

# CONTROLLI NDT SULLE STRUTTURE IN C.A. SOGGETTE A CARICO D'INCENDIO

F. Morrone\* - G. Porco\*\* - G. F. Valer Montero\*\*

\* Newtech s.r.l. via Antinori –Rende- Cs  
[fulvio.morrone@virgilio.it](mailto:fulvio.morrone@virgilio.it)

\*\* Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile  
[a.porco@sismalab.it](mailto:a.porco@sismalab.it) [giuliafvalerm@gmail.com](mailto:giuliafvalerm@gmail.com)

## Introduzione

La verifica dello stato di consistenza delle strutture in calcestruzzo armato, soggette a carico d'incendio, in campo ingegneristico ha sempre rappresentato una problematica ostica e molto complessa. Questa realtà, più volte citata nella letteratura specializzata, si giustifica con la multidisciplinarietà dell'argomento che richiede, oltre alla conoscenza di procedure e metodologie di analisi per lo studio di edifici esistenti, anche conoscenze di natura sperimentale per il controllo in situ di materiali danneggiati per esposizione ad alte temperature. Questi ingredienti non costituiscono comunque condizione necessaria e sufficiente per poter giungere alla soluzione del problema, infatti fondamentali sono la conoscenza di altri dati quali ad esempio, le modalità di sviluppo dell'incendio, le temperature raggiunte e i tempi di esposizione dei materiali alle condizioni estreme. Sicuramente tutte le variabili citate incidono fortemente sulle valutazioni circa i coefficienti di sicurezza detenuti dalla struttura nella condizione post incendio e sulle eventuali scelte di ripristino o di demolizione e ricostruzione. L'unico dato confortante è che le strutture in calcestruzzo armato grazie alla natura non combustibile del materiale ed alla sua bassa diffusività termica, mostrano un buon comportamento al fuoco, manifestando una lenta diffusione del calore all'interno degli elementi strutturali.

Appare evidente che una corretta valutazione dello stato di danno e conseguentemente la identificazione dei coefficienti di sicurezza in opera, includa diversi aspetti da investigare, con la prerogativa negativa che non sono disponibili in letteratura procedure di controllo standardizzabili, utili a guidare i tecnici in una analisi articolata secondo una precisa cronologia di attività. Anche per quanto attiene alle metodologie sperimentali, molto spesso vengono impiegate metodologie di indagine consolidate e prestazionali sui materiali integri ma di cui si ignora la reale affidabilità e la resa una volta trasferite sui materiali deteriorati dalle alte temperature. In riferimento a quest'ultimo aspetto è usuale imbattersi in campagne sperimentali dove le tecniche, riconosciute affidabili per i materiali integri vengono utilizzate con la stessa disinvoltura su materiali esposti a forti gradienti termici fornendo di fatto, valori poco omogenei e fortemente perturbati da condizioni locali.

Sulla scorta di queste osservazioni è stato proposto il presente lavoro con l'intento di fornire qualche utile osservazione e qualche utile spunto nell'ambito delle attività finalizzate alla verifica di

sicurezza di edifici soggetti a carico di incendio. L'obiettivo è quello di proporre una procedura dotata di riferimenti procedurali facilmente riconoscibili e attuabili, per eseguire le verifiche sugli edifici con l'ausilio di una metodologia osservazionale dello stato di danno e facendo largo uso delle tecniche NDT. In riferimento a quest'ultimo aspetto vedremo, nelle sezioni seguenti, come sarà necessario verificare a priori l'esistenza di alcune condizioni prima di redigere ed eseguire il piano di indagini in situ, per garantire l'acquisizione di dati sperimentali omogenei e non influenzati da elementi di danneggiamento locali che potrebbero fortemente variare i reali parametri di resistenza del calcestruzzo.

## **1. IL COMPORTAMENTO DEL CALCESTRUZZO, DELL'ACCIAIO E DEI SOLAI A CARICO D'INCENDIO**

Prima di entrare nel merito della procedura di controllo proposta e fornire qualche spunto di riflessione sull'uso delle tecniche sperimentali di indagine, è opportuno soffermarsi preliminarmente su alcuni aspetti caratterizzanti il comportamento delle parti resistenti di un immobile quando è interessato da un carico di incendio, limiteremo in questo contesto l'analisi per brevità, al solo calcestruzzo armato e ai solai latero cementizi.

Tale passaggio servirà a mettere in rilievo alcuni aspetti guida presenti nella procedura di approccio al problema che verrà proposta nelle sezioni seguenti, la quale, è fortemente ancorata alla analisi visiva dello stato di fatto, con la principale finalità di poter circoscrivere aree omogenee da investigare sperimentalmente. In riferimento a quest'ultimo aspetto sarà importante stabilire l'estensione delle aree che hanno subito percorsi di riscaldamento e di esposizione simile e valutare invece, sulla singola membratura portante, quali volumi di calcestruzzi e quali barre d'acciaio presentano lo stesso livello di danneggiamento in modo da poter garantire l'acquisizione di dati sperimentali omogenei per giungere a caratterizzare meccanicamente i materiali in opera.

Pertanto, considerato che gli aspetti che verranno di seguito analizzati sono comunque abbastanza noti e molto trattati nella letteratura di riferimento, passeremo rapidamente in rassegna gli effetti prodotti dai gradienti termici sul calcestruzzo, sull'acciaio, sulle membrature in c.a e sugli orizzontamenti, limitandoci per quest'ultimi sempre per brevità, ad una delle tipologie più diffuse sul territorio nazionale ossia il solaio latero cementizio.

### **1.1 IL CALCESTRUZZO**

Il calcestruzzo è sicuramente tra i materiali impiegati in edilizia, un componente che offre elevate garanzie in riferimento all'incendio, sia nei riguardi dell'integrità strutturale, intesa come conservazione di forma delle sezioni resistenti e mantenimento entro certi limiti dei parametri meccanici originari, sia per la tutela degli occupanti gli edifici, che dispongono rispetto ad altre tipologie costruttive, di apprezzabili intervalli di tempo per lasciare l'immobile, prima che possano generarsi meccanismi di collasso.

In riferimento più specificatamente, al comportamento mostrato per effetto di gradienti termici indotti, il materiale superando i 400 gradi centigradi evidenzia una divergenza di variazione volumetrica tra gli aggregati e la pasta di cemento, in particolare gli aggregati tendono a dilatarsi e la pasta cementizia tende al ritiro. Per effetto di questa contrapposta reazione, nascono delle tensioni interne che producono micro lesioni nella pasta cementizia interessando principalmente le zone di contatto inerte malta.

Per quanto attiene invece al comportamento a carico di incendio sotto il profilo chimico, il danneggiamento è associato al rilascio dell'acqua sia contenuta nelle porosità del materiale, sia presente nella fase idrata, queste modificazioni comportano una variazione in termini di incremento della porosità e determinano una conseguente riduzione dei parametri meccanici. In generale, il calcestruzzo confezionato con inerti di natura calcarea mostra, per temperature inferiori ai 750 gradi centigradi, una propensione meno accentuata alla perdita di prestazionalità rispetto ad un calcestruzzo prodotto con inerti di natura silicea. I calcestruzzi comunque manifestano apprezzabili modificazioni in termini di resistenze ultime e di moduli elastici per temperature prossime ai 600 gradi centigradi. L'esposizione alle alte temperature inoltre fa sì che il materiale assuma delle caratteristiche alterazioni cromatiche che virano dal rosa rosso, al grigio bianco fino al giallo marrone, queste ultime si manifestano al raggiungimento di temperature di oltre 900 gradi.

La risposta del calcestruzzo ai gradienti termici è inoltre estremamente significativa non solo per le proprie modificazioni cui si accennava, ossia presenza di micro lesioni o perdita di capacità portante, ma principalmente perché il calcestruzzo ingloba le barre d'armatura e di conseguenza in opera funge come elemento di protezione dell'acciaio che notoriamente, per valori prossimi ai 500 gradi centigradi, perde gran parte delle sue caratteristiche meccaniche. Quindi il mantenimento di una buona compattezza e omogeneità, specialmente nelle zone di copriferro, unita ad una bassa porosità eventualmente accompagnata da spessori apprezzabili, può estendere i tempi di raggiungimento dei fatidici 500 gradi alle barre presenti nelle sezioni resistenti, generando il mantenimento per tempi significativi dei coefficienti di sicurezza originari in presenza di incendio.

Appare evidente che il livello di danneggiamento presente nel calcestruzzo per l'esposizione al fuoco, considerata la possibilità di avere micro lesioni con intensità e densità variabile in funzione dei tempi di esposizione e delle temperature raggiunte, può divenire un elemento discriminante nella scelta delle tecniche di indagine in situ, elevandone alcune, con particolari accorgimenti, a valori di alta affidabilità e precludendo ad altre la possibilità di impiego. Inoltre la possibilità di avere su una stessa membratura portante, livelli di danneggiamento diversificati per superfici e profondità, sicuramente induce altri elementi di variabilità ai parametri sperimentali tali da renderli poco omogenei ed in alcuni casi forse fortemente fuorvianti nella valutazione delle caratteristiche meccaniche.

## **1.2 L'ACCIAIO**

L'acciaio è senza dubbio l'elemento più vulnerabile presente sulla struttura e nelle sezioni resistenti quando un edificio è interessato da un incendio. In letteratura sono disponibili diversi studi che mostrano, come, per la stragrande maggioranza degli acciai utilizzati in campo civile, il superamento di temperature intorno a 500-550 gradi coincide con una repentina riduzione delle proprietà meccaniche, ossia marcata perdita di resistenza e forte contrazione del modulo elastico. Per quanto attiene alle fasi successive all'evento e cioè la fase di raffreddamento e quindi di ritorno alle temperature ambientali, l'acciaio evidenzia un marcato recupero delle caratteristiche possedute all'origine, con modalità e valori in funzione del tipo di materiale e della massima temperatura cui lo stesso è stato esposto. Questi comportamenti, indotti dalle variazioni di temperatura associate con un incendio, hanno un diretto effetto sui coefficienti di sicurezza in opera, sia nel corso dell'incendio, sia ad evento estinto e cioè nella condizione danneggiata. Le sezioni resistenti evidenzieranno pertanto livelli di affidabilità in virtù del numero delle barre presenti, della loro collocazione geometrica riferita alla fonte di calore e i coefficienti di sicurezza, per come vedremo saranno comunque estremamente variabili ed influenzati da molti altri fattori. Quindi, nelle strutture in c.a, a differenza delle strutture in acciaio dove la vulnerabilità al fuoco è direttamente correlata con l'elemento portante, la sensibilità al fuoco degli acciai impiegati si riflette in modo diretto sulla sicurezza delle sezioni resistenti di travi e pilastri ma grazie alla presenza del calcestruzzo, l'effetto prodotto potrà essere notevolmente condizionato.

## **1.3 LE SEZIONI IN C.A.**

La valutazione della sicurezza di un edificio, che è stato soggetto a carico di incendio è direttamente legata allo stato di conservazione dei materiali nella situazione post incendio e alla storia di esposizione e di evoluzione delle temperature che hanno registrato nel corso dell'evento. Individuare le caratteristiche meccaniche possedute dai materiali dopo il trattamento termico, è un elemento imprescindibile per conoscere i reali coefficienti di sicurezza presenti nelle sezioni resistenti delle membrature portanti e per verificare quale possa essere il livello di affidabilità dell'opera per continuare a svolgere la sua funzione nelle condizioni in cui si trova o se è necessario eseguire interventi di consolidamento. Naturalmente tutto il processo implica una seria e attenta analisi di verifica di affidabilità delle sezioni in c.a.

Indispensabile è pertanto conoscere come la sezione, composta dai due componenti base, reagisce al carico termico e come si ripercuotono sul comportamento complessivo, le carenze meccaniche mostrate dal singolo materiale. Altro aspetto fondamentale è stabilire in che modo evolvono gli incrementi di temperatura all'interno della sezione della trave e del pilastro, sia in base alla esposizione rispetto alla sorgente, sia in riferimento alla storia di carico termico cui essi sono stati sottoposti. Nel seguito pertanto, verranno rapidamente richiamati due concetti elementari, il primo

relativo a come, i due componenti base, in relazione all'incremento di temperatura possano influire sulla prestazionalità complessiva della sezione resistente e il secondo su quali siano le modalità di trasmissione delle temperature all'interno di sezioni generiche in c.a. per effetto di un processo di carico termico esterno. In particolare nei riguardi di quest'ultimo aspetto con riferimento a un percorso tempo-temperatura della ISO 834 e con l'ausilio di sezioni tipo per dimensione e posizionamento planimetrico verranno esaminati alcune mappe termiche per diversi tempi di esposizione.

Partiamo con l'analisi dell'influenza prodotta dal comportamento dell'acciaio sulla sezione in c.a. La perdita di capacità portante per l'acciaio, in termini di resistenza ultima, così come la evidente riduzione dei moduli elastici quando siamo in presenza di elementi prevalentemente compressi e costituiti principalmente da aree resistenti in calcestruzzo, non è elemento di forte preoccupazione nei riguardi di eccessive riduzioni dei coefficienti di sicurezza, se non nelle fasi di sviluppo dell'incendio. Viceversa per gli elementi prevalentemente inflessi quali le travi dove le sollecitazioni di risposta ai carichi presenti, sono basate esclusivamente sugli sforzi di trazione presenti nelle barre, è facile prevedere una riduzione dei margini di sicurezza con fase evolutiva massima nel corso dello sviluppo delle più alte temperature e in base alla portata dell'evento per questi elementi sarà più elevato il rischio di collasso. Nella fase di estinzione dell'evento invece, il recupero delle caratteristiche dell'acciaio comporterà, nel caso sia ancora collocato nelle posizioni originarie, un recupero dei margini di sicurezza rispetto alla fase acuta dell'incendio. Appare chiaro che la valutazione della affidabilità delle membrature inflesse e l'accertamento della presenza di adeguati coefficienti di sicurezza, sia per le fasi proprie dell'incendio che per le fasi post evento, presenterà connotati di elevata difficoltà e sarà fortemente condizionata dai parametri meccanici degli acciai nella condizione post evento.

Sulle membrature inflesse un ruolo determinante per la tutela degli acciai è svolto dallo stato di efficienza dei copriferri. Se i copriferri sono stati ben realizzati e con materiale a bassa porosità l'incremento di temperatura causato dall'incendio potrà essere fortemente condizionato con il vantaggio di avere minore danneggiamento dell'acciaio. La cattiva realizzazione dei copriferri in fase costruttiva così come pure il suo deterioramento nel corso dell'incendio sotto forma di micro fessure, di fatto favorisce un rapido raggiungimento delle temperature critiche per l'acciaio rendendo i coefficienti di sicurezza in opera estremamente ridotti e favorendo la nascita di meccanismi di collasso parziali specialmente, come vedremo in seguito, sui solai. In riferimento invece al secondo aspetto e cioè come le variazioni esterne di temperatura, producano per diverse condizioni di esposizione, un diversificato regime di riscaldamento interno è possibile fare riferimento ad alcuni schemi guida. In pratica in base alla geometria della membratura resistente e a come essa è collocata planimetricamente se si tratta di un pilastro o se inserita nei solai se si tratta di una trave, si può risalire alle mappe termiche con riferimento ad un percorso di riscaldamento in un prefissato intervallo di tempo. A titolo di esempio nelle sezioni seguenti vengono riportate le mappe termiche per alcune travi inglobate in solai tipo fig.1, fig.2.

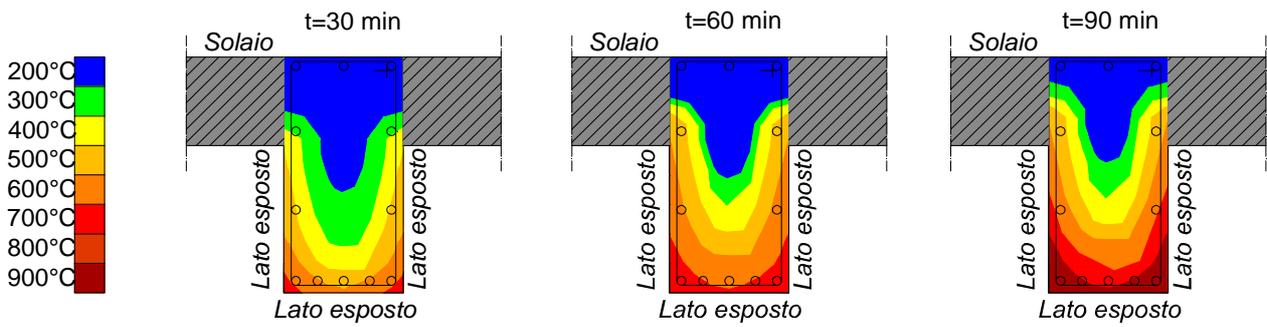


Fig. 1- Trave tipo di piano soggetta ad un processo di carico termico su 3 lati.

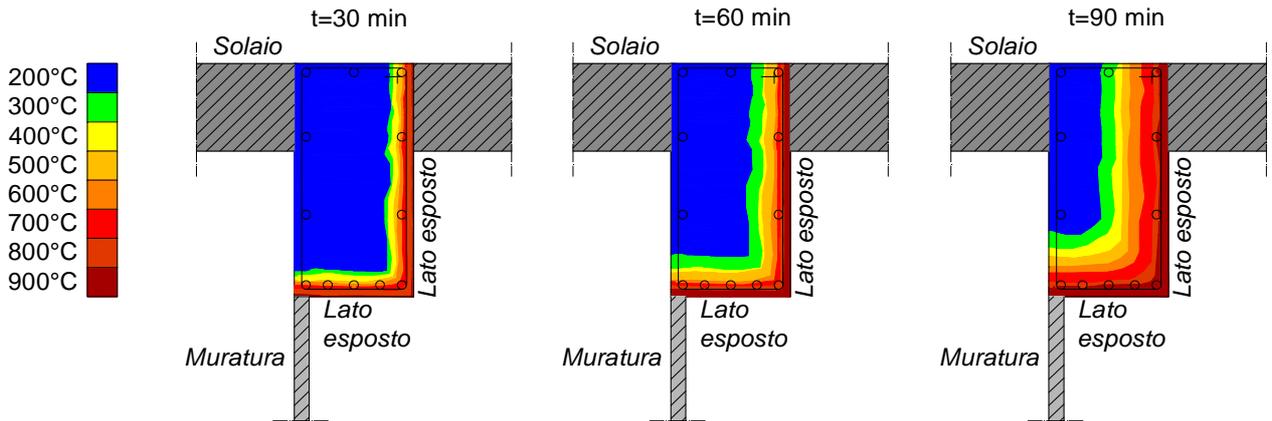


Fig. 2 - Trave tipo di piano soggetta ad un processo di carico termico su 2 lati

Nelle figure 3 e 4 sono invece riportate alcune mappe termiche per dei pilastri con diverse condizioni di confinamento e di esposizione.

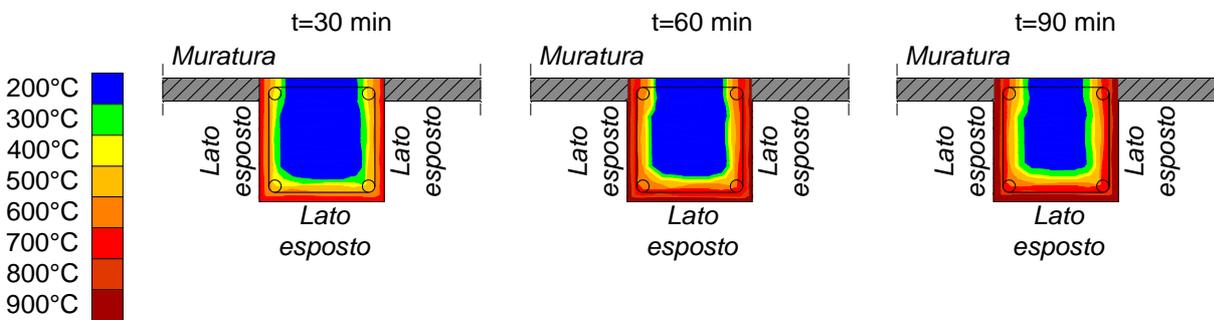


Fig. 3 - Pilastro tipo soggetto ad un processo di carico termico su 3 lati.

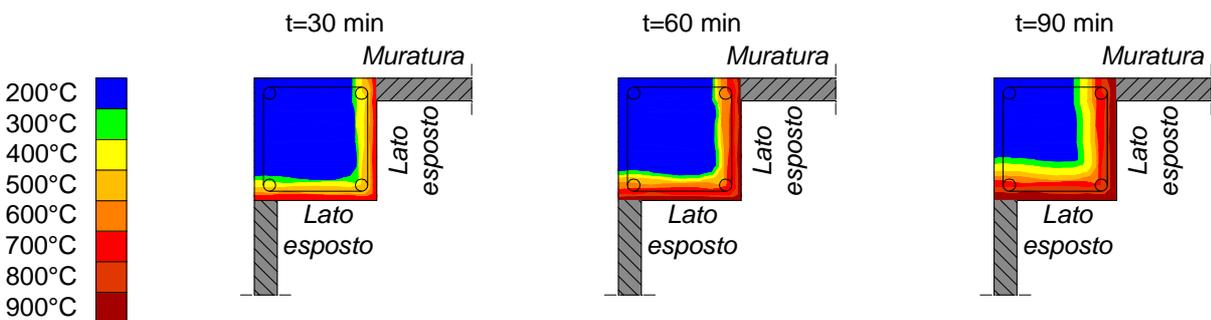


Fig. 4 - Pilastro tipo soggetto ad un processo di carico termico su 2 lati.

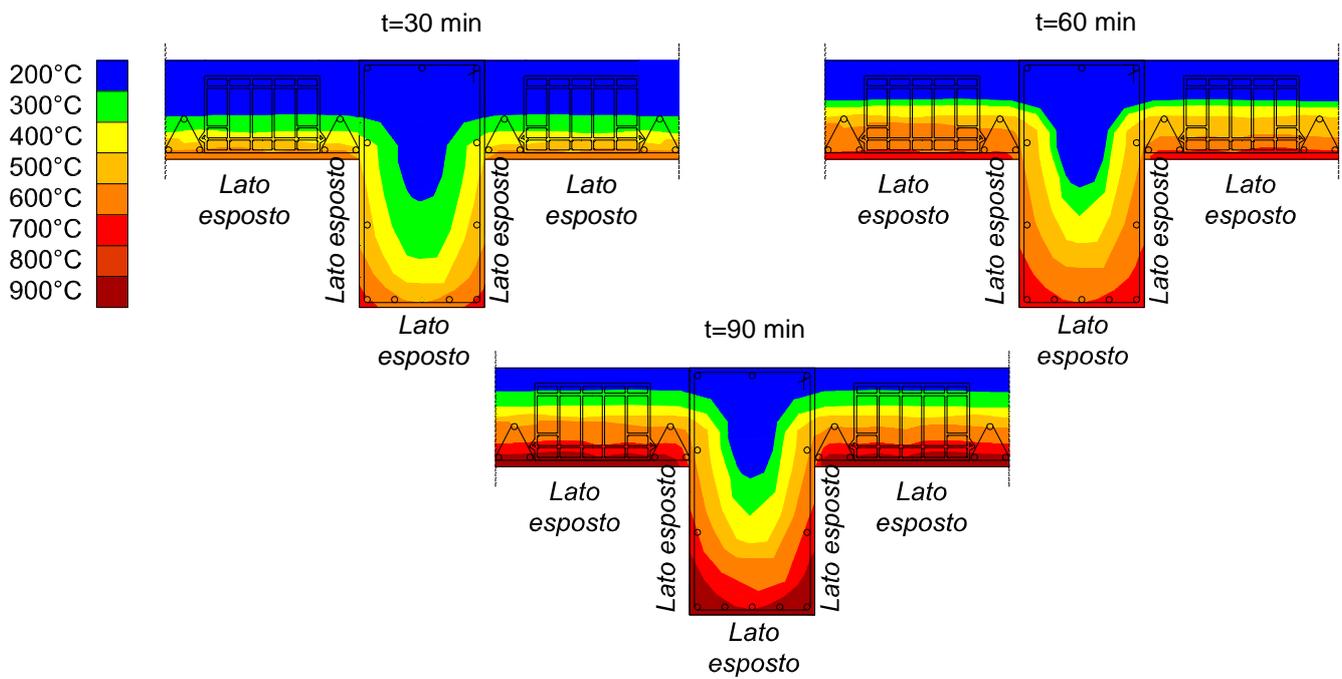
Dalle figure è evidente che sulla stessa sezione è ricorrente registrare superfici con livelli di temperatura diversificati sia procedendo verso il baricentro della sezione sia muovendosi sul solo perimetro esterno. Questa variabilità indurrà naturalmente livelli di deterioramento del materiale calcestruzzo estremamente diversi, con strati a porosità più accentuata verso l'esterno rispetto a quelli interni e addirittura superfici più deteriorate su alcuni lati rispetto ad altre appartenenti alla stessa membratura ma meno esposte. Questa variabilità per come è ovvio attendersi avrà rilevanti ripercussioni, sia sul prelievo di campioni cilindrici che essendo eventualmente costituiti da strati diversamente deteriorati evidenzieranno valori sperimentali legati ad aspetti locali, sia per la esecuzione di indagini NDT che attraversando spessori con materiale a diverso comportamento produrranno risultati di complessa interpretazione. Assume pertanto sulla sezione resistente in c.a. rilevanza estrema la ricerca di un dato sperimentale omogeneo che nello stesso punto di misura offra garanzie di affidabilità e ripetibilità.

#### **1.4 I SOLAI LATERO CEMENTIZI**

La risposta alle variazioni di temperatura dei solai e quindi il livello di deterioramento raggiunto dagli orizzontamenti è un elemento estremamente importante nella valutazione delle risorse residue di un edificio. Naturalmente essendo il solaio una struttura secondaria, ma deputata a sopportare carichi quali, i pesi propri, i pesi permanenti ed in base alla destinazione d'uso carichi accidentali, la verifica di consistenza effettuata in modo avulso dagli elementi principali portanti, ha una esclusiva valenza di controllo circa la formazione di meccanismi locali di collasso.

Ovviamente la risposta al carico di incendio è diversa a seconda del tipo di solaio utilizzato in opera. Oggi in opera le tipologie maggiormente ricorrenti presenti su strutture per civile abitazione sono sostanzialmente due. Il solaio con elementi precompressi e pignatte, ed il solaio con travetti tralicciati o predisposti in opera e laterizi. La prima tipologia presenta caratteristiche proprie delle strutture resistenti in precompresso, con armature in acciaio armonico e calcestruzzi impiegati nella realizzazione dei travetti con caratteristiche più elevate rispetto ai calcestruzzi impiegati per il successivo completamento. La seconda tipologia è invece molto più simile, per quanto attiene a materiali e comportamento, alle membrature classiche in c.a. Per brevità verranno trattate le caratteristiche di risposta al fuoco della sola seconda tipologia.

Con riferimento ad un processo di carico termico noto (ISO 834) nella figura seguente è illustrata la diffusione interna delle temperature su un solaio latero cementizio per tre diversi tempi di esposizione. Per come si può notare nello spessore del solaio le variazioni di temperatura, spostandosi verso l'estradosso, sono notevoli e mentre vengono meglio assorbite dalla trave portante, sui travetti ed ancor di più sulle pignatte producono effetti di notevole deterioramento. In base al tempo ed alla temperatura di esposizione i solai presentano danneggiamenti estremamente diversificati.



*Fig. 5 – Solaio latero cementizio tipo soggetto ad un processo di carico termico all'intradosso*

Zone meno interessate dagli incrementi di temperatura mostrano a volte solo il deterioramento degli intonaci, in altre aree con processo di carico più spinto si passa anche a riconoscere la perdita limitata dei copriferri dei travetti e limitate parzializzazioni delle pignatte dovute ad una non uniforme distribuzione delle temperature, le quali si riducono per come illustrato precedentemente, repentinamente procedendo dall'intradosso interessato dall'incendio verso l'estradosso. In altre invece la notevole esposizione e le alte temperature raggiunte provocano la nascita di sforzi tangenziali elevati che producono lo sfaldamento totale delle pignatte, il distacco di parti consistenti dei copriferri e la fuoriuscita delle armature dei travetti, dalla loro sede naturale assumendo la posizione ad arco rovesciato. Nelle immagini seguenti, sono riportate le tre diverse condizioni di danneggiamento descritto: l'ultima, quella più elevata, mostra la parziale perdita di aderenza della barre di acciaio presenti nei travetti portanti.





*Fig. 6 - Effetti del carico di incendio sui solai in sequenza dall'alto verso il basso lieve – medio - alto*

Da quanto illustrato è evidente che una diversa condizione di danno indica sicuramente tempi di esposizione e temperature raggiunte nel corso dell'evento diverse. Questa osservazione potrà essere utile per identificare, su aree sufficientemente estese zone dove gli elementi portanti presenti sono stati soggetti a carichi termici più gravosi rispetto ad altre dove il livello di esposizione è stato più contenuto. Una attività di mappatura del danno, presente sulle aree di solaio appartenenti allo stesso livello, mediante la sola indagine visiva, potrà costituire una buona guida per effettuare una zonazione a diversi livelli di deterioramento fornendo utili informazioni sulle zone maggiormente esposte e su quelle meno interessate dall'incremento della temperatura; inoltre sarà possibile identificare delle direttrici di attenuazione del fenomeno perpendicolarmente alle quali è ipotizzabile pensare delle isoterme che indicheranno sulla singola membratura quali volumi dei materiali hanno i connotati di omogeneità per l'esecuzione delle indagini in situ.

## **2. TECNICHE NDT PER IL CONTROLLO DEI MATERIALI**

La valutazione dei parametri meccanici in opera di calcestruzzi e acciai è effettuata per strutture esistenti o di nuova realizzazione ricorrendo a tecniche non distruttive opportunamente tarate con valori rilevati su campioni prelevati in situ. Principalmente la tecnica NDT in campo civile consente di effettuare comparazioni in opera tra materiali presenti su diverse membrature portanti, in pratica attraverso i metodi ultrasonoro e sclerometrico si perviene a stabilire l'appartenenza dei materiali ad una stessa famiglia e solo successivamente con una chiara visione di omogeneità, attraverso una indagine

semi distruttiva quale è il carotaggio e la successiva prova a compressione, sarà possibile intravedere valori di resistenza a rottura che attraverso i fattori di confidenza riportati nelle NTC 08 forniranno i riferimenti materiali con i quali verrà eseguita la verifica di sicurezza. Naturalmente la procedura risente di alcuni fattori insiti nelle procedure sperimentali, ad esempio il metodo sclerometrico è fortemente influenzato sia dal livello di finitura della superficie su cui si esegue il test sia dalla eventuale carbonatazione esistente, mentre l'indagine ultrasonora risente fortemente della presenza di fessurazioni che attenuano di fatto la trasmissione del segnale.

Considerando che nel contesto trattato le attività sperimentali saranno condotte su parti strutturali danneggiate da effetti termici anche notevoli è opportuno sottolineare alcuni accorgimenti che consentano di ottenere anche sulle strutture danneggiate da incendio, valori omogenei e sicuramente affidabili, per valutare i parametri di resistenza. Quindi nelle sezioni seguenti verranno richiamate le tecniche NDT maggiormente utilizzate in caso di incendio sottolineando alcuni aspetti procedurali utili per l'esecuzione dei test in opera. E' bene precisare che non verrà trattato il metodo sclerometrico in quanto, essendo principalmente un test di natura superficiale perde notevolmente di efficacia quando si interviene su manufatti fortemente deteriorati.

## **2.1 INDAGINE VISIVA**

La metodologia principale di approccio alle verifiche in situ è senza dubbio l'indagine visiva. Questa indagine nel caso di danno da incendio viene condotta operativamente in più fasi. La prima attività di rilievo del danno è solitamente eseguita come attività ricognitiva per valutare l'esistenza di parti pericolanti, per definire la predisposizione di presidi a protezione di cose e persone e per documentare dall'intradosso i solai danneggiati acquisendo i diversi gradi di deterioramento. La seconda fase è invece con prerogative finalizzate alla acquisizione puntuale sulle membrature portanti del livello di danneggiamento, ossia perdita dei copriferri, parzializzazione delle sezioni resistenti con espulsione delle armature, rilievo delle alterazioni cromatiche. In questa seconda fase rientra naturalmente il rilievo delle armature messe in evidenza per la taratura dell'indagine magnetometrica.

L'indagine visiva su edifici danneggiati da incendio ha una rilevanza maggiore rispetto alla stessa attività eseguita in altri contesti, con essa, vedremo successivamente nella parte relativa alla proposta di approccio al problema, verrà eseguita la perimetrazione base delle aree, con riferimento alle diverse intensità di danno rilevate sui campi di solaio, offrendo al tecnico la disponibilità di accorpare superfici e membrature con omogeneo trattamento termico ricevuto. In pratica rappresenterà l'elemento guida del percorso di valutazione in situ.

## **2.2 INDAGINE MAGNETOMETRICA**

L'indagine magnetometrica anche nel contesto di edifici danneggiati da incendio costituisce la metodologia con la quale vengono identificate le barre, il loro diametro ed il copriferro nelle sezioni

resistenti in c.a. Ricordiamo che in base alla procedura di valutazione della sicurezza sugli edifici riportata nella NTC 08 è necessario ricostruire integralmente l'organismo resistente. Pertanto l'uso del pacometro potrà essere sia da supporto per una verifica a campione delle geometrie delle armature presenti e documentate su elaborati ufficiali sia rappresentare l'unico strumento per ricostruire integralmente quanto presente su tutto l'edificio in assenza di documentazione ufficiale. Naturalmente la rilevazione delle barre va tarata e verificata su alcune sezioni guida con l'ausilio della indagine visiva ottenuta rimuovendo il copriferro e misurando il reale diametro presente nonché il copriferro. La metodologia di rilievo NDT delle barre in caso di strutture danneggiate da incendio non evidenzia problematiche particolari se non nella preparazione delle superfici che in caso di incendio necessitano di procedure più intense per rimuovere quanto presente sulle zone aggredite dal fuoco.

### **2.3 INDAGINE ULTRASONORA**

L'indagine ultrasonora è largamente impiegata sui calcestruzzi per effettuare la misura dei tempi di propagazione degli impulsi nel materiale, solitamente i trasduttori possono essere disposti secondo tre diverse posizioni e le metodologie di lettura sono definite:

- Metodo di trasmissione diretta;
- Metodo di trasmissione semidiretta;
- Metodo di trasmissione indiretta.

Una volta effettuata la misura delle velocità è possibile elaborare opportunamente i dati per verificare l'esistenza di classi di omogeneità e con riferimento a valori a rottura provenienti dal carotaggio è possibile stabilire le classi di resistenza del materiale saggiato.

Il metodo ultrasonoro è senza dubbio un valido supporto per analizzare il calcestruzzo in opera, non risente eccessivamente dello stato di finitura della superficie della membratura da analizzare e nel caso si proceda con la metodologia diretta, consente di investigare, da superficie a superficie, tutto il materiale presente all'interno della sezione resistente. Questa prerogativa estremamente positiva nel caso di investigazione su materiali integri, offre lo spunto per qualche utile valutazione in riferimento a indagini eseguite su materiali danneggiati da incendio. Dall'analisi delle isoterme riportate per le sezioni esposte a carico da incendio, è evidente un trattamento termico diversificato, sia procedendo verso l'interno del materiale, sia variabile in superficie per particolari posizioni planimetriche. Con riferimento al trattamento termico è possibile affermare che le isoterme tracciate in effetti, indicano le parti di materiale a pari condizione di danneggiamento. Con questa prerogativa appare chiaro che l'indagine ultrasonora in opera debba essere condotta sulla singola membratura interessando materiale omogeneo e cioè con lo stesso livello di danneggiamento. Questo accorgimento potrà garantire l'acquisizione di dati paragonabili tra di loro ed escluderà di fatto l'ottenimento di velocità fortemente attenuate da difetti locali. Inoltre il trattamento di dati tra membrane diverse dovrà tener conto di uno stato di omogeneità che garantisca, allontanandosi dalla zona dove si è raggiunta la massima temperatura, l'accorpamento di

dati provenienti da membrature con lo stesso livello di esposizione e da volumi di calcestruzzo che hanno subito lo stesso danneggiamento. In definitiva l'uso della metodologia ultrasonora su elementi esposti a carico di incendio senza tener conto delle reali condizioni di danneggiamento degli elementi può condurre a forti scostamenti tra i reali valori di resistenza a rottura e quelli determinati sperimentalmente.

#### **2.4 CAROTAGGIO E PRELIEVO DI BARRE**

Il carotaggio è la metodologia di prova più affidabile per la determinazione delle resistenze dei calcestruzzi in opera, l'indagine attraverso il prelievo di campioni cilindrici e la successiva prova a compressione fornisce valori di resistenza ultima la quale, in funzione del livello di conoscenza raggiunto e con l'ausilio di opportuni fattori di confidenza, garantirà al tecnico i riferimenti numerici con i quali eseguire le valutazioni di sicurezza. Il carotaggio inoltre ricordiamo che è anche un buon veicolo per individuare i profili di carbonatazione presenti sulle sezioni resistenti e quindi per assicurare indirettamente un controllo sulle aspettative di vita degli acciai contenuti nelle sezioni resistenti. L'indagine con requisiti di semi distruttività è eseguita, come quasi tutte le tecniche sperimentali, nel rispetto di norme e procedure oramai consolidate e validate sul materiale integro, ossia privo di difetti e danneggiamenti, mentre nel caso di accertamento su un calcestruzzo che ha subito un trattamento termico è necessario attuare alcuni accorgimenti che precludano la possibilità di avere una disomogeneità dei dati e che consentano di prelevare campioni effettivamente rappresentativi dai quali ricavare valori a rottura affidabili. Il prelievo di un campione di materiale in opera di solito per strutture integre viene effettuato con degli accorgimenti che tendono ad avere lungo l'asse della carota materiale omogeneo quindi privo di nidi di ghiaia e senza soluzioni di continuità dovute ad inclusioni di porzioni di armatura. Tale azione dovrà essere naturalmente perseguita anche in presenza di strutture soggette a carico di incendio anzi, considerata la sicura condizione di danneggiamento delle membrature sarà opportuno verificare la buona rappresentatività ed omogeneità dei campioni. Un utile aiuto ad indirizzare le attività di prelievo possono scaturire dall'esame dei termogrammi precedentemente illustrati. Sempre con l'ipotesi che le differenze di temperatura siano indirettamente rappresentative di una mappatura del danno sulla sezione, è evidente che le direzioni di prelievo siano obbligatoriamente da disporre parallelamente alle isoterme e non perpendicolarmente ad esse, con la ulteriore prescrizione che tutta la carota estratta appartenga ad un insieme omogeneo di calcestruzzo trattato termicamente. Con questa attività di ubicazione, verifica e definizione della direzione di prelievo del materiale, si potrà garantire la omogeneità dei campioni estratti e il condizionamento della dispersione dei dati.

Per quanto attiene agli acciai, la metodologia utilizzata per valutarne la resistenza a trazione è basata sulla estrazione di campioni in opera e sulla esecuzione di una prova a trazione sulla porzione di barra prelevata. Per le strutture danneggiate da incendio il prelievo solitamente viene effettuato su membrature rappresentative di aree che presentano lo stesso livello di danneggiamento, avendo cura di

accoppiare prima la barra aggiuntiva e di rimuovere successivamente la barra di prelievo. In particolare per zone che non evidenziano barre espulse dalle sezioni resistenti il prelievo è effettuato sui pilastri in modo da produrre disturbo ad elementi resistenti con ridotto regime di sollecitazione flessionale. Mentre per zone che presentano copriferri compromessi e barre a vista, il prelievo verrà eseguito su queste ultime sicuramente più danneggiate di altre ancora collocate nel cls, in aggiunta ad un prelievo da eseguire sempre su membrature danneggiate, ma verticali e prevalentemente compresse.

### **3. UNA PROPOSTA DI APPROCCIO AL PROBLEMA**

Dopo aver esaminato le principali tecniche NDT di controllo da utilizzare in situ per valutare l'affidabilità dei materiali, ed aver preliminarmente illustrato gli effetti prodotti da un carico termico su calcestruzzi, acciai, strutture principali e secondarie con membratura portante in c.a. è possibile introdurre una proposta di approccio al problema della verifica di affidabilità di una opera soggetta ad un incendio. La proposta di protocollo procedurale riportata nella presente nota sarà incentrata principalmente sull'aspetto della valutazione sperimentale, sia meccanica che visiva mentre, saranno solo citate le fasi di calcolo e la valutazione numerica della risposta delle membrature portanti alle previste condizioni di carico da normativa, rimandando per eventuali approfondimenti a test specifici. Naturalmente il protocollo proposto in questa sede come semplice procedura, ed espresso come mera elencazione di attività da porre in essere, sarà soggetto a una successiva validazione di campo, che gli autori si ripropongono di pubblicare in una nuova nota con i necessari approfondimenti che in questa sede, per brevità, sono stati omessi.

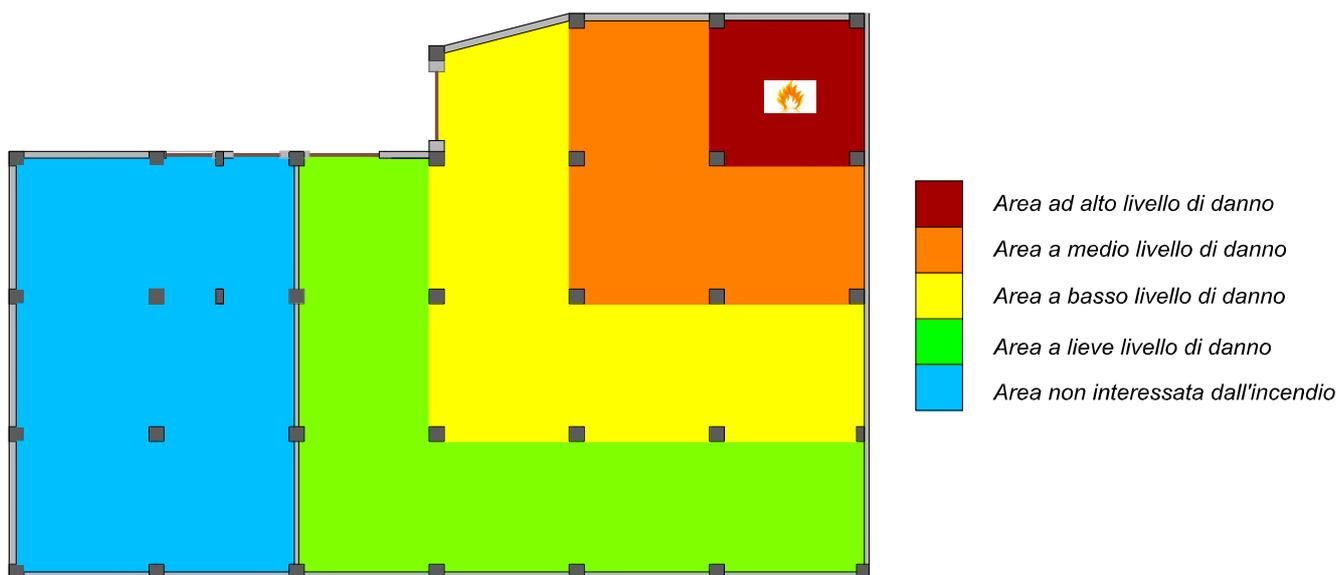
La procedura proposta è costituita da fasi di indagine in situ, da fasi valutative, da fasi di acquisizione dei parametri sperimentali dei materiali in opera e infine da fasi deduttive con le quali vengono individuati i parametri meccanici del calcestruzzo e dell'acciaio e definiti i livelli di affidabilità dell'opera nel rispetto delle condizioni di carico previste dalle NTC08. Il processo quindi si conclude con una valutazione di affidabilità della struttura principalmente per l'azione dei carichi verticali e nel caso in cui l'edificio sia ubicato in zona sismica anche con un confronto tra risorse richieste dalle condizioni sismiche da normativa e le risorse detenute dall'immobile, definendo ove necessario prescrizioni all'uso o richiedendo interventi di adeguamento o miglioramento sismico.

Utilizzando uno schema con un ordine cronologico delle attività, le fasi del protocollo consistono in:

1. Ricognizione sui luoghi per verificare preliminarmente la necessità di predisporre opere di presidio e di messa in sicurezza. Classificazione delle aree dell'immobile identificando ove presenti, eventuali giunti tecnici e circoscrivendo le aree interessate dall'incendio. Questa fase è molto importante in quanto, a volte, sono presenti zone integre con materiali identici a quelli interessati dall'incendio, pertanto è sicuramente facilitata l'azione comparativa con materiali

vergini, per valutare l'effettivo decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali danneggiati.

- Indagine visiva preliminare con classificazione delle aree dei solai interessati dall'incendio in relazione al livello di danno. In questa fase in base alle aree visionate è preferibile assumere quattro o cinque livelli di danneggiamento di riferimento per descrivere lo stato dei solai soggetti all'incendio. La classificazione delle singole aree sarà basata sulla entità delle variazioni geometriche subite dagli orizzontamenti, in base al grado di: disgregazione delle pignatte del solaio, della consistenza del copriferro dei travetti, dalla eventuale fuoriuscita delle barre dalla sede naturale, della perdita di planarità del solaio, e dalla consistenza dell'intonaco. In questo modo, l'intera area soggetta ad incendio, verrà divisa in zone, con una gradazione di intensità di danno. Questa mappatura restituirà di fatto la storia di propagazione dell'evento e classificherà le membrature portanti in base alla loro collocazione nelle zone danneggiate. Lo schema che otterremo a seguito di questa azione sarà simile a quello riportato nella figura seguente.



*Fig. 7 – Perimetrazione delle aree effettuata in base allo stato di danneggiamento dei solai*

- Sulla scorta della prima classificazione delle aree, dalla quale saranno evidenti le zone con maggiore danneggiamento rispetto a zone più periferiche e quindi più integre sarà possibile tracciare delle direttrici di indagine. Tali direzioni avranno l'utilità di individuare gruppi di membrature omogenee da porre in comparazione in modo da verificare l'effettiva attenuazione dell'impovertimento delle caratteristiche di resistenza dei materiali dalle zone di focolaio verso le aree più periferiche.

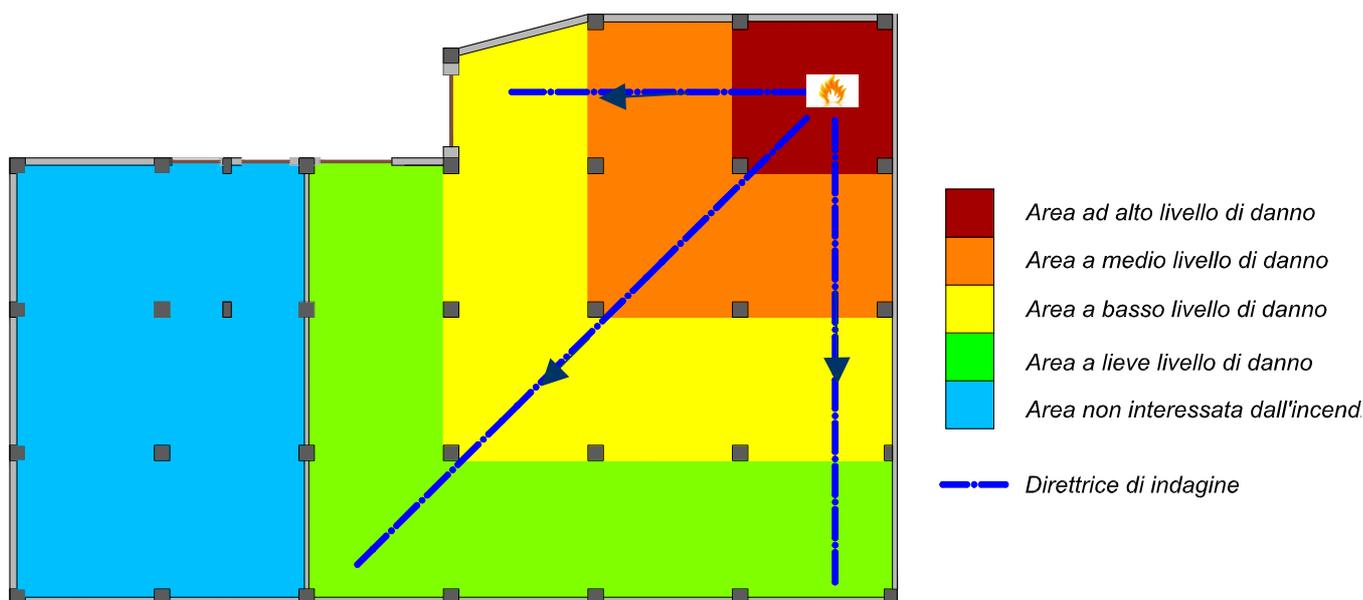


Fig. 8 – Definizione delle direttrici di indagine

Queste direttrici inoltre forniranno una guida per definire un primo orientamento dell'asse dei carotaggi e dei percorsi delle onde ultrasonore. Di solito gli assi vengono disposti ortogonalmente alle direttrici assunte, in quanto anche le isoterme sono normalmente disposte perpendicolarmente a queste linee ideali. Ovviamente, la definitiva posizione dell'asse per l'esecuzione dei carotaggi e per la trasmissione delle onde ultrasonore verrà assunta a seguito di una analisi di dettaglio effettuata sulla singola membratura in base alla effettiva distribuzione locale delle isoterme.

#### 4. Definizione di un piano di indagine

Con la disponibilità della zonazione basata sul livello di danneggiamento dei solai e di riflesso sulle membrature portanti, potrà essere redatto un piano di indagine utilizzando le tecniche NDT e includendo il prelievo di campioni di calcestruzzo e acciaio in modo da essere rappresentativi in numero per livello di danneggiamento di ogni zona. Operativamente nel piano di indagine vengono riportate due attività principali che però saranno eseguite in tempi diversi. La prima attività che viene svolta è quella relativa alle indagini NDT che di fatto costituisce il punto successivo del protocollo e solo successivamente si passerà al prelievo dei materiali ossia carote e barre di armatura. Tale procedura è giustificata dal fatto che notoriamente i controlli NDT sono utilizzati per validare accorpamenti omogenei tra membrature e quindi tra i materiali, che nel piano sono previsti esclusivamente sulla scorta di assunzioni tecniche ma che necessariamente dovranno essere suffragati da una validazione sperimentale in situ.

#### 5. Validazione del piano di indagine attraverso prove non distruttive per la verifica di fattibilità

Prima di rendere operativa l'attività sperimentale di prelievo dei campioni è necessaria per come già anticipato una validazione di quanto previsto nel piano di indagine attraverso una nuova attività ricognitiva e una attività di controllo basata principalmente su tecniche NDT per

verificare gli accorpamenti omogenei riportati nel piano di indagine. Molto semplicemente verranno assunti in opera parametri quali le velocità di transito sui calcestruzzi e verranno successivamente verificati gli accorpamenti omogenei riportati nel piano di indagine. Eseguita e completata questa fase si potrà passare ad eseguire i campionamenti dei materiali.

#### 6. Campagna sperimentale: Valutazione dei parametri meccanici dei materiali

Questa fase è costituita principalmente dalla classica attività di prelievo di carote, estrazione di barre ed infine esecuzione sui campioni estratti di prove a compressione e prove a trazione in laboratorio. Acquisiti i valori sperimentali a rottura ricavati sui campioni con l'ausilio dei fattori di confidenza verranno esplicitati i parametri di resistenza dei materiali danneggiati i quali potranno essere rappresentativi o di tutto il complesso o di parti dell'immobile in base al livello di danneggiamento registrato.

#### 7. Valutazione della sicurezza in opera per carichi verticali e per sisma

La disponibilità delle geometrie delle membrature resistenti, dei solai e la consistenza dei materiali in opera consentirà di attivare la procedura di verifica di sicurezza. Questa fase conclusiva del protocollo fornirà le informazioni circa la possibilità di continuare ad utilizzare l'immobile nello stato post incendio senza alcuna prescrizione o evidenzierà la esigenza di sgomberarlo o limitarne l'uso con particolari prescrizioni.

### CONCLUSIONI

La procedura proposta nella presente nota illustra una metodologia guida per la valutazione di sicurezza su edifici soggetti a carico d'incendio. Il protocollo procedurale sotto il profilo sperimentale utilizza le tecniche di controllo NDT le quali costituiscono un formidabile strumento di indagine per effettuare una verifica di omogeneità su membrature soggette allo stesso trattamento termico e per valutare le caratteristiche in situ dei materiali. Il protocollo, espresso sotto forma di un insieme di attività da svolgere in sequenza cronologica, è attualmente oggetto di validazione sul campo e i risultati di queste attività saranno con i necessari approfondimenti oggetto di una prossima nota tecnica.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Cartapati – “ *Le strutture di c.a. e c.a.p. e l'incendio. Parte prima: Inquadramento dei problemi di verifica*” – Giornale AICAP. 2002.
- [2] M. Li, C. Qian, W. Sun – “*Mechanical properties of high-strength concrete after fire*” - Cement and Concrete Research 34 (2004) 1001–1005.
- [3] R. Felicetti – “*Strumenti inediti per l'analisi del degrado nelle strutture in cemento armato*” - Estratto dagli atti del 17° Congresso C.T.E. Roma, 5-6-7-8 novembre 2008.
- [4] D.G. Favilla, G.C. Marano, F. Piccininni, F. Trentadue, G. Ninni – “*Analisi termica di solai in latero-cemento sottoposti a carico d'incendio*”. La Gazzetta dei Solai. Mensile di informazione tecnica sui solai in laterizio. Febbraio 2009, numero 54.