

Michele Zappia

Fire engineering: Resistenza al fuoco di strutture in cemento armato

*I progressi dell'ingegneria
della sicurezza antincendio
nella valutazione
della resistenza al fuoco
di strutture in cemento
armato*

Attraverso l'interessante articolo pubblicato dalla nostra rivista (n. 3 - marzo 2003), a firma di Francesco Mazzini, intitolato: "Fire Engineering", viene ribadita la sempre più impellente necessità di coniugare l'applicazione delle normative di tipo prescrittivo basate su prove di laboratorio, con quelle fondate sulle prestazioni effettive degli elementi strutturali in caso di incendio.

Enormi sono i progressi compiuti negli ultimi anni nello studio teorico e nei metodi di calcolo volti a determinare la resistenza al fuoco delle strutture, anche attraverso la sperimentazione e l'analisi dei risultati di prova, nonché attraverso l'impiego di strumenti (modelli simulativi), che prevedono l'applicazione di procedure in grado di valutare con esattezza l'influenza e le variazioni dei diversi parametri che caratterizzano le proprietà termiche dei materiali.

Il settore dei prodotti da costruzione in Europa è regolato dalla direttiva 89/106/CEE, recepita in Italia con il D.P.R. n° 246 del 21.04.1993.

In questo caso, diversamente da quanto altre direttive hanno in passato espresso, l'applicabilità dei "requisiti essenziali" non riguarda direttamente il prodotto, bensì l'opera che con lo stesso si va a realizzare.

Così come riportato da Francesco Mazzini nel precedente articolo, il documento interpretativo n.2 della stessa direttiva, "sicurezza in caso di incendio", prevede, nella definizione dei requisiti essenziali, la possibilità di tradurli in specifici requisiti prestazionali, attraverso l'applicazione, strategica, dell'approccio ingegneristico in alternativa a quello prescrittivo.

La "structural fire engineering", anche attraverso i recenti sviluppi di metodi di previsione del reale comportamento al fuoco dell'intera struttura, mette a disposizione dei progettisti, strumenti volti a definire la stabilità strutturale in caso di incendio, che attraverso una corretta definizione di appropriati modelli termici e strutturali, ci

Resistenza al fuoco di strutture in cemento armato

danno la possibilità di ricavare le reali azioni, termiche e meccaniche agenti sull'elemento da analizzare.

Altresì la sperimentazione ha dimostrato che la stabilità di un elemento strutturale durante un incendio, dipende non solo dalle temperature raggiunte, ma anche dai carichi applicati, dagli effetti delle azioni combinate, dai vincoli (che limitano le deformazioni e permettono il trasferimento dei carichi), e dalla congruità tra ogni singolo elemento e la struttura di cui fa parte.

Con opportuni accorgimenti progettuali (limitazione delle tensioni e delle interazioni tra membrature; opportuno posizionamento degli elementi all'interno e all'esterno del fabbricato; modesto aumento della sezione di qualche elemento), di costo limitato, è possibile ottenere sufficienti gradi di resistenza al fuoco senza dover fare ricorso alla protezione passiva delle strutture.

A seguito del vasto lavoro di sperimentazione, analisi ed elaborazione compiuto in campo internazionale, in molti paesi alle normative tradizionali di tipo "prescrittivo" (troppo cautelative), si stanno affiancando normative di tipo "prestazionale", fondate su solide basi scientifiche, che consentono ai progettisti di adottare soluzioni alternative dimostrandone la sufficiente sicurezza in caso di incendio.

Conseguentemente nei paesi dove è accettata l'ingegneria della sicurezza al fuoco per la valutazione delle misure attive e passive, le richieste delle autorità nazionali competenti sono sempre meno prescrittive e tendono a stabilire le funzioni e i livelli di prestazione richiesti.

In entrambi i casi (metodi sperimentali e analitici), può essere usata 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; viceversa i metodi analitici, pur adottando tale curva al fine di rendere congruenti le previsioni teoriche con quelle sperimentali, 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.

MODELLAZIONE DEGLI INCENDI:



I modelli disponibili vengono usualmente classificati in tre categorie. Per la risoluzione di tali modelli è indispensabile fare ricorso a procedure numeriche di analisi, basate nella maggior parte dei casi, su tecniche di discretizzazione.

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.

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,

Resistenza al fuoco
di strutture
in cemento armato

*Il CFAST, ipotizza
che l'incendio rimanga
confinato all'interno
del compartimento
in cui ha origine*

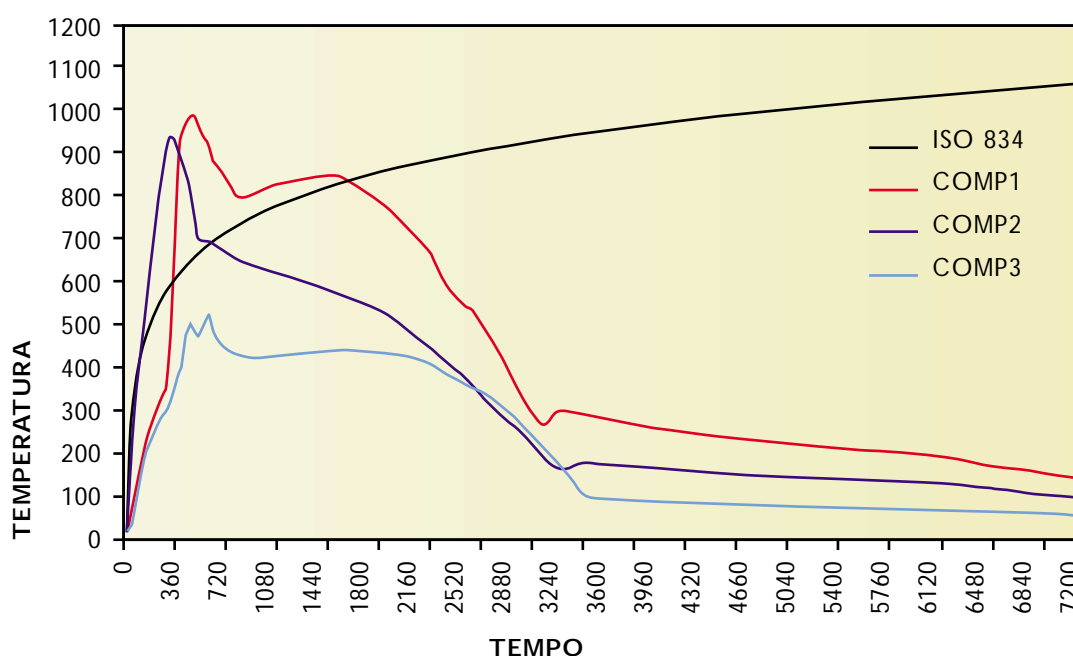
il "CFAST" contenuto nel pacchetto di software HAZARD I distribuito dal NIST, [8], che utilizza un modello a due strati.

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. 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

Sequenza di curve di incendio reale



Resistenza al fuoco di strutture in cemento armato

chiuso, 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.

ANALISI DELLA SICUREZZA DEI COMPONENTI DI CEMENTO ARMATO

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: il **metodo tabellare**, il **metodo del fattore di riduzione medio**, il **metodo della sezione equivalente**.

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).

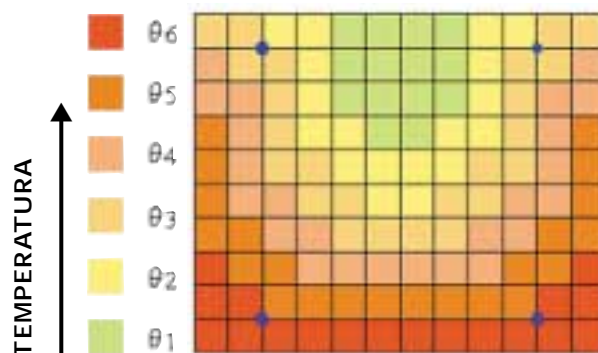
Qualora all'interno della sezione da analizzare siano presenti dei vuoti, questi possono essere modellati sia considerando la superficie di separazione come superficie esterna dell'elemento sia modellando anche i vuoti con elementi rettangolari o triangolari.

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. 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.



Esempio di discretizzazione di una sezione e analisi del campo termico

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, può essere costruito, per punti, il corrispondente dominio di resistenza M_U - N_U .

Resistenza al fuoco
di strutture
in cemento armato

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).

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.

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 σ - ϵ "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} .

Infine il valore dello sforzo normale ultimo N_{ui} e del momento ultimo M_{ui} , può essere determinato mediante una semplice integrazione numerica, con riferimento al baricentro della sezione.

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.

CONCLUSIONI

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 marcato 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 copriferri alle elevate temperature (spalling).