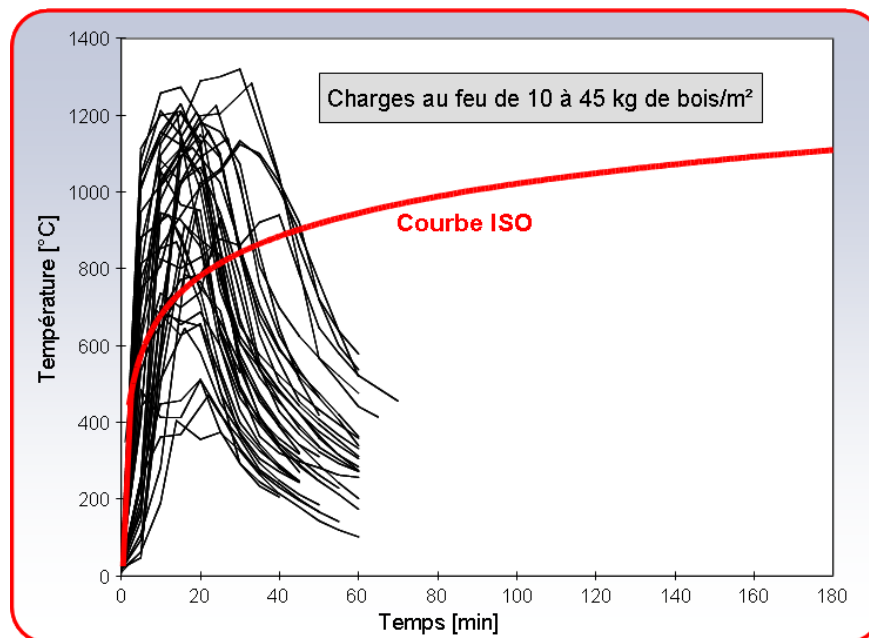


## 14. Criteri generali per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico.

A cura di:





**Commissione per la Sicurezza**  
delle Costruzioni in Acciaio  
in caso d'Incendio

La **Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso d'Incendio** è un gruppo di lavoro costituito il 20 gennaio 2006, su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio con la partecipazione del Ministero dell'Interno, composto da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale e da docenti universitari. Esso si propone i seguenti principali obiettivi:

- costituire un tavolo tecnico per la valutazione dei risultati della ricerca nazionale ed europea;
- analizzare tecnicamente la norma nazionale, con i necessari riferimenti alle norme vigenti nell'ambito della Comunità Europea;
- fornire strumenti tecnici aggiornati agli operatori di controllo (VVF e collaudatori) per la valutazione della sicurezza delle strutture in acciaio;
- fornire strumenti tecnici per l'aggiornamento professionale.

*Per tutte le informazioni sulle attività della Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso d'Incendio e di Fondazione Promozione Acciaio: [www.promozioneacciaio.it](http://www.promozioneacciaio.it)*

## **Premessa**

L'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza degli edifici in caso di incendio è regolamentato in ambito nazionale dal Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007. I criteri di calcolo su cui questo approccio è basato sono definiti nell'ambito del nuovo quadro normativo vigente, in particolare nei due Decreti del Ministero dell'Interno del 16 febbraio e 9 marzo 2007, nelle Norme Tecniche per le Costruzioni e nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici.

Il presente contributo vuole presentare i criteri di calcolo impiegabili ai sensi delle norme nazionali vigenti per l'applicazione dell'approccio ingegneristico ai fini della sicurezza strutturale in caso di incendio, proponendo una procedura per la verifica della loro applicazione al caso delle strutture di acciaio.

## **Criteria generali la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio mediante l'applicazione dell'approccio ingegneristico**

Sandro Pustorino – Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in Caso di Incendio (Coordinatore)

Emidio Nigro - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II

Luca Ponticelli - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

*Il presente lavoro è frutto delle attività 2012 condotte dalla Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, istituita e sostenuta da Fondazione Promozione Acciaio.*

### **Criteria di calcolo previsti dalla normativa nazionale vigente**

La valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio può essere condotta seguendo due diversi approcci di calcolo:

- l'approccio prescrittivo;
- l'approccio prestazionale (o ingegneristico).

Mentre il primo approccio si sostanzia in una verifica anche per singoli elementi della struttura con riferimento ad una curva nominale di incendio a temperatura uniforme strettamente crescente (in genere la ISO 834, detta curva nominale "standard") per un periodo limitato di tempo (prescritto dal Normatore), il secondo tiene conto di un incendio verosimilmente attribuibile alla struttura (incendio "naturale") e non può prescindere da un'analisi dell'intera struttura da effettuarsi per tutta la durata dell'incendio (compresa la fase di raffreddamento).

In Italia, l'attuale panorama normativo consente di seguire ciascuna delle due strade con le limitazioni indicate nel seguito.

Se l'attività per la quale si deve effettuare la progettazione strutturale a caldo è di tipo "normato" ossia essa è coperta da una specifica regola tecnica di prevenzione incendi, quali le scuole, gli alberghi, le autorimesse etc., l'unico approccio perseguibile è quello di tipo prescrittivo, con la verifica della "REI" da parte degli elementi strutturali. Solo in caso di necessità di deroga alla regola tecnica di riferimento è consentito l'approccio prestazionale per la verifica del soddisfacimento dei requisiti di resistenza al fuoco, come sancito dal decreto del Ministro dell'interno 9 maggio 2007.

In caso di attività "non normata", è necessario verificare che la stessa sia soggetta o meno ai controlli da parte dei Vigili del Fuoco, in base al decreto del Presidente della Repubblica n. 151 del 1 agosto 2011. In caso affermativo, per la verifica dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture ci si deve riferire al decreto del Ministro dell'interno 9 marzo 2007 che reca la libera scelta tra i due tipi di approccio introdotti ad inizio paragrafo. Nel caso in cui il progettista opti per l'approccio prescrittivo, la verifica al fuoco dei singoli elementi strutturali andrà condotta con riferimento al cimento termico derivante dall'applicazione della ISO 834 per un periodo di tempo funzione del carico di incendio specifico di progetto, da calcolare con le modalità previste dal DM 9/3/2007. In caso di approccio prestazionale, oltre alla verifica dell'intera struttura per tutta la durata dell'incendio "naturale" preso a riferimento, il progettista dovrà ripetere l'analisi per singoli elementi con riferimento all'incendio standard per una classe pari alla metà di quella per la quale avrebbe dovuto condurre la verifica qualora avesse scelto direttamente l'approccio prescrittivo.

In caso di attività "non normata" e "non soggetta" ai controlli dei Vigili del Fuoco, il progettista deve riferirsi alle NTC 2008 (decreto del Ministro delle infrastrutture 14 gennaio 2008) che, in maniera del tutto analoga a quanto fatto dal DM 9/3/2007, definisce 5 livelli di progettazione strutturale a caldo. Mentre il DM 9/3/2007 esclude l'applicabilità del 1° livello "nessun requisito di resistenza al fuoco" (si ricorda che il DM 9/3/2007 è applicabile ad attività "soggette" "non normate"), il DM 14/1/2008 lascia il progettista libero di scegliere il livello "giusto" per la struttura.

In ultimo, il decreto del Ministro dell'interno 16 febbraio 2007, inerente i requisiti di resistenza al fuoco dei prodotti da costruzione (così come definiti dalla direttiva 89/106/CEE), stabilisce la possibilità di effettuare le verifiche a caldo delle strutture seguendo le tre modalità appresso indicate:

- il metodo tabellare di cui al DM 16/2/2007
- il metodo sperimentale, con classificazione degli elementi in base alla norma europea EN 13501-2, 3 e 4

- il metodo analitico, in base agli Eurocodici strutturali e, fino alla data di pubblicazione degli annessi nazionali delle parti fuoco degli Eurocodici con decreto del Ministro delle infrastrutture, anche con le norme UNI 9502, 9503 e 9504 con le limitazioni indicate dal DM 16/2/2007.

Attualmente gli annessi nazionali sono stati terminati e sono disponibili sul sito del Ministero dei Lavori Pubblici, ma non sono ancora stati pubblicati nella Gazzetta Ufficiale.

Il DM 14/1/2008 vede nell'impiego degli Eurocodici strutturali l'unica modalità di verifica analitica a caldo delle strutture.

### **Il procedimento di verifica delle strutture con approccio ingegneristico**

L'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio richiede l'analisi e la trattazione di una serie di fenomeni che riguardano sia le fasi dello sviluppo degli incendi che possono verificarsi nell'edificio oggetto dello studio, sia il conseguente comportamento della struttura portante durante l'evoluzione del fenomeno.

Di seguito sono trattati i passi fondamentali del procedimento finalizzato alla valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio. La completezza e la chiarezza della trattazione di ognuno di tali passaggi favorisce il corretto svolgimento delle analisi e rende possibile la validazione delle procedure e la verifica dei risultati ottenuti.

#### ***Analisi quantitativa del rischio, scenari di incendio***

Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere valutati tutti gli incendi realisticamente ipotizzabili, scegliendo i più gravosi per lo sviluppo e la propagazione dell'incendio e per gli effetti sull'edificio. In particolare, quando si fanno le verifiche di resistenza al fuoco delle strutture, questa analisi deve essere indirizzata verso i casi che determinano la più pericolosa sollecitazione strutturale.

Al fine di individuare gli scenari di incendio significativi per uno specifico edificio si può seguire la procedura seguente, di volta in volta adattandola alle condizioni di progetto.

Il primo passo consiste nel determinare i diversi compartimenti all'interno dell'edificio. Essi vengono individuati dalla presenza delle pareti tagliafuoco. Gli scenari di incendio prevedono che le fiamme si sviluppino in un solo compartimento per volta. Per il compartimento in esame si devono considerare tutti i parametri che influiscono sullo sviluppo dell'incendio.

Inizialmente l'incendio sarà di tipo localizzato, pertanto dovranno essere applicati i modelli di calcolo specifici per questo tipo di incendio. Successivamente si verifica il flash-over e l'incendio diventa generalizzato: in base alle caratteristiche del compartimento e dei materiali in esso contenuti è possibile determinare la curva di incendio corrispondente o, applicando modelli di fluido dinamica computazionale, sarà possibile determinare le curve di temperatura in molte posizioni all'interno del compartimento.

Per determinare gli elementi strutturali critici per la stabilità in caso di incendio, deve essere fatta un'analisi della struttura sottoposta ai carichi statici e una valutazione degli effetti delle dilatazioni termiche dovute all'incendio.

Una volta individuato lo scenario di incendio di progetto deve essere condotta un'analisi strutturale dell'edificio che tenga conto delle azioni meccaniche con la combinazione dei carichi per la situazione eccezionale di incendio e le azioni termiche dovute all'incendio.

Normalmente quando viene svolta una verifica strutturale con approccio prestazionale è richiesta la verifica per tutta la durata dell'incendio, compresa la fase di raffreddamento.

Una volta analizzati gli scenari di incendio è necessario dimostrare che questi scenari sono rappresentativi dei fenomeni che si possono verificare nell'edificio e che comprendono quelli più critici per esso.

#### ***Sviluppo dell'incendio: curve di incendio naturali***

Al contrario di quanto avviene per l'approccio prescrittivo, l'applicazione dell'approccio prestazionale prevede che vengano individuati gli *scenari di incendio* possibili all'interno del compartimento.

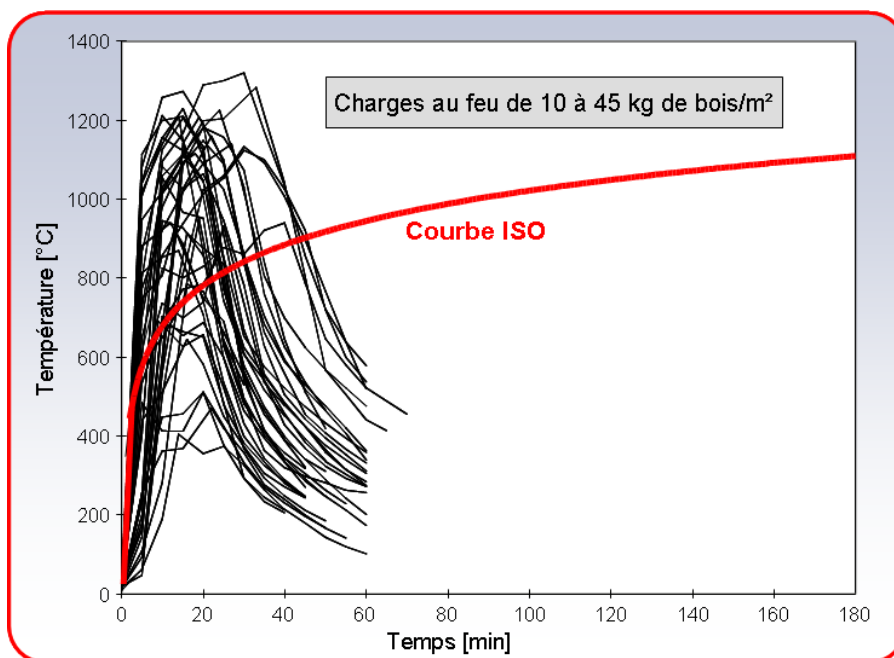
Ai sensi del decreto del Ministero dell'Interno 9 maggio 2009 per "*scenario di incendio*" deve intendersi "*la descrizione qualitativa dell'evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Di solito può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio*

*pienamente sviluppato, decadimento. Deve, inoltre, stabilire l'ambiente nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio gli eventuali impianti di protezione attiva".* Gli scenari di incendio rappresentano dunque la schematizzazione degli eventi che possono ragionevolmente verificarsi. Gli scenari di incendio devono tenere conto dei parametri che influiscono sullo sviluppo dell'incendio, che comprendono le caratteristiche del compartimento e dei materiali in esso presenti.

Le curve di incendio che si ottengono per i vari scenari presentano un andamento caratteristico, individuato dalle seguenti fasi:

- fase di innesco: in questa fase le temperature sono molto basse e le fiamme sono molto ridotte. La durata della fase non è facilmente individuabile;
- fase di accrescimento o pre-flashover: riguarda la fase di propagazione dell'incendio fino al flashover in cui le fiamme si sviluppano in tutto il compartimento. La durata di questa fase dipende principalmente dalle caratteristiche del compartimento e dei materiali combustibili;
- flashover: è il momento di passaggio da un incendio localizzato ad uno generalizzato quando la temperatura dei gas all'interno del compartimento è sufficientemente elevata. La sua durata dipende dalle condizioni di ventilazione e dal carico di incendio;
- fase di pieno sviluppo o post-flashover: questa fase corrisponde a un fuoco generalizzato e la durata dipende dal carico di incendio e dalla ventilazione. In questa fase il tasso di combustione è relativamente stabile;
- fase di spegnimento: le fiamme cominciano a ridursi fino a quando tutto il combustibile è completamente bruciato.

La corretta individuazione degli scenari di incendio costituisce la fase centrale nell'ambito del processo di progettazione prestazionale e pertanto è quanto mai opportuno che la loro definizione sia condivisa in fase preventiva da parte dell'organo di controllo VVF.



**Fig. 1** : Curva di incendio ISO834 e curve di incendio naturali risultanti da incendi reali in laboratorio

I parametri che influiscono sullo sviluppo dell'incendio, che devono essere considerati nelle analisi per ottenere le curve di incendio naturali sono:

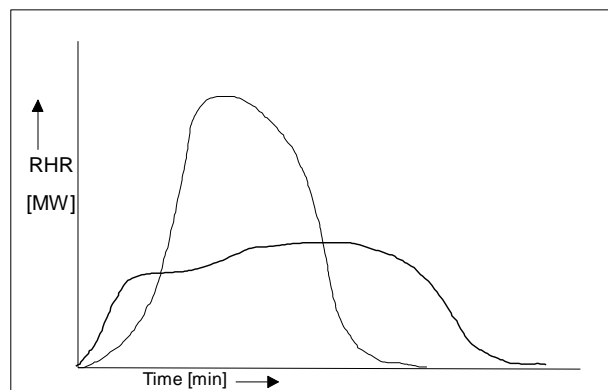
- Carico di incendio.

Il carico di incendio in un determinato compartimento corrisponde alla sommatoria di tutti i materiali combustibili che vi si trovano. In EN 1991-1-2 sono fornite le formule per il calcolo del carico di incendio e i valori dei poteri calorifici di alcuni materiali combustibili che si trovano comunemente negli edifici. Normalmente viene considerato il carico di incendio uniformemente distribuito all'interno del compartimento e nel calcolo si fa riferimento alla densità di carico di incendio. Quando non è possibile ipotizzare un carico uniforme nel compartimento è necessario fare riferimento alla reale distribuzione del carico di incendio. Per le principali destinazioni d'uso degli edifici civili viene fornita in EN 1991-1-2 tabella E.4 la densità di carico di incendio caratteristica derivata dalle statistiche sugli edifici reali.

Il carico di incendio specifico deve essere corretto per mezzo di coefficienti moltiplicativi che tengano conto delle caratteristiche del compartimento e della presenza delle misure di protezione attiva contro l'incendio. In questo modo si ottiene il carico di incendio di progetto, che deve essere considerato nel calcolo dello sviluppo dell'incendio. La normativa italiana affronta la definizione del carico di incendio in modo analogo a quanto stabilito da EN 1991-1-2, ma per la determinazione del carico di incendio di progetto fornisce coefficienti differenti da quelli di EN 1991-1-2.

- Rilascio termico dell'incendio – Curva RHR.

Il carico di incendio definisce l'energia disponibile, ma la temperatura dei gas di un incendio dipende dal tasso di calore rilasciato (RHR). Uno stesso carico di incendio, bruciando molto velocemente o lentamente senza fiamme, dà luogo a curve della temperatura dei gas completamente differenti. La curva RHR è la funzione che determina l'aumento di temperatura dei gas e la propagazione dei gas e dei fumi. Un generico incendio inizia in una piccola zona e poi si propaga durante una successiva fase di sviluppo. A questo punto possono succedere due cose, a seconda che durante il processo di propagazione ci sia o meno sufficiente ossigeno per sostenere la combustione. In un primo caso, una volta che l'incendio ha raggiunto il massimo sviluppo senza alcuna limitazione di ossigeno, la RHR è limitata dal carico di incendio disponibile (incendio controllato dal combustibile). Oppure, se la misura delle aperture nel compartimento è troppo piccola per permettere l'ingresso di una quantità sufficiente di aria, l'ossigeno disponibile limita la RHR e l'incendio è controllato dalla ventilazione. Entrambi i tipi di incendio, controllato dal combustibile e controllato dalla ventilazione, possono svilupparsi fino al flashover. Questo importante fenomeno, il flashover, segna la transizione da un incendio localizzato ad un incendio che coinvolge tutte le superfici del materiale combustibile presente nel compartimento. Una formulazione della curva RHR è fornita in EN 1991-1-2.



**Fig. 2** - Due curve RHR corrispondenti alla stessa quantità di carico di incendio.

- Posizione dell'incendio all'interno del compartimento.

Le posizioni del fuoco da considerare nel calcolo sono quelle che portano agli effetti più sfavorevoli.

- Condizioni di ventilazione.

Le condizioni di ventilazione sono un fattore fondamentale per lo sviluppo dell'incendio. Le aperture che devono essere considerate nel calcolo comprendono finestre, porte e tutte le aperture che in caso di incendio possono effettivamente risultare aperte. Per le aperture vetrate si considera che raggiunta una determinata temperatura dei gas i vetri si rompono: tale temperatura di riferimento dipende dalle caratteristiche dei vetri impiegati. Normalmente la temperatura di rottura dei vetri ordinari è compresa tra 100 e 500°C, in funzione del tipo di vetro, delle modalità di posa in opera, dello spessore, delle dimensioni,.... Per completezza la verifica dovrà essere condotta con condizioni di ventilazione diverse che contemplino la possibile apertura o chiusura delle varie parti, per determinare le condizioni critiche all'interno del compartimento.

- Caratteristiche delle pareti del compartimento.

Le pareti del compartimento influiscono sullo sviluppo dell'incendio in quanto scambiano calore con i gas caldi, pertanto per la corretta definizione dello sviluppo dell'incendio è necessario conoscere le proprietà termiche delle pareti.

- Misure attive di lotta all'incendio.

La presenza di misure attive di prevenzione degli incendi influisce sulla sicurezza delle persone e sulla velocità di intervento da parte delle squadre di soccorso, per cui nel calcolo del carico di incendio sono inseriti dei coefficienti che permettono di tenere in conto questo fenomeno. La presenza di sistemi di spegnimento inoltre modifica la curva di rilascio termico relativa all'incendio di progetto, pertanto in un'analisi completa non può essere trascurata.

### **Modelli di incendio (EN 1991-1-2 e Appendice Nazionale)**

Il quadro normativo vigente prevede metodi di calcolo di differente livello per la determinazione dello sviluppo di un incendio. L'Eurocodice EN1991-1-2 individua i seguenti modelli:

- modelli semplici, costituiti dagli incendi parametrici;
- i modelli a zona, che, schematizzando il fenomeno in forme appropriate, permettono di prendere in considerazione tutti i principali parametri che influenzano l'incendio;
- i modelli di campo, piuttosto complessi, che consentono la trattazione completa del fenomeno anche nel caso di particolari geometrie dell'edificio.

A questi modelli generali deve essere aggiunta la procedura di calcolo per la trattazione degli incendi localizzati, mediante la quale è possibile individuare il flusso termico sulle strutture in presenza di un incendio il cui sviluppo è di tipo pre-flashover.

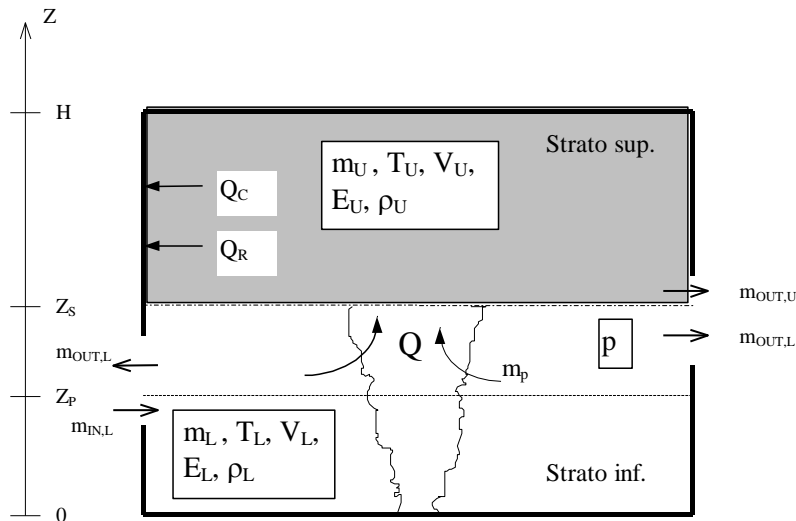
Di seguito sono descritti sinteticamente i diversi modelli, trattando dapprima quelli che si impiegano nelle situazioni di incendio pre-flashover (modelli di incendio localizzato e modelli a due zone) e poi quelli impiegati nelle situazioni di incendio post-flashover (incendi pienamente sviluppati).

### **Gli incendi localizzati e modelli a due zone**

In un **incendio localizzato** c'è un'accumulazione di prodotti di combustione in uno strato (strato superiore) posto a contatto con il soffitto ed al di sopra di un'interfaccia orizzontale che lo separa dallo strato inferiore, dove le temperature dei gas si mantengono più fredde.

Questa situazione è ben rappresentata da un **modello a due zone**, valido per tutte le condizioni pre-flashover.



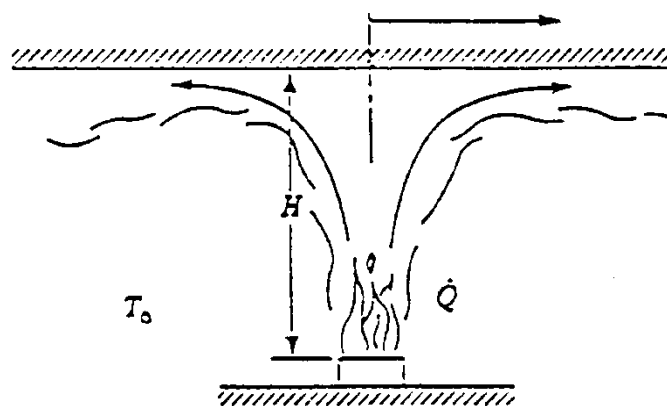


**Fig. 3** - Schema di compartimento mediante un modello a due zone

I modelli a zona sono programmi numerici che calcolano lo sviluppo della temperatura dei gas in funzione del tempo integrando le equazioni differenziali ordinarie esprimenti le leggi di conservazione della massa e dell'energia in ogni zona del compartimento. Essi sono basati sull'ipotesi fondamentale che la temperatura è uniforme in ogni zona. I modelli a zona non forniscono soltanto l'evoluzione della temperatura dei gas nel compartimento, ma anche altre informazioni aggiuntive, come la temperatura delle pareti o la velocità dei gas attraverso le aperture. In un modello a due zone vengono considerate le equazioni che esprimono l'equilibrio della massa e dell'energia per ognuno dei due layer, oltre che gli scambi tra questi attraverso i modelli che simulano l'ingresso dell'aria.

Quando è necessario valutare il comportamento di elementi strutturali posti al di sopra ed in vicinanza dell'incendio, l'ipotesi di temperatura uniforme può non essere sicura ed il modello a due zone deve essere combinato con specifici modelli di incendi localizzati, come ad esempio il metodo di Hasemi descritto in EN1991-1-2. Si tratta di un modello semplificato che, sulla base di poche formule semplici, permette di individuare la forma della fiamma sviluppata da un incendio localizzato e le azioni termiche sugli elementi orizzontali che si trovano sopra di essa.

In ogni posizione, la massima temperatura dei gas intorno alle travi deve essere ottenuta come valore massimo derivante dai due modelli.

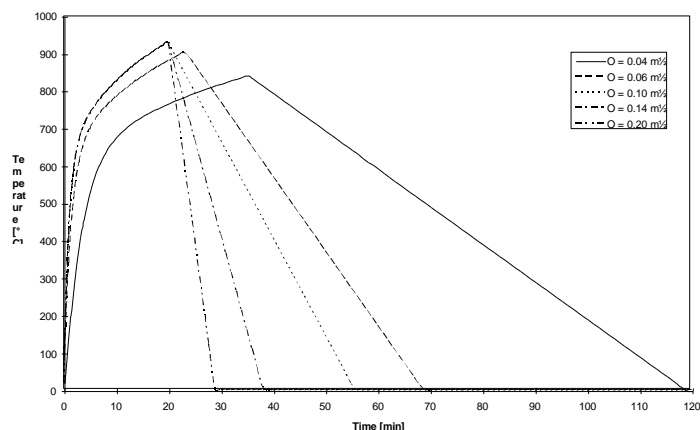


**Fig. 4** – Schema di incendio localizzato

## ***Gli incendi pienamente sviluppati: le curve parametriche e i modelli a una zona***

Per modellare un incendio pienamente sviluppato all'interno di un edificio esistono differenti modelli, che di seguito sono sinteticamente presentati.

Gli **incendi parametrici** sono un semplice strumento di calcolo dello sviluppo di un incendio in un edificio che tiene conto dei più importanti parametri fisici che influenzano il fenomeno. Come gli incendi nominali, essi sono definiti da relazioni temperatura-tempo. In questo caso però le relazioni sono definite in funzione di alcuni parametri che caratterizzano lo scenario che si considera. Un modello di incendio parametrico è previsto nell'ambito dell'Eurocodice EN1991-1-2.



**Fig. 5 - Esempio di incendi parametrici.**

I **modelli ad una zona** corrispondono all'applicazione dei modelli a zona agli incendi pienamente sviluppati. Un modello ad una zona è basato sull'ipotesi fondamentale che, durante l'incendio, la temperatura dei gas all'interno del compartimento è uniforme. Pertanto la sua applicazione è in condizioni di incendio post-flashover.

Tecniche di modellazione dell'incendio più sofisticate ed avanzate consistono nell'uso di modelli di fluidodinamica computazionale (**modelli di campo o CFD**). I modelli di campo forniscono la stima dell'evoluzione dell'incendio in uno spazio, risolvendo per via numerica le equazioni fondamentali del flusso dei fluidi risultante da un incendio. Questi modelli sono capaci di modellare incendi in fase pre-flashover e localizzati, incendi in fase post-flashover ed anche il movimento dei fumi. La loro applicazione per la determinazione dell'incendio naturale di progetto è prevista nell'ambito dell'Appendice D dell'Eurocodice EN 1991-1-2.

### ***Combinazione tra modelli a una zona e modelli a due zone***

Una volta individuati i valori dei parametri che influiscono sul calcolo dell'incendio, è necessario scegliere il modello di incendio da applicare. Inizialmente deve essere applicato un modello per incendio pre-flashover ad esempio un modello a due zone e successivamente un modello di incendio generalizzato ad esempio ad una zona: il problema è individuare il momento in cui si verifica il passaggio da incendio localizzato a generalizzato e quindi è necessario cambiare modello.

Un modello a due zone permette la determinazione di due parametri fondamentali:

- la temperatura della zona superiore  $T_U$ ;
- l'altezza della superficie di interfaccia tra le due zone.

Sulla base di questi due valori è possibile individuare il momento in cui non è più applicabile un modello a due zone.

### ***Determinazione delle azioni termiche sugli elementi strutturali: la risposta termica della struttura***

Quando la struttura portante di un edificio si trova in condizioni di incendio è soggetta ad azioni sia di tipo meccanico che di tipo termico. Le azioni termiche sono dovute all'incremento della temperatura dei gas conseguente all'evoluzione dell'incendio e sono determinate dalle condizioni in cui avviene il trasferimento di

calore sulle superfici degli elementi strutturali. Il risultato di questo fenomeno, detto risposta termica della struttura, in generale porta ad una dilatazione degli elementi e ad una riduzione delle loro proprietà meccaniche nelle zone in cui si verifica il riscaldamento.

I metodi di calcolo previsti dalle normative vigenti per la determinazione della risposta termica di una struttura di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo possono essere distinti in:

- modelli di calcolo semplificato
- modelli di calcolo avanzato

### **Determinazione della resistenza al fuoco: la risposta meccanica della struttura.**

Come già detto, in condizioni di incendio la struttura portante di un edificio è soggetta ad azioni sia di tipo meccanico che di tipo termico. Le azioni meccaniche sono dovute alla presenza dei carichi permanenti e a quella degli altri carichi che agiscono sulla struttura al momento della crisi determinata dall'incendio. A seconda degli schemi statici con cui la struttura è realizzata, la dilatazione termica che accompagna la risposta termica può essere contrastata determinando così sforzi termici indotti non presenti nella struttura nelle condizioni di servizio in cui l'incendio non è presente. Questi sforzi, in combinazione con le azioni meccaniche, determinano uno stato di deformazione della struttura che, in alcuni casi, o in alcune parti, può arrivare a rottura. L'analisi di questo fenomeno, detto risposta meccanica della struttura, ci consente di individuare il parametro che più interessa di una struttura in condizioni di incendio, ossia la sua resistenza al fuoco.

La risposta meccanica di una struttura in condizioni di incendio si ottiene mediante la soluzione dei seguenti passi:

- determinazione delle azioni meccaniche in condizioni di incendio;
- schematizzazione e calcolo strutturale in condizioni di incendio.

### **Determinazione delle azioni meccaniche in caso di incendio**

Le *combinazioni di carico per la situazione eccezionale di incendio* sono definite secondo la seguente regola, tratta dagli Eurocodici (EN 1990, 2005; EN 1991-1-2, 2002) ma valida anche nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k(t) + (\psi_{1,1} \text{ oppure } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d(t)$$

essendo:

- $G_{k,j}$  valore caratteristico delle azioni permanenti;
- $P_k(t)$  valore caratteristico dell'azione di precompressione;
- $Q_{k,1}$  valore caratteristico dell'azione variabile principale;
- $\psi_{1,1}$  coefficiente di combinazione per il valore frequente della azione variabile principale;
- $\psi_{2,1}$  coefficiente di combinazione per il valore quasi-permanente della azione variabile principale;
- $\psi_{2,i}$  coefficiente di combinazione per il valore quasi-permanente delle altre azioni variabili;
- $Q_{k,j}$  valore caratteristico delle altre azioni variabili;
- $A_d(t)$  valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio.

L'utilizzo di  $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$ , corrispondente al valore "frequente" dell'azione variabile, o di  $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ , corrispondente al valore "quasi permanente" dell'azione variabile, deve essere specificato nell'Appendice Nazionale degli Eurocodici. In generale è raccomandato l'uso di  $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$  ed i coefficienti  $\psi_{2,i}$  vengono scelti in base alla destinazione d'uso dell'edificio.  $A_d(t)$  è il valore di progetto dell'azione termica indiretta dovuta all'incendio. Con questo termine ci si riferisce a quelle azioni che possono nascere a causa delle dilatazioni termiche indotte dall'incendio e delle interazioni tra gli elementi della struttura.

## Schematizzazione della struttura portante e calcolo strutturale in condizioni di incendio

Per quanto riguarda la verifica della risposta meccanica delle strutture esposte all'incendio, essa può essere fatta secondo i tre approcci seguenti:

- analisi per elementi, in cui ogni elemento della struttura è valutato considerandolo completamente separato dagli altri elementi, mentre le condizioni di vincolo con gli altri elementi sono sostituite con appropriate condizioni al contorno;
- analisi di parti di struttura, in cui una parte della struttura è direttamente presa in considerazione nella valutazione, usando appropriate condizioni al contorno per rappresentare la sua interazione con le altre parti della struttura;
- analisi strutturale globale, in cui tutta la struttura è presa in considerazione nella valutazione.

In riferimento alle precedenti procedure di progetto per la valutazione della risposta meccanica delle strutture esposte all'incendio, possono essere fatte le seguenti osservazioni:

- l'analisi per elementi sarà applicata a elementi isolati della struttura (elemento per elemento) perciò è di facile impiego in particolare con i metodi di calcolo semplificati e largamente usata in condizioni di incendio nominale (per esempio: curva di incendio standard ISO 834)
- l'analisi di parti della struttura o l'analisi strutturale globale prende in considerazione almeno alcuni elementi insieme, considerando direttamente l'interazione tra di essi; la redistribuzione dei carichi dalle parti riscaldate (parti indebolite all'interno del compartimento incendio) alle parti fredde (parti più resistenti fuori dal compartimento di incendio) può essere valutata in modo accurato. Di conseguenza l'analisi globale della struttura permette di ottenere un più realistico comportamento meccanico della struttura esposta all'incendio.

Secondo gli attuali Eurocodici, possono essere usati tre tipi di modelli di calcolo per valutare il comportamento meccanico delle strutture in situazione di incendio, all'interno dei differenti approcci di analisi visti sopra. Si nota in particolare:

- metodi di calcolo semplificato basato su dati tabellati, disponibili solo per le strutture composte acciaio-calcestruzzo;
- modelli di calcolo semplificato, che possono essere divisi in due gruppi differenti; il primo è il famoso metodo della temperatura critica, ampiamente applicato all'analisi di elementi strutturali di acciaio, il secondo è costituito da tutti i modelli meccanici semplificati sviluppati per l'analisi di elementi strutturali di acciaio e composti;
- modelli di calcolo avanzati, che possono essere applicati a tutti i tipi di strutture e sono in generale basati o sul metodo agli elementi finiti o sul metodo alle differenze finite; nell'attuale ingegneria della sicurezza all'incendio, sta diventando il metodo sempre più usato a causa dei numerosi vantaggi che fornisce.

La scelta della parte di struttura da analizzare deve essere condotta anche alla luce del metodi di calcolo impiegato. La tabella seguente mostra chiaramente le differenti possibilità di applicazione dei tre metodi di analisi in condizioni di incendio nominale (standard).

☐ Azione termica definita con incendi nominali

Tipi di analisi	Dati tabellati	Modelli di calcolo semplificati	Modelli di calcolo avanzati
<b>Analisi per elementi</b>	<b>Si</b> ISO-834 incendio standard	<b>Si</b>	<b>Si</b>
<b>Analisi di parti della struttura</b>	<b>Non applicabile</b>	<b>Si</b> (se disponibile)	<b>Si</b>
<b>Analisi strutturale globale</b>	<b>Non applicabile</b>	<b>Non applicabile</b>	<b>Si</b>

Tab. 1 - Dominio di applicazione dei differenti metodi di calcolo in condizioni di incendio

## **Procedura di validazione e controllo**

La procedura di validazione e controllo deve verificare la validità del metodo di calcolo e l'esattezza dei risultati ottenuti. In generale la procedura deve prevedere la validazione dei metodi di calcolo utilizzati e il controllo della rispondenza in opera delle ipotesi di progetto e del modello di calcolo impiegato.

La procedura di validazione e controllo dovrebbe prevedere almeno i passi seguenti:

### *1) Scenari di incendio di progetto*

Gli scenari di incendio considerati devono essere definiti dal progettista, sulla base di dati di progetto forniti dal responsabile dell'attività. Questi scenari indicano chiaramente le condizioni di utilizzazione dei locali, oltre a tutte le misure attive e passive messe in opera e considerate nei calcoli delle prestazioni delle strutture portanti in caso di incendio. Essi devono essere definiti con specifico riferimento agli obiettivi di sicurezza che sono stati fissati per ogni progetto. Gli scenari di incendio di progetto devono essere approvati dalle autorità competenti e comunicati al responsabile dell'attività.

### *2) Curve di incendio naturale di progetto*

Ogni scenario di incendio sarà rappresentato da una curva di incendio naturale che determina l'azione termica che deve essere considerata per il calcolo strutturale. Le curve di incendio naturale sono stabilite per mezzo di un modello di calcolo o di un programma riconosciuto e basato sui criteri definiti in EN1991-1-2 (Eurocodice 1, parte fuoco) e sull'annesso nazionale. Un metodo o un programma di calcolo è riconosciuto se sufficientemente validato per mezzo di una campagna sperimentale basata su rapporti di prova redatti da organismi riconosciuti.

### *3) Analisi strutturale in condizioni di incendio*

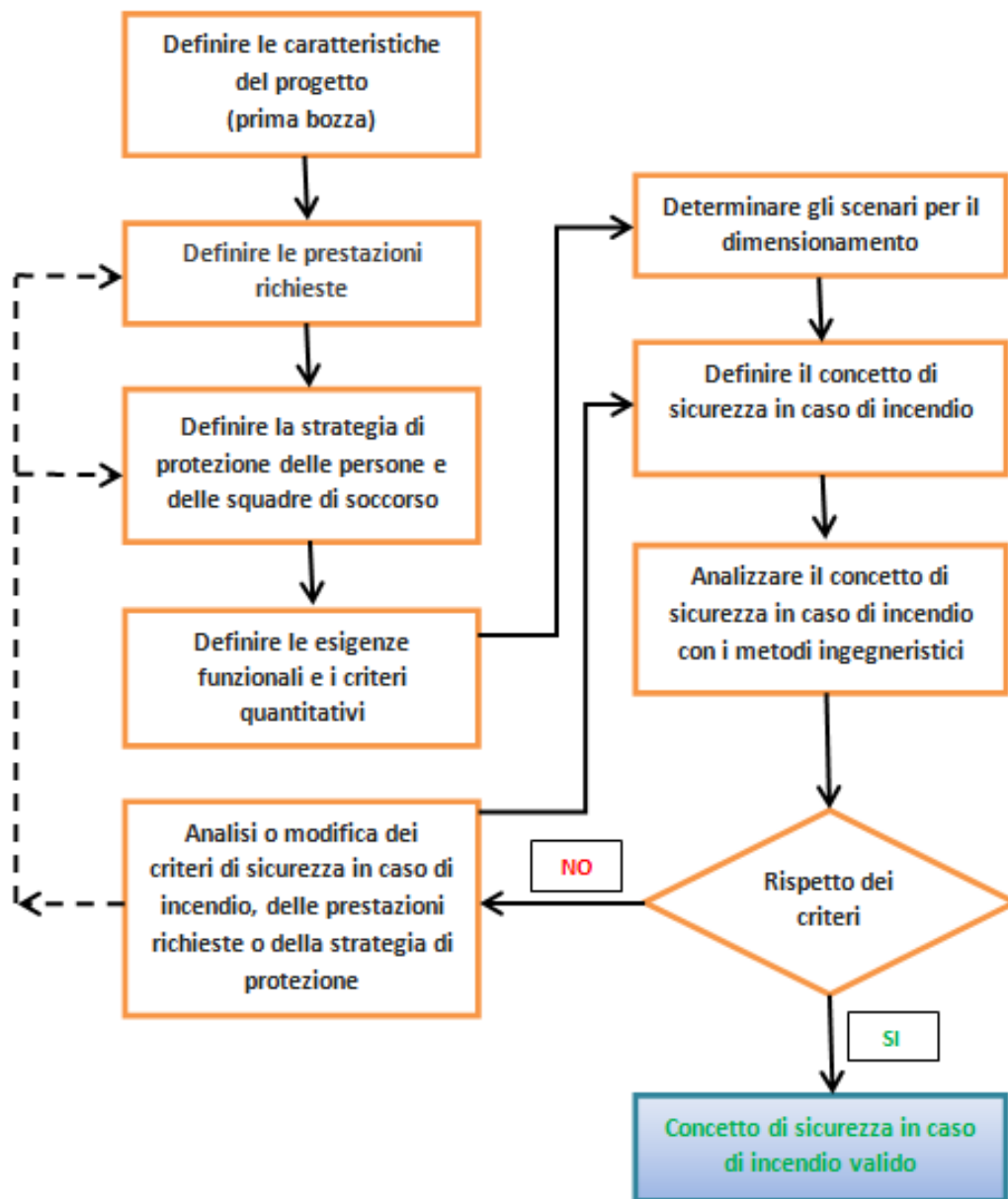
Le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture sono determinate mediante i criteri di calcolo previsti dalla normativa vigente, in particolare secondo quanto previsto nelle parti fuoco degli Eurocodici, rispettando le indicazioni delle Appendici Nazionali. Particolare attenzione deve essere prestata alla schematizzazione strutturale e ai metodi di calcolo applicati, rispettando i criteri previsti dalle norme vigenti, in particolare dal decreto 9 marzo 2007 e dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

L'analisi strutturale condotta mediante modelli di calcolo avanzato deve essere condotta per mezzo di un codice di calcolo sufficientemente riconosciuto e calibrato sulla base di prove sperimentali.

### *4) Verifiche previste dalle disposizioni normative vigenti*

La documentazione tecnica riguardante l'applicazione dell'approccio ingegneristico per la valutazione della sicurezza strutturale in caso di incendio è soggetta agli ordinari controlli previsti dalle normative vigenti per le opere strutturali soggette a rischio di incendio. In particolare a quanto previsto dalle procedure di prevenzione incendi, ai sensi dell'art. 16 del DLgs n. 139 del 8 marzo 2006, secondo le modalità previste da D.P.R. n. 151 del 1 agosto 2011, e dalle procedure di collaudo strutturale, ai sensi di quanto previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008).

Nell'ambito del gruppo di lavoro ISO TC92 SC4 [8] è stata definita una metodologia di valutazione e controllo applicata alla sicurezza in caso di incendio, che è rappresentata in Figura 6.



**Fig. 6** – Metodologia di validazione e controllo applicata alla sicurezza in caso di incendio secondo ISO TC92 SC4

## **Bibliografia**

- [1] Decreto del Ministero dell'Interno del 16 febbraio 2007 "*Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione*" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n. 87);
- [2] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 marzo 2007 "*Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco*" (GU n. 74 del 29-3-2007- Suppl. Ordinario n.87);
- [3] Decreto del Ministero dell'Interno del 9 maggio 2007 "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio" (G.U. n. 117 del 22-5-2007);
- [4] Norme Tecniche per le Costruzioni, supplemento ordinario della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 4 febbraio 2008, n.29;
- [5] EN 1991.1.2 (Eurocodice 1) "Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni in generale - Azioni sulle strutture esposte al fuoco";
- [6] EN 1993.1.2 (Eurocodice 3) "Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [7] EN 1994.1.2 (Eurocodice 4) "Progettazione delle strutture composte acciaio- calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio";
- [8] ISO/DIS 16730 "Fire Safety Engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods";
- [9] DIFISEK+, Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge, Progetto RFCS, Roma, Istituto Superiore Antincendi, 2 dicembre 2008;
- [10] Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer". John Wiley & Sons, New York, 1976;
- [11] Twilt, L. et al.: Design tools for the behavior of multi-storey steel-framed buildings exposed to natural fires". Report EUR 20953 EN, European Commission, Science Research and Development, 2004.
- [12] Nigro E., Cefarelli G., Pustorino S., Princi P., "Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio", Hoepli, 2010.
- [13] ITM-SST 1551.1 "Prescriptions de sécurité incendie. Instruction technique. Etude de stabilité au feu à l'aide d'une approche performancielle", Luxembourg.