# VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STRUTTURALE DI UN EDIFICIO ESISTENTE IN C.A.

L. OMBRES<sup>(1)</sup>, F. LIRANGI<sup>(2)</sup>, M. ZAPPIA<sup>(3)</sup>, M. BRECCOLOTTI<sup>(4)</sup>, I. VENANZI<sup>(4)</sup>

- (1) Dipartimento di Strutture, Università degli Studi della Calabria (UNICAL), via P. Bucci, 87030 Arcavacata di Rende (CS).
- (2) Libero professionista.
- (3) Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Comando Provinciale di Perugia, 06100 Perugia.
- (4) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia, via G. Duranti 93, 06124 Perugia.

#### **SOMMARIO**

Viene presentata una metodologia per la determinazione della storia di temperatura di un incendio reale, basata sul metodo "a zone". Attraverso tale metodologia è stato possibile definire una procedura per la valutazione della resistenza al fuoco di alcuni elementi strutturali in cemento armato (pilastri e travi) di un edificio esistente, all'interno del quale, nel 1991, si verificò un incendio reale di vaste proporzioni (foto 1). I risultati ottenuti con tale metodologia sono stati successivamente confrontati con i risultati ricavati dall'applicazione di una storia Tempo-temperatura di tipo convenzionale (UNI 7678). Da tale confronto è stato possibile analizzare criticamente l'influenza del modello di incendio sulla misura della sicurezza.

# **1. INTRODUZIONE**

Il metodo di valutazione della resistenza al fuoco previsto nel principale documento legislativo italiano in materia di protezione al fuoco, la Circolare nº 91 del 1961 [1], è basato sull'esecuzione di prove sperimentali al forno su prototipi di dimensioni contenute, compatibili con quelle delle camere di prova.

Successivamente, nel 1989, in armonia con l'evoluzione della normativa internazionale, è stata emanata la norma UNI/CNVVF 9502 [2], aggiornata recentemente nel 2001, che prevede, in alternativa al metodo sperimentale, l'impiego di un metodo analitico di valutazione della resistenza al fuoco.

Entrambi i metodi, quello sperimentale e quello analitico, fanno uso di una curva convenzionale, valida per tutte le tipologie strutturali, che definisce l'andamento nel tempo della temperatura dell'aria durante l'incendio e che presenta un andamento crescente con legge monotona.

I metodi analitici adottano tale curva al fine di rendere congruenti le previsioni teoriche con quelle sperimentali, ma non presentano, evidentemente, limitazioni circa l'impiego di curve formulate in modo diverso. Essi si prestano pertanto ad essere impiegati, eventualmente con opportune varianti, anche per tener conto di storie di incendio più aderenti alla realtà.

Utilizzando questa possibilità, nella presente comunicazione viene analizzata l'influenza della modellazione dell'incendio sulla valutazione della sicurezza dei componenti strutturali di cemento armato di un edificio esistente a rischio di incendio.

# 2. MODELLAZIONE DEGLI INCENDI

# 2.1 Incendi convenzionali

L'attuale normativa italiana adotta un'unica legge prestabilita per rappresentare l'andamento temporale della temperatura di un compartimento in cui si sviluppa l'incendio e che, per questo motivo, è spesso detta incendio convenzionale. Tale legge, riportata nella norma UNI 7678 [3] (fig. 1) e conforme a quella contenuta nella norma ISO 834 [4], è descritta dalla relazione:

$$T - T_0 = 345 \log_{10}(8t + 1)$$
 [°C]

in cui:

- T è la temperatura dell'ambiente al tempo *t*, [°C];

- T<sub>0</sub> è la temperatura iniziale, generalmente pari a 20°C;

- t è il tempo di esposizione espresso in minuti.



Figura 1. Andamento della curva standard, da [3,4].

Tale curva ha il pregio di essere generica e quindi applicabile in ogni circostanza ed allo stesso tempo appare cautelativa, in quanto non tiene conto della diminuzione di temperatura che inevitabilmente si verifica, nel caso degli incendi reali, per esaurimento del combustibile o per insufficienza di ventilazione.

2.2 Incendi reali

L'andamento della curva tempo-temperatura di un incendio reale è alquanto diverso da quello dell'incendio convenzionale e può essere ottenuto studiando la corrispondente evoluzione dei fenomeni chimico-fisici che si verificano durante la combustione del materiale contenuto nel compartimento [5,6].

La determinazione di tale curva si basa sulla risoluzione di un sistema di equazioni di bilancio energetico e di massa che descrivono analiticamente i trasferimenti di calore e massa che interessano regioni diverse del compartimento in cui l'incendio ha origine.

La complessità del problema non consente, salvo casi molto semplici e di marginale interesse ai fini delle applicazioni pratiche, di utilizzare soluzioni in forma chiusa. E' indispensabile fare ricorso a procedure numeriche di analisi basate, nella maggior parte dei casi, su tecniche di discretizzazione. I modelli disponibili vengono usualmente classificati in tre categorie.

La più semplice da utilizzare è quella dei modelli parametrici, che utilizzano curve di andamento analitico prestabilito, ma dipendente dalle caratteristiche del compartimento e del materiale contenuto.

I modelli cosiddetti "a campo" sono di tipo bidimensionale o tridimensionale e suddividono lo spazio del compartimento in un numero molto elevato di celle o elementi. Tali modelli sono basati su codici di calcolo di fluidodinamica computazionale e richiedono un impegno di calcolo generalmente molto rilevante.

I modelli cosiddetti "a zone", di complessità intermedia tra i due precedenti, sono di tipo monodimensionale e suddividono il compartimento in un numero ridotto di regioni, o "zone", con caratteristiche approssimativamente uniformi, che interagiscono fra di loro con scambi di massa ed energia.

I modelli a zone [7] prevedono la risoluzione, per ogni regione individuata, di un sistema di equazioni differenziali che sono ottenute imponendo la conservazione della massa (equazione di continuità) e la conservazione dell'energia (primo principio della termodinamica), assumendo come valide le leggi dei gas ideali e definendo densità ed energia interna.

Le zone sono delimitate da un certo numero di regioni adiacenti (in genere si considerano solo due zone, una superiore ed una inferiore, rispetto alla superficie di separazione dei gas caldi dai gas freddi) e da una certa porzione delle pareti che delimitano il compartimento.

Comunemente vengono presi in considerazione due strati, ma esistono anche modelli a più strati, come quello che considera una terza zona costituita da gas caldi che si accumulano al di sotto del soffitto del compartimento e che non è interessata dai fenomeni convettivi (strato limite).

La risoluzione del sistema di equazioni differenziali che governano il problema può essere effettuata per mezzo di ben noti e collaudati codici di calcolo automatico, come, ad esempio, il CFAST contenuto nel pacchetto di software HAZARD I distribuito dal NIST, [8], che utilizza un modello a due strati.

# **3. DESCRIZIONE**

# 3.1 Incendio reale

Nella notte tra il 23 e il 24/11/1991, un incendio di vaste proporzioni si è sviluppato nei locali posti al piano seminterrati e al piano terra di un edificio sito in Rende (provincia di Cosenza). Tali locali venivano utilizzati per il deposito e la vendita di tessuti e capi di abbigliamento (foto 1). I piani soprastanti erano adibiti a civile abitazione.

Dalle analisi effettuate successivamente all'evento, si è potuto ricostruire le fasi iniziali ed il successivo sviluppo dell'incendio per come segue. Verosimilmente è stata introdotta benzina, in quantitativo limitato, nell'intercapedine posta nella zona nord-ovest del seminterrato (fig. 2), attraverso la griglia metallica a luce aperta esistente lungo il perimetro del seminterrato stesso.

Attraverso un sistema di innesco rudimentale (miccia a lenta combustione) il liquido infiammabile si è incendiato.

Successivamente, l'incendio si è propagato in tutto il piano seminterrato mantenendosi comunque in una situazione di combustione lenta, a causa di un ridotto afflusso di ossigeno

dall'esterno (controllato dalla ventilazione). L'apertura di porte e finestre, necessaria per l'intervento dei soccorritori, provocava lo sviluppo dell'incendio generalizzato ed il successivo passaggio dello stesso sotto il controllo dei materiali combustibili presenti all'interno dei locali.

La mancanza di compartimentazione, tra il piano terra e il piano seminterrato ha consentito lo sviluppo dell'incendio anche nei locali posti al piano terra (foto 2).

Il foro nel solaio in c.a. per il collegamento dei due piani ha funzionato come un vero camino così come dimostrano i gravissimi danni riscontrati sul solaio in latero-cemento soprastante



Foto 1: Edificio colpito dall'incendio.



Figura 2. Piano seminterrato dell'edificio: griglia di areazione.

l'apertura e sulla scala in acciaio. La scala in acciaio è stata praticamente distrutta e tutta la zona circostante il vano di comunicazione e passaggio è stata attraversata da fiamme intense e forti flussi di calore.

L'enorme quantità di materiale combustibile presente nei locali, ha alimentato l'incendio, e nei locali si sono raggiunte temperature molto alte, superiori ai 1000 °C. Le stesse temperature hanno agito verosimilmente per periodi di tempo sufficientemente lunghi, tali cioè da determinare seri danni agli elementi componenti la struttura edilizia fino a provocarne le precarie seri danno capaci di compromettere le condizioni di stabilità dell'intero fabbricato.

# 3.2 Edificio

Il fabbricato danneggiato dall'incendio, realizzato verso la metà degli anni '70, è composto da sette piani fuori terra più un piano seminterrato ed un piano sottotetto (foto 1), ed è ubicato in un territorio classificato in zona sismica di II categoria.

In pianta ha una configurazione ad "L" (fig. 2), presenta un asse di simmetria geometrica inclinato di 45° rispetto all'orizzontale e passante per lo spigolo interno della "L" con i prospetti principali che si sviluppano lungo le due arterie urbane.

La superficie lorda dei primi due livelli, (piano seminterrato e piano terra), è di circa 800 m<sup>2</sup> ciascuno, mentre la superficie degli altri piani fuori terra è circa 560 m<sup>2</sup>.

Il fabbricato è stato realizzato con strutture portanti in calcestruzzo armato gettate in opera e progettate in conformità con le norme ed i regolamenti vigenti all'epoca della costruzione.

Il numero dei pilastri è pari a 57 per i primi due livelli e si riduce a 50 per quelli superiori.

Il sistema strutturale è quello classico di una struttura intelaiata, con travi e pilastri in calcestruzzo armato e solai in laterocemento, ad eccezione del primo solaio in calcestruzzo armato avente altezza circa 20 cm.

#### 3.3 Danni

Le elevate temperature raggiunte dagli elementi strutturali costituenti e delimitanti i locali, all'interno dei quali si ebbe a verificare l'incendio, hanno provocato evidenti lesioni trasversali, distacchi superficiali, sgretolamenti e sfaldamenti superficiali, danni tipicamente attribuibili alla prolungata esposizione del calcestruzzo ad elevate temperature.

Per quanto riguarda le armature si è potuto constatare come, per effetto dell'espulsione del copriferro (spalling), le barre sono state lambite direttamente dalle fiamme pertanto, in aggiunta alle deformazioni plastiche, si sono verificate perdita di aderenza e snervamenti localizzati, e in alcuni casi si è arrivati alla rottura trasversale delle barre. Le strutture maggiormente danneggiate sono risultate quelle del piano seminterrato, danni di minore entità sono stati riscontrati in alcuni elementi strutturali del piano terra.



Figura 3. Deformazione solaio I° livello.

#### 3.3.1 Solai, pilastri e travi

Il solaio soprastante il piano seminterrato è costituito da una piastra in calcestruzzo armato, dello spessore di circa 20 cm, poggiante su travi in parte emergenti ed in parte a spessore.

Il notevole incremento della temperatura e la consistente capacità termica dello stesso solaio, lambito inferiormente dalle fiamme, ha prodotto un elevato effetto dilatante (fig. 3) che, conseguentemente, ha causato la rottura di quasi tutti i pilastri del piano in questione, in quanto sollecitati da elevatissimi sforzi di taglio trasversali; altresì, tale dilatazione ha causato la rottura pressoché completa del primo impalcato. Particolarmente diffuse sono anche le lesioni nel solaio del II° livello (foto 3) e in tutte le travi (foto 4).



Foto 3. Solaio II° livello.



Alcune travi del piano seminterrato apparivano eccessivamente deformate e senza copriferro (foto 5) mentre le travi del I° e del II° livello non hanno subito danni molto consistenti.

I danni, riassumendo, sono stati provocati da una deformazione principale, verificatasi per la dilatazione termica della piastra in c.a. costituente il primo solaio (fig. 4); tale piastra, come detto precedentemente, si è dilatata verso l'esterno in tutte le direzioni, trascinando la testa dei pilastri e sottoponendo ad azioni di trazione le travi; Verosimilmente la piastra ha anche subito deformazioni nel piano verticale.

Pertanto, tutti i pilastri sono stati interessati da lesioni trasversali, longitudinali ed oblique e presentano uno spalling molto consistente tale da provocare l'espulsione violenta del copriferro con conseguente cedimento della staffatura. In alcuni pilastri, le fratture sono particolarmente evidenti (foto 5) e le barre di armatura si sono deformati fino a fuoriuscire dal calcestruzzo in quanto esposte direttamente all'azione del fuoco a causa dell'espulsione del copriferro (SPALLING); in un pilastro (foto 5), le eccessive deformazioni plastiche si è riscontrato il tranciamento dei ferri di armatura.

Un'altra tipologia di danni è attribuibile alle azioni di rapido raffreddamento degli elementi colpiti dai getti d'acqua, infatti, i pilastri maggiormente danneggiati si trovano in prossimità degli ingressi al seminterrato, e vicino ai punti del perimetro sud - est dai quali è stata eseguita l'azione di spegnimento da parte dei Vigili del Fuoco.

A seguito del puntuale rilievo dei danneggiamenti causati dall'incendio è stato avviato uno studio sistematico e comparato delle lesioni teso a dimostrare quanto sopra accennato nei riguardi del comportamento al fuoco della piastra in cemento armato costituente il solaio del primo livello.



Foto 5. Danni riscontrati nei pilastri.

# 4. ANALISI DELLA RESISTENZA AL FUOCO DI ALCUNI COMPONENTI STRUTTURALI IN C.A. DELL'EDIFICIO IN ESAME

#### 4.1 Metodo analitico

La verifica di sicurezza degli elementi strutturali in c.a. è stata effettuata per via analitica con il metodo della sezione equivalente previsto dalla UNI/CNVVF 9502.

<u>metodo della sezione equivalente</u>: nota che sia la mappatura termica all'interno dell'elemento le aree resistenti del conglomerato e dell'acciaio vengono ridotte puntualmente mediante i fattori di riduzione  $k_c(T)$  e  $k_s(T)$  o  $k_b(T)$  o  $k_p(T)$  funzione del valore della temperatura T. Definita così la sezione equivalente, le verifiche allo stato limite ultimo possono essere effettuate sulla sezione ridotta con gli usuali metodi della scienza delle costruzioni senza applicare il coefficiente riduttivo per carichi di lunga durata. Questo metodo, che può essere considerato esatto, in quanto permette di tenere conto dell'eventuale variazione del braccio delle forze interne, può essere suddiviso in fasi successive, costituite dalla modellazione geometrica della sezione trasversale del componente considerato, dall'analisi del campo termico e dalla costruzione del corrispondente dominio di interazione M-N, che vengono descritte in dettaglio nel seguito.

# 4.2 Modellazione geometrica

La sezione dell'elemento esposto all'incendio viene preliminarmente suddivisa in elementi rettangolari o triangolari di dimensioni contenute e quindi tali da poter considerare la temperatura costante al loro interno. Tale suddivisione deve essere realizzata in maniera tale da poter attribuire con esattezza proprietà termiche e meccaniche differenti ai diversi materiali presenti all'interno della sezione (calcestruzzo, laterizio, acciaio...). Qualora all'interno della sezione da analizzare siano presenti dei vuoti questi possono essere modellati sia considerando la superficie di separazione come superficie esterna dell'elemento sia modellando anche i vuoti con elementi rettangolari o triangolari. La suddivisione in elementi della sezione deve inoltre essere tale da far coincidere, per quanto possibile, i baricentri delle armature metalliche con i nodi del modello di calcolo.

#### 4.3 Analisi del campo termico

La determinazione del campo termico all'interno della sezione durante l'esposizione all'incendio può essere effettuata risolvendo l'equazione di propagazione del calore di Fourier mediante la tecnica degli elementi finiti. A tale scopo è necessario definire le proprietà termiche dei materiali, desumendole da prove

sperimentali mirate, oppure facendo riferimento ad indicazioni bibliografiche specifiche o a normative tecniche. Ad esempio la UNI/CNVVF 9502 fornisce le leggi di variazione con la temperatura T della conducibilità termica  $\lambda_c(T)$ , del calore specifico  $C_c(T)$  e della massa volumica  $\rho_c(T)$  del calcestruzzo, realizzato sia con inerti calcarei che con inerti silicei. Utili indicazioni sono anche contenute negli Eurocodici 2 e 4. Occorre poi precisare le condizioni al contorno, espresse sotto forma di storie temporali della temperatura dell'aria che lambisce le superfici esposte al fuoco e di quantità di calore scambiata dall'elemento con l'ambiente esterno.

Se è possibile supporre che la temperatura all'interno del componente considerato sia uguale in tutte le sue sezioni trasversali, il problema può essere studiato in campo bidimensionale, con evidenti vantaggi in termini di rapidità di calcolo. Al termine di questa parte del procedimento della analisi termica è nota, istante per istante, la temperatura di ogni elemento utilizzato per la discretizzazione.

# 4.4 Costruzione dei domini di interazione Mu- Nu

La capacità di prestazione delle sezioni di cemento armato esposte al fuoco è espressa dal diagramma di interazione tra momento ultimo e sforzo assiale ultimo, proprio come nel caso delle sezioni di cemento armato fredde. Nel caso dell'incendio l'unica variante è rappresentata dal fatto che il dominio d'interazione ha un carattere evolutivo nel tempo, in quanto il tempo di esposizione all'incendio determina variazioni, in senso peggiorativo, della resistenza dei materiali.

Noto l'andamento della temperatura all'interno della sezione ai vari istanti prefissati (ad esempio 30, 60, 90, 120 minuti), per ciascuno di essi, il dominio di resistenza  $M_u - N_u$  viene costruito per punti, applicando la metodologia seguente.

La sezione trasversale viene preliminarmente discretizzata in regioni di dimensioni contenute, normalmente le stesse già utilizzate al momento della risoluzione del problema termico per elementi finiti (fig. 4).

Ciascun punto ( $M_{ui}$ , $N_{ui}$ ) della frontiera del dominio di resistenza viene ottenuto assegnando alla sezione trasversale considerata un diagramma di deformazioni unitarie rappresentativo di una condizione di rottura (schiacciamento del calcestruzzo o snervamento dell'acciaio), dedotto dall'insieme di tutti quelli possibili (fig. 5).

A ciascun elemento  $K_c$  del modello di calcolo ed a ciascuna barra d'armatura  $K_s$  può essere così associato un valore specifico di deformazione unitaria  $\varepsilon_{kc}$  ed  $\varepsilon_{ks}$ .

Sulla base della conoscenza del valore della temperatura di ciascun elemento, determinata mediante l'analisi termica precedentemente svolta, è possibile così associare a ciascuno di essi un legame costitutivo  $\sigma$ - $\epsilon$  "personalizzato" che tiene conto del degrado della resistenza meccanica dovuto alla temperatura raggiunta localmente. In tal modo alle deformazioni  $\epsilon_{kc}$  ed  $\epsilon_{ks}$  si possono far corrispondere per il calcestruzzo la tensione  $\sigma_{kc}$  e per l'acciaio quella  $\sigma_{ks}$ .

Il valore dello sforzo normale ultimo  $N_{ui}$  e del momento ultimo  $M_{ui}$ , può essere determinato mediante integrazione numerica, con riferimento al baricentro della sezione nel I stadio:



Figura 4. Discretizzazione della sezione.



Figura 5. Insieme dei diagrammi di deformazioni unitarie rappresentativi di condizioni di rottura.

$$N_{i} = \sum_{k=1}^{N_{c}} \sigma_{kc} \cdot A_{kc} + \sum_{k=1}^{N_{s}} \sigma_{ks} \cdot A_{ks}$$

$$M_{i} = \sum_{k=1}^{N_{c}} \sigma_{kc} \cdot A_{kc} \cdot (y - y_{g}) + \sum_{k=1}^{N_{s}} \sigma_{ks} \cdot A_{ks} \cdot (y - y_{g})$$
(2)

Affinché la verifica di sicurezza risulti soddisfatta, il punto rappresentativo della domanda di prestazione ultima alla sezione  $(M_d, N_d)$ , determinato mediante opportuna combinazione delle sollecitazioni caratteristiche, tenendo conto degli appropriati coefficienti parziali di sicurezza e di combinazione, deve cadere all'interno della frontiera del dominio di interazione.

# 5. APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI ANALISI ALL'EDIFICIO IN ESAME

5.1 Modellazione numerica dell'incendio

Il modello a zone perfezionato descritto in precedenza è stato utilizzato per la simulazione di un incendio all'interno dell'edificio esistente in c.a. precedentemente descritto.

La simulazione dell'incendio è stata condotta con la procedura precedentemente descritta, utilizzando il codice di calcolo CFAST.

Il compartimento è stato preliminarmente suddiviso in sette sotto-compartimenti, evidenziati in fig. 7. Il carico di incendio reale, stimato sulla base del materiale effettivamente presente nei locali, è risultato pari a 112 Kg/mq di l.p.s. per il piano seminterrato, e 73 Kg/mq di l.p.s. per il piano terra. I valori dei carichi d'incendio così determinati sono riportati in tab. 1.



Fissato quindi il sotto-compartimento in cui ha origine l'incendio (n° 2), è stato ipotizzato un metodo di propagazione agli altri sotto-compartimenti dipendente dal tempo e dalla temperatura di autoaccensione dei materiali.

Pertanto, in successione avviene la propagazione ai sotto-compartimenti n. 1, 3, 4, 5, 6 e 7 secondo lo schema riportato in fig. 6.

Le curve tempo-temperatura così ottenute sono riportate nelle fig. 7 e 8, nelle quali, è indicata, per raffronto, anche la curva tempo-temperatura dell'incendio convenzionale UNI 7678. E' possibile notare come le curve dell'incendio reale presentino una fase iniziale in cui si ha un rapido incremento della temperatura cui segue in genere una fase decrescente.



Figura 7. Simulazione dell'incendio reale, temperature nel sotto-compartimento 2.

Per il sotto-compartimento n.2, la temperatura massima, pari a circa 700 °C, è raggiunta in appena 500 s dall'inizio dell'incendio. Successivamente raggiunge 1100 °C dopo 130 minuti, per poi diminuire fino ai valori di temperatura ambiente.

È evidente come la curva di incendio reale del compartimento n° 2, comporti il raggiungimento di temperature elevate almeno quanto quelle raggiunte dalla curva UNI 7678 (fig. 7).

5.2 Analisi della sicurezza di alcuni componenti strutturali dell'edificio in esame

Per eseguire le verifiche di resistenza (a caldo) sono stati scelti alcuni elementi strutturali in c.a., presenti nel piano seminterrato dell'edificio in esame.

Per il pilastro interno n°43 contenuto nel sotto-compartimento n° 2, per il pilastro di bordo n° 38 contenuto nel sotto-compartimento n°5 e per la trave emergente n° 34-42 contenuta nel sotto-compartimento n° 2, sono stati determinati i domini di resistenza  $M_u$  -  $N_u$ , seguendo la procedura descritta al paragrafo 3. L'evoluzione temporale dei domini è stata studiata utilizzando, come storia temporale, sia quella fornita dalla curva standard UNI7678, sia quella determinata simulando l'incendio reale e prendendo in considerazione i risultati relativi allo strato dei gas caldi del sotto-compartimento n° 2 e del sotto-compartimento n° 5.

Dagli elaborati progettuali esistenti ed utilizzati per la costruzione dell'edificio è stato possibile ricavare le armature presenti in tali elementi strutturali (vedi figg. 9, 10 e 11) e le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati (acciaio FeB38k e calcestruzzo Rck 250 Kg/cm<sup>2</sup>). Le analisi sono state estese fino ad un tempo di esposizione pari a 120'.

Con riferimento all'incendio standard, nelle figure 12, 13 e 14 sono riportati, sotto forma di mappature termiche, i risultati dell'analisi del campo termico a t = 30'.



Figura 9. Sezione del pilastro nº 38-40 x 40 cm.



Figura 11. Sezione della trave n° 34-42 - 40 x 60 cm.



Figura 10. Sezione del pilastro nº 43-55 x 40 cm.



Figura 12. Pilastro n°38 – Mappatura termica a t=30 min con incendio convenzionale



Figura 13. Pilastro n°43 – Mappatura termica a t=30 min con incendio convenzionale



Figura 14. Trave  $n^{\circ}34 - 42$  – Mappatura termica a T=30 min con incendio convenzionale.

I diagrammi di interazione, calcolati ogni 30 minuti fino a t = 120', sono riportati in forma grafica nelle figg. 15, 16 e 17. Le successive figure 18, 19 e 20 riportano i risultati delle analoghe elaborazioni, eseguite però utilizzando i risultati dell'incendio simulato per via numerica.



Figura 15. Pilastro n° 38: dominio di resistenza  $M_u - N_u$  con incendio convenzionale.



Figura 16. Pilastro n° 43: dominio di resistenza Mu - Nu con incendio convenzionale.



Figura 17. Trave n° 34-42: dominio di resistenza Mu - Nu con incendio convenzionale.



Figura 19. Pilastro n° 43: dominio di resistenza Mu - Nu con incendio reale.



Figura 18. Pilastro n° 38: dominio di resistenza Mu – Nu con incendio reale.



Figura 20. Trave n° 34-42: dominio di resistenza Mu – Nu con incendio reale.

# 7. CONCLUSIONI

Con la procedura proposta è stato possibile tener conto della propagazione dell'incendio attraverso ambienti contigui dello stesso compartimento. Per ogni compartimento è stata determinata una propria curva tempo-temperatura, la quale presenta in generale un andamento decrescente dopo il suo picco massimo, molto diversa da quella convenzionale prevista dalla norma UNI 7678 ed utilizzata tanto per lo svolgimento delle prove al forno che per le verifiche analitiche condotte secondo la UNI 9502.

La procedura, applicata al caso concreto dell'edificio in questione, ci ha consentito di effettuare il confronto dei risultati ottenuti dimostrando che, nel sotto-compartimento n°2, in cui sono presenti sia il pilastro centrale n° 43 che la trave emergente n° 34-42, la curva tempo-temperatura dell'incendio reale (fig. 7) è molto simile a quella dell'incendio convenzionale (UNI 7678), fino all'istante pari a t=130'.

Ciò ha comportato che anche i domini di interazione M-N ottenuti con l'incendio reale presentano ampiezza quasi uguale ai domini ottenuti con l'incendio convenzionale (figg. 21,22 e 23).

Tale risultato va peraltro considerato con prudenza, in quanto l'impiego dell'incendio reale al posto di quello convenzionale deve essere accompagnato da un corrispondente perfezionamento del modello analitico indicato dalla UNI 9502, affinché esso tenga conto anche delle inevitabili imperfezioni delle strutture e della possibilità di accadimento del fenomeno dell'espulsione dei copriferri alle elevate temperature.

In generale si può concludere, evidenziando che, nel caso della tipologia strutturale considerata, dello scenario d'incendio che realmente si è verificato nella struttura e della simulazione d'incendio eseguita, per gli elementi strutturali presenti nei sottocompartimenti, l'incendio convenzionale utilizzato dalla normativa italiana per la protezione contro il fuoco risulta essere cautelativo in quanto, sovrastima le temperature che

effettivamente vengono raggiunte e i domini d'interazione M-N ad esso corrispondenti sono molto più stretti rispetto a quelli ottenuti con l'incendio reale. Per rendere minima tale differenza è necessario operare una definizione sovrastimata del carico d'incendio.



Figura 21. Pilastro n° 43: confronto domini di resistenza  $M_u - N_u$ .



Figura 23. Pilastro n° 38: confronto domini di resistenza  $M_u - N_u$ .



Figura 22. Trave  $n^{\circ}$  34-42: confronto domini di resistenza  $M_u - N_u$ .

# BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero dell'Interno. Circolare n° 91 del 14 settembre 1961, "Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati e strutture in acciaio destinati ad uso civile".
- [2] UNI/CNVVF 9502, "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso" (2001).
- [3] UNI 7678, "Elementi costruttivi. Prove di resistenza al fuoco" (Maggio 1977).
- [4] ISO 834, "Fire Resistance Tests Element of Building Construction", International Organization Precasting Plant and Technology.
- [5] R. Friedman, An International survey of computer models for fire and smoke, *J. Of Fire Prot. Engr.* 4 (3), pp. 81-92 (1992).
- [6] A.L. Materazzi, S. Rossi, M. Zappia, Sicurezza strutturale e andamento degli incendi reali, *Antincendio* (Aprile 2000).
- [7] J. Quintiere, Fundamentals of enclosure Fire Zone Model, J. Of Fire Prot. Engr. (1989).
- [8] R.W. Bukowski, R.D. Peacock, W.W. Jones, C.L. Forney, HAZARD I: Fire Hazard Assessment Method, *NIST Handbook n*<sup>o</sup> 146. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (1991).