

INFLUENZA DELLA MODELLAZIONE DELL'INCENDIO SULLA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA AL FUOCO DI STRUTTURE DI C.A.

A.L. MATERAZZI⁽¹⁾, M. ZAPPIA⁽²⁾, M. BRECCOLOTTI⁽¹⁾

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Perugia, via G. Duranti 93, 06124 Perugia.

(2) Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Comando Provinciale di Perugia, 06100 Perugia.

SOMMARIO

Viene presentata una metodologia per la determinazione della storia di temperatura di un incendio reale, basata sui metodi "a zone". I risultati ottenuti vengono utilizzati per valutare la resistenza al fuoco di componenti di cemento armato. Il confronto con i risultati ottenuti applicando l'incendio convenzionale definito dalla UNI7678 consente di discutere 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 n° 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.

Nel caso delle prove al forno l'impiego di una curva di questo tipo è legato agli aspetti tecnologici della realizzazione dell'incendio nelle camere di prova, nelle quali risulta complicato, se non impossibile, riprodurre storie tempo-temperatura che presentino rami cadenti dopo il picco.

Viceversa 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 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] (vedi fig. 1) e conforme a quella contenuta nella norma ISO 834 [4], è descritta dalla relazione:

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

in cui:

- T è la temperatura dell'ambiente al tempo t , [°C];
- T_0 è la temperatura iniziale, generalmente pari a 20°C;
- t è il tempo di esposizione espresso in minuti.

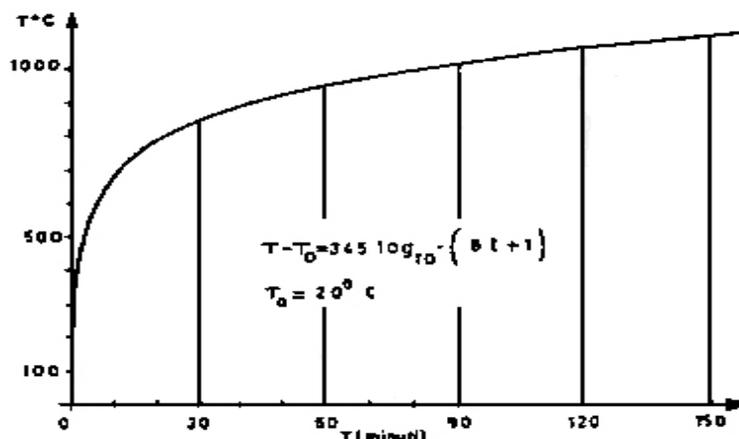


Figura 1. Andamento della curva standard, da [3,4].

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.

2.3 Un modello a zone perfezionato

La modellazione a zone è sicuramente uno strumento importante per la determinazione di una curva tempo-temperatura realistica con la quale eseguire le verifiche di sicurezza al fuoco. Inoltre, la possibilità di disporre di procedure automatiche di risoluzione (il già citato codice CFAST), consente la sua semplice e veloce applicazione. In alcuni casi, però, tale software risulta inadeguato a descrivere il reale evolversi dell'incendio in un edificio. Infatti, se è pur possibile modellare la suddivisione in compartimenti del fabbricato, nonché le caratteristiche del materiale contenuto, non si è in grado di simulare la dinamica dell'incendio che si origina in un compartimento e che poi si propaga a quelli attigui, alimentandosi ulteriormente per la combustione dei materiali in essi presenti. Il CFAST, come altri modelli a zone, ipotizza infatti che l'incendio rimanga confinato all'interno del compartimento in cui ha origine, trascurando questo rilevante aspetto.

Per superare questo limite è possibile operare come segue. Una volta modellata la geometria del compartimento e definiti appropriatamente i materiali combustibili presenti, si ipotizza la localizzazione iniziale dell'incendio. Le pareti che delimitano il compartimento vengono modellate come aperture che sono inizialmente chiuse, ma che possono aprirsi ad un tempo prefissato. Così facendo, si ipotizza che le pareti del compartimento incendiato mantengano stabilità e tenuta per il tempo richiesto dalle norme, dopo di che si assume che esse cedano completamente consentendo alla fiamma di propagarsi liberamente.

Qualora le pareti contengano delle aperture effettive, quali ad esempio porte o finestre, in aggiunta al meccanismo sopra descritto, si fa avvenire comunque la propagazione del calore attraverso le aperture parziali presenti fin dall'inizio. La temperatura nei locali contigui viene controllata con continuità attivando l'accensione del combustibile presente al raggiungimento della temperatura di ignizione e proseguendo quindi l'analisi su un compartimento allargato in cui sono presenti altri focolai. È possibile proseguire in tal modo simulando la propagazione dell'incendio all'interno dell'edificio fin quando esso si estinguerà per esaurimento del combustibile o del comburente.

3. ANALISI DELLA SICUREZZA DEI COMPONENTI DI C.A.

La verifica di sicurezza degli elementi strutturali in c.a. può essere effettuata per via analitica con i metodi previsti dalla UNI/CNVVF 9502. Essa prevede tre metodi di calcolo:

metodo tabellare: la verifica analitica di resistenza al fuoco può essere omessa qualora la distanza tra asse delle barre o trefoli di armatura dalla superficie esposta al fuoco sia superiore ai valori tabellari riportati nella normativa stessa;

metodo del fattore di riduzione medio: a partire dalla conoscenza della mappatura termica dell'elemento, sotto l'ipotesi che il braccio delle forze interne non cambi per la riduzione della zona compressa, vengono calcolati dei fattori di riduzione medi k_{ms} , k_{mb} , k_{mp} e k_{mc} relativi rispettivamente ad acciaio ordinario, acciaio in barre, acciaio per precompressione e calcestruzzo da confrontare poi con un fattore di riduzione critico funzione del fattore di riduzione del coefficiente di sicurezza per i carichi presenti in caso di incendio η_{fi} , della riduzione del coefficiente di sicurezza dei materiali ($\gamma_{M,fi}/\gamma_M$) e della sollecitazione dei materiali (conglomerato, acciaio) nella verifica a freddo;

metodo della sezione equivalente: 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.

3.1 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.

3.2 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.

3.3 Costruzione dei domini di interazione $M_u - N_u$

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.

Nota 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. 2).

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. 3).

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 ϵ_{kc} ed ϵ_{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 ϵ_{kc} ed ϵ_{ks} si possono far corrispondere per il calcestruzzo la tensione σ_{kc} e per l'acciaio quella σ_{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:

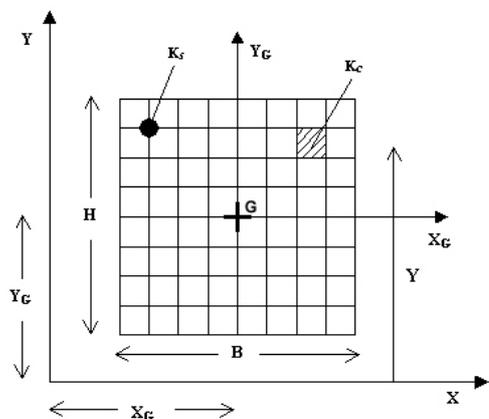


Figura 2. Discretizzazione della sezione.

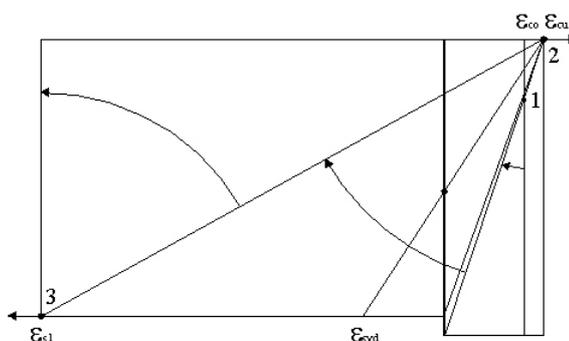


Figura 3. Insieme dei diagrammi di deformazioni unitarie rappresentativi di condizioni di rottura.

$$N_i = \sum_{k=1}^{N_c} \sigma_{kc} \cdot A_{kc} + \sum_{k=1}^{N_s} \sigma_{ks} \cdot A_{ks}$$

$$M_i = \sum_{k=1}^{N_c} \sigma_{kc} \cdot A_{kc} \cdot (y - y_g) + \sum_{k=1}^{N_s} \sigma_{ks} \cdot A_{ks} \cdot (y - y_g) \quad (2)$$

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.

4. ESEMPIO NUMERICO

4.1 Descrizione del fabbricato

Il modello a zone perfezionato descritto in precedenza è stato utilizzato per la simulazione di un incendio all'interno di un complesso ospedaliero di recente costruzione, l'Ospedale Comprensoriale di Città di Castello, in provincia di Perugia, costruito nel 1992.

L'edificio è caratterizzato da uno schema architettonico "a piastra e torre" in cui la parte a torre, che ospita le camere per le degenze, è composta di sei piani fuori terra, mentre quella a piastra è costituita da due piani fuori terra. La struttura portante è costituita da telai di c.a. con pareti di irrigidimento, sempre di c.a., che resistono alle azioni sismiche orizzontali e sono disposte in corrispondenza dei vani scale.

Da tale costruzione è stata estratta una porzione di fabbricato avente dimensioni in pianta di 25.8 x 30.8 m (circa 795 m² di superficie) corrispondente ad un compartimento, al cui interno sono presenti sale visite ed ambulatori disposti intorno ad una sala di attesa centrale (fig. 4).

Le pareti che delimitano il compartimento sono realizzate con elementi aventi caratteristiche di resistenza al fuoco pari ad almeno REI 120. Analogamente la comunicazione con i compartimenti adiacenti è garantita da porte tagliafuoco REI 120 dotate di dispositivo automatico di chiusura attivato da un sistema di rilevazione dei fumi.

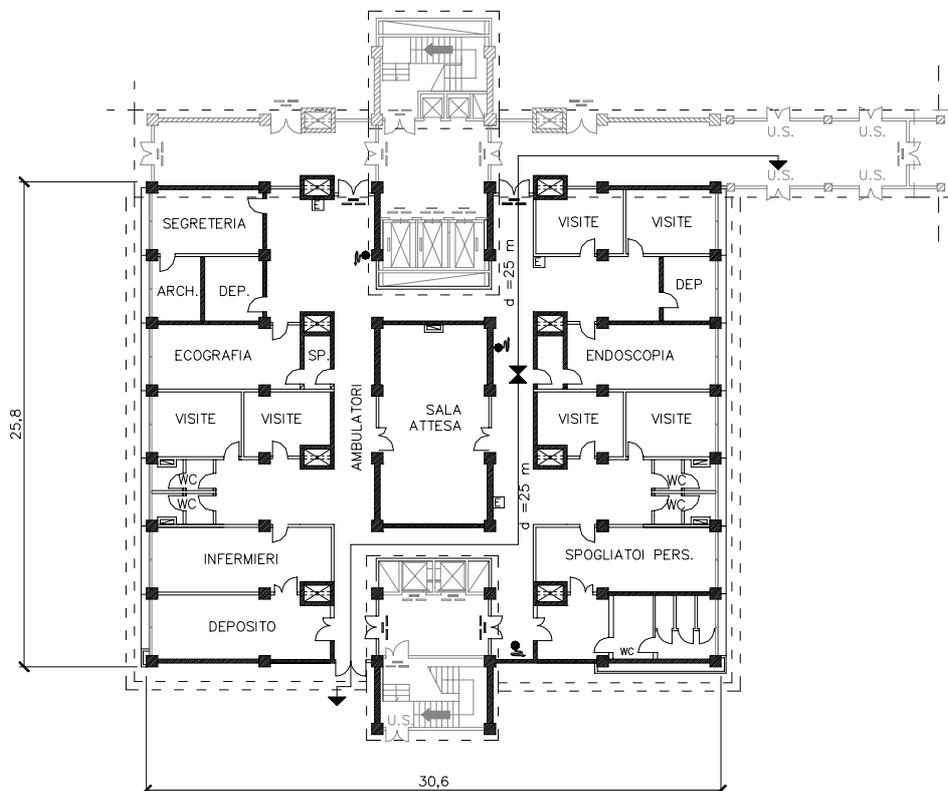


Figura 4. Pianta del compartimento analizzato.

4.2 Modellazione numerica dell'incendio

La simulazione dell'incendio è stata condotta con la procedura precedentemente descritta, utilizzando il codice di calcolo CFAST. Tenuto conto del fatto che per la tipologia di compartimento presa in considerazione non sono contemplate dalla vigente normativa prescrizioni circa le caratteristiche di resistenza al fuoco delle pareti divisorie interne e quindi che il tempo della loro durata non è definibile con precisione, la propagazione dell'incendio è stata studiata considerando la sola propagazione del calore attraverso le aperture effettive.

Il compartimento è stato preliminarmente suddiviso in undici sotto-compartimenti, evidenziati in fig. 5. Il carico di incendio di ogni sotto-compartimento è stato calcolato a partire dalla conoscenza degli elementi di arredo e delle strumentazioni presenti nei locali adibiti a sale visita, sale d'attesa ed ambulatori. I valori dei carichi di incendio così determinati sono riportati in tab. 1.

Fissato quindi il sotto-compartimento in cui ha origine l'incendio, è stato ipotizzato che la propagazione agli altri sotto-compartimenti avvenga al raggiungimento, da parte dei materiali combustibili presenti, della propria temperatura di ignizione.

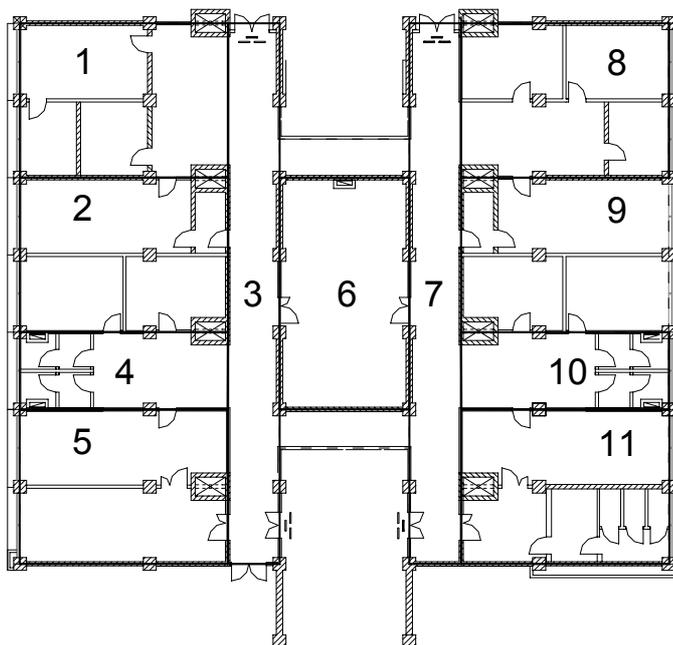


Figura 5. Numerazione dei sotto-compartimenti.

Sotto –compartimento n°	Area [mq]	Potere calorifico (Kcal)	Carico di incendio (kg/m ²)
1 Segreteria – archivio – deposito	69.12	3113373	10.30
2 Ecografia - Sale visite	69.12	2102794	6.91
3 Corridoio	60.48	0	0
4 Corridoio	34.56	0	0
5 Sala infermieri – deposito	69.12	2901594	9.54
6 Sala attesa	86.40	938190	2.46
7 Corridoio	60.48	0	0
8 Sala visite – deposito	69.12	2852280	9.38
9 Endoscopia - sale visite	69.12	2102794	6.91
10 Corridoio	34.56	0	0
11 Spogliatoio personale	69.12	122698	4.03

Tabella 1. Dimensioni e carichi di incendio dei sotto-compartimenti.

Nella simulazione si è ipotizzato che l'incendio abbia origine nel compartimento n. 2, propagandosi poi in successione ai sotto-compartimenti n. 1, 5, 6, 9, 8 e 11 secondo lo schema riportato in fig. 6.

Le curve tempo-temperatura così ottenute sono riportate nelle figg. 7 ed 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. I risultati ottenuti mostrano però come la fase a temperatura decrescente possa essere interrotta da una nuova fase di temperatura crescente dovuta al calore sviluppato dal materiale combustibile presente nei locali contigui.

Così ad esempio per il sotto-compartmento n.1 la temperatura massima, pari a circa 1000 °C, è raggiunta in appena 500 s dall'inizio dell'incendio. Successivamente la temperatura scende fino a 800 °C a 840 s, per poi aumentare di nuovo fino a 840°C in corrispondenza dell'istante 1560 s. Da questo momento inizia la fase decrescente definitiva, che riporta la temperatura ai valori ambientali.

È evidente come la curva di incendio reale così ottenuta comporti il raggiungimento di temperature meno elevate, soprattutto alle durate di resistenza al fuoco maggiori, mentre per brevi durate si possono raggiungere temperature ben al di sopra di quelle previste dalla curva UNI 7678.

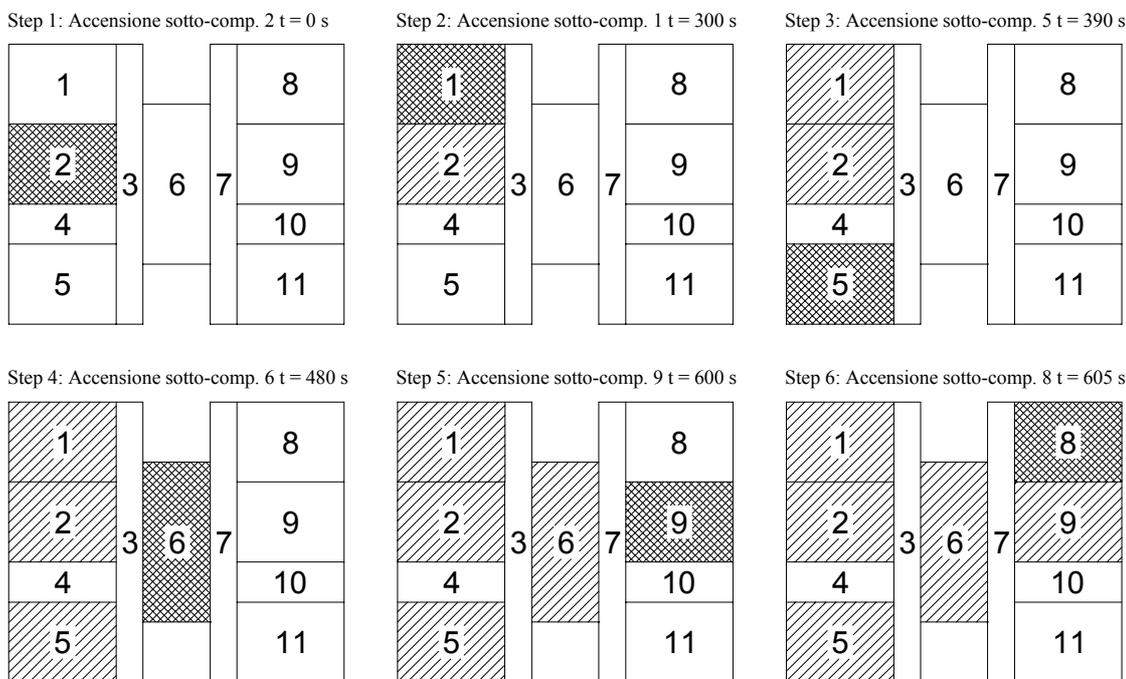


Figura 6. Sequenza di accensione dei sotto-compartmenti. La campitura scura indica il sotto-compartmento che si accende al passo corrente, quella chiara i sotto-compartmenti già accesi.

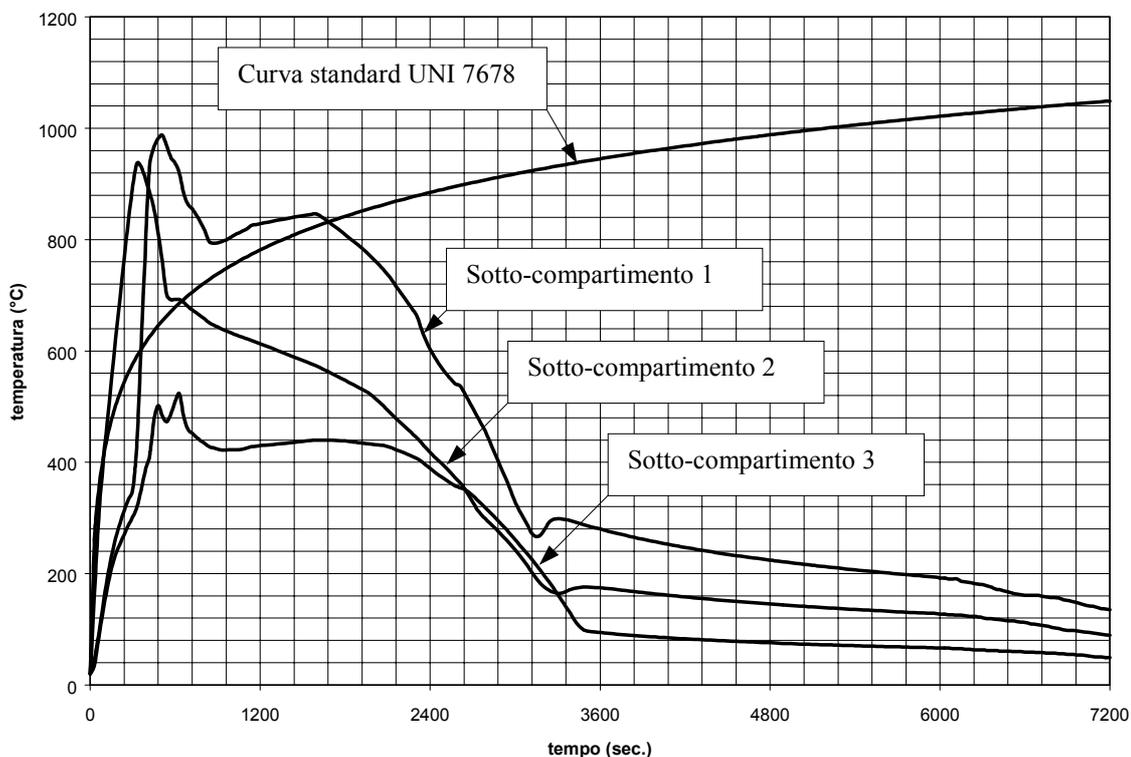


Figura 7. Simulazione dell'incendio reale, temperature nei sotto-compartmenti 1, 2 e 3.

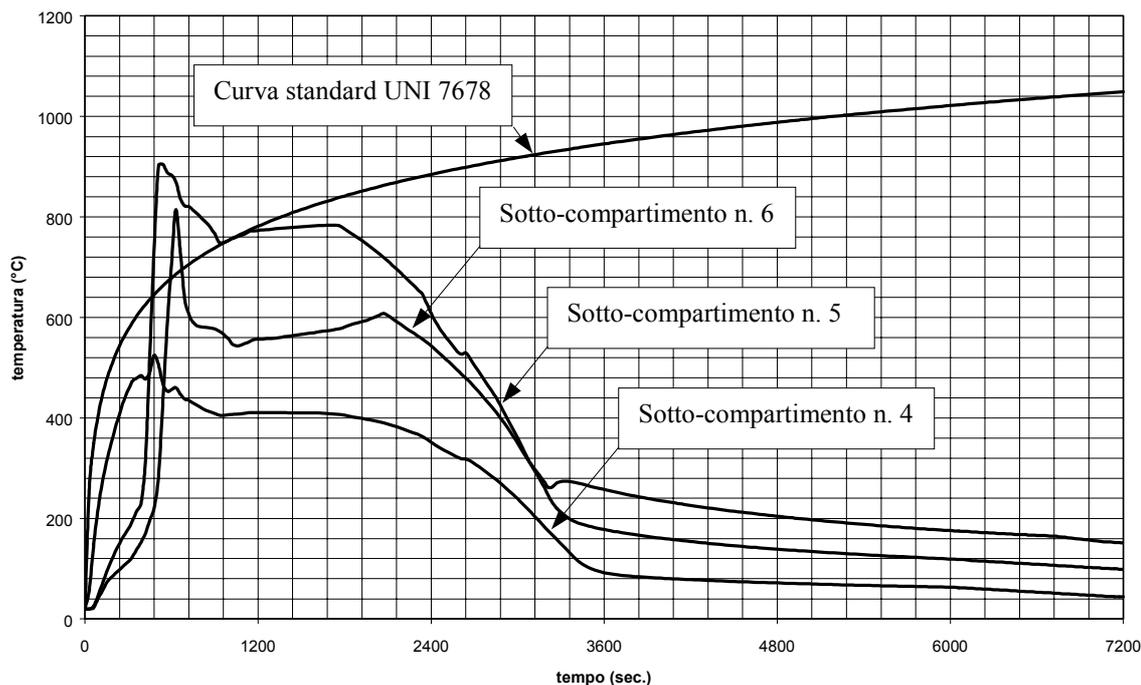


Figura 8. Simulazione dell'incendio reale, temperature nei sotto-compartimenti 4, 5 e 6.

4.3 Analisi della sicurezza dei componenti strutturali

Per un pilastro interno e per una trave appartenenti al telaio in c.a. dell'edificio e contenuti all'interno del sotto-compartimento n. 2 sono stati determinati i domini di resistenza $M_u - N_u$, seguendo la procedura descritta al paragrafo 3. La 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.

Dagli elaborati progettuali è stato possibile ricavare le armature presenti negli elementi strutturali (vedi figg. 9 e 10) e le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati (acciaio FeB44k e calcestruzzo Rck 35 N/mm²). Le analisi sono state estese fino alla durata T di 120 minuti.

Con riferimento all'incendio standard, nelle figure n. 11, 12 sono riportati, sotto forma di linee isoterme, i risultati dell'analisi del campo termico a T = 30 minuti.

I diagrammi di interazione, calcolati ogni 30 minuti fino a T = 120, sono riportati in forma grafica nelle figg. 13 e 14. Le successive figure n. 15, 16, 17 e 18 riportano i risultati delle analoghe elaborazioni, eseguite però utilizzando i risultati dell'incendio simulato per via numerica. Le sollecitazioni di progetto M_d ed N_d sono state determinate considerando i coefficienti parziali di sicurezza ed i fattori di combinazione definiti dalla norma UNI/VVF 9502.

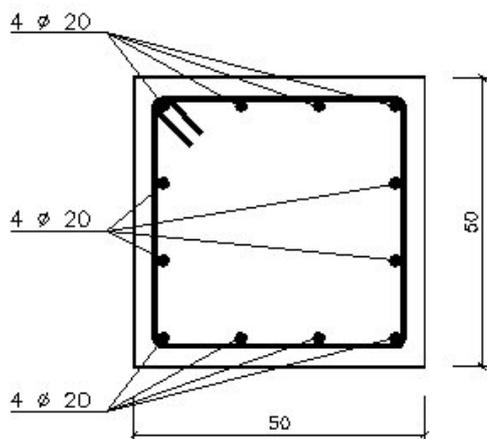


Figura 9. Sezione del pilastro 50 x 50 cm.

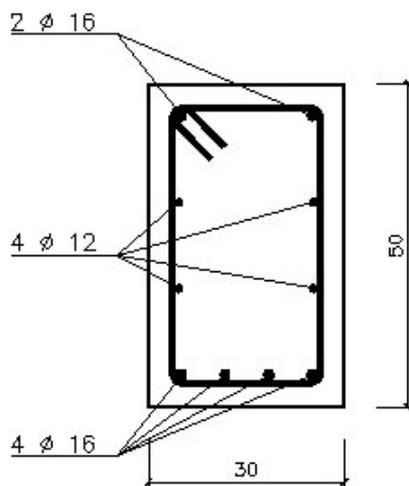


Figura 10. Sezione della trave 30 x 50 cm.

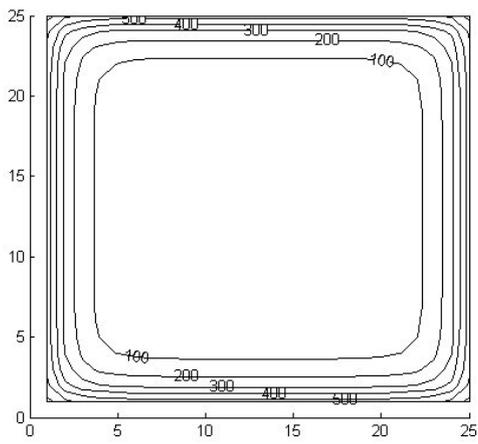


Figura 11. Pilastro - Isotherme a T=30 min con incendio convenzionale.

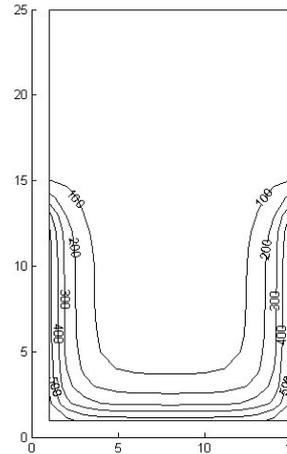


Figura 12. Trave - isoterme a T=30 min con incendio convenzionale.

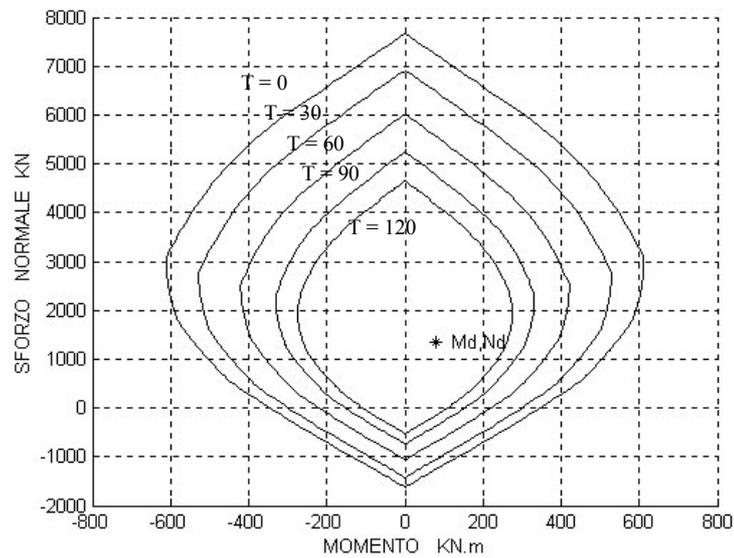


Figura 13. Pilastro: dominio di resistenza $M_u - N_u$ con incendio convenzionale.

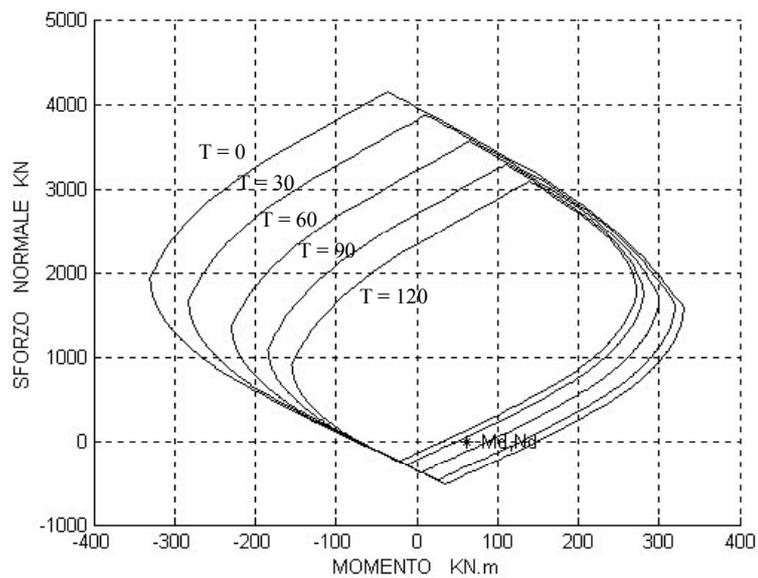


Figura 14. Trave: dominio di resistenza $M_u - N_u$ con incendio convenzionale.

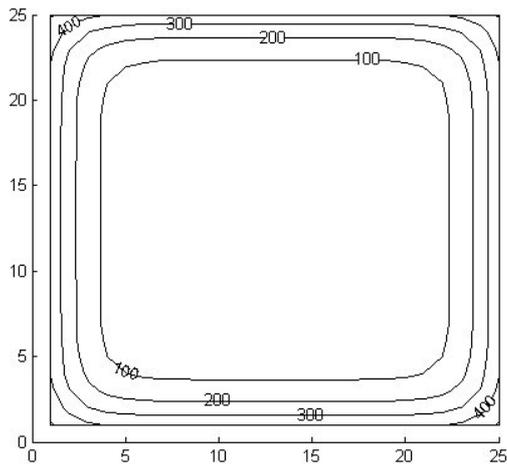


Figura 15. Pilastro - Isotherme a T=30 min con incendio reale.

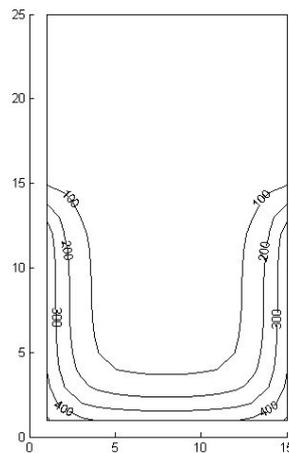


Figura 16. Trave - Isotherme a T=30 min con incendio reale.

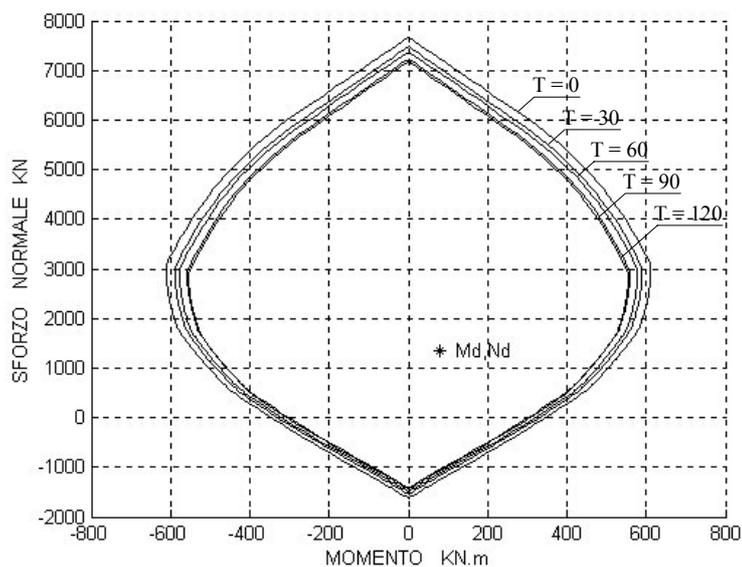


Figura 17. Pilastro: dominio di resistenza $M_u - N_u$ con incendio reale.

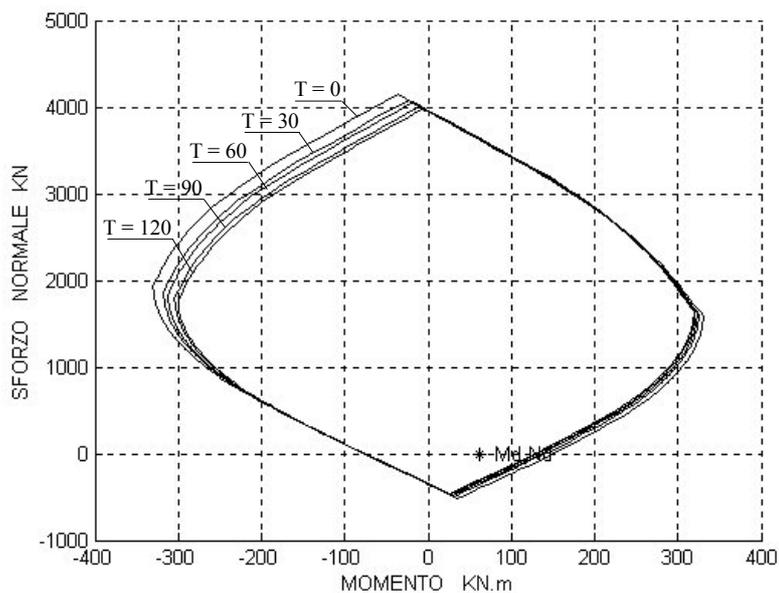


Figura 18. Trave: dominio di resistenza $M_u - N_u$ con incendio reale.

Allo scopo di valutare l'influenza della curva tempo-temperatura sulla stima della sicurezza è stato determinato l'andamento temporale del coefficiente di sicurezza globale del pilastro rispetto alla rottura. Ciò è stato fatto ipotizzando la crescita delle sollecitazioni ad eccentricità costante. Con riferimento alle figure 19 e 20, la prima relativa allo scenario di incendio convenzionale e la seconda allo scenario di incendio reale, i coefficienti di sicurezza ai tempi $T=0, 30, 60, 90, 120$ minuti sono stati calcolati eseguendo i rapporti fra i segmenti $OP_0, OP_1, OP_2, OP_3, OP_4$ ed il segmento OP , che individua la sollecitazione di progetto.

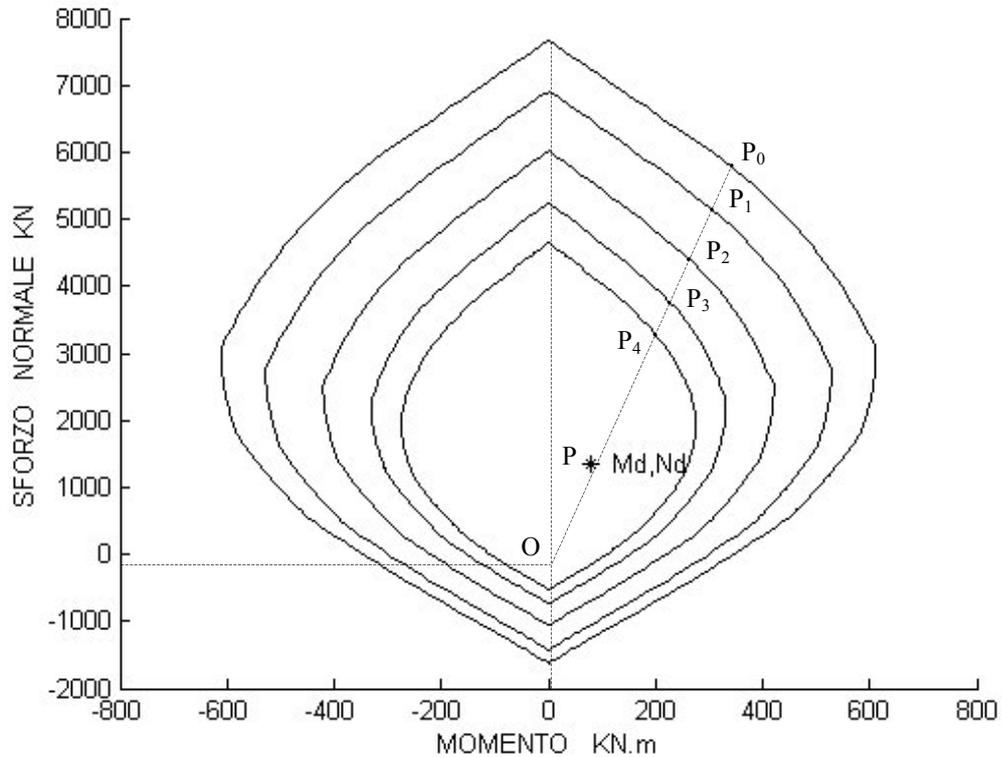


Figura 19. Pilastro: determinazione grafica dei fattori di resistenza con incendio convenzionale.

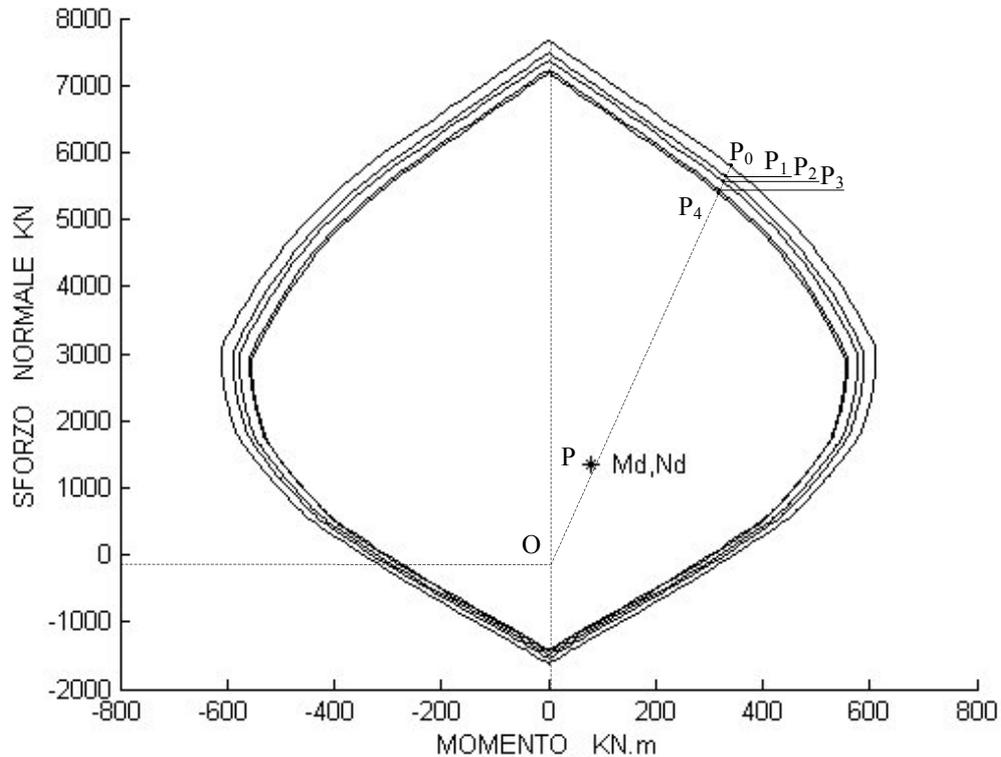


Figura 20. Pilastro: determinazione grafica dei fattori di resistenza con incendio reale.

Sempre con riferimento al pilastro, tali rapporti vengono presentati in forma grafica in figura n. 21, nella quale vengono confrontati i valori dei fattori di sicurezza relativi al pilastro nelle due ipotesi di incendio convenzionale ed incendio reale. Da tale figura si può notare come, nello specifico esempio preso in esame, in cui il valore del carico di incendio presente all'interno del compartimento non è elevato, l'incendio convenzionale risulti molto più gravoso dell'incendio reale.

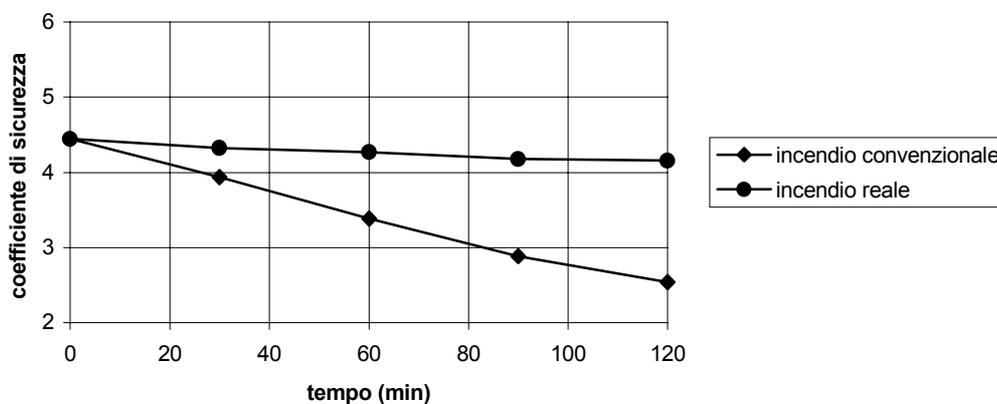


Figura 21. Pilastro: coefficienti di sicurezza in funzione del tempo di esposizione all'incendio.

5. CONCLUSIONI

Nella presente comunicazione è stata presentata una metodologia per la determinazione della storia tempo-temperatura di un incendio, che ricade nella categoria dei cosiddetti modelli "a zone". La procedura proposta è in grado di tener conto della propagazione dell'incendio attraverso ambienti contigui dello stesso compartimento. Per ogni locale del compartimento viene così 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 è stata quindi applicata al caso concreto di un tipico edificio a rischio d'incendio - un ospedale - procedendo quindi alla costruzione dei domini di resistenza M-N di alcuni componenti strutturali tipici.

Poiché la procedura per l'analisi di resistenza al fuoco della UNI 9502 si presta ad essere impiegata anche con leggi tempo-temperatura diverse da quella convenzionale e più aderenti alla realtà, esse sono state svolte utilizzando sia l'incendio reale che quello convenzionale conforme alla UNI 7678. Il confronto dei risultati ottenuti ha mostrato che la diminuzione dei coefficienti di sicurezza in funzione della durata di esposizione al fuoco è molto più marcata nel caso di incendio convenzionale che in quello di incendio reale.

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 copriferrì alle elevate temperature.

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° 146*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (1991).