazione dell'impalcato (vista in pianta)



è stato definito con tre elementi principali: il *punto di zero*, ovvero l'origine del sistema di riferimento e le due *linee di riferimento*, ovvero gli assi T e L (fig. 9). Per una chiara definizione della direzione delle scansioni, sono state considerate le due seguenti coordinate: la *progressiva trasversale*, ovvero la coordinata misurata, a partire dal punto di zero, lungo l'asse T; la *progressiva longitudinale*, ovvero la coordinata misurata, a partire dal punto di zero, lungo l'asse L.

La scelta del sensore da utilizzare è stata fatta in funzione della finalità cui l'indagine era rivolta ed ha avuto come obiettivo il giusto compromesso tra risoluzione e penetrazione del segnale.

Il sensore utilizzato per effettuare la campagna d'indagini ha una frequenza centrale di 1.6 GHz (fig. 10) e consente di ottenere una profondità massima di scansione nel cls pari a circa 1 m.

Per eseguire le indagini, la superficie laterale della trave è stata suddivisa in una griglia da 20 cm lungo la progressiva longitudinale, facendo in modo che la linea fosse coincidente con gli assi dei cavi.

L'origine del sistema di riferimento è stata scelta uguale per tutte le travi e posta a circa 10 cm dal giunto ($L = 10$ cm), come mostrato in fig. 9.

Si riporta nelle immagini seguenti la sezione della trave in cui viene indicata la posizione dell'antenna (fig. 8) ed una vista laterale del concio con l'indicazione della direzione delle scansioni effettuate dopo aver tracciato la griglia (fig. 9).

Il trasduttore è stato spostato lungo le li-



Figura 10 - Radar geologico IDS RIS: trasduttore e sistema di acquisizione (sx); antenna da 1.6 GHz (dx)

nee della griglia tracciata sulla superficie laterale della trave; il tempo di andata e ritorno del segnale (TT) è stato impostato a 18 ns/m, per una profondità di penetrazione del segnale pari a 90 cm.

Una volta installato lo strumento, scelti il sistema di riferimento ed il sensore, è stata eseguita la campagna d'indagine. È stata effettuata la scansione con un singolo trasduttore a causa delle ridotte dimensioni della trave.

Ground Penetrating Radar Equipment

Il radar utilizzato per effettuare la campagna d'indagine suddetta è distribuito da Ingegneria dei Sistemi (IDS) S.p.a. ed è costituito da 3 apparati fondamentali (fig. 10).

Il primo è l'apparato di acquisizione e controllo, che svolge parecchie funzioni: eccita i sensori (fase di trasmissione) con un segnale impulsivo a banda larga; riceve, digitalizza e memorizza il segnale di ritorno rilevato dai sensori (fase di

ricezione). Memorizza, insieme ai dati radar, i dati di posizione, allo scopo di evitare errori dovuti a sviste dell'operatore; infine, visualizza i dati acquisiti in tempo reale, in modo da permettere una tempestiva valutazione della funzionalità degli apparati e della corretta scelta dei sensori.

Il secondo apparato è il sistema di elaborazione dati, ovvero il software IDSgred, in grado di elaborare i dati radar acquisiti nella fase campale, in modo da ottimizzare la leggibilità delle informazioni di interesse.

Il terzo è il sensore, di frequenza opportuna e dotato di ruota metrica (fig. 10). La ruota metrica è il sensore di posizione collocato lateralmente all'antenna.

La sua funzione è quella di segnalare al laptop la posizione occupata dall'antenna durante una scansione per consentire la perfetta localizzazione dei dati acquisiti. La risoluzione della ruota metrica è di circa 2 cm. Durante la fase di post-processing sono state applicate tutte le elaborazioni necessarie per ottenere adeguati standard qualitativi del radar-

gramma.

Più in particolare, l'equalizzazione del guadagno, l'allineamento delle sezioni radar acquisite, la visualizzazione in scala di grigi, il calcolo della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica e, quindi, della profondità reale dei bersagli individuati.

Figura 8 - Sezione della trave

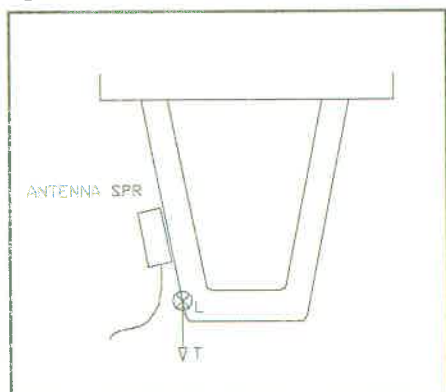
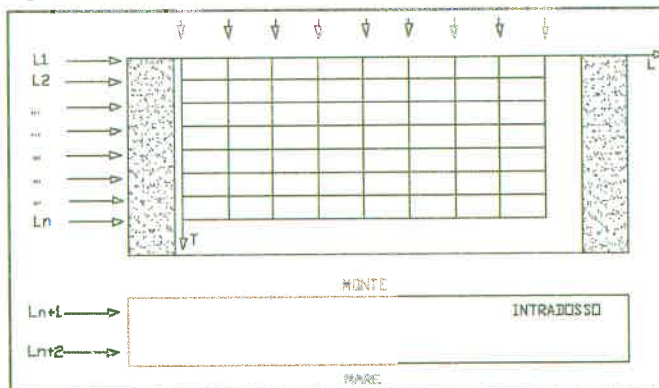


Figura 9 - Indicazione delle linee di scansione sulla griglia



Risultati sperimentali

Sono state localizzate parecchie zone ammalorate, in cui erano presumibilmente presenti delaminazione dovuta a

del cavo e, quindi, possibile ammaloramento del calcestruzzo all'interfaccia calcestruzzo-cavo.

Dal radargramma si possono facilmente misurare il numero, il copriferro ed il

passo dei cavi.

In particolare 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 si tratta di delaminazione.

Dall'analisi del singolo sweep 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).

Il segnale ed il radargramma riportati in figura 13 indicano assorbimento del segnale nella zona evidenziata in rosso.

Tale andamento è da attribuire ad un forte degrado del calcestruzzo per effetto dell'azione dei cloruri o dell'umidità. Dalle indagini visive si era ipotizzato che l'armatura sottostante fosse interessata da avanzati fenomeni corrosivi.

Le indagini radar confermano pienamente quanto ipotizzato e danno anche un'informazione sull'estensione della superficie ammalorata.

L'analisi della traccia radar (figura 13) 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

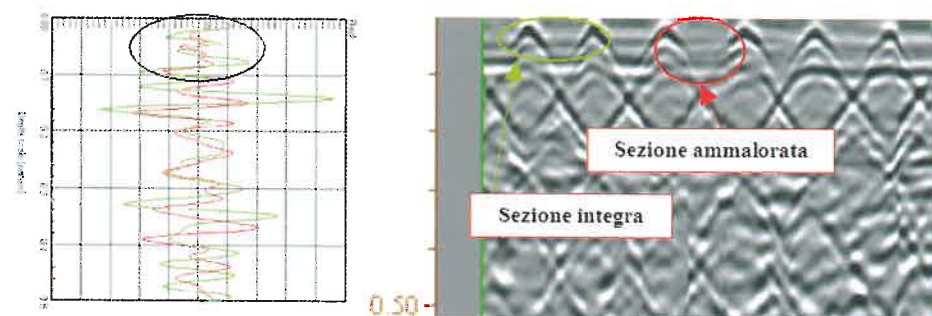


Figura 11 - Dx: Segnale acquisito in una sezione integra (in verde) ed in una sezione ammalorata (in rosso); Sx: radargramma della superficie laterale del concio

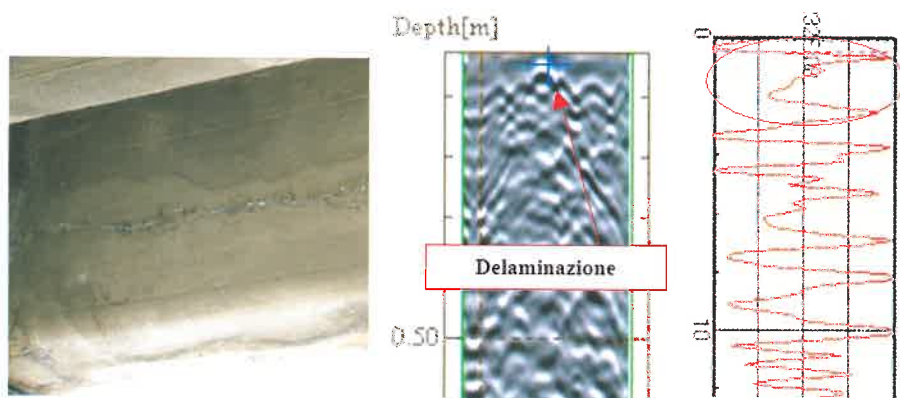


Figura 12 - Dx: Segnale acquisito in una sezione in cui si è rilevata una lesione lungo il cavo e quindi possibile delaminazione, Sx: radargramma del concio

fenomeni corrosivi, efflorescenze, vespai e fratture nel calcestruzzo.

Le indagini effettuate con il radar penetrante hanno rilevato che il segnale acquisito in corrispondenza di zone gravemente ammalorate era molto attenuato per l'elevata conducibilità del calcestruzzo. In figura 11 viene mostrata la differenza sostanziale tra il segnale acquisito in una zona "sana" della trave (traccia in verde) e quello acquisito in una sezione in cui il calcestruzzo potrebbe essere ammalorato (traccia in rosso). Il radargramma ha permesso di misurare lo spessore del cassone lungo la superficie laterale, pari a circa 100-110 mm.

Il segnale ed il radargramma riportati in figura 12 si riferiscono ad una sezione trasversale della trave in cui dalle indagini visive è emersa una lesione lungo l'asse

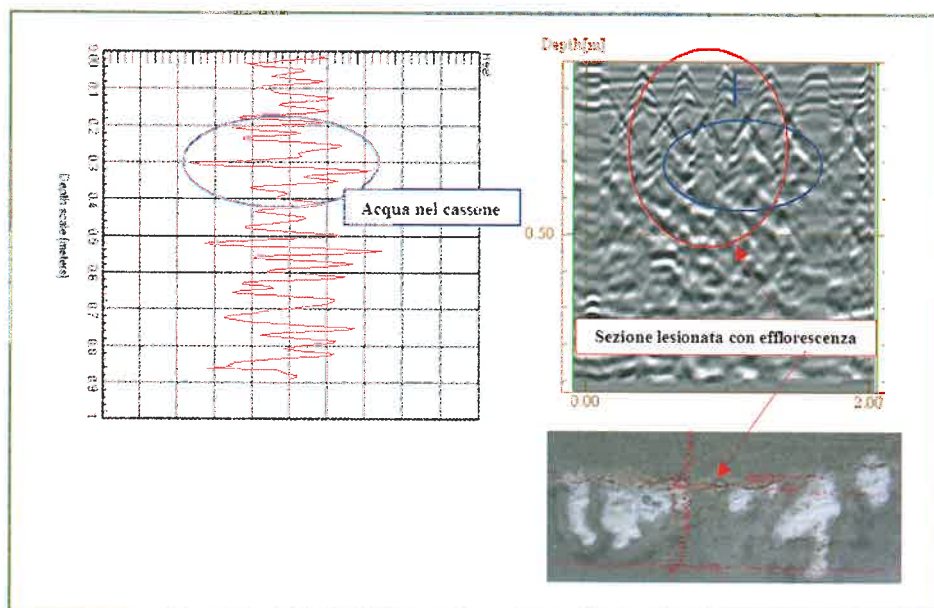


Figura 13 - Dx: Segnale acquisito in una sezione in cui si è rilevata efflorescenza; Sx: radargramma della superficie

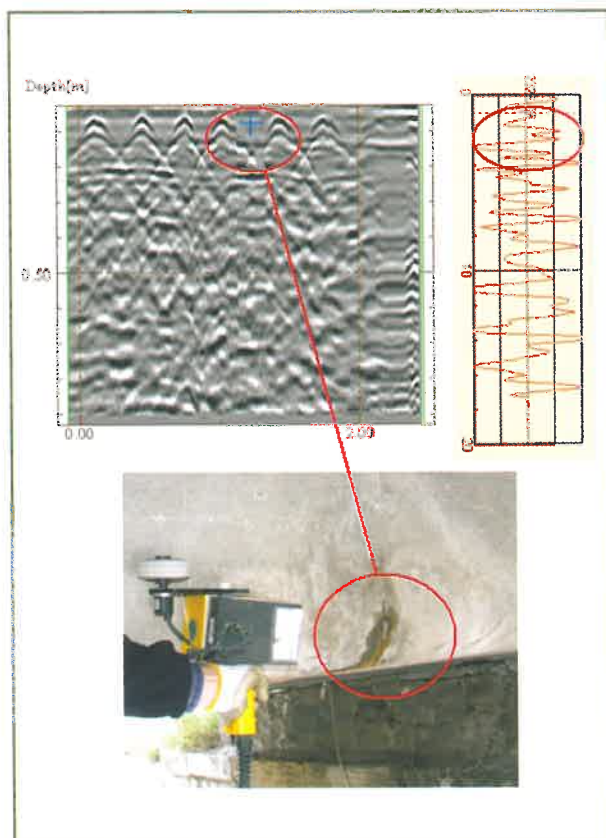


Figura 14 - Radargramma e singolo sweep (l'asse verticale è in ns) della trave, in corrispondenza di una lesione

all'interno, probabilmente a causa di una non corretta impermeabilizzazione della soletta.

Durante l'indagine visiva è stata riscontrata la presenza di diverse macchie di umidità all'intradosso della trave e pertanto l'ipotesi che il cassone, al suo interno, fosse pieno d'acqua ha trovato conferma nell'indagine radar.

Sulla stessa trave è stata rilevata una lesione all'intradosso, in corrispondenza del giunto tra due conci adiacenti.

Dai risultati (fig. 14) si è potuto ricavare che cedimenti strutturali di tal genere (lesione della trave) possono essere rilevati con la tecnica radar.

La discontinuità del cls tra conci adiacenti può essere individuata dalla tecnica radar come illustrato in fig. 14.

Conclusioni

I controlli non distruttivi stanno assumendo, negli ultimi anni, un ruolo chiave per la diagnosi ed il controllo delle strutture in calcestruzzo, in particolare modo delle strutture in c.a. precompresso e di

quelle post-tese. Le strutture post-tese, in particolare a conci prefabbricati, sono frequentemente preferite rispetto ad altre soluzioni costruttive per la loro facilità di esecuzione, la loro flessibilità e per la loro struttura modulare. Tali strutture sono, però, soggette a particolari fenomeni di degrado legati alla possibile presenza di vuoti all'interno

dei condotti di alloggiamento dei cavi di post-tensionamento.

È, pertanto, necessaria un'attenta valutazione che permetta di stabilirne il comportamento nei confronti della durabilità. Attualmente sono tante le tecniche non distruttive utilizzate per il controllo delle strutture post-tese.

Il GPR offre alcuni vantaggi rispetto alle altre tecniche: è rapida da effettuare anche su superfici estese ed è ripetibile in qualsiasi momento, non comporta nessun intervento invasivo sulla struttura, non richiede precauzioni di nessun tipo per l'operatore (le antenne sono schermate) e richiede l'accesso da un solo lato della struttura da indagare.

Quello che ancora più importante da sottolineare è che le campagne radar non risentono della presenza del traffico veicolare e, poiché sono rapide da effettuare, hanno una ridotta incidenza sulla viabilità della struttura interessata alle indagini. Nel presente lavoro è stata illustrata un'applicazione della tecnica GPR su alcune travi da ponte in c.a.p. post-teso, che presentavano evidenti segni di ammaloramento del calcestruzzo e di corrosione delle armature.

La tecnica è stata applicata nell'ambito di una campagna d'indagine volta a rilevare disomogeneità del calcestruzzo, difetti, lesioni e delaminazioni.

Tale tecnica è risultata di particolare utilità nella localizzazione e caratterizzazione dei suddetti difetti.

Gli autori

Proverbio Edoardo è professore straordinario di "Scienza e Tecnologia dei Materiali" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Messina. È autore di più di 100 pubblicazioni su riviste e atti di congresso internazionali e nazionali.

Si è sempre occupato di corrosione e protezione dei materiali ed in particolare della corrosione nelle strutture in calcestruzzo armato.

È responsabile scientifico del progetto MIUR "Nuove tecnologie per la valutazione del degrado.

Epasto Gabriella è dottoranda di ricerca in "Ingegneria e Chimica dei Materiali" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina ove sta approfondendo le tematiche dell'identificazione di difetti interni in strutture in c.a. e c.a.p. tramite indagini non distruttive. Si è laureata a Messina nel 2003 in Ingegneria dei Materiali con una tesi di laurea dal titolo "Degrado al fuoco delle strutture in calcestruzzo armato" in collaborazione con la Sidercem S.r.l.

Vincenzo Venturi, ingegnere libero professionista e, da oltre 20 anni, Direttore Tecnico

della SIDERCEM S.r.l. società titolare di due Laboratori Ufficiali ed Istituto di Ricerca e Sperimentazione sui materiali da costruzione, sulle tecniche di controllo, sul monitoraggio e sulla diagnosi del degrado di grandi opere e del patrimonio monumentale.

È stato titolare a contratto presso la Facoltà di Ingegneria di Messina del corso "Tecniche di indagine in-situ ed in laboratorio di manufatti in calcestruzzo e muratura". È autore di oltre 30 pubblicazioni su riviste e atti di congresso internazionali e nazionali.

È responsabile per la SIDERCEM del progetto MIUR "Nuove tecnologie per la valutazione del

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare gli Ingg. D. Santacroce e P. Longo della Sidercem S.r.l. di Misterbianco (CT) ed il Dott. V. Longo della Diagnosis di Catania per la collaborazione. Si desidera, inoltre, ringraziare il Compartimento ANAS di Catania per la disponibilità.

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) J.H. Bungey, "Sub-Ground Radar Testing Of Concrete: A Review", Construction and Building Materials, Vol. 18, pp. 1-8 (2004).

(2) Concrete Society: "Guidance On The Radar Testing Of Concrete Structures". Tech. Rep.48, 1997:88

(3) Poston R. W. and Vouters J. P., "Durability Of Precast Segmental Bridges", NCHRP Web Document 15 (Project 20-7/Task 92), June 1998.

(4) Proverbio E., Laganà G., Venturi V., "Il Collasso del Ponte S. Stefano" l'Edilizia, No. 3, Giugno-Luglio, Anno XV, pp. 32-37.

(5) Geophysical Survey System, Inc., "GSSI Handbook for Radar Inspection of Concrete", 2001.

(6) Jeffrey J. Daniels, "Ground Penetrating Radar Fundamentals", Prepared as an appendix to a report to the U.S.EPA, Region V, November, 2000

(7) Z. M. Sbartai, S. Laurens, J.P. Balayssac, G. Ballivy, G. Arliguie, "Effect of Concrete Moisture on Radar Signal Amplitude", ACI Materials Journal, V. 103, No. 6, November-December 2006.

degrado ed il controllo delle strutture in calcestruzzo armato precompresso".

Marco Venturi, geologo libero professionista e, da oltre 20 anni, Direttore Tecnico della SIDERCEM S.r.l. società titolare di due Laboratori Ufficiali ed Istituto di Ricerca e Sperimentazione sui materiali da costruzione, sulle tecniche di controllo, sul monitoraggio e sulla diagnosi del degrado di grandi opere e del patrimonio monumentale. Dal 1983 si è dedicato alle applicazioni del georadar, in campo geognostico, archeologico e di ingegneria civile, seguendo corsi di perfezionamento e training applicativo negli Stati Uniti ed in Finlandia. È responsabile per la SIDERCEM del progetto MIUR "Nuove tecnologie per la valutazione del degrado ed il controllo delle strutture in calcestruzzo armato precompresso".

Area A (D.P.R. n. 296/93 - conc. n. 85274 del 30/10/2004 - conc. n. 59440 del 04/04/2005)

- Leganti idraulici
- Calcestruzzi
- Laterizi
- Acciai
- Procedimenti di saldatura

Area B (D.P.R. n. 296/93 - conc. n. 85274 del 30/10/2004 - conc. n. 59440 del 04/04/2005)

- Geotecnica
- Meccanica delle terre
- Meccanica delle rocce
- Indagini geognostiche
- Monitoraggi e prove in situ
- Indagini geofisiche e georadar

Area C

Diagnostica

- Diagnosi del degrado
- Analisi strutturale
- Collaudi statici e dinamici
- Ispezione e sorveglianza
- Monitoraggi strutturali

Strade

- Conglomerati bituminosi
- Bitumi
- Controlli in corso d'opera

Ambiente

- Chimica
- Mineralogia e Petrografia
- Analisi ambientali
- Ricerca amianto

Topografia

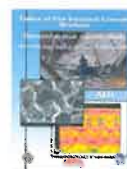
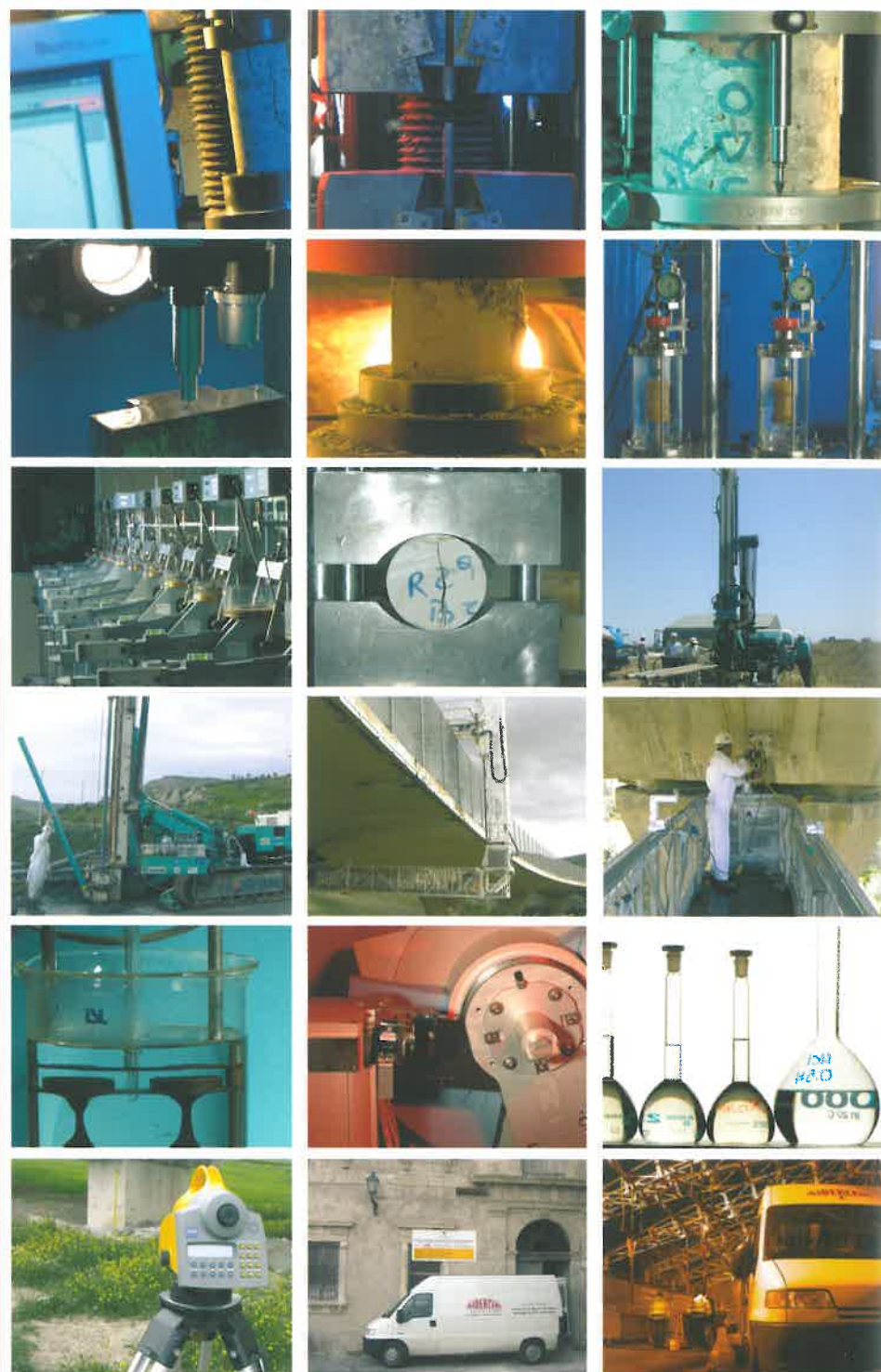
- Rilievo
- Fotogrammetria terrestre ed aerea
- 3D laser scanner

Metrologia

- Forze
- Lunghezze
- Pressioni

Ricerca e Sviluppo

- Seminari
- Convegni
- Progetti di Ricerca
- Didattica e Formazione



www.sidercem.it

Laboratorio di Caltanissetta
C/da Calderaro (Z.I.) - C.P. 287
93100 Caltanissetta
tel. 0934 565012 PBX - fax 0934 575422
e-mail: sidercemcl@sidercem.it

Laboratorio di Misterbianco
Via Agnelli, 22 (Z.I.)
95045 Misterbianco (CT)
tel. 095 476942 PBX - fax 095 475003
e-mail: sidercemct@sidercem.it