

STRUMENTI INEDITI PER L'ANALISI DEL DEGRADO NELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

*ROBERTO FELICETTI
Politecnico di Milano*

SUMMARY

Most of the external agents affecting the durability of concrete members lead to steep gradients of the material properties within the concrete cover. This deterioration can be hardly inspected via the commonly available ND techniques, which generally smooth the material response at the scale of the coarse aggregate, that is also the significant range for the problem at issue. Another common task in civil engineering is the detection of flaws and delamination cracks over large areas, like pavements, topping concrete in precast decks, tiles and plaster in building facades.

In order to provide some viable tools for the solution of these problems, new ND techniques have been developed in the last years, which are based on easily available devices and proved to be well suited to onsite applications. Among them is the measurement of the drilling and coring resistance, that allow to continuously scan the material response at increasing depth. Also to be cited are the detection of colour alterations and the monitoring of the acoustic response of a surface, which may be profitably rely on commonly available electronic devices. This paper is aimed at providing a brief account on these techniques, including the experience gained by both laboratory testing and the analysis of some real structures.

1. INTRODUZIONE

L'analisi del degrado nelle strutture in calcestruzzo armato è un problema di notevole complessità, che non sempre le tradizionali tecniche non distruttive di indagine consentono di risolvere in maniera efficiente. Tra gli esempi che è possibile citare vi è il danneggiamento del copriferro ad opera di condizioni ambientali particolarmente severe (gelo-disgelo, incendio) o di reazioni chimicofisiche all'interno del materiale (carbonatazione, reazione alcali-silice, penetrazione di ioni).

Questi fenomeni di norma producono un gradiente più o meno marcato delle proprietà fisicomeccaniche nello strato più esterno di conglomerato. Al contrario, il principio di base delle comuni tecniche di indagine per elementi in calcestruzzo è quello di mediare l'eterogeneità intrinseca del materiale, che è riconducibile alla frazione più grossa degli aggregati e che coinvolge la medesima scala dimensionale dei fenomeni citati [1].

Un'altra problematica importante è rappresentata dal possibile distacco dello stesso copriferro, dei fondelli in laterizio nei solai alleggeriti (fenomeno dello sfondellamento) e degli strati di rivestimento e finitura (intonaci, pavimentazioni, massetti, lastre, ecc). Un ulteriore aggravio è spesso rappresentato dalla notevole estensione delle aree interessate e, in alcuni casi, dal potenziale pericolo per l'incolumità delle persone.

In tempi recenti vi sono stati notevoli progressi per quanto riguarda la messa a punto di tecniche avanzate per l'identificazione dei fenomeni di distacco e di delaminazione. Un primo esempio è rappresentato dai metodi basati sulla propagazione di brevi impulsi ultrasonici, che vengono parzialmente riflessi dalle eventuali discontinuità del materiale (impact-echo e pulse-echo [2]). Le maggiori limitazioni sono in genere rappresentate dalla profondità minima dei distacchi che è possibile identificare (> 40mm) e dal tempo richiesto per le indagini (dell'ordine di 1 ora/m²).

Un altro metodo che è stato notevolmente perfezionato è la termografia all'infrarosso, basata sul rilievo delle anomalie del campo termico superficiale di un manufatto sottoposto all'azione di transitori termici naturali o indotti artificialmente. Una maggiore accuratezza può essere ottenuta registrando l'evoluzione temporale delle temperature [3], pur con l'evidente difficoltà legata ai tempi relativamente lunghi che caratterizzano la propagazione delle onde termiche in un materiale poco diffusivo quale il calcestruzzo.

Si possono poi citare l'analisi modale e dello spettro delle onde superficiali e lo studio della

propagazione delle onde elettromagnetiche. Un inquadramento di questa materia in così rapida evoluzione è tra le finalità di un Comitato Tecnico di formazione relativamente recente (RILEM 207- INR *Interpretation of NDT results and assessment of RC structures*), che mira a definire le potenzialità e le modalità di impiego delle tecniche di indagine più avanzate nello studio di problemi di particolare rilievo nell'Ingegneria Civile.

Vi è però da dire che l'elevata specializzazione richiesta per l'utilizzo di questi metodi, unitamente all'elevato costo delle strumentazioni ed ai lunghi tempi necessari per l'implementazione sul campo, costituiscono tuttora un freno alla loro diffusione su larga scala. Nella pratica spesso ci si affida ad un professionista esperto, che disponendo il prelievo di alcuni campioni per le analisi di laboratorio e saggiando la risposta delle membrature con strumenti semplici e di uso comune (martello, sclerometro, misure di velocità di impulsi ultrasonici, ecc), si forma un'idea sullo stato di degrado dell'opera e sugli interventi necessari per il ripristino della sua funzionalità e durabilità.

Anche in quest'ottica di maggiore concretezza e di attenzione ai vincoli operativi che spesso condizionano le applicazioni in situ, vi sono tuttavia dei notevoli margini di affinamento, nel senso di rendere meno invasivi i prelievi, più sistematiche e oggettive le analisi, più immediata la disponibilità dei risultati. In alcuni casi questa possibilità è offerta da dispositivi largamente diffusi (calcolatori portatili, fotocamere e periferiche audio digitali), che permettono di tradurre in forma numerica la percezione soggettiva che si ricava dall'esame visivo della struttura (colore e sonorità). In altre situazioni è la stessa operazione di prelievo di un campione a fornire delle informazioni sulla compattezza e sulla tenacità del materiale a profondità crescenti dalla superficie del manufatto.

Quest'ultima osservazione apre il vasto capitolo dei "metodi combinati", nei quali più informazioni concorrono alla valutazione delle condizioni della struttura. Si tratta di un approccio che può essere suggerito dalla convenienza di affiancare indagini locali più accurate a tecniche rapide ma spesso poco affidabili, dalla necessità di compensare gli effetti spuri di alcuni parametri (umidità, età del calcestruzzo) e, in generale, dall'esigenza di migliorare l'accuratezza delle misure effettuate.

Tenendo presenti i vantaggi offerti da una visione più ampia della strategia operativa, le potenzialità di alcuni dispositivi elettronici di largo consumo, ma anche i vincoli operativi imposti dalle applicazioni sul campo, è stata messa a punto, presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano, una serie di promettenti strumenti di indagine per la valutazione del degrado delle strutture in calcestruzzo armato. Di queste metodologie, mirate in particolare alla valutazione del danno da incendio e dei distacchi delle pavimentazioni, si vuole dare in questa nota una breve rassegna, anche con riferimento ad alcuni esempi applicativi ed alle attuali linee di sviluppo.

2. RESISTENZA AL CAROTAGGIO E ALLA PERFORAZIONE

Il prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo, da sottoporre a prove meccaniche o ad analisi di laboratorio, è sicuramente una delle metodologie più diffuse per l'indagine su strutture esistenti. Tuttavia, nello studio dei fenomeni di degrado il materiale estratto si presenta fortemente stratificato ed è importante poterne distinguere le proprietà puntuali a profondità crescenti lungo l'asse della carota. Esempi di metodi idonei basati sulla risposta meccanica sono la scansione ultrasonica mediante sonde esponenziali [4] e, operando su dischi ricavati dalla carota, la misura del modulo elastico dinamico [4, 5], le prove di trazione indiretta [6] e le prove di compressione su un'impronta ridotta di carico [7]. Vi è poi una serie di analisi fisicochimiche che rientrano nella normale pratica di laboratorio e che, richiedendo campioni di piccole dimensioni, si prestano bene ad un'indagine puntuale (contenuto di ioni, porosità, analisi termiche di luminescenza, gravimetrica e differenziale [8]).

È altresì noto che la velocità di avanzamento della corona diamantata durante il taglio della carota fornisce già un'indicazione sulla qualità del materiale incontrato alle diverse profondità, in maniera del tutto simile a quanto viene correntemente fatto nelle prospezioni geofisiche o durante la perforazione dei pozzi petroliferi (le cosiddette tecniche "while drilling"). Tuttavia, non esistono in letteratura studi sistematici su questo tipo di approccio applicato alle strutture in calcestruzzo, anche se si ha notizia di rilievi simili effettuati durante i lavori di ripristino della galleria del Monte Bianco dopo l'incendio del 1999 [4].

Per verificare le potenzialità del metodo è stata utilizzata una comune carotatrice alla quale sono stati applicati dei sensori per la misura della velocità di rotazione, dell'avanzamento, della spinta esercitata sulla corona e della potenza elettrica assorbita (Fig. 1a). La lettura dei sensori è affidata ad un calcolatore portatile munito di una scheda

multifunzione (convertitore A/D e gestione di segnali logici), che consente di visualizzare in tempo reale tutti i parametri che caratterizzano il processo di carotaggio. I risultati più rappresentativi della qualità del materiale sono il lavoro specifico netto (Joule per mm³ intagliato) ed il tempo speso durante un avanzamento unitario (s/mm).

In una prima serie di prove è stato studiato l'effetto di alcuni parametri operativi, quali il diametro della corona, la spinta e la velocità di rotazione. Le prove sono state eseguite utilizzando dei provini cubici di calcestruzzo ordinario (lato = 150 mm, $R_{cm} = 50 \text{ N/mm}^2$).

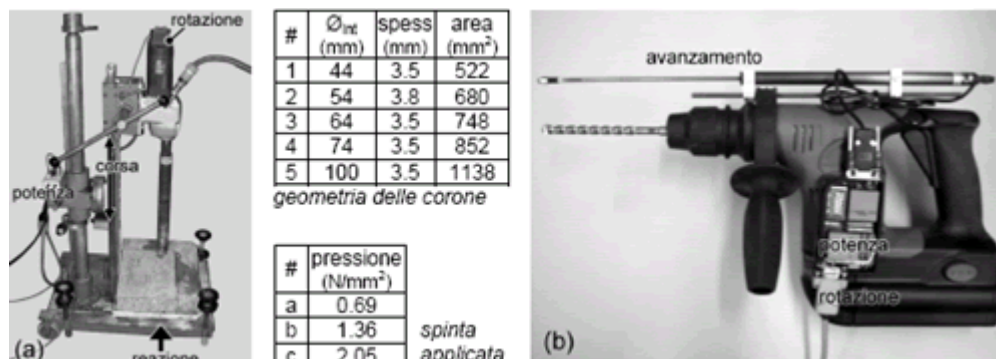


Figura 1. (a) Carotatrice con i sensori per la misura dei parametri operativi e variabili indagate nelle prove preliminari di carotaggio; (b) trapano modificato per la misura della resistenza alla perforazione.

Alla velocità di riferimento (600 giri/min) i risultati mostrano una relativa costanza del lavoro speso per unità di volume intagliato, sia al variare del diametro della corona (Fig. 2a) che al crescere della spinta esercitata durante il carotaggio (Fig. 2b). Nel contempo, un incremento del diametro della corona o della pressione impressa tendono a ridurre il tempo necessario per il taglio della carota, con un aumento della potenza assorbita dal motore a parità di energia dissipata. Anche un aumento della velocità di rotazione (1250 giri/min) comporta una semplice riduzione del tempo di avanzamento a parità di lavoro specifico (i diagrammi vengono omessi). Nel successivo programma sperimentale si è scelto di utilizzare la corona di minor diametro, che ha il pregio di essere meno invasiva per la struttura ma ha anche lo svantaggio di essere maggiormente influenzata dal controllo della pressione esercitata.

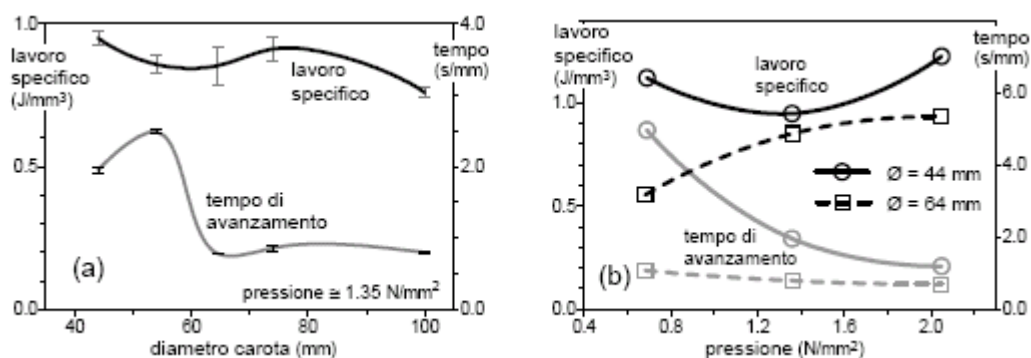


Figura 2. Risultati delle prove preliminari di carotaggio al variare del diametro della corona e della pressione esercitata sull'utensile (velocità di rotazione 600 giri/min).

Per indagare la sensibilità del metodo al degrado del materiale è stata eseguita una seconda serie di prove di laboratorio aventi per oggetto due gruppi di cubetti di calcestruzzo (aggregato siliceo o argilla espansa, lato = 150 mm, $R_{cm} = 50 \text{ N/mm}^2$) danneggiati uniformemente mediante l'esposizione a cicli termici lenti fino a diverse temperature massime ($T_{max} = 200\text{-}800^\circ\text{C}$). Sugli stessi materiali è stato svolto in precedenza uno studio simile, con riferimento alla resistenza alla perforazione [9], misurata mediante un trapano a percussione opportunamente modificato (Fig. 1b). In linea di principio i due metodi presentano forti analogie, perché si fondano sulla microfratturazione che si produce quando un indentatore scalfisce una superficie. Tuttavia, mentre nella corona diamantata vi è una serie di piccoli risalti che abrasano diffusamente il materiale, nel caso della perforazione vi è un unico tagliente di maggiori dimensioni su cui agisce un percussore. In questo secondo caso si ha dunque una maggiore concentrazione degli sforzi e una più profonda propagazione delle fratture, che è più evidente nei materiali

più duri e fragili [10]. Per questo motivo la resistenza alla perforazione può risultare inferiore in calcestruzzi di buona qualità integri, rispetto al caso in cui questi, avendo già subito un lieve danneggiamento, esibiscono una maggiore deformabilità e quindi un'attenuazione dei fenomeni di frattura [9].

Queste considerazioni sono confermate dai risultati sperimentali, soprattutto se si guarda all'energia spesa nelle due tecniche di perforazione, che tende a rimanere costante o addirittura a crescere in presenza di un danno termico di modesta entità (Fig. 3). Il tempo necessario per l'avanzamento della corona diamantata è invece un parametro che dimostra fin da subito una buona sensibilità al degrado del materiale, del tutto confrontabile con altre proprietà particolarmente indicate per questo tipo di identificazione, come la velocità degli ultrasuoni [11] e la resistenza all'estrazione di inserti (capo test) [8]. È però evidente il vantaggio offerto dalla tecnica basata sul carotaggio, che consente di eseguire una "scansione" delle condizioni del calcestruzzo a profondità crescenti.

Per verificare questa potenzialità, gli stessi due calcestruzzi sono stati utilizzati per preparare dei pannelli di piccole dimensioni (275x550x80 mm), che sono stati sottoposti ad un forte gradiente termico ($>5^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) esponendo una delle facce alla temperatura di 750°C , mentre quella opposta è stata mantenuta a temperatura ambiente (Fig. 4a). A partire dal profilo delle temperature massime raggiunte, misurato mediante 3 termocoppie inserite nel getto, e conoscendo il decadimento delle resistenza cubica a compressione ad una generica temperatura (si veda la Fig. 3), è stato anche ricavato il profilo della resistenza residua del materiale ($R_{\text{cm}}^T/R_{\text{cm}}^{20}$), con l'obiettivo di delineare il comportamento meccanico atteso alle diverse profondità.

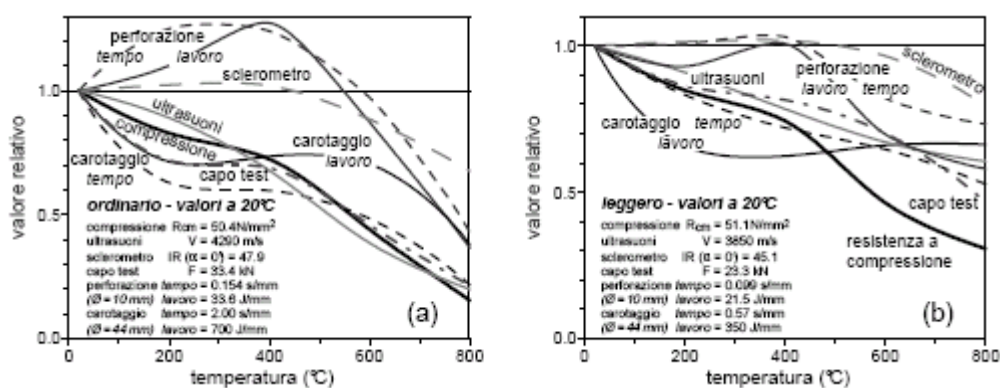


Figura 3. Sensibilità ad un danno termico uniforme di diverse tecniche di indagine applicate ad un calcestruzzo ordinario con aggregato siliceo e ad un calcestruzzo leggero con aggregato di argilla espansa.

Con un procedimento analogo sono stati ricavati i profili attesi per i parametri misurati nelle prove di perforazione e carotaggio (Fig. 4b-d, per brevità si omettono i risultati relativi al calcestruzzo leggero). I valori misurati alle diverse profondità sono in buon accordo con quelli previsti, se si fa eccezione per i primi 10 mm, dove si risente del non completo affondamento dell'utensile (~ 5 e 3 mm per la carotatrice e il trapano rispettivamente) e dove la reidratazione superficiale del calcestruzzo può aver ridotto ulteriormente la risposta del materiale. Rispetto alla perforazione, il carotaggio mostra una migliore ripetibilità dei risultati, perché meno influenzato dall'effetto locale degli aggregati. Inoltre, come già evidenziato nelle prove su cubetti, questo metodo è più sensibile e già sul lato freddo del pannello ($T_{\text{max}} = 230^{\circ}\text{C}$) si registra una sensibile caduta della risposta rispetto al calcestruzzo integro (più del 30%).

Nella maggior parte delle applicazioni sul campo le prove di resistenza alla perforazione nelle fasi conclusive giungono ad indagare il materiale non degradato, consentendo di ricavare un valore di riferimento della risposta meccanica al quale rapportare l'intero profilo. In tal modo è possibile analizzare i risultati in termini relativi, svincolandosi da una preventiva calibrazione del metodo. Questa diventa invece indispensabile nel caso si voglia risalire ad altre proprietà di maggiore interesse ingegneristico, come la resistenza a compressione, data l'influenza della durezza dell'aggregato e di una serie di parametri operativi (diametro e tipo di corona, pressione, velocità).

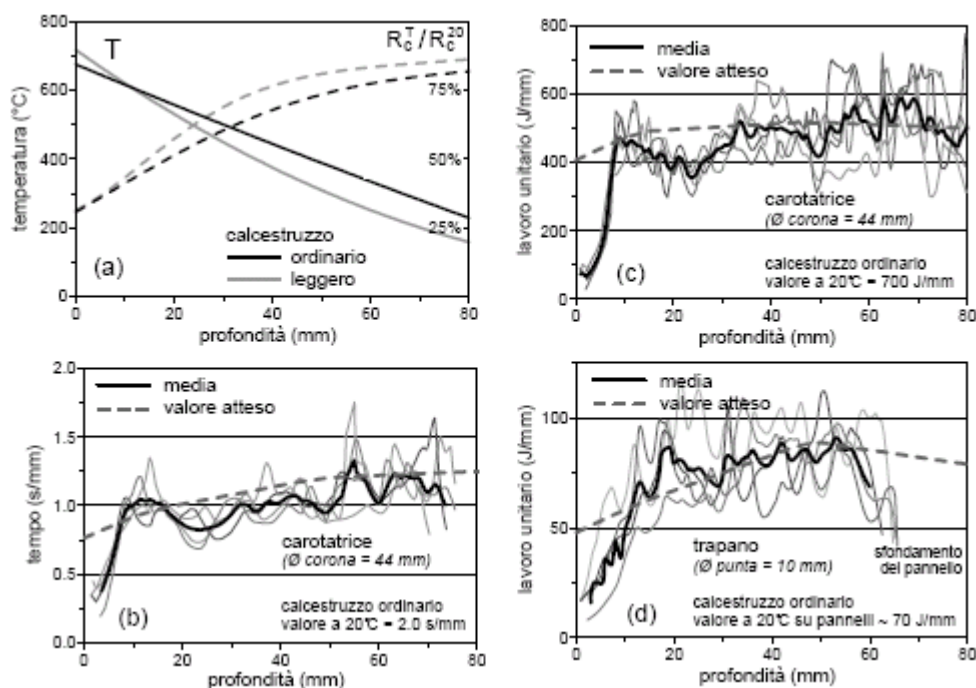


Figura 4. Profili termici nei pannelli esposti a gradiente termico ed andamento dei parametri misurati nelle prove di carotaggio e di perforazione.

3. MISURE COLORIMETRICHE

In alcuni casi il degrado del calcestruzzo per effetto degli agenti ambientali esterni comporta una lieve alterazione cromatica degli strati più superficiali, che spesso può essere rilevata con un semplice esame visivo, pur con tutte le limitazioni di una stima qualitativa. Un esempio è rappresentato dall'effetto dell'alta temperatura, che introduce inizialmente delle sfumature rosa-rosso (300- 600°C), quindi grigio biancastro (600-900°C) e infine giallo-marrone (900-1000°C). La colorazione rosa-rosso deriva dalla possibile presenza di composti del ferro negli aggregati, che possono deidratarsi od ossidarsi nell'intervallo di temperature indicato. L'intensità di questa variazione di colore dipende dal tipo di aggregato ed è maggiormente pronunciata per gli aggregati silicei e meno per aggregati calcarei ed ignei. L'identificazione di questo primo cambiamento di colore è di particolare importanza pratica, perché la sua comparsa coincide generalmente con l'inizio di significative perdite di resistenza del calcestruzzo.

Un metodo accurato ma oneroso consiste nell'esame di campioni di calcestruzzo (tipicamente dei dischi ricavati da una carota) con un colorimetro [4] o uno spettrofotometro. Quest'ultimo strumento consente di suddividere lo spettro visibile in un elevato numero di bande (in genere fino a 40) e di quantificare la percentuale di luce riflessa dalla superficie del materiale in ogni intervallo.

Con riferimento al calcestruzzo ordinario con aggregato siliceo citato in precedenza, si può notare inizialmente un fattore di riflessione relativamente costante (colore grigio) con una lieve dominante rossa (curva 20°C di Fig. 5). L'esposizione all'alta temperatura produce effetti trascurabili fino a 400°C, mentre a temperature più elevate vi è una riduzione uniforme in tutto lo spettro, che corrisponde ad una tonalità più scura e, in termini relativi, ad una ancora più forte dominante rossa.

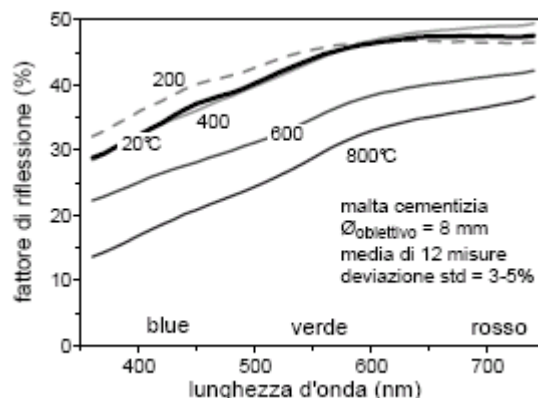


Figura 5. Fattore di riflessione nello spettro visibile di un calcestruzzo siliceo esposto ad un danno termico uniforme (l'aggregato è stato trascurato).

Senza ricorrere a strumenti così sofisticati, si è dimostrato che questa alterazione cromatica può essere misurata con sufficiente accuratezza anche utilizzando le immagini ricavate con una comune fotocamera digitale [12]. In questo caso la luce che giunge al sensore viene filtrata e suddivisa in tre sole bande cromatiche (i canali rosso verde e blue - RGB). Inoltre, non essendo più possibile controllare l'intensità e l'angolo di incidenza della sorgente luminosa in ogni parte dell'inquadratura, il rapporto tra luce riflessa e incidente non può essere ricavato. Un esempio significativo è rappresentato dalla vista laterale di una carota, che per effetto della forma cilindrica appare più scura lungo un margine (Fig. 6a).

Un semplice metodo per evidenziare la citata alterazione cromatica consiste nell'eliminare l'influenza dell'intensità luminosa, normalizzando le misure dei tre canali (ad esempio $r = R / (R+G+B)$), e nel calcolare in ogni punto (pixel) la differenza $r - b$ tra i valori del rosso e del blue (Fig. 6b). Questo procedimento ha il vantaggio di riassumere in un solo parametro scalare una misura che, in termini più rigorosi, andrebbe rappresentata nello spazio colorimetrico tridimensionale.

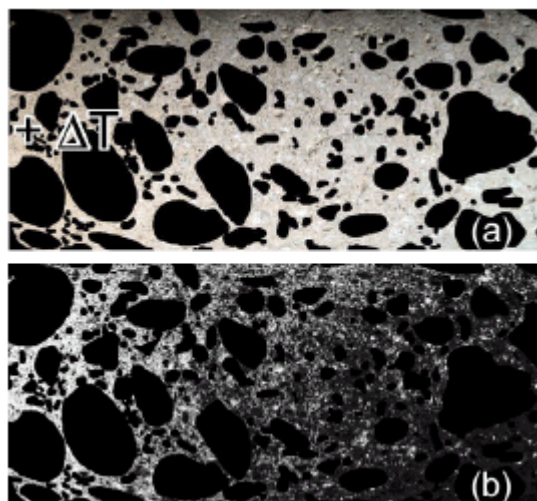


Figura 6. Vista laterale di una carota esposta a un gradiente termico (con aggregati mascherati) e immagine ottenuta dalla differenza dei canali rosso e blue normalizzati ($R-B / (R+G+B)$, con successiva equalizzazione della scala dei grigi).

Un altro punto di forza è il considerevole numero di informazioni disponibili in una singola immagine digitale (molte migliaia di pixel), che permette di analizzare separatamente la pasta di cemento e gli aggregati e di tenere conto della variabilità statistica delle misure dovuta alla eterogeneità del materiale. Partendo da queste indagini sull'incertezza delle misure [12], svolte nello spazio colorimetrico x-y definito dalla Commission Internationale de l'Éclairage (CIE 1931), si è visto che il miglior compromesso tra sensibilità e minimizzazione della dispersione è rappresentato dalla differenza delle due coordinate di cromaticità x - y (Fig. 7), del tutto equivalente al valore $r - b$.

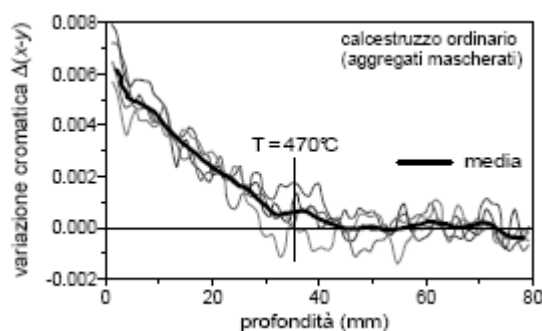


Figura 7. Profili dell'alterazione cromatica definita nel sistema x-y CIE 1931 ottenuti da 4 carote estratte da un pannello di calcestruzzo siliceo esposto ad un gradiente termico (cfr. Fig. 4).

Dal punto di vista operativo, la maggiore limitazione è rappresentata dalla necessità di estrarre una carota, anche se di piccolo diametro. In alcuni casi applicativi si è riscontrato che la stessa dilatazione termica del copriferro può produrre dei distacchi superficiali che mettono a nudo l'alterazione cromatica del materiale (Fig. 8a). In alternativa, anche la polvere di perforazione, raccolta ordinatamente con uno speciale dispositivo, consente di ricavare un profilo dell'alterazione cromatica (Fig. 8d-f), anche se con la maggiore incertezza dovuta alla mancata separazione dell'aggregato.

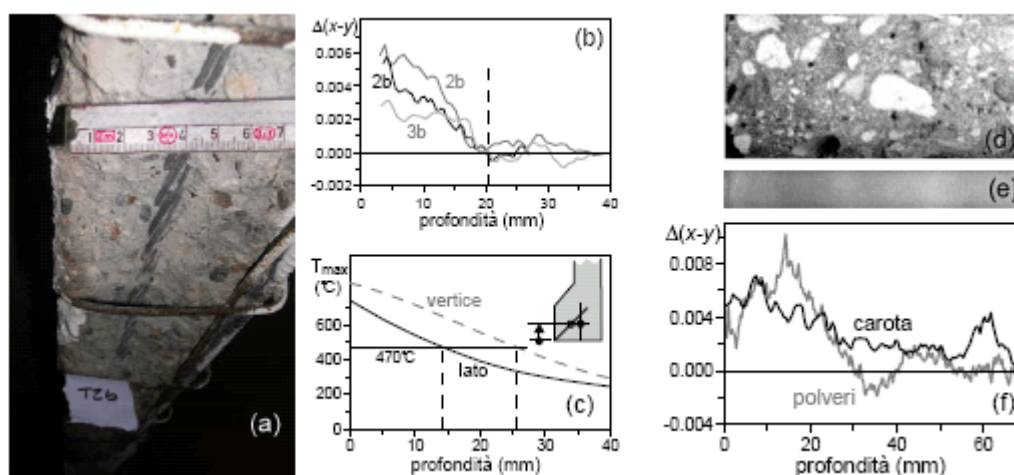


Figura 8. Esempi applicativi di misure colorimetriche: (a) distacco del copriferro della nervatura di un tegolo prefabbricato ad opera delle dilatazioni termiche e confronto tra i profili dell'alterazione cromatica (b) ed i gradienti termici stimati a partire dalla modellazione dello scenario d'incendio (c); confronto tra le analisi di una carota (d) e di un campione ordinato di polvere di perforazione (e).

Di questo approccio, che mira alla combinazione delle due tecniche della resistenza alla perforazione e dell'analisi colorimetrica, è allo studio un'ulteriore variante basata sull'ispezione del foro mediante un endoscopio munito di telecamera. Con opportune tecniche di fotoraddrizzamento è possibile sviluppare nel piano la superficie interna del foro, costruendo un'immagine digitale da sottoporre alle analisi già discusse.

4 . ACUSTICA DI IMPATTO NELLE PAVIMENTAZIONI

L'identificazione dei distacchi poco profondi (entro 0.1 m) che spesso caratterizzano gli strati di completamento e finitura delle costruzioni civili, può in genere essere effettuata mediante la semplice percussione della superficie con un martello o un'asta, evidenziando la diversa sonorità delle zone ammalorate. Come in tutte le tecniche di indagine basate sulla percezione dell'operatore, vi è però il problema di rendere più oggettiva e sistematica l'analisi e di facilitare la redazione di mappe del danno a supporto dei lavori di ripristino. Alcuni studi [13] hanno dimostrato il buon accordo tra lo spettro delle vibrazioni acustiche generate dall'impatto e la più onerosa misura a contatto mediante un accelerometro (Fig. 9a). Vi è quindi uno stretto legame tra il timbro sonoro percepito e la risposta dinamica dello strato delaminato. A differenza del caso di propagazione e riflessione di un impulso di onde di compressione, che di solito coinvolge frequenze ultrasoniche, la vibrazione dello

strato distaccato può essere assimilata al modo di fondamentale di una piastra, con frequenze di qualche kHz facilmente udibili e rilevabili con un comune microfono (Fig. 9b). Nel caso di uno strato di rivestimento i difetti tendono a localizzarsi ad una profondità ben definita e sarebbe quindi possibile stabilire un legame tra frequenza dominante e diametro medio della zona distaccata. Tuttavia, questa relazione dipende dalla rigidezza flessionale della strato superficiale che spesso risente di fessurazioni trasversali, con sostanziale riduzione della frequenza emessa.

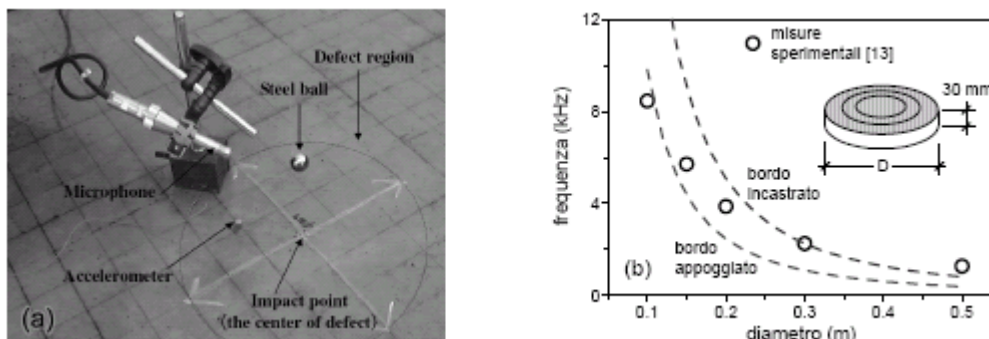


Figura 9. (a) Verifica della corrispondenza tra misure di vibrazione mediante accelerometro a contatto e microfono [13]; (b) confronto tra i risultati sperimentali e la frequenza naturale di piastre circolari.

Al fine di poter applicare le indagini basate sull'acustica di impatto su ampie superfici è stata messa a punto una specifica strumentazione, basata su un carrello che col suo moto attiva un martello dotato di punta intercambiabile in plastica (Fig. 10). Il meccanismo di azionamento fa sì che le battute si ripetano ad interasse costante di 0.075 m, consentendo di risalire alla posizione del carrello dal semplice conteggio dei colpi. Il campo ottimale di funzionamento è tra 1 e 6 battute al secondo, per evitare fenomeni di interferenza tra il braccio del martello e la ruota a camme.

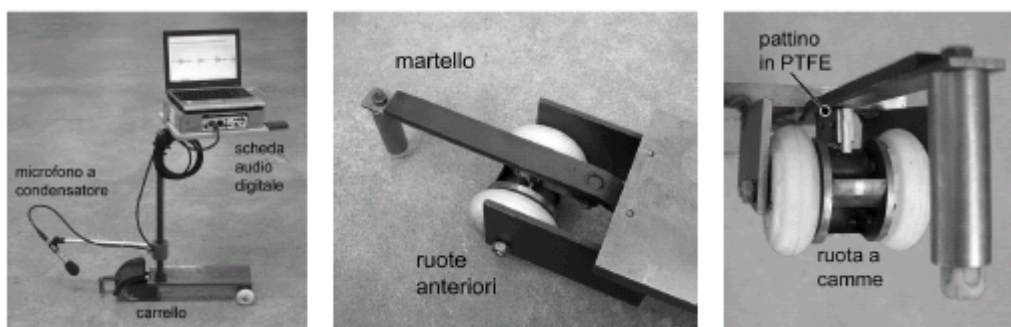


Figura 10. Strumentazione per la battitura delle pavimentazioni e dettagli del meccanismo di azionamento del martello attivato dalle ruote anteriori (intervallo tra le battute = 0.075 m).

Per la registrazione del suono ci si è avvalsi di un microfono a condensatore (AKG 451B) e di una scheda audio digitale (Edirol UA-25) collegata ad un computer portatile. Rispetto a quella integrata nel computer, la scheda esterna ha il vantaggio di una migliore preamplificazione e della compatibilità con questo tipo di microfono.

La strumentazione descritta è stata realizzata per indagare la pavimentazione industriale di un edificio adibito a logistica (superficie ~ 8000m²). L'area in oggetto è organizzata in 20 corsie di lunghezza 80 m a servizio di scaffalature metalliche di notevole altezza (14.5 m - Fig. 11). L'accesso alle scaffalature è garantito da speciali carrelli elevatori a guida elettromagnetica, le cui ruote insistono ripetutamente sulle stesse impronte di carico.

Questo ha portato, dopo una decina di anni di esercizio (~ 10⁵ cicli), a registrare alcuni distacchi localizzati dello strato superficiale resistente all'usura, complice la relativa deformabilità della piastra di fondazione, progettata a suo tempo per carrelli di tipo più leggero. Data l'elevata altezza a cui operano gli elevatori, è evidente il pericolo rappresentato da una perdita di planarità della pavimentazione. Per questo motivo, si è reso necessario individuare le zone danneggiate e fornire un'indicazione sul più o meno elevato rischio di distacco, in modo da poter pianificare i necessari interventi di ripristino.

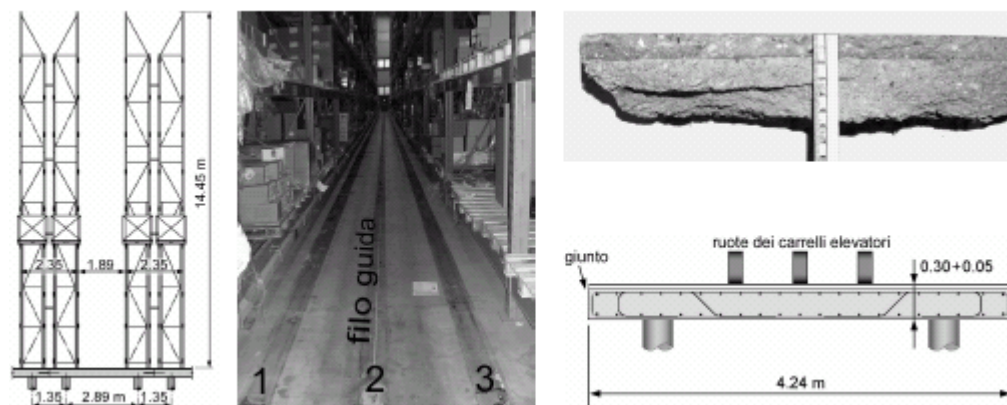


Figura 11. Caratteristiche della pavimentazione indagata: sezione tipo delle scaffalature e vista di una corsia di accesso con le impronte delle tre ruote dei carrelli elevatori e il filo guida, sezione della piastra di pavimentazione posata su pali e campione del sovrastante massetto con lo strato resistente all'usura.

Considerato che l'interesse è focalizzato sulle sole impronte caricate, si è deciso di analizzare ciascuna corsia lungo 4 allineamenti, corrispondenti alle impronte laterali e alle due metà dell'impronta centrale individuate dal filo guida dei carrelli. Con l'aggiunta dell'area di manovra si è così giunti ad indagare circa 7 km lineari di pavimentazione, ad una velocità media di 4 battute al secondo (0.3 m/s). L'intero lavoro sul campo ha richiesto circa 12 ore lavorative ed è stato così possibile inserirlo nella pausa del fine settimana, che rappresenta l'unica interruzione resa disponibile dall'attività continuativa dello stabilimento.

È seguita l'elaborazione dei file audio registrati durante la battitura della pavimentazione, secondo il procedimento di seguito descritto:

A. Riconoscimento e conteggio delle battute del martello, indicate da una rapida variazione del segnale (dell'ordine di 10 kHz), indipendentemente dalle condizioni della pavimentazione.

B. Determinazione dello spettro di frequenza, mediante la trasformata di Fourier. Lo spettro è caratterizzato da un picco ben definito a 180 Hz, dovuto alla vibrazione del braccio del martello, che si innesca alcuni millisecondi dopo la battuta (Fig. 12a,b). La parte rimanente è praticamente piatta nel caso di struttura integra, altrimenti è caratterizzata da un picco nell'intervallo 0.5-3.0 kHz a seconda dell'entità del distacco (Fig. 12c).

C. Calcolo dell'intensità media della risposta all'impatto, mediante l'integrale A2 dello spettro nell'intervallo 0.26-4.0 kHz. L'intensità della battuta è invece descritta dall'integrale A1 nell'intervallo 0.13-0.26 kHz, che presenta una buona ripetibilità (coeff. variazione @ 10%). Il rapporto tra i due valori fornisce un indice adimensionale della sonorità della struttura per ogni colpo di martello, il cui valore è attorno a 0.5 per la pavimentazione integra, ma può arrivare a 5-10 nel caso di un distacco esteso.

D. Definizione di una soglia, basata sulla media e sulla dispersione dell'indice di danno nella pavimentazione integra. I punti in cui questa soglia viene superata (circa 2400 su 85000 battute) vengono evidenziati in una mappa come probabile sede di distacchi. L'entità del difetto viene restituita mediante una scala cromatica tarata sull'intervallo di variazione dell'indicatore di danno (Fig. 13).

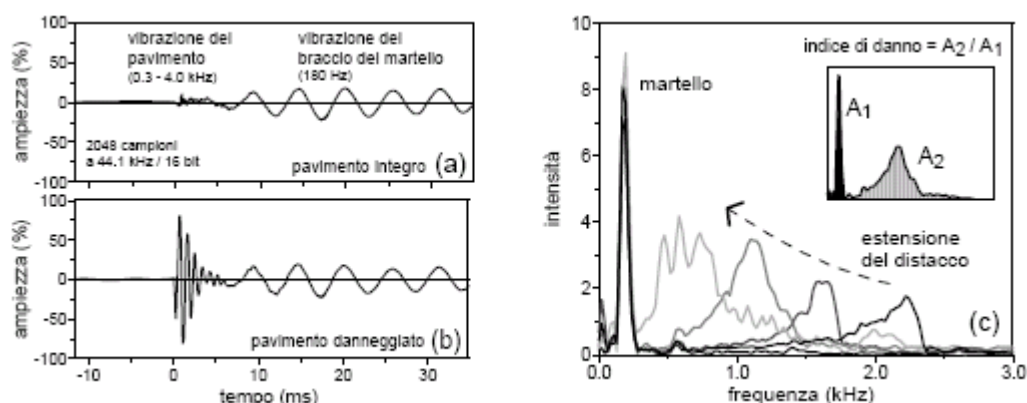


Figura 12. Confronto tra la risposta del pavimento integro (a) e di un punto distaccato (b); spettro di frequenza in corrispondenza di distacchi di dimensione crescente (c) e definizione dell'indice di danno.

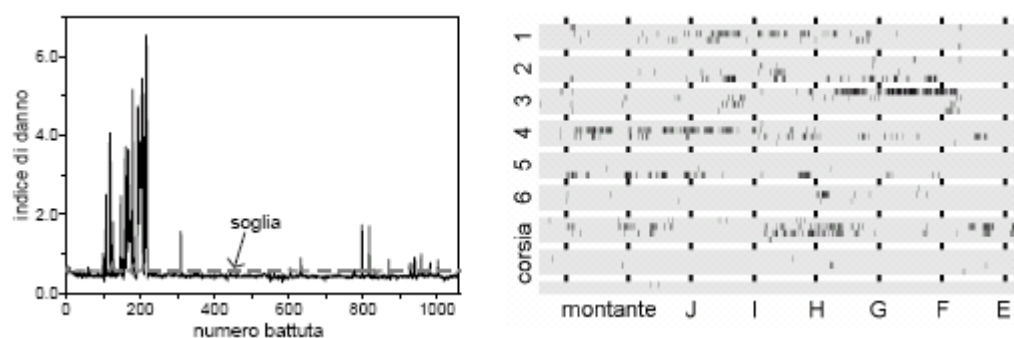


Figura 13. Individuazione delle zone distaccate di una corsia dal confronto tra l'indice di danno e una soglia minima; estratto della mappa del danno della pavimentazione (4 scansioni per ciascuna corsia).

Questo procedimento è risultato più affidabile di un'analisi basata sulla sola frequenza di picco dello spettro, dal momento che nelle zone più danneggiate questo non è ben individuabile e la sua interpretazione in termini di diametro della zona distaccata fornisce risultati poco realistici.

5. CONCLUSIONI

La presente nota riassume alcuni recenti sviluppi delle ricerche svolte dall'autore nel campo dell'identificazione del degrado delle strutture in calcestruzzo armato. Le tecniche proposte si basano su strumentazioni relativamente semplici, messe a punto modificando le attrezzature già disponibili in laboratorio (carotatrice, trapano) o basate su un uso opportuno di apparecchiature largamente diffuse (macchine fotografiche e dispositivi audio digitali). Un'altra caratteristica di sicuro interesse per le applicazioni sul campo è quella della immediata disponibilità dei risultati, che facilita la pianificazione di eventuali ulteriori approfondimenti sulle condizioni dell'opera. Vi è infine il vantaggio derivante dalla possibile combinazione di più tecniche, come il controllo del processo di estrazione di un campione e la successiva analisi dello stesso a piè d'opera o in laboratorio.

Entrando nel merito delle singole tecniche, le prime esperienze sul loro utilizzo, focalizzate in particolare sul danno termico da incendio e sui distacchi nelle pavimentazioni, hanno permesso di tracciare le seguenti considerazioni conclusive.

Il rilievo in continuo dei parametri di perforazione e carotaggio consente di ricostruire un profilo della risposta del materiale nel caso di una forte variazione delle proprietà meccaniche con la profondità dalla superficie. L'energia specifica dissipata dipende meno dalla scelta dell'utensile o dalla spinta esercitata, ma non è molto sensibile in presenza di un degrado di lieve entità. Il contrario si può dire per la velocità di avanzamento della carotatrice, che è meno facilmente riconducibile alle proprietà meccaniche del materiale ma diventa un buon indicatore se rapportata al valore di riferimento del calcestruzzo integro a fine foro.

La valutazione delle alterazioni cromatiche del calcestruzzo a partire dall'analisi delle immagini digitali dei campioni è una tecnica particolarmente semplice, che consente di far fronte all'eterogeneità del materiale sfruttando l'elevato numero di misure ottenute in una sola ripresa. Anche in questo caso l'interesse non è rivolto ad una determinazione accurata della colore in termini assoluti, quanto ad un confronto col materiale integro, che spesso è presente nella stessa inquadratura. L'analisi dei dati può essere basata sull'impiego di comuni programmi per l'elaborazione di immagini o, in maniera più rigorosa, utilizzando le routine disponibili in numerosi linguaggi di programmazione. Per limitare l'impatto dovuto all'estrazione dei campioni, è allo studio la possibile combinazione con le tecniche di perforazione, mediante l'analisi delle polveri prodotte o l'esame delle pareti del foro con un endoscopio.

La verifica della risposta acustica delle pavimentazioni sottoposte a battitura è una tecnica diagnostica consolidata, che può essere resa più rigorosa ed efficiente con dispositivi relativamente semplici e di basso costo. Il metodo proposto è stato messo a punto per dare risposta ad una specifica applicazione ed ha permesso di redigere la mappa dei distacchi che interessano una vasta pavimentazione industriale in tempi difficilmente uguagliabili con altre tecniche. È allo studio la possibilità di estendere questo approccio alle pareti verticali, puntando soprattutto sul coordinamento tra la misura della risposta acustica della superficie e la determinazione delle coordinate geometriche del punto rilevato.

6. BIBLIOGRAFIA

[01] **J.H. BUNGEY**, "The Testing of Concrete in Structures", Blackey Academic and Professional, Glasgow, 1996.

[02] **M. KRAUSE, M. BÄRMANN, R. FRIELINGHAUS, F. KRETZSCHMAR, O. KROGGEL, K.J. LANGENBERG, C. MAIERHOFER, W. MÜLLER, J. NEISECKE, M. SCHICKERT, V. SCHMITZ, H. WIGGENHAUSER, F. WOLLBOLD**, "Comparison of pulse-echo methods for testing concrete", NDT&E Int., V.30, n.4, 1997, p.195-204.

[03] **F. WERITZ, G. WEDLER, A. BRINK, M. RÖLLIG, C. MAIERHOFER, H. WIGGENHAUSER**, "Investigation of concrete structures with Pulse Phase Thermography", Proc. Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engrg. (NDT-CE), Berlin (2003), 9p.

[04] **LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**, "Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie", Report ME 62, 2005, 114 p.

[05] **U. DILEK, M.L. LEMING**, "Comparison of pulse velocity and impact-echo findings to properties of thin disks from a fire damaged slab", J. of Performance of Constructed Facilities, ASCE, February 2007, p.13-21.

[06] **J.R. DOS SANTOS, F.A. BRANCO, J. DE BRITO**, "Assessment of concrete structures subjected to fire - the FBTest", Mag. of Concrete Res., V.54, N.3, 2002, p.203-208.

[07] **A. BENEDETTI, E. MANGONI**, "Damage Assessment in Actual Fire Situations by Means of Non-Destructive Techniques and Concrete Tests", Proc. Int. Workshop "Fire Design of Concrete Structures: what Now? What Next?", Milan, Italy, 2005, p. 231-239.

[08] **FIB: Bollettino di informazione n. 46**, "Fire design of concrete structures - Structural behaviour and assessment", 2008, 209p.

[09] **R. FELICETTI**, "The Drilling Resistance Test for the Assessment of Fire Damaged Concrete", Journal of Cement and Concrete Composites, V. 28, 2006, p.321-329.

[10] **B. CHIAIA**, "Fracture mechanisms induced in a brittle material by a hard cutting indenter", International Journal of Solids and Structures, V.38, 2001, p. 7747-7768.

[11] **M. COLOMBO, R. FELICETTI**, "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", Fire Safety Journal, V.42, 2007, pp. 461-472.

[12] R. FELICETTI, "Digital-Camera Colorimetry for the Assessment of Fire-Damaged Concrete", Proc. Int. Workshop "Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?", Milan, Italy, 2005, p.211-220.

[13] M. ASANO, T. KAMADA, M. KUNIEDA, K. ROKUGO, "Impact acoustics methods for defect evaluation in concrete", Proc. Int. Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin 2003, 8p.

[14] R. FELICETTI, "Assessment of an industrial pavement via the impact acoustics method", Proc. RILEM Conf. "on Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures" (SACoMaTiS), Varenna, 2008, p.127-136.

Contatto con l'autore:

Roberto Felicetti: roberto.felicetti@polimi.it