

DIAGNOSTICA SU STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO DANNEGGIATE DAL FUOCO: NUOVE STRUMENTAZIONI E INTERPRETAZIONE COORDINATA DEI RISULTATI

ROBERTO FELICETTI,
DICA – Politecnico di Milano

SUMMARY

The assessment of fire damage in concrete structures involves two complementary major tasks: on-site investigation and interpretation of the observed evidences. Concerning the first point, some innovative and viable inspection techniques are briefly illustrated in the paper. Their common trait is the ability to provide an immediate feedback, with no need for time-consuming laboratory analyses. As regards the interpretation of results, the main issue is to harmonize the indications provided by the available diagnostic tools, which are limited to specific ranges of temperature and to definite depths in the exposed concrete cover. The proposed approach relies on the parametric analysis of the temperature developed in the compartment, via a numerical model of the fire scenario. The resulting temperature profiles are then checked against the results of the Non-Destructive inspection techniques, in order to select the most likely thermal input undergone by the structural members.

Parole chiave: calcestruzzo, danno, diagnostica, proprietà residuali, tecniche non distruttive (NDT).

1. INTRODUZIONE

La valutazione della capacità portante residua e della durabilità di strutture in calcestruzzo armato sopravvissute ad un incendio è un problema complesso e non ancora del tutto risolto, che coinvolge diverse aree di competenza, dalla Scienza dei Materiali all'Ingegneria Strutturale, dalla diagnostica mediante tecniche non distruttive (NDT) all'Ingegneria Antincendio. Lo sviluppo di nuove strumentazioni d'indagine e l'elaborazione di procedure efficaci per l'interpretazione dei risultati sono i due aspetti fondamentali per consentire un sostanziale avanzamento in questo campo.

In linea generale, il primo passo da compiere nella valutazione del danno da incendio implica un

controllo approfondito della struttura a diversi livelli [1]: *globale* (scenario di incendio, rilievo delle deformazioni irreversibili degli elementi), *intermedio* (fessurazione, spacco superficiale, instabilità delle barre d'armatura) e *locale* (identificazione delle condizioni dei materiali in punti specifici). Una panoramica sui metodi consolidati che possono essere impiegati in tale contesto è disponibile in alcune pubblicazioni tecniche sull'analisi e il ripristino delle strutture danneggiate dal fuoco [2, 3].

Alla piccola scala di osservazione, il problema principale è rappresentato dalla forte variabilità delle condizioni che si producono alle diverse profondità dalla superficie riscaldata. Di fatto, a causa degli elevati gradienti termici che si sviluppano durante un incendio, il calcestruzzo del copriferro deve essere considerato come un materiale fortemente stratificato. Ciò vale per la risposta meccanica (resistenza a compressione e a trazione, modulo elastico, durezza, velocità e attenuazione delle onde elastiche), ma anche per una serie di proprietà fisico-chimiche che vengono notevolmente influenzate dall'esposizione all'alta temperatura e che possono diventare l'oggetto delle indagini diagnostiche (densità delle microfessurazioni, porosità, umidità, composizione chimica, colore, conducibilità elettrica, ecc.) [4, 5].

Diverse metodologie sono state proposte per affrontare il problema dell'identificazione dei gradienti delle proprietà residue in prossimità della superficie esposta [6]. La maggior parte di esse si basa su ripetute analisi di laboratorio effettuate su piccoli campioni prelevati a diverse profondità nel copriferro (ad esempio dischi sottili tagliati da una carota). Come primo tentativo per superare le limitazioni dovute all'onerosità di un simile approccio, in precedenti lavori sono state proposte all'autore alcune tecniche diagnostiche innovative (interpretazione semplificata della rifrazione di impulsi ultrasonici, controllo delle alterazioni cromatiche tramite una fotocamera digitale e misura della resistenza alla perforazione) [7]. La caratteristica che le accomuna risiede nella capacità di fornire una risposta immediata sulle condizioni del materiale, e quindi indicazioni utili per il proseguimento delle indagini sulla struttura in esame.

Nella stessa ottica, in tempi più recenti sono stati sviluppati altri metodi: la trasmissione degli impulsi generati da un trapano battente (più sensibile del metodo originale della resistenza alla perforazione e meno affetta dalla presenza degli aggregati) [8], le analisi chimico-fisiche sulla polvere estratta durante la perforazione (in un'unica operazione e senza richiedere alcuna preparazione del campione) [9] e la misurazione della durezza dinamica delle armature (per stimare la loro resistenza residua allo snervamento) [10]. Una sintetica descrizione di questi metodi è riportata nella prima parte del presente articolo.

Nonostante la vasta gamma di strumenti di indagine attualmente disponibili, va osservato che nella maggior parte dei casi le informazioni fornite da ciascuno di essi sono limitate a determinati intervalli di temperatura (o livelli di danno) e a profondità definite dalla superficie esposta. Una combinazione di tecniche diverse è quindi essenziale per compensare queste limitazioni, migliorando l'affidabilità complessiva della valutazione della capacità portante residua. Ciò richiede un confronto coordinato di diverse indicazioni sulla base dei profili di temperatura che possono realisticamente svilupparsi nella struttura. Questi ultimi sono il risultato della temperatura che si sprigiona all'interno del compartimento, e del progressivo assorbimento del calore ad opera della conduzione termica nelle membrature esposte.

In sostanza, gli elementi in calcestruzzo esposti al fuoco rispondono filtrando la sollecitazione termica indotta dall'ambiente circostante e tenendo memoria delle temperature massime raggiunte, attraverso le trasformazioni chimico-fisiche che hanno luogo nel materiale. Anche se i parametri che caratterizzano lo scenario d'incendio non sono noti con precisione (durata, temperatura massima, velocità di decadimento, ecc.), è possibile eseguire un'analisi parametrica che produca un insieme di possibili profili di temperatura all'interno degli elementi, da convalidare sulla base della loro coerenza con i risultati sperimentali. Oltre a mettere in relazione i risultati relativi a diversi intervalli di temperatura e a diverse profondità, questo procedimento porta come risultato finale la validazione di uno scenario di incendio di severità realistica, permettendo di estendere la valutazione ben al di là degli elementi ispezionati. Tale approccio viene discusso nella seconda parte dell'articolo.

2. STRUMENTI INNOVATIVI PER LA DIAGNOSTICA SUI MATERIALI

La valutazione delle condizioni residue del calcestruzzo danneggiato dall'incendio può usufruire di diversi strumenti diagnostici [1]. Si va da tecniche consolidate e relativamente semplici (scalpellatura superficiale, misura dell'indice di rimbalzo), a metodi più sofisticati (onde di superficie, rifrazione di impulsi) e approfondite analisi di laboratorio (su carote o parte di esse). Gli aspetti critici per la scelta di una metodologia di prova sono la possibilità di essere condotta in situ, la rapidità di esecuzione e l'affidabilità dei risultati, caratteristiche difficilmente armonizzabili. Partendo da tali considerazioni, sono state proposte alcune tecniche innovative per la diagnostica sul materiale a scala locale, le cui potenzialità e possibili limitazioni vengono brevemente discusse nel seguito.

2.1. TRASMISSIONE DEGLI IMPULSI PRODOTTI DA UN TRAPANO BATTENTE

La misura della resistenza incontrata nella perforazione del copriferro (tempo e lavoro spesi per un avanzamento unitario della punta) è un metodo pratico per l'indagine post-incendio [7]. La tecnica è molto veloce (circa 10 s per una prova) e non è influenzata da fessurazioni o rugosità indotte dallo spacco superficiale. Tuttavia, gli indici di danno basati su tale metodologia non risultano sufficientemente sensibili nel caso di danno limitato, in quanto viene individuato solo un decadimento della resistenza a compressione superiore al 50%. Inoltre, il metodo risente del disturbo locale causato dagli aggregati, il che rende necessario mediare gli esiti di più prove, al fine di individuare una chiara tendenza nella risposta del materiale.

Per superare tali limitazioni, è stata sviluppata una nuova versione di questa tecnica [8], traendo ispirazione dal metodo *Seismic While Drilling*, comunemente utilizzato nelle indagini geofisiche. In questo caso vengono rilevati i forti impulsi di compressione generati dal percussore del trapano, misurandone il tempo di volo fino ad un ricevitore fisso posizionato sul lato opposto a quello di perforazione (scansione della velocità degli impulsi, Fig.1). L'implementazione del metodo ha richiesto alcuni sviluppi della strumentazione, quali la applicazione di estensimetri sulla punta, la trasmissione del loro segnale attraverso contatti striscianti anulari (slip-ring di Fig.1), l'introduzione di un amplificatore con banda adeguata e di un digitalizzatore. Grazie alla frequenza relativamente bassa delle onde eccitate (circa 15 kHz, lunghezza d'onda pari 0.1-0.3 m), il metodo non è influenzato dagli aggregati e può essere applicato ad elementi fortemente danneggiati e di notevole spessore. Una serie di prove di calibrazione su cubi di calcestruzzo riscaldati uniformemente (lato = 150mm, $T = 20-800^{\circ}\text{C}$, resistenza iniziale $f_c = 52\text{N/mm}^2$ su cubi) ha mostrato una sensibilità molto buona in tutto l'intervallo d'interesse, con un andamento del tutto analogo a quello del noto metodo della velocità degli impulsi ultrasonori (UPV, Fig.2).

Il potenziale di questa tecnica è ancor più evidente nel caso più realistico di danno variabile con la profondità dalla superficie esposta. In un pannello in calcestruzzo di spessore 135 mm riscaldato su un solo lato ($T_{\text{max}} = 840-120^{\circ}\text{C}$), la misura ripetuta durante la perforazione (10-20 percussioni/mm) permette di tracciare il profilo della velocità residua degli impulsi (Fig. 3), con un'ottima ripetibilità dei risultati.

Sono in corso ulteriori studi sull'estensione di questo principio al caso di trasmissione indiretta (trapano e ricevitore disposti sullo stesso lato), che è di interesse nel caso di pareti, piastre e rivestimenti di gallerie.

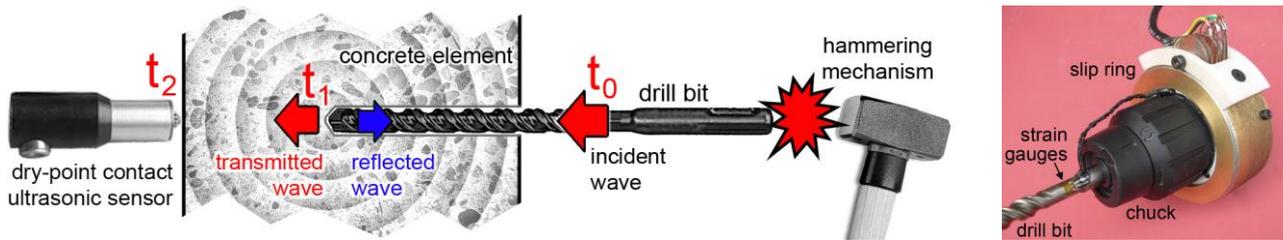


Figura 1. Principio basato sul tempo di volo degli impulsi prodotti dal percussore del trapano e sistema per la misura della deformazione nello stelo della punta.

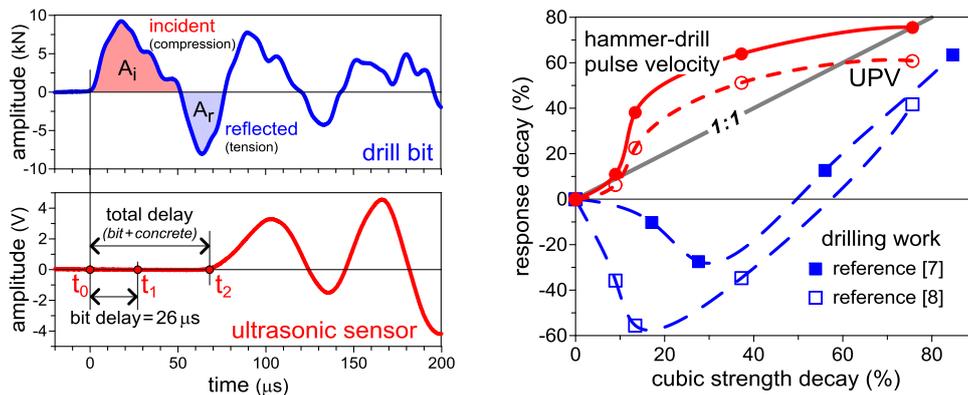


Figura 2. Tempo di volo di un impulso del trapano e confronto tra le sensibilità al danneggiamento termico della velocità degli impulsi e del lavoro di perforazione (UPV = Velocità degli Ultrasuoni convenzionale).

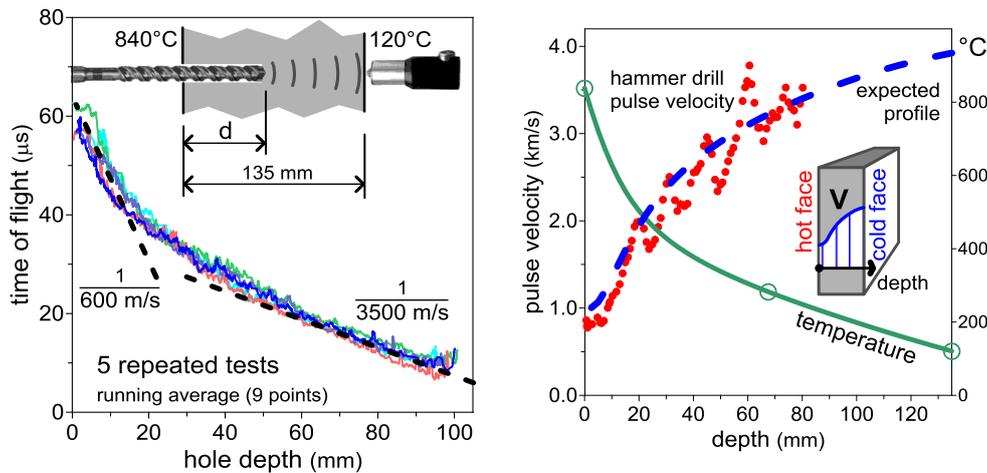


Figura 3. Tempo di volo degli impulsi attraverso un pannello in calcestruzzo soggetto a un gradiente di danno termico e profilo delle velocità degli impulsi in funzione della profondità dal lato esposto.

2.2. ANALISI DI CAMPIONI ORDINATI DI POLVERE DI PERFORAZIONE

Alcune analisi sulle proprietà chimico-fisiche del calcestruzzo, che risultano adatte per la valutazione del danno locale dovuto all'incendio, richiedono una preventiva frantumazione del materiale in una polvere fine (diffrazione ai raggi X, termo-luminescenza, Analisi Termica Differenziale DTA, Analisi Termo-Gravimetrica TGA, ecc.). Altre indagini, normalmente eseguite su campioni inte-

gri, possono essere effettuate anche sul materiale frantumato (profondità di carbonatazione, misurazione del colore, ecc.). Su tali considerazioni si basa l'idea di affiancare ai risultati della prova di perforazione l'esame della polvere prodotta.

Nel problema in esame, caratterizzato da forti variazioni delle proprietà con la profondità di perforazione, un requisito importante è quello di raccogliere la polvere preservandone l'ordine di estrazione, in modo da poter risalire alla posizione del prelievo nel copriferro. A tale scopo è stato

sviluppato uno speciale dispositivo (Carbontest[®], www.carbontest.it), che permette la raccolta ininterrotta della polvere di calcestruzzo che fluisce attraverso le scanalature elicoidali della punta da trapano [9]. Tale dispositivo si compone di una testa anulare dotata di una spazzola circolare, che permette il passaggio della punta di perforazione ma trattiene i detriti prodotti (Fig.4). La testa è dotata di un imbuto che convoglia la polvere in una provetta verticale. La provetta è realizzata con una resina trasparente, per controllare la regolarità del flusso della polvere durante la perforazione e consentire una prima ispezione visiva. Un sottile taglio longitudinale, che non permette il passaggio dei granuli raccolti, rende invece possibile infiltrare il campione con i reagenti liquidi utilizzati in alcune analisi chimiche (ad esempio la soluzione di fenoltaleina per la prova carbonatazione).

Una prima applicazione del dispositivo nel campo della diagnostica del danneggiamento da incendio riguarda l'identificazione della lieve tonalità rosa-rosso che caratterizza il calcestruzzo riscaldato nell'intervallo 300-600°C [1, 9]. Elaborando opportunamente un'immagine digitale della provetta contenente il campione raccolto, è possibile evidenziare un profilo dell'alterazione del colore lungo la profondità del foro.

Una seconda applicazione è rappresentata dall'analisi termica differenziale (DTA), prova che richiede il riscaldamento di un piccolo campione di polvere di calcestruzzo per riconoscere le trasformazioni chimico-fisiche (e quindi le temperature) che non hanno avuto modo di svilupparsi durante l'incendio. A tale scopo è stata messa a punto una speciale provetta di nichel-cromo, dotata di una serie di piccoli fori per consentire il monitoraggio della temperatura del campione di polvere durante il suo riscaldamento fino a 1000°C. Questo permette di eseguire una serie di prove DTA in contemporanea.

La limitazione principale osservata in questi primi due esempi è data dall'impossibilità di con-

trollare l'incidenza casuale dell'aggregato grossolano nel campione, il che comporta una maggiore dispersione nei risultati.

Tornando allo scopo originario del dispositivo Carbontest[®] (cioè controllare il pH del copriferro), va osservato che la principale fonte di alcalinità nei pori di calcestruzzo è la Portlandite (idrossido di calcio), che si decompone gradualmente a partire dai 450°C (deidrossilazione) e la cui assenza nella malta cementizia è un indicatore di particolare importanza nell'ambito delle trasformazioni subite dal calcestruzzo in seguito al riscaldamento. Sebbene la deidrossilazione della Portlandite sia un processo reversibile [11], il recupero delle condizioni di pH richiede una prolungata esposizione all'umidità [12], che può essere generalmente esclusa in elementi protetti dalla pioggia.

Al fine di verificare l'efficacia del metodo in questione nel valutare i danni post-incendio, è stata misurata la profondità di deidrossilazione nello stesso pannello in calcestruzzo oggetto delle prove di propagazione degli impulsi prodotti dal trapano battente (Fig.3). Considerando il fattore di scala tra la lunghezza del campione di polvere e la profondità del foro da cui è stato ricavato (pari a circa 2:1 per una punta $\varnothing=10$ mm), si è ottenuta una profondità media di 26 millimetri (Fig.4). Tenuto conto del profilo delle temperature di Fig.3, ciò corrisponde ad una temperatura massima di 455°C, il che è in buon accordo con il punto generalmente riconosciuto di decomposizione della Portlandite.

Vale la pena notare che questo tipo di analisi non potrebbe essere eseguita su carote, poiché l'acqua utilizzata per il raffreddamento della corona diamantata tenderebbe a ripristinare l'alcalinità del campione prima dell'applicazione del reagente. Inoltre, è necessario valutare preliminarmente la profondità di carbonatazione della struttura, per non confondere gli effetti del normale invecchiamento con le trasformazioni indotte dall'incendio.

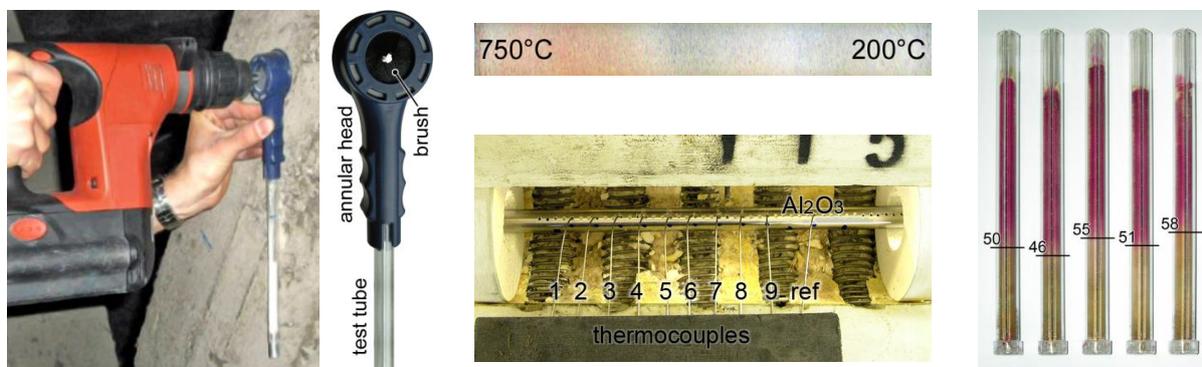


Figura 4. Strumento Carbontest[®] per il prelievo di un campione ordinato di polvere di perforazione; alterazione cromatica di un campione e setup per l'Analisi Termica Differenziale multipla; profondità di deidrossilazione del pannello di Fig.3 (scala 2:1, in mm).

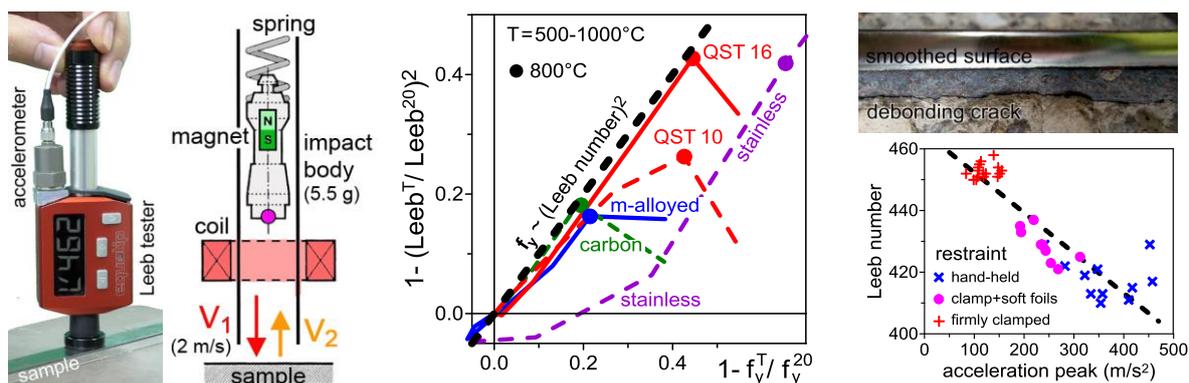


Figura 5. Strumento di Leeb provvisto di accelerometro per la compensazione della vibrazione del campione; schema di funzionamento dello strumento; correlazione con lo sforzo residuo di snervamento; influenza delle possibili vibrazioni causate della perdita di aderenza della barra.

2.3. DUREZZA DINAMICA DELLE ARMATURE

Contrariamente al calcestruzzo, il cui deterioramento indotto dal fuoco è in gran parte irreversibile, le armature in acciaio possono recuperare una quota significativa delle caratteristiche meccaniche iniziali durante il raffreddamento. Ciò dipende fortemente dal tipo di materiale (acciaio al carbonio o inossidabile, barre in acciaio temprato e rinvenuto o in micro-legato, laminazione a caldo o trafilatura a freddo) e uno studio specifico risulta necessario per determinare il danno permanente subito dall'armatura [13].

Un'alternativa interessante è fornita dalla prova di durezza dinamica (prova Leeb, ASTM A956). Contrariamente alle tradizionali prove di durezza statiche (Brinell, Rockwell, Vickers), che richiedono un dispositivo da banco e un sistema ottico di misura dell'impronta prodotta nell'indentazione, il metodo Leeb è adatto ad applicazioni in situ. In tale prova, un corpo dotato di una punta sferica dura ($\varnothing = 3 \text{ mm}$) impatta sulla superficie del campione per la spinta esercitata da una molla. La velocità d'impatto e di rimbalzo vengono misurate a circa 1 mm dal punto di impatto, attraverso il potenziale elettrico indotto in una bobina da un magnete permanente montato all'interno del corpo battente (Fig.5). Il rapporto di tali velocità, moltiplicato per 1000, è definito come durezza di Leeb.

Questo schema permette di sviluppare dispositivi portatili e compatti che possono essere facilmente posizionati sulle barre di armatura. Il metodo richiede una superficie piana e liscia, anche se con limiti non molto stringenti (rugosità media $< 2 \mu\text{m}$). Il campione deve, inoltre, essere bloccato in modo efficace, in modo da evitare eventuali vibrazioni che possano attenuare il rimbalzo della massa battente. Tale problematica è evidente nel caso di copriferro molto danneggiato, se si ha perdita di aderenza a causa delle dilatazioni termiche differenziali di calcestruzzo e acciaio.

Per verificare la sensibilità del metodo al decadimento della tensione residua di snervamento, sono state studiate le seguenti tipologie di armature in acciaio:

- Acciaio temprato e rinvenuto "Tempcore" (QST, $\varnothing=10-16 \text{ mm}$). È attualmente l'acciaio da armatura più utilizzato in Europa.
- Barre in micro-legato (MA, $\varnothing=10 \text{ mm}$), che incorporano elementi di lega (niobio e vanadio).
- Barre in acciaio inossidabile lavorato a freddo (acciaio austenitico AISI 304L, SS, $\varnothing=12 \text{ mm}$). Contrariamente alle barre laminate a caldo dello stesso materiale, questo acciaio è molto sensibile alle temperature elevate.
- Barre a sezione quadrata in acciaio al carbonio (CS, lato=12-20 mm). Prodotte in Italia nel periodo 1950-1970, sono caratterizzate da una maggiore resistenza rispetto alle barre lisce in acciaio al carbonio laminato a caldo, ma anche e da una maggiore sensibilità al fuoco.

Dopo l'esposizione a differenti cicli termici ($T_{\text{max}} = 500, 600, 700, 800 \text{ e } 1000^\circ\text{C}$), sono stati sottoposti a prova di trazione dei campioni di barra di lunghezza 0.6 m, mentre provini più corti sono stati sottoposti alla prova di durezza dinamica.

Le prove di durezza sono state eseguite fissando i campioni nella morsa del banco di una fresa. La parte superiore di ogni campione è stata spianata con la macchina utensile e poi levigata con tela abrasiva. Sono state effettuate circa 30 prove su due campioni per ogni combinazione acciaio-temperatura, con risultati piuttosto ripetibili (coefficiente di variazione $< 5\%$).

Per tutti gli acciai al carbonio riscaldati fino a 800°C si è osservata una buona corrispondenza tra il decadimento della resistenza residua allo snervamento e la riduzione del quadrato dell'indice di Leeb (cioè l'energia cinetica di rimbalzo, Fig.5). Per temperature più elevate si os-

servano una durezza crescente e una dispersione più ampia, probabilmente a causa dell'ingrossamento dei grani della microstruttura cristallina. Tuttavia, la correlazione individuata permette di valutare facilmente il comportamento residuo delle armature in acciaio al carbonio nell'intervallo di temperature di maggiore interesse, senza richiedere alcuna conoscenza circa il tipo di acciaio.

Un comportamento totalmente diverso caratterizza l'acciaio inossidabile trafilato a freddo, probabilmente a causa della mancanza di un vero e proprio punto di snervamento e del notevole aumento dell'incrudimento esibito dalle armature danneggiate (rapporto $f_t / f_y > 2.5$), evidenziando il ruolo della resistenza a trazione f_t accanto alla resistenza a snervamento f_y .

Per quanto riguarda le applicazioni in situ, si è visto che una normale smerigliatrice angolare con dischi lamellari in tela abrasiva è una soluzione praticabile per rendere piana la superficie delle barre, a condizione di non surriscaldare il pezzo durante la lavorazione. La lucidatura finale viene eseguita utilizzando un trapano da modellismo ad alta velocità munito di dischi abrasivi a grana fine.

Per quanto riguarda la possibile vibrazione della barra durante la prova, a causa del distacco dal calcestruzzo, è stata osservata una relazione lineare tra l'accelerazione massima del corpo del durometro e la riduzione del numero di Leeb rispetto al caso di un vincolo efficace. Se trascurato, questo effetto può portare a una sottostima della tensione residua fino al 10-15%.

3. INTERPRETAZIONE COORDINATA DEI RISULTATI

Nonostante i numerosi strumenti diagnostici utili per le valutazioni post-incendio, la caratterizzazione completa, sia del massimo livello di danno sulla superficie esposta, sia della penetrazione del calore all'interno di un elemento in calcestruzzo, richiede generalmente l'applicazione combinata di diversi metodi. Limitando la discussione alle tecniche che non necessitano di procedure troppo onerose sul campo o di successive analisi in laboratorio, sulla base dell'esperienza diretta dell'autore [1, 5] e di un esame della letteratura [2-3, 6] è possibile tracciare la seguente sintesi (Fig.6):

- **Sclerometro.** Permette di rilevare la risposta dello strato più esterno ad una profondità nominale di circa 15 mm, purché la temperatura raggiunta superi i 500°C.
- **Prova Cut And Pull-Out (CAPO test).** Presenta un'eccellente sensibilità al degrado della resistenza per tutti i livelli di danno, da limitato a molto importante. L'informazione riguarda però una profondità molto contenuta (~ 5mm).

- **Colorimetria.** La colorazione rosa assunta dal calcestruzzo nell'intervallo 300-600°C può essere rilevata a qualsiasi profondità, una volta che sia stato estratto un campione di materiale. In base all'esperienza dell'autore, l'isoterma 450°C può essere rilevata tramite elaborazione di immagini digitali, senza una calibrazione specifica per il calcestruzzo studiato.
- **Profondità di deidrossilazione.** Un più netto fronte di colorazione può essere evidenziato utilizzando un indicatore di pH su un campione di polvere prelevato a secco. Il fronte corrisponde al raggiungimento della temperatura massima di 455°C.
- **Resistenza alla perforazione.** Lavoro e tempo di perforazione possono essere misurati a qualsiasi profondità. L'inizio del decadimento termico viene generalmente osservato a circa 500°C.
- **Velocità dell'Impulso di Perforazione.** Questa nuova tecnica è decisamente più sensibile rispetto alla versione precedente. Una limitazione è rappresentata dalla necessità di accedere su due lati opposti dell'elemento ispezionato.
- **Velocità media degli impulsi ultrasonori** per trasmissione diretta. Fornisce il tempo totale di transito degli impulsi attraverso lo spessore di un elemento (integrale della lentezza, ovvero $1/\text{velocità}$ dell'impulso). A causa della notevole eterogeneità degli strati attraversati, l'interpretazione richiede di ipotizzare un profilo di temperatura e una corrispondente curva di decadimento della velocità [1]. La validazione del profilo ipotizzato (Fig.6) è quindi fondata sulla corrispondenza del valore medio della velocità di propagazione ($1/\text{lentezza media}$) con quanto osservato sperimentalmente.
- **Rifrazione degli impulsi ultrasonori** per trasmissione indiretta. Il profilo della velocità degli impulsi può essere identificato mediante l'applicazione di entrambe le sonde emittente e ricevente sulla superficie esposta al fuoco, ripetendo la misura con distanze crescenti tra le sonde (in genere 0.1-0.6m). Gli algoritmi di inversione comunemente utilizzati in geofisica permettono di risalire al profilo di velocità. In alternativa, sono disponibili alcuni diagrammi di correlazione [1, 7] per determinare lo spessore dello strato danneggiato significativamente ($UVP_T < 80\%UPV_{20}$, $T > 300^\circ\text{C}$).

I profili di temperatura che si sviluppano negli elementi in calcestruzzo esposti al fuoco, la cui valutazione è l'oggetto delle indagini diagnostiche, sono il risultato finale della conduzione del calore prodotto all'interno del comparto incendiato. Nel caso di un incendio completamente sviluppato (post flashover), questo dipende principalmente dal carico d'incendio specifico q_t (riferito alla superficie totale del comparto), dal fattore di apertura O (che regola la velocità di

rilascio del calore nel caso di incendi controllati dalla ventilazione) e dalle proprietà termiche delle superfici esposte (che regolano il calore assorbito e poi rilasciato dai materiali di rivestimento).

Un'analisi sugli effetti di queste grandezze è resa agevole dalla formulazione dell'incendio parametrico proposta nell'Eurocodice 1 (EN 1991-1-2, 2002). In Fig.7 si riportano i profili di sviluppo della temperatura massima raggiunta all'interno di una parete di spessore 0.2m, tenuto conto dell'ulteriore propagazione di calore che si verifica durante la fase di decadimento dell'incendio. L'andamento regolare dei profili termici al crescere del carico di incendio dovrebbe garantire per tutte le tecniche citate una buona sensibilità a questo parametro, che rappresenta una delle informazioni più incerte nell'identificazione dello scenario (data anche la perdita di energia dovuta alle fiamme che

divampano all'esterno delle aperture).

Viceversa, una modifica del fattore di apertura mostra come si possa giungere a conclusioni errate qualora ci si basi su una semplice ispezione superficiale degli elementi, poiché piccole aperture comportano scenari d'incendio caratterizzati da temperature inferiori ma a nel complesso più severi. Ciò può essere difficilmente riconosciuto tramite tecniche di indagine sensibili a un'unica soglia di temperatura (ad esempio i 450°C di colorimetria o deidrossilazione). Infine, la presenza di materiali isolanti e rivestimenti leggeri (limitati valori di inerzia termica) tende a far aumentare il danneggiamento superficiale, mentre l'effetto si attenua con la profondità. Anche in questo caso si rende necessaria la combinazione di più tecniche di indagine efficaci in diversi campi di temperatura e profondità.

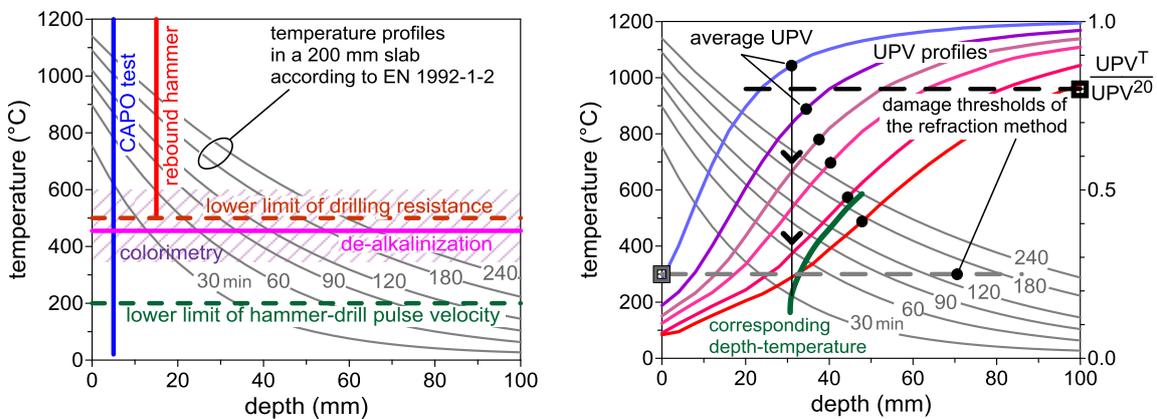


Figura 6. Intervallo di sensibilità di alcune tecniche di indagine e legame tra i profili di temperatura e i valori attesi della velocità media degli impulsi misurata tramite tecniche ad ultrasuoni.

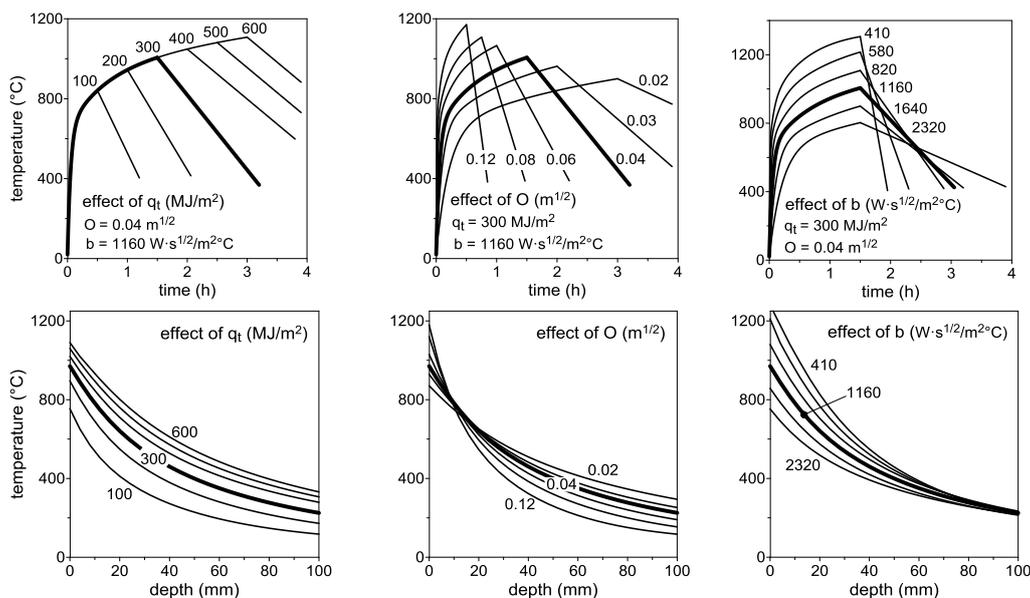


Figura 7. Influenza del carico specifico d'incendio q_t , del fattore di apertura O e della radice quadrata dell'inerzia termica b sulle curve parametriche temperatura-tempo e sui corrispondenti profili delle temperature massime raggiunte all'interno di un pannello in calcestruzzo di spessore 200 mm.

4. IDENTIFICAZIONE DELLO SCENARIO D'INCENDIO IN UN'ESPOSIZIONE DI MOBILI

Come esempio di uso combinato di diverse tecniche d'indagine si riporta l'analisi dello scenario d'incendio condotta nel caso di un'esposizione di mobili nella quale ha avuto luogo la completa combustione del carico di incendio. L'edificio si sviluppa su tre piani fuori terra, organizzati in un unico spazio a pianta libera (12.5 x 40 m). I piani sono caratterizzati da differenti altezze (3.8, 3.3, e 3.0 m partendo dal piano terra) e da diversi fattori di apertura medi ($O = 0.18, 0.09$ e $0.06 \text{ m}^{1/2}$, rispettivamente). La struttura è costituita da un telaio portante in calcestruzzo armato gettato in opera, realizzato in diversi getti di qualità piuttosto variabile, secondo la pratica comune degli anni '60. Sulla base del rapporto d'intervento dei Vigili del Fuoco e della documentazione fotografica disponibile (Fig.8), la combustione ha avuto origine al piano terra e si è propagata al secondo piano attraverso una scala aperta, interessando infine anche il primo piano. La fase di combustione ad ogni piano è durata tra i 30 e i 60 minuti.

La complessa sequenza di eventi, l'apertura verticale rappresentata dalla scala e la mancanza di dati sulla distribuzione del carico di incendio scoraggiano la modellazione completa dello scenario nell'intero edificio. Ciononostante, i risultati delle prove diagnostiche eseguite su tutta la struttura, mostrano che la parte maggiormente danneggiata risulta essere l'estremità NE di ciascun piano. Per tale motivo, queste aree sono state considerate come compartimenti separati, che sono stati analizzati mediante un modello numerico a zone (Ozone 2.2.5), tenendo in considerazione valori realistici del fattore di apertura e delle proprietà termiche dei materiali di rivestimento. Al contrario, il carico d'incendio è stato trattato come parametro libero, sulla base del quale calibrare la severità dell'incendio fino ad ottenere la corrispondenza tra i risultati delle simulazioni e le indicazioni fornite dalle ispezioni in situ.

Limitando la discussione al possibile scenario d'incendio sviluppatosi al primo piano, si riportano in Fig.8 differenti curve temperatura-tempo valutate sulla base di usuali ipotesi circa l'evoluzione nel tempo del rilascio termico (crescita "t-quadro" con media velocità di propagazione, massima potenza termica $RHR_{max} = 250 \text{ kW/m}^2$ e inizio della fase di decadimento in corrispondenza di un carico di incendio residuo pari al 30% di quello iniziale). A causa del fattore di apertura relativamente elevato, sia le analisi numeriche sia il modello di incendio parametrico dell'Eurocodice 1 indicherebbero un raffreddamento molto rapido nella fase di decadimento. Tale problema è stato discusso da Feasey e Buchanan, che hanno proposto di modificare il valore di riferimento dell'inerzia termica delle pareti e con esso il fattore di scala temporale che regola la cinetica del fenomeno [14].

Per quanto riguarda le indagini sugli elementi danneggiati, si è deciso di focalizzare l'attenzione sulla parte superiore delle colonne che sostengono la trave di spina dell'edificio, per la loro posizione rappresentativa e per la minore influenza delle armature e delle fessure rispetto alle travi. Le colonne (400 x 400 mm, con un carico assiale pari a circa il 10% della loro capacità media) erano rivestite con uno strato di 10 mm di intonaco, in buona parte distaccatosi durante l'incendio. Poiché la tempistica di quest'ultimo fenomeno non è nota, nelle analisi termiche si è considerato un intonaco perfettamente aderente alla struttura ma di spessore dimezzato. In Fig.9 si riportano una sintesi dei risultati delle prove Non Distruttive e una serie di possibili profili di temperatura e velocità degli ultrasuoni (questi ultimi basati sulla curva di decadimento presentata in [1, 7]).

Si sottolinea che l'interpretazione di molti risultati delle prove ND si basa sul confronto tra le risposte del materiale prima e dopo il danneggiamento. Nelle situazioni reali, è possibile valutare solo la qualità media del calcestruzzo originario, controllando elementi non esposti al fuoco (in questo caso le colonne situate all'aperto e nel seminterrato). A causa dello scarso controllo della qualità durante la fase di costruzione della struttura in

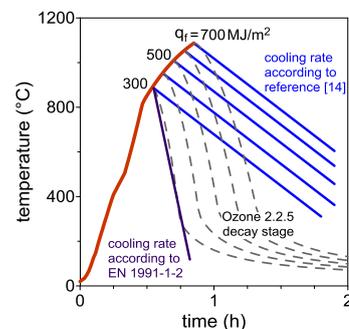
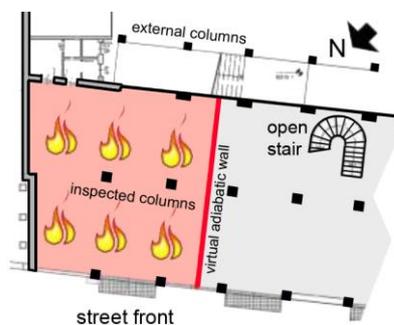


Figura 8. Fase post flashover ai piani terra e secondo dell'esposizione di mobili, sub-compartimento considerato nelle analisi dello scenario d'incendio al primo piano e curva temperatura-tempo ottenuta dal modello a zone.

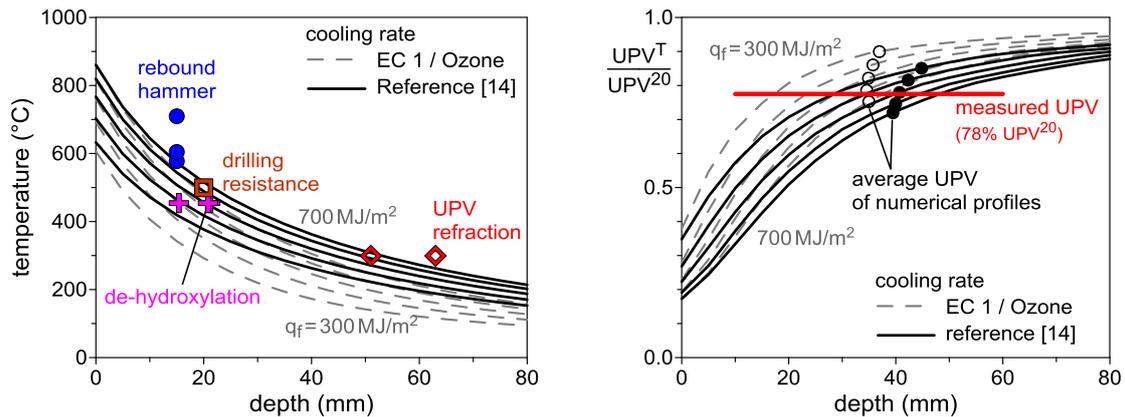


Figura 9. Confronto fra i risultati delle tecniche diagnostiche e i profili di temperatura ottenuti sulla base delle curve temperatura-tempo di Fig.8 per la sezione trasversale di una colonna in c.a. 400 x 400 mm; corrispondente profilo della velocità degli ultrasuoni e confronto con la velocità media di attraversamento della sezione.

esame, gli effetti apparenti del fuoco in uno specifico elemento possono essere sovrastimati (o sotto-stimati) se di qualità iniziale inferiore (o superiore) rispetto alla media. Questo è un ulteriore motivo che spinge all'utilizzo combinato di differenti tecniche di indagine e a verificare le condizioni di più elementi simili nello stesso compartimento. In linea di principio, tale problema dovrebbe essere meno rilevante per la misura della profondità di deidrossilazione (relativa ad una specifica trasformazione chimica) e per la tecnica della resistenza alla perforazione, che si basa sul confronto tra strati profondi e superficiali attraversati dallo stesso foro.

Il risultato finale è che il più alto carico d'incendio nel campo di valori considerato ($q_f = 600-700 \text{ MJ/m}^2$ per unità di superficie in pianta) e il più lento decadimento [14] portano alla migliore corrispondenza con i risultati sperimentali. Una dispersione maggiore è evidenziata dalla durezza superficiale, mentre il metodo della resistenza alla perforazione ha reso necessario mediare più prove (5 in questo caso) per mostrare in modo chiaro l'inizio del decadimento del lavoro di perforazione. Il metodo di rifrazione degli ultrasuoni ha richiesto un attento esame dei segnali ricevuti, a causa della fortissima attenuazione degli impulsi nel copriferro danneggiato. La tecnica basata sulla trasmissione diretta degli impulsi ultrasonici si è dimostrata molto più semplice da implementare, ma l'interpretazione dei risultati non sarebbe stata possibile senza il supporto di una modellazione dello scenario di incendio e dei profili di temperatura corrispondenti. Quest'ultima tecnica prevede lo studio dell'intero spessore dell'elemento ed è meno influenzata di altre dall'ulteriore danneggiamento che caratterizza gli strati più esterni nei mesi successivi all'incendio (a causa dell'assorbimento di umidità dall'ambiente). Probabilmente è per tale motivo che un carico di incendio leggermente inferiore ($q_f = 500 \text{ MJ/m}^2$) sembra più coerente con questi ultimi risultati.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente lavoro sono stati presentati alcuni nuovi strumenti diagnostici e una procedura per l'interpretazione coordinata dei risultati delle indagini, al fine di delineare un approccio pratico e affidabile per la valutazione del danno da incendio nelle strutture in calcestruzzo armato.

Le principali conclusioni che si possono trarre sono riassunte nel seguito.

- La misura della velocità di propagazione dei forti impulsi generati dal meccanismo battente di un trapano a percussione combina la praticità delle tecniche basate sulla perforazione con una sensibilità decisamente superiore ai livelli più modesti di danno. Alcuni studi sono in corso per sviluppare uno strumento più semplice e accessibile e per consentire una maggiore flessibilità della configurazione di prova.
- La misura dell'alcalinità in un campione ordinato di polvere di perforazione è un metodo molto rapido (circa 1 minuto per prova) per rilevare la profondità dell'isoterma 450°C . Ulteriori indagini sono necessarie per verificare l'influenza della composizione del calcestruzzo, dell'invecchiamento e dell'umidità ambientale.
- La prova standard di durezza dinamica (metodo Leeb) è una soluzione pratica per valutare la tensione di snervamento residua delle armature. Una correlazione di validità generale è stata individuata per acciai al carbonio ordinari fino a 800°C . Per gli altri materiali (acciai incruditi e inossidabili), il metodo può essere utilizzato in termini comparativi, per estendere i risultati delle prove distruttive. L'eventuale perdita di aderenza della barra può tradursi in una sottostima non trascurabile della tensione di snervamento residua, a cui si può far fronte rilevando le vibrazioni del dispositivo di prova.

- Il confronto coordinato dei risultati delle indagini in situ con i profili di temperatura ottenuti attraverso un'analisi parametrica dello scenario d'incendio rappresenta un modo efficace per unificare le indicazioni relative ai diversi intervalli di profondità e temperatura e per fornire un quadro più attendibile sulle condizioni residuali della struttura. Una volta che uno scenario d'incendio di severità realistica viene convalidato, i risultati possono essere estesi ben oltre i singoli elementi investigati.

RINGRAZIAMENTI

Le tecniche diagnostiche presentate in questo lavoro sono state messe a punto nell'ambito di diverse Tesi di Laurea sviluppate presso le Facoltà di Ingegneria e di Architettura del Politecnico di Milano. Un sentito ringraziamento va agli Allievi coinvolti, e in particolare a Michele Mazzocchi (propagazione di impulsi del trapano battente), Marcello Palumbo (misure di alcalinità della polvere), Paolo Belluomini, Arianna Colmegna e Matteo Racioppo (prove di durezza dinamica).

Un particolare ringraziamento anche al Dott. Francesco Lo Monte (DICA - Politecnico di Milano) per le stimolanti discussioni a tutto campo sulle tematiche della Fire Engineering, del comportamento al fuoco dei calcestruzzi e della diagnostica strutturale, oltre che per il fattivo supporto nella stesura del presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **Felicetti R.**, "Assessment Methods of Fire Damages in Concrete Tunnel Linings", *Fire Technology*, 49(2), 509-529, 2013.
- [2] **CIB W14 Report**, "Repairability of Fire Damaged Structures", *Fire Safety J.*, 16, 251-336, 1990.
- [3] **Concrete Society**, "Assessment and repair of fire damaged concrete structures", TR 68, 2008.
- [4] **RILEM**, "Properties of Materials at High Temperatures: Concrete", Schneider U. (ed), Dept. Civil Engrg University of Kassel, Germany, 1985.
- [5] **FIB Task Group 4.3**, "Fire design of concrete structures - structural behaviour and assessment", *Fib bulletin* 46, 63-114, 2008.
- [6] **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées**, "Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie", Report ME 62 (in French), 2005.
- [7] **Colombo M. e Felicetti R.**, "New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures", *Fire Safety Journal*, 42, 461-472, 2007.
- [8] **Felicetti R.**, "Assessment of Fire Damaged Concrete via the Hammer-Drill Pulse Transmission Technique", *Int. Symp. on NDT of Materials and Structures (NDTMS 2011)*, 205-212, 2011.
- [9] **Felicetti R.**, "Assessment of the deteriorated concrete cover by combined while-drilling techniques", *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 18 (1), 25-33, 2012.
- [10] **Felicetti R. e Gambarova P. G.**, "Assessment of the Residual Strength of Fire-Damaged Steel-Rebars", *Int. Symp. on NDT of Materials and Structures (NDTMS 2011)*, 213-218, 2011.
- [11] **Alarcon-Ruiz L., Platret G., Massieu E. e Ehrlacher A.**, "The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste". *Cement and Concrete Research*, 35, 609-613, 2005.
- [12] **Poon C.-S., Azhar S., Anson M. e Wong Y.-L.**, "Strength and durability recovery of fire damaged concrete after post-fire-curing", *Cem. and Con. Res.*, 31, 1307-1318, 2001.
- [13] **Felicetti R., Gambarova P.G. e Meda A.**, "Residual behaviour of steel rebars and R/C sections after a fire", *Construction and Building Materials*, 23 (12), 3546-3555, 2009.
- [14] **Feasey R. e Buchanan A. H.**, "Post-flashover fires for structural design", *Fire Safety Journal*, 37 (1), 85-105, 2002.

Roberto Felicetti: roberto.felicetti@polimi.it