

# ANGOLO TECNICO

Luca Ponticelli

# Resistenza **al Fuoco**

## La verifica al fuoco delle strutture metalliche

### AZIONI SULLE STRUTTURE METALLICHE SOTTOPOSTE AD INCENDIO

Il primo passo da compiere per la verifica al fuoco di una struttura non è dissimile da quello necessario per la verifica di una struttura in condizioni ordinarie: stabilire le "azioni" cui essa è sottoposta. Non è un caso se il termine utilizzato è "azioni" e non "carichi" come solitamente si è soliti fare perchè le costruzioni, in fase di incendio, sono soggette a cimenti di duplice natura:

- **meccanica**
- **termica.**

Verificare in condizioni di incendio una struttura significa stabilire se la stessa sarà in grado di portare i carichi presenti (azioni meccaniche) per un tempo minimo prestabilito facendo fronte al decadimento della proprietà meccaniche dei materiali di cui essa è costituita per effetto dell'incremento di temperatura (azioni termiche).

Con riferimento a quanto riportato negli Eurocodici strutturali, sono appresso evidenziate le due categorie di azioni.

### AZIONI MECCANICHE

**Le azioni meccaniche** derivano dalla presenza di carichi che durante l'incendio sollecitano le strutture. Esse sono di molteplice natura:

- G** carichi permanenti (es. pesi propri)
- Q** carichi variabili (es. sovraccarichi, neve, vento...)

**A** azioni indirette dovute all'esposizione all'incendio (es. dilatazioni termiche impedito o differenziate ...) Di ognuna delle dette azioni deve essere determinato il valore caratteristico (**k**) nonché il coefficiente parziale di sicurezza (**γ**) per le azioni permanenti ed i coefficienti di combinazione **ψ** delle azioni variabili.

In sostanza, i valori caratteristici dei carichi sono quei valori che hanno la probabilità del 5% di essere maggiorati, i coefficienti **γ** tengono conto del fatto che è possibile che sulle strutture possano essere presenti carichi superiori ai valori caratteristici e i coefficienti **ψ** tengono conto

della probabilità della presenza contemporanea di più carichi accidentali all'atto dell'incendio.

La combinazione dei carichi indicata da EC1 parte 2.2 è quella prevista in casi eccezionali:

$$\Sigma \gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} Q_{k1} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{ki} + A_d(t)$$

con:  $\gamma_{GA} = 1.0$

$\psi_{1,1}$  e  $\psi_{2,i}$  sono forniti nella parte I di EC1 nel caso di edifici:

	$\psi_1$ azione variabile principale	$\psi_2$ azione variabile principale
Sovraccarichi sugli edifici		
Cat. A domestici e residenziali	0,5	0,3
Cat. B – uffici	0,5	0,3
Cat. C – aree di congresso	0,7	0,6
Cat. D – aree di acquisto	0,7	0,6
Cat. E – magazzini	0,9	0,8
Carichi del traffico negli edifici		
Cat. F peso del veicolo $\leq 30$ kN	0,7	0,6
Cat. G $30$ kN $\leq$ peso del veicolo $\leq 160$ kN	0,5	0,3
Cat. H – tetti	0,0	0,0
Carichi da neve sugli edifici	0,2	0,0
Carichi da vento sugli edifici	0,5	0,0

La normativa, comunque, prevede anche procedimenti semplificati per la determinazione delle sollecitazioni meccaniche in caso di incendio.

### Azioni termiche

**Le azioni termiche** sono costituite dalla potenza termica netta che investe la superficie degli elementi costituenti la struttura per effetto dell'incendio:

$$h_{net,d} = \gamma_{n,c} h_{net,c} + \gamma_{n,r} h_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

## Resistenza al Fuoco

dove:

$h_{net,c}$  è il flusso netto per convezione  
 $h_{net,r}$  è il flusso netto per irraggiamento  
 $\gamma_{n,c}$  e  $\gamma_{n,r}$  sono i coefficienti parziali di sicurezza per ottenere i valori di progetto dei flussi termici (essi sono posti pari a 1,0).

Le espressioni dei due contributi al flusso termico complessivo sono le seguenti:

$h_{net,r} = \emptyset \epsilon_{res} 5,67 \cdot 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$  e:

$h_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) [\text{W/m}^2]$  dove:

$\emptyset [-]$  fattore di configurazione che misura il rapporto tra il calore radiante fuoriuscente da una sorgente e il calore che raggiunge la superficie oggetto di riscaldamento. Tale fattore varia tra 0 e 1 e, qualora non fosse ben specificato, può essere cautelativamente posto pari a 1.  
 $\epsilon_{res} [-]$  emissività risultante. Essa è il rapporto tra il potere emissivo della sorgente in esame alla temperatura considerata e quello del corpo nero alla stessa temperatura. In generale dipende dalla temperatura. Varia tra 0 e 1 (0,50 per l'acciaio, 0,24 per alluminio lucidato e 0,56 per alluminio con le superfici sporche).

$\theta_g [^\circ\text{C}]$  temperatura dell'ambiente (assunta pari alla temperatura nell'intorno delle membrature).  
 $\theta_m [^\circ\text{C}]$  temperatura della superficie del materiale riscaldato

$5,67 \cdot 10^{-8}$  costante di Stefan-Boltzman  $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$

$\alpha_c [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$  coefficiente di trasmissione termica per convezione (pari a 9 su superfici non esposte al calore e a 25 per superfici esposte al programma standard).

L'obiettivo dell'analisi termica è quello di risalire alla distribuzione delle temperatura nel tempo all'interno delle strutture e, quindi, alla capacità portante ed alla deformazione delle stesse istante per istante.

Il problema termico è completamente definito se, oltre alla potenza termica netta trasmessa alla struttura sono note le condizioni iniziali di temperatura e le proprietà termiche dei materiali impiegati.

La normativa europea consente sostanzialmente due approcci per la risoluzione del problema termico con riferimento alla determinazione dell'andamento della temperatura ambiente durante le fasi dell'incendio. Sono infatti ammesse leggi di variabilità tempo-

temperatura **nominali** e **parametriche**.

**Le curve nominali**, estremamente semplificate, involuppano in genere gli incendi reali. Esse sono molto comode per le sperimentazioni dei materiali in forno sia perché consentono una standardizzazione delle prove nei paesi europei (con conseguente facilità di esportazione dei beni tra i paesi), sia perché esse sono state concepite per essere facilmente implementate nei laboratori di prova. Tipiche curve nominali sono:

**Curva standard (ISO 834):**

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

$\theta_g [^\circ\text{C}]$  temperatura ambiente nel compartimento  
 $t [\text{min}]$  tempo

**Curva esterna:**

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20$$

$\theta_g [^\circ\text{C}]$  temperatura nell'intorno della membratura  
 $t [\text{min}]$  tempo

**Le curve parametriche** tengono conto del reale andamento della temperatura nel tempo:

esse evidenziano infatti una fase crescente (riscaldamento) ed una fase decrescente (raffreddamento) più o meno prolungate e con il raggiungimento di una temperatura di picco più o meno elevata a seconda della quantità di combustibile presente e della possibilità di apporto di ossigeno fresco dall'esterno. In sostanza, quindi, l'andamento reale della temperatura dipende dal carico di incendio qd e dal fattore di ventilazione "O".

Infatti sappiamo che, affinché possa verificarsi un incendio è necessario che vi sia combustibile, comburente ed un innesco. Una volta innescatosi, l'incendio può estinguersi naturalmente per mancanza di combustibile o di comburente (o di entrambi) e quindi questi due parametri risultano indispensabili per la determinazione dell'andamento nel tempo della temperatura ambiente durante l'incendio che, raggiunta la fase di picco, tenderà a decrescere. L'Eurocodice 1 fornisce due differenti modelli per la determinazione parametrica della curve tempo-temperatura a seconda che gli elementi strutturali sottoposti a verifica siano interni o esterni al compartimento interessato dall'incendio. Per semplicità si riporta solo il modello relativo ad elementi *interni* al compartimento.

La curva tempo-temperatura nella fase di riscaldamento è:

$$\theta_g = 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \text{ con:}$$

$\theta_g [^\circ\text{C}]$  temperatura nel compartimento  
 $t^* [\text{ore}] = t \cdot \Gamma$   
 $t [\text{ore}]$  tempo

Resistenza  
al Fuoco

- $\Gamma$  [-] =  $[O/b]^2 / (0,04/1160)^2$
- $b$  [ $J/m^2s^{1/2}K$ ] =  $(\rho c \lambda)^{1/2}$  (variabile tra 1000 e 2000)
- $O$  [ $m^{1/2}$ ] fattore di ventilazione =  $A_v \sqrt{h/A_t}$   
(limitato tra 0,02 e 0,20)
- $A_v$  [ $m^2$ ] area delle aperture verticali
- $h$  [m] altezza delle aperture verticali
- $A_t$  [ $m^2$ ] superficie totale della pareti (muri, pavimenti, soffitti incluse le aperture)
- $\rho$  [ $kg/m^3$ ] densità delle chiusure perimetrali
- $c$  [ $J/kg K$ ] calore specifico della chiusure perimetrali
- $\lambda$  [ $W/m K$ ] conducibilità termica delle chiusure perimetrali

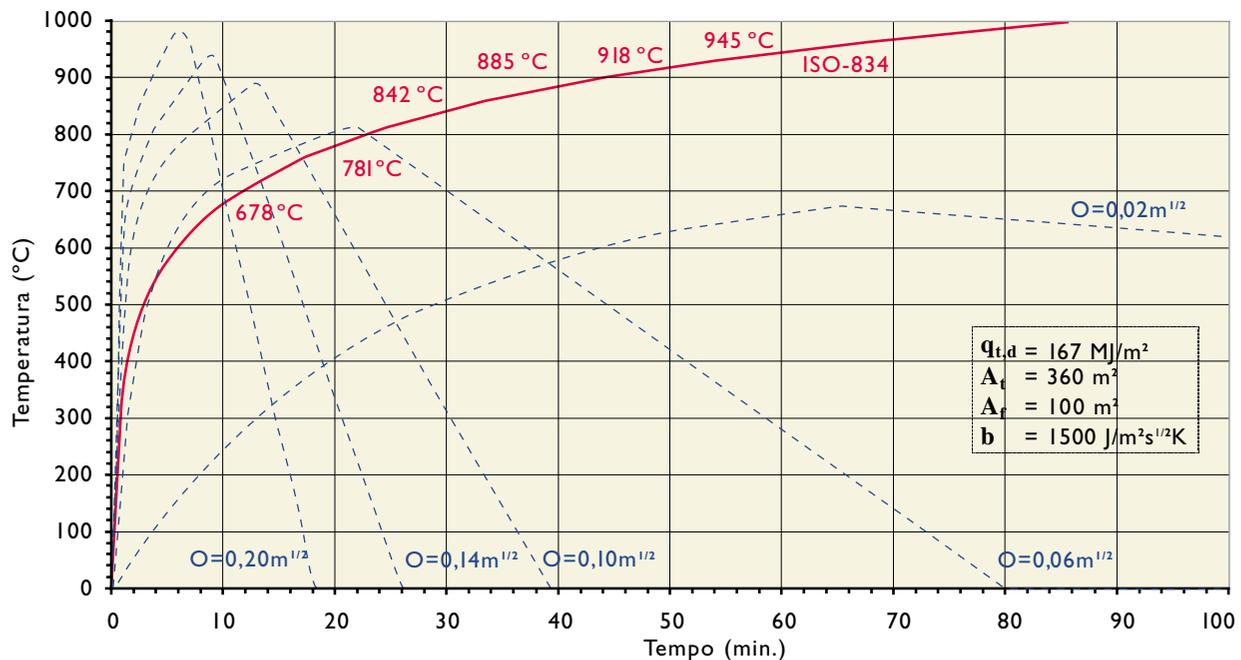
La fase di riscaldamento termina all'istante  $t_d^*$  momento in cui si raggiunge la massima temperatura  $\theta_{max}$ . La norma fornisce l'espressione di  $t_d^*$ :

$t_d^*$  [ore] =  $(0,13 \cdot 10^{-3} q_{t,d} \cdot \Gamma) / O$  dove:  
 $q_{t,d}$  [ $MJ/m^2$ ] è il valore di progetto del carico di incendio riferito all'intera superficie del compartimento ( $A_t$ ) con la limitazione che esso sia compreso tra 50 e 1000 [ $MJ/m^2$ ].

Dall'istante  $t_d^*$  inizia la fase di raffreddamento con andamento lineare più o meno accentuato in dipendenza del valore assunto da  $t_d^*$ :

$\theta_g = \theta_{max} - 625 (t^* - t_d^*)$  per  $t_d^* \leq 0,5$  ore  
 $\theta_g = \theta_{max} - 250 (3 - t_d^*)(t^* - t_d^*)$  per  $0,5 < t_d^* < 2$  ore  
 $q_g = q_{max} - 250 (t^* - t_d^*)$  per  $t_d^* \geq 2$  ore  
 Anche l'approccio con le curve parametriche è approssimato poiché prescinde dalla fase iniziale di riscaldamento dell'ambiente e presuppone che tutto il compartimento sia interessato all'incendio (quindi è relativo ad una fase successiva al flash-over). Sono però allo studio dei modelli (detti "naturali") che consentono di descrivere il reale andamento della temperatura negli ambienti tenendo conto anche dell'estensione del focolaio e dello strato dei fumi caldi (ad esempio con i modelli a due zone) nelle fasi iniziali dell'incendio.  
 Si riporta un confronto tra la curva standard ed alcune curve parametriche ottenute al variare del solo fattore di ventilazione:

**CONFRONTO TRA CURVE PARAMETRICHE DI ECI E CURVA STANDARD**



Si nota che la curva standard è una curva strettamente crescente mentre le curve parametriche constano di una tratto ascendente (riscaldamento) e di un tratto discendente (raffreddamento) dovuto o a carenza di ossigeno e di combustibile. Entrambe queste curve sono valide nell'ipotesi di incendio generalizzato al compartimento.  
 Stabiliti i carichi agenti su una struttura, il passo

successivo è quello di valutare il decadimento delle proprietà meccaniche dei materiali al crescere delle temperature nonché la variazione delle proprietà termiche degli stessi per effettuare le analisi termiche che consentiranno di risalire all'andamento delle temperature nelle membrature al trascorrere del tempo.