

Strumenti per l'analisi del degrado nelle strutture in cls armato

La valutazione delle condizioni del copri ferro riveste una notevole importanza nell'analisi del degrado degli elementi strutturali in calcestruzzo armato. Nuove metodologie operative, basate su strumentazioni semplici e accessibili, offrono un valido supporto in questo tipo di indagini

Roberto Felicetti

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 copri ferro ad opera di condizioni ambientali particolarmente severe (gelo-disgelo, incendio) o di trasformazioni chimico-fisiche all'interno del materiale (carbonatazione, reazione alcali-silice, penetrazione di ioni). Questi fenomeni di norma producono un gradiente più o meno marcato delle proprietà fisico-meccaniche 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].

In alternativa, esistono metodi avanzati che consentono un esame più puntuale delle condizioni locali dello strato più superficiale (rifrazione di onde elastiche, propagazione delle onde superficiali, proprietà elettriche, ecc). Un inquadramento di questa materia 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.

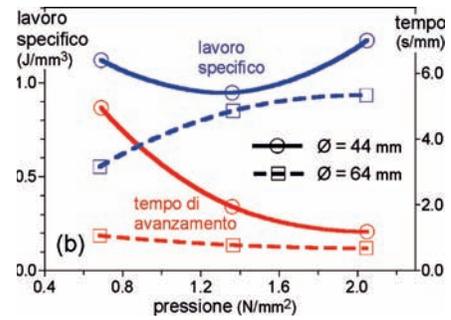
Anche in quest'ottica di maggiore concretezza e di attenzione ai vincoli economici e operativi che spesso condizionano le applicazioni in situ, vi sono tuttavia dei notevoli margini di affinamento, nel senso di rendere meno invasivi i prelievi, più sistematiche e oggettive le analisi, più immediata la disponibilità dei risultati. In alcuni casi questa possibilità è offerta da dispositivi largamente diffusi o facilmente accessibili (calcolatori portatili, fotocamere digitali, schede multifunzione per l'acquisizione di segnali), che permettono di tradurre in forma numerica la percezione soggettiva che si ricava dall'esame visivo della struttura. In altre situazioni è la stessa

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).

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 uso comune, 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, nate principalmente con lo scopo di valutare il danno da incendio e la profondità di carbonatazione, 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

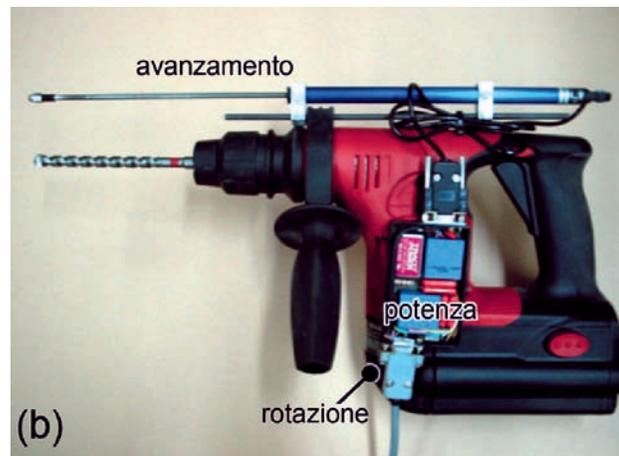
Il prelievo di campioni cilindrici di calcestruzzo, da sottoporre a prove meccaniche o ad analisi di laboratorio, è sicuramente una delle metodologie più diffuse per l'indagine su strutture esistenti.



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 [2] e, operando su dischi ricavati dalla carota, la misura del modulo elastico dinamico [2, 3], le prove di trazione indiretta [4] e le prove di compressione su un'impronta ridotta di carico [5]. Vi è poi una serie di analisi fisico-chimiche 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, gravimetria e differenziale [6]). 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



Figura 1. (a) Carotatrice con i sensori per la misura dei parametri operativi; (b) trapano modificato per la misura della resistenza alla perforazione.



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 [2]. 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 (secondi per mm di profondità). 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, $R_{cm}=50 \text{ N/mm}^2$).

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). Di fatto, un incremento della pressione impressa o del diametro della corona (e quindi della sua velocità periferica) 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 omissi). 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 la cui velocità di avanzamento è influenzata sensibilmente dalla pressione esercitata.

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 (ag-

gregato 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 ($T_{max}=200-800^\circ\text{C}$). Gli stessi campioni sono stati oggetto di uno studio simile, con riferimento alla resistenza alla perforazione [7], misurata mediante un trapano a percussione opportunamente modificato (Fig. 1b). In linea di principio i due metodi presentano forti analogie, perché si fondano sulla micro-fratturazione che si produce quando un indentatore scalfisce la superficie di un materiale relativamente fragile. Tuttavia, mentre nella corona diamantata vi è una serie di piccoli risalti che producono una abrasione diffusa, nel caso della perforazione vi è un unico tagliante di maggiori dimensioni su cui agisce un percussore. In questo secondo caso si ha dunque una maggiore concentrazione degli sforzi e una più profonda

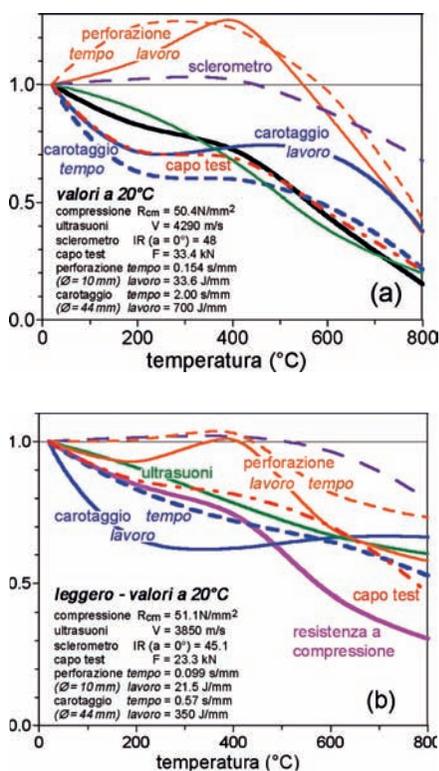


Figura 3. Sensibilità ad un danno termico uniforme di diverse tecniche di indagine applicate ad un calcestruzzo ordinario con aggregato siliceo e ad un calcestruzzo leggero con aggregato di argilla espansa.

propagazione delle fratture, che è più evidente nei materiali più duri e fragili [8]. 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 una attenuazione dei fenomeni di frattura [7].

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 [9] e la resistenza all'estrazione di inserti (capo test) [6]. 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. 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'effe-

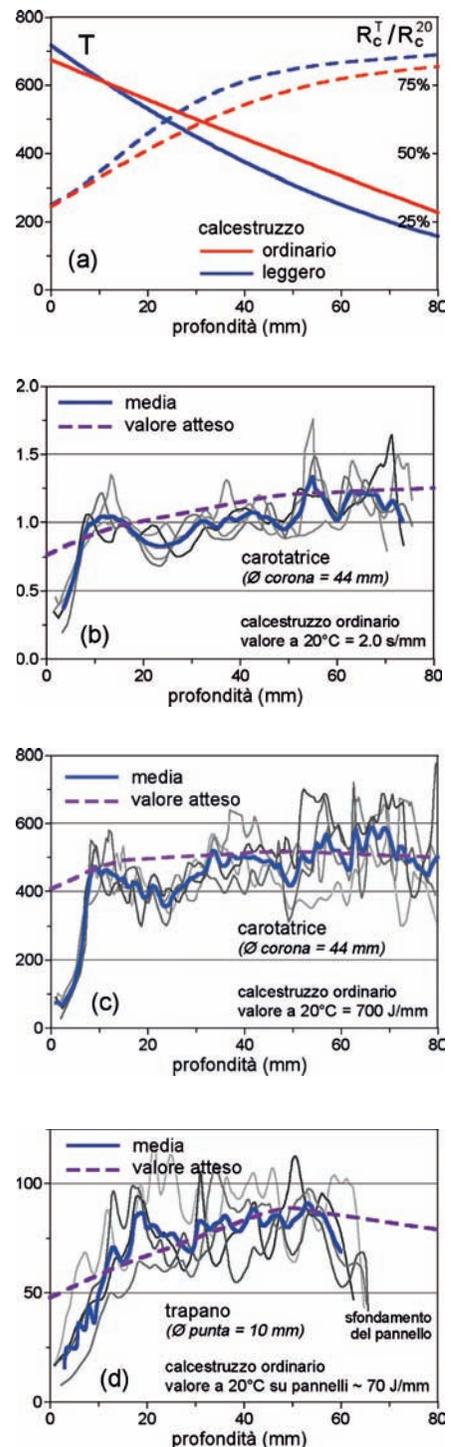


Figura 4. Profili termici nei pannelli esposti a gradiente termico ed andamento dei parametri misurati nelle prove di carotaggio e di perforazione.

to 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 al-

la 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).

3. ANALISI DELLE POLVERI DA PERFORAZIONE

A dispetto della notevole praticità di impiego sul campo, una delle maggiori limitazioni del metodo di indagine basato sulla resistenza alla perforazione è il fatto di non fornire un campione indisturbato di materiale da sottoporre a successivi approfondimenti mediante analisi di laboratorio. Occorre però osservare che spesso le indagini sulle proprietà chimico-fisiche del cal-

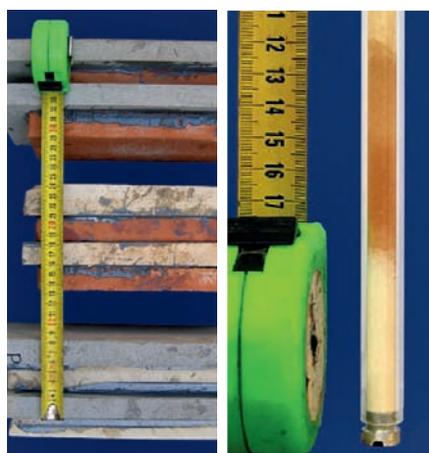
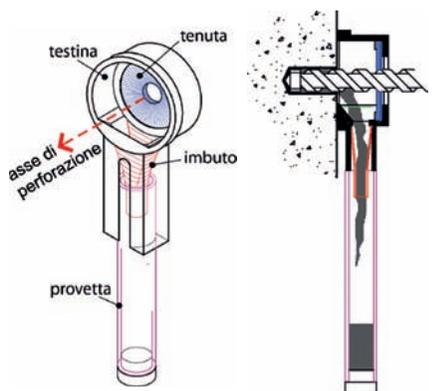
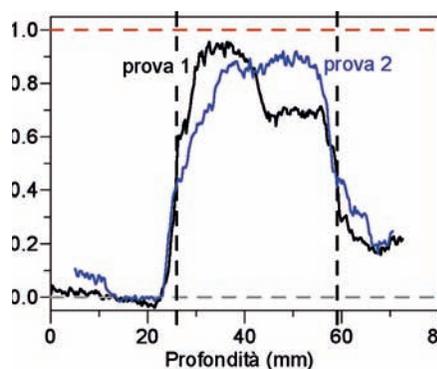


Figura 6. Provini stratificati per la verifica dell'efficacia del dispositivo di raccolta delle polveri; campione estratto dal provino centrale di calcarenite e laterizio e diagrammi della variazioni cromatiche lungo l'asse della provetta (l'ascissa è stata scalata sulla profondità effettiva del foro).



cestruzzo richiedono una preventiva macinazione del materiale (diffrazione raggi X, contenuto di ioni cloro, analisi termo-differenziale e termo-gravimetrica, ecc). In altri casi, le analisi che vengono normalmente svolte su campioni integri possono essere condotte anche sulla polvere, con risultati del tutto equivalenti (profondità di carbonatazione, misure colorimetriche, ecc). Diventa quindi possibile integrare le misure di resistenza alla perforazione con la successiva analisi della polvere prodotta. Nello studio dei fenomeni di degrado superficiale, un aspetto fondamentale è il mantenimento dell'ordine di estrazione, che consente di risalire alla profondità del materiale originario e di ricostruire l'eventuale gradiente della proprietà indagata. A tal fine, è stato ideato un semplice strumento che permette di raccogliere le polveri con continuità all'interno di una provetta. Il dispositivo (Fig. 5) sfrutta la caduta della polvere estratta dal canale elicoidale della punta ed è composto da una testina di intercettazione di forma anulare dotata di un elemento di tenuta, al di sotto della quale un condotto ad imbuto convoglia la polvere lungo l'asse della provetta di raccol-

Figura 5. Dispositivo per la raccolta delle polveri da perforazione.

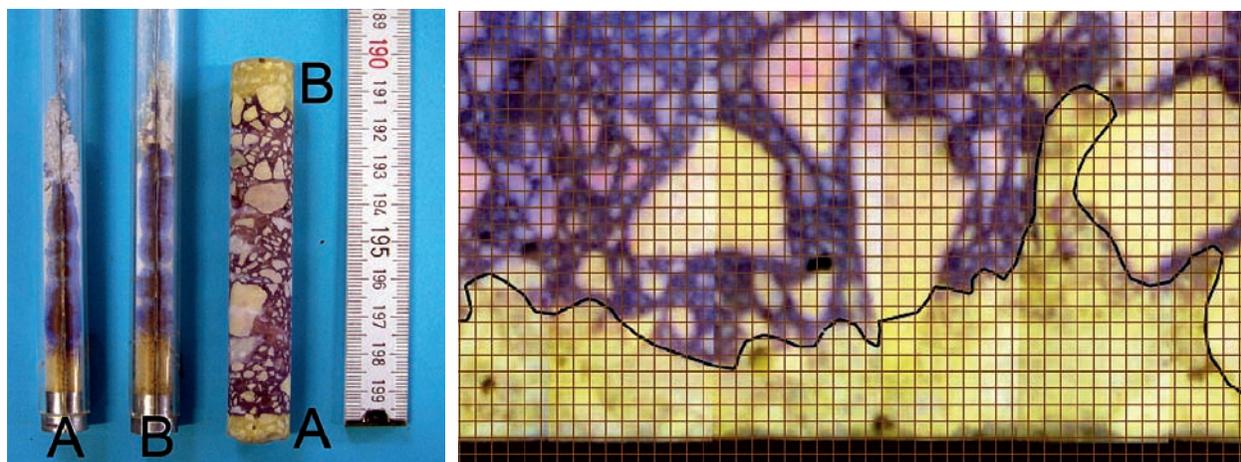
ta. Quest'ultima può essere adatta al tipo di analisi che si prevede di effettuare sul materiale. L'impiego di un contenitore trasparente consente di verificare il regolare afflusso di polvere durante la perforazione e di determinare la lunghezza del campione prelevato, che va poi rapportata all'effettiva profondità del foro. Un ulteriore vantaggio è quello di poter effettuare un primo esame visivo del campione, rilevando, per esempio, eventuali alterazioni cromatiche della polvere (si veda il successivo paragrafo 4). Sempre per consentire l'analisi del campione senza manipolazioni all'interno della provetta, un taglio sottile lungo la generatrice del contenitore, di larghezza tale da non permettere la fuoriuscita dei granelli di polvere, consente l'introduzione di reagenti liquidi per l'analisi chimica (p.es. la soluzione di fenolftaleina per la prova di carbonatazione). Alcune indagini preliminari sono state svolte per verificare l'effettivo ordinamento del materiale estratto. Sono stati costruiti dei provini stratificati, incollando con resina epossidica alcune lastre in materiale lapideo o laterizio di diverso colore (Fig. 6). I provini sono stati quindi forati operando in direzione orizzontale e i campioni di polvere, raccolti in provette trasparenti, sono stati fotografati con una fotocamera digitale. Con tecniche di elaborazione delle immagini analoghe a quelle illustrate nel successivo paragrafo 4 è possibile valutare quantitativamente la purezza del campione di polvere sulla base della sua cromaticità. Il diagramma di Fig. 6 mostra un esempio di tale rappresentazione per un provino di laterizio e calcarenite. Per facilitare la lettura le misure colorimetriche sono state normalizzate

nell'intervallo tra 0 (calcarenite) e 1 (laterizio). Si nota che fino a circa 40 mm di profondità le polveri mantengono una buona purezza, con una variazione di colore ben definita al primo cambio di materiale. Al crescere della profondità aumenta l'effetto dell'abrasione delle pareti laterali del foro, che porta ad un lieve mescolamento delle polveri dei vari strati, anche se per profondità superiori a quelle di interesse nello studio della maggior parte dei fenomeni di degrado.

Una seconda campagna di prove ha avuto lo scopo di verificare l'affidabilità delle misure di profondità di carbonatazione eseguite sui campioni di polvere. A tal fine sono stati utilizzati dei cubetti di calcestruzzo (lato = 100 mm) esposti ad un'atmosfera ricca di anidride carbonica, e quindi tale da accelerare l'evoluzione del fenomeno. Dai cubetti sono state estratte delle micro-carote ($\varnothing = 17 \text{ mm}$) sulle quali è stata misurata la profondità di carbonatazione mediante un indicatore per la determinazione del pH. La zona carbonatata è evidenziata dalle zone gialle alle estremità dei campioni (Fig. 7).

La misura è stata quindi ripetuta forando i cubetti con un trapano a percussione e raccogliendo la polvere in provette trasparenti dotate di taglio laterale, in modo da consentire il trattamento con lo stesso rivelatore di pH utilizzato per la tecnica tradizionale. Nei campioni di Fig. 7 si osserva che la polvere trattata mostra la medesima alterazione cromatica delle micro-carote, anche se lo spessore interessato è amplificato del rapporto tra la lunghezza del campione di polvere e la profondità del foro (pari circa a 2:1 in queste prove). Il confronto tra i due tipi di analisi porta a dei

Figura 7. Campioni di polvere e micro-carota estratti dallo stesso cubetto di calcestruzzo e trattati con un rivelatore di pH; variazione della profondità di carbonatazione lungo il perimetro di una micro-carota (intervallo della griglia = 1 mm).



valori medi di 7 e 10 mm determinati sui due estremi della carota, contro le corrispondenti profondità di 6 e 8 mm stimate mediante i campioni di polvere. Differenze di questo ordine di grandezza sono trascurabili se rapportate alla dispersione dei risultati tipica delle osservazioni in situ. Nel caso della microcarota il confronto è reso più difficile dal fatto che a causa degli aggregati lo spessore carbonatato può presentare un profilo irregolare, con variazioni anche notevoli (da 5 a 20 mm lungo l'intero perimetro nell'esempio di Fig. 7). Viceversa, si può assumere che il campione di polvere fornisca già un valore medio dell'alcalinità del materiale ad una data profondità, il che facilita la determinazione di un valore rappresentativo per il punto esaminato.

L'aspetto di sicuro interesse della tecnica basata sull'analisi delle polveri è la notevole rapidità di esecuzione (dell'ordine di un minuto a prova) e la facilità di applicazione sul campo, non essendo necessario l'allacciamento alla rete elettrica e il raffreddamento mediante acqua che invece è richiesto per l'estrazione delle carote. Anche il danno arrecato alla struttura viene ridotto, essendo sufficiente la perforazione di fori di piccolo diametro (in genere 10 mm). In tal modo diventa possibile aumentare il numero dei punti rilevati ed effettuare delle valutazioni sulla variabilità statistica del fenomeno di degrado.

Un esempio applicativo di questo tipo di approccio è offerto dalle indagini svolte sulle facciate esterne della chiesa di S. Giovanni Bono a Milano. Si tratta di

un edificio in calcestruzzo a vista realizzato alla fine degli anni '60 e che ha già dato evidenti segnali di corrosione delle armature, come testimoniato da alcuni ripristini locali del copriferro (Fig. 8). Dalle misure effettuate sulle falde di copertura (100 rilievi pachometrici del copriferro e 14 prelievi di campioni di polvere) è risultato che al momento dell'indagine la profondità media di carbonatazione è già superiore al valore medio del copriferro ed è caratterizzata da una elevata dispersione. Ipotizzando che le due grandezze in esame siano tra di loro indipendenti e che seguano una distribuzione normale, è possibile stimare che nelle membrature esaminate la probabilità che si realizzino le condizioni per l'insorgere della corrosione delle armature (profondità di carbonatazione \geq copriferro) è di circa il 75%. Questo risultato è coerente con i diffusi fenomeni di corrosione già attivi nella struttura esaminata. Le indagini qui discusse sono state svolte utilizzando il prototipo del dispositivo di raccolta delle polveri illustrato in Fig. 5, ma sono già in fase di realizzazione gli stampi per la sua produzione in serie.

4. 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'effe-

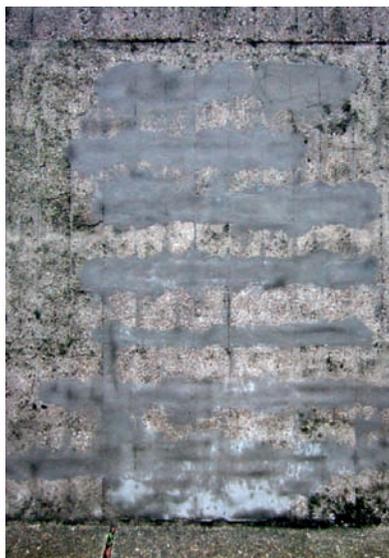


Figura 8. La chiesa di S. Giovanni Bono a Milano e le tracce dei precedenti interventi di ripristino; confronto tra la distribuzione di probabilità del copriferro e della profondità di carbonatazione.

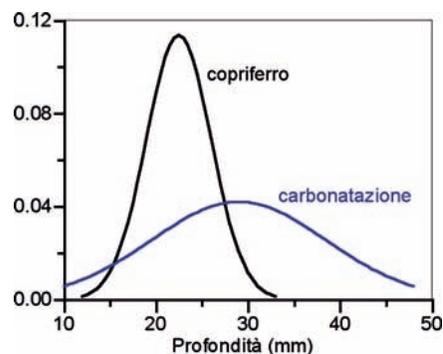


Figura 10. Vista laterale di una carota esposta a un gradiente termico (con aggregati mascherati) e immagine ottenuta dalla differenza dei canali rosso e blue normalizzati (R-B / R+G+B, con successiva equalizzazione della scala dei grigi).

to 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 [2] 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. 9). 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.

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

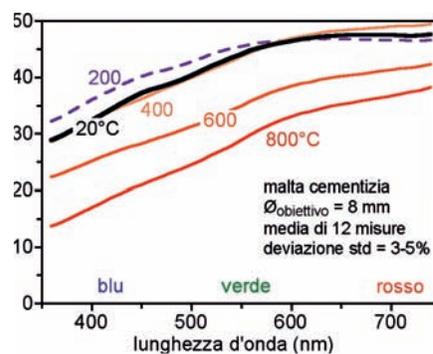
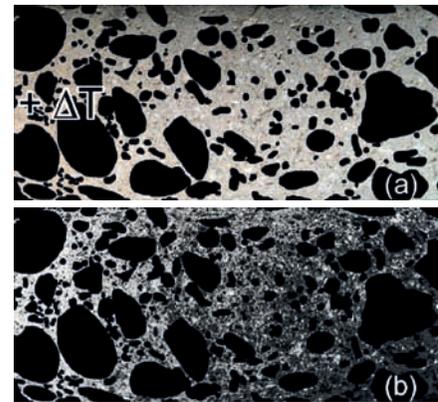


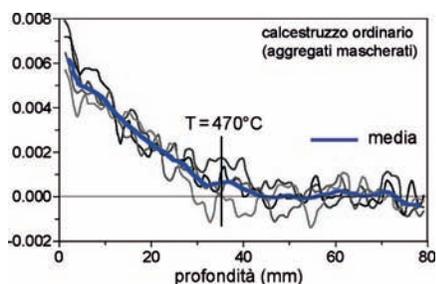
Figura 9. Fattore di riflessione nello spettro visibile di un calcestruzzo siliceo esposto ad un danno termico uniforme (l'aggregato è stato trascurato).



una comune fotocamera digitale [10]. In questo caso la luce che giunge al sensore viene filtrata e suddivisa in tre sole bande cromatiche (i canali rosso verde e blue del sistema di rappresentazione 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. 10a).

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. 10b). 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.

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 [10], 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. 11), del tutto equivalente al valo-



re della differenza $r - b$. 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 durante l'incendio può produrre dei distacchi superficiali che mettono a nudo l'alterazione cromatica del materiale (Fig. 12a). In alternativa, anche la polvere di perforazione, raccolta ordinatamente con il dispositivo descritto precedentemente, consente di ricavare un profilo dell'alterazione cromatica (Fig. 12d-f), anche se con la maggiore incertezza dovuta alla mancata separazione dell'aggregato.

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.

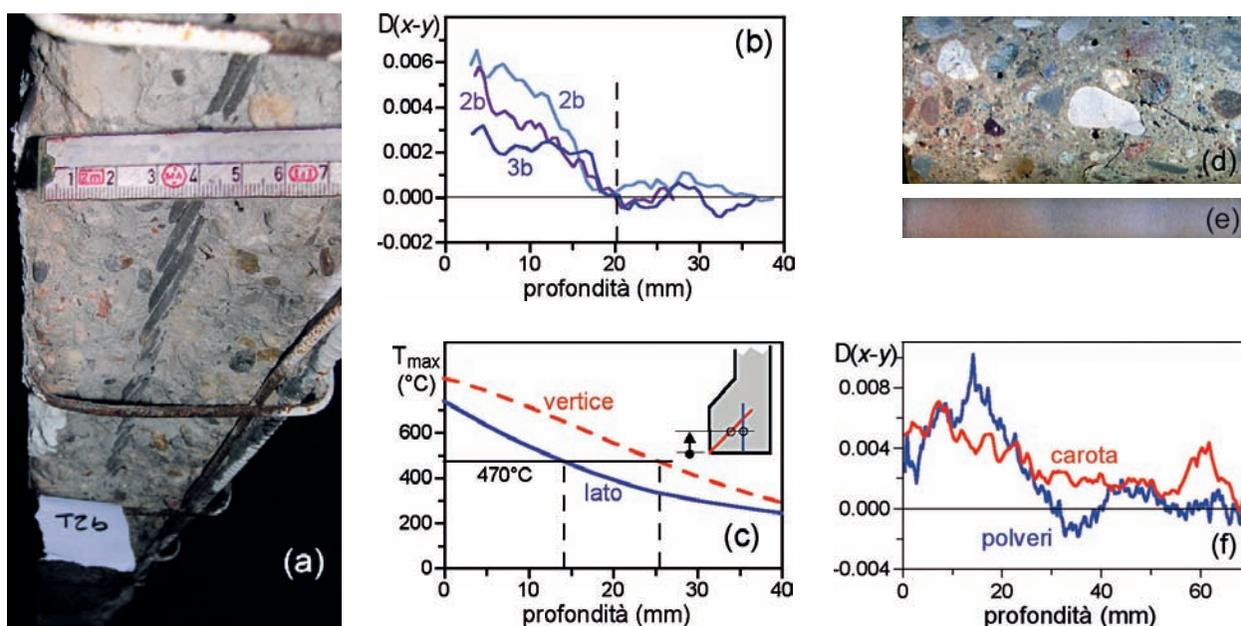
5. CONCLUSIONI

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 a percussione) o basate su un uso opportuno di apparecchiature largamente diffuse (macchine fotografiche digitali e schede multifunzione per acquisizione dati). 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 sulla carbonatazione, hanno permesso di tracciare le seguenti considerazioni conclusive. Il rilievo in continuo dei parametri di perforazione e carotaggio consente di

Figura 11. 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).

Figura 12. 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).



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.

L'analisi di un campione ordinato della polvere prodotta durante la perforazione è un metodo di particolare praticità operativa, che fornisce risultati confrontabili con la tradizionale estrazione di carote ma permette di limitare il danno arrecato alla struttura. Con una opportuna scelta del contenitore di raccolta è possibile svolgere un primo esame visivo o un'analisi colorimetrica della polvere, oltre che applicare un comune rivelatore di pH per la determinazione della profondità di carbonatazione.

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.

Relazione tratta dagli Atti del XVII Congresso C.T.E. – Collegio dei Tecnici della Industrializzazione Edilizia (Roma, 5-6-7-8 novembre 2008)

BIBLIOGRAFIA

1. J.H. BUNGEY, "The Testing of Concrete in Structures", Blackey Academic and Professional, Glasgow, 1996.
2. 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.
3. 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, Febbraio 2007, p.13-21.
4. 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.
5. 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?", Milano, Italia, 2005, p. 231-239.
6. FIB: Bollettino di informazione n. 46, "Fire design of concrete structures - Structural behaviour and assessment", 2008, 209p.
7. 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.
8. 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.
9. M. COLOMBO, R. FELICETTI, "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", Fire Safety Journal, V.42, 2007, pp. 461-472.
10. R. FELICETTI, "Digital-Camera Colorimetry for the Assessment of Fire-Damaged Concrete", Proc. Int. Workshop "Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?", Milano, Italia, 2005, p.211-220.