

Influenza della curva di incendio nella progettazione strutturale di un edificio in acciaio

Le prestazioni meccaniche delle strutture in acciaio degradano sensibilmente con l'innalzamento della temperatura.

La sicurezza delle strutture metalliche esposte al rischio di incendio richiede pertanto costi di intervento notevoli, tanto che in condizioni ad alto rischio spesso si privilegiano altri sistemi costruttivi, più adatti a mantenere la propria resistenza strutturale in tali severe condizioni ambientali. Occorre aggiungere, inoltre, che spesso i procedimenti di calcolo e di verifica si presentano complessi e con campi di validità limitati. D'altronde la rilevanza delle strutture in acciaio è tale da aver spinto i ricercatori e gli Enti normatori a studiare in maniera approfondita gli aspetti legati alla resistenza al fuoco, introducendo procedimenti di analisi più raffinati e innovativi, che sono stati poi codificati nella normativa più recente e in particolare negli Eurocodici.

Le sezioni principali degli Eurocodici che trattano di resistenza al fuoco delle strutture metalliche sono:

- UNI ENV 1991.2.2 : "Basi di calcolo ed azioni sulle strutture . Azioni sulle strutture esposte al fuoco", Aprile 1997.
- UNI ENV 1993.1.2 : EUROCODICE 3 – "Regole generali. Progettazione della resistenza all'incendio", Settembre 1995.

Gli Eurocodici introducono due diversi metodi di analisi:

- un metodo convenzionale
- un metodo generale;

Il metodo convenzionale, simile ai procedimenti nazionali attualmente in vigore, si basa su procedimenti analitici fortemente semplificati, tarati sulla base di osservazioni sperimentali.

Il modello generale, invece, è di tipo analitico e richiede l'analisi dell'evoluzione del comportamento della struttura soggetta all'incendio, tenendo conto degli effetti legati al riscaldamento, controllando che non si verificano crisi locali o globali.

In Italia, gli Eurocodici non sono stati ancora formalmente adottati, per cui le norme di riferimento in materia di strutture in acciaio sono:

- Circolare n.91 del 14 settembre 1961– Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile
- ISO UNI 9503: Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in acciaio.

L'obiettivo della tesi è di approfondire i procedimenti analitici di verifica delle strutture metalliche esposte al rischio di incendio, con particolare riguardo alle ipotesi e alle metodologie che consentono di impiegare curve di incendio naturali.

UNI9503 E MODELLO CONVENZIONALE DELL'EC3

I modelli convenzionali permettono un dimensionamento semplificato degli elementi dell'edificio, che vengono considerati individualmente, prescindendo dal comportamento globale della struttura. La verifica della validità delle ipotesi semplificative che sono alla base dei procedimenti convenzionali ed il controllo della loro coerenza con il reale comportamento della struttura sono stati oggetto di uno studio approfondito.

Le verifiche convenzionali si basano sostanzialmente sulla definizione di temperatura critica e sulla sua determinazione in funzione dello stato di sollecitazione a freddo dell'elemento. La temperatura critica è definita come la temperatura della struttura che ne determina la crisi. In alternativa, la resistenza al fuoco può essere definita come la durata in minuti dell'intervallo di tempo, misurato dall'inizio dell'incendio, per il quale la struttura è in grado di svolgere la propria funzione portante.

Il modello convenzionale dell'Eurocodice prevede una formula di verifica analoga a quella generale del tipo

$$E_{fid} \leq R_{fid}$$

in cui si controlla che le sollecitazioni E_{fid} siano minori delle resistenze disponibili R_{fid} .

Nella disequazione le sollecitazioni E_{fid} , calcolate a freddo, sono quelle dovute alla combinazione di carico per la situazione eccezionale di incendio, mentre la resistenza R_{fid} è quella valutata per l'effettiva distribuzione della temperatura sulla sezione trasversale impiegando i diagrammi di variazione delle caratteristiche del materiale in funzione della temperatura. Un metodo analogo è impiegato anche dalla UNI9503, sintetizzato nella formula:

$$\chi \cdot P/P_u = f_{y\theta}/f_y$$

dove:

$f_{y\theta}$ = tensione di snervamento alla temperatura critica

f_y = tensione di snervamento a temperatura ordinaria

χ = fattore correttivo per tarare il metodo con quello sperimentale

P = carico sull'elemento conseguente all'azione di calcolo

P_u = carico corrispondente allo stato limite ultimo di collasso a temperatura ordinaria.

La verifica richiede pertanto di determinare, oltre alle azioni da applicare alla struttura, anche la temperatura degli elementi strutturali in funzione di quella dei gas all'interno del compartimento e la variazione di resistenza che consegue al riscaldamento.

Nel seguito si sintetizzano i passi del procedimento.

AZIONI MECCANICHE

Le combinazioni di carico per la situazione eccezionale di incendio previste dall'Eurocodice e dalla norma UNI possono essere ricondotte alla stessa formulazione. Trattandosi di una condizione di carico eccezionale, i coefficienti parziali, che tengono conto della distribuzione probabilistica delle azioni, sono tutti unitari.

Le azioni di calcolo per la resistenza al fuoco sono rappresentate dalla più gravosa delle combinazioni:

$$F_d = G_{kj} + A_d + \psi_1 \cdot Q_{k1} + \sum \psi_{2i} \cdot Q_{ki}$$

dove:

G_{kj} = valore caratteristico delle azioni permanenti

Q_{k1} = valore caratteristico dell'azione variabile dominante

Q_{ki} = valore caratteristico delle altre azioni variabili

A_d = valore caratteristico di una azione eccezionale

ψ_1 e ψ_{2i} = coefficienti di combinazione.

Il termine A_d , che compare nella formula dell'Eurocodice, si riferisce al valore di progetto dell'azione termica indiretta, in cui compaiono anche:

- l'espansione termica vincolata della membratura;
- le tensioni interne provocate dai gradienti termici;
- le dilatazioni termiche di elementi adiacenti.

Nella formula di combinazione della UNI9503, questo termine non compare esplicitamente, ma è prescritto di tenere conto delle azioni interne dovute all'eventuale impedimento delle dilatazioni.

CURVA DI INCENDIO

L'andamento della temperatura durante l'evoluzione dell'incendio è schematizzato dalla "curva di incendio". Nei modelli convenzionali si impiegano curve normalizzate, studiate per coprire tutte le possibili situazioni progettuali che possono verificarsi, senza approfondire i fattori che influenzano il reale sviluppo del fuoco.

La UNI9503 fornisce la sola curva normalizzata ISO834, mentre l'Eurocodice per il modello convenzionale introduce tre diverse curve nominali temperatura-tempo (fig. 1):

1. la curva di incendio standard;
2. la curva per elementi esterni;
3. la curva per gli idrocarburi.

La curva standard coincide con la curva ISO834, mentre le altre due sono relative a situazioni progettuali diverse da quelle standard.

È importante osservare come il metodo generale dell'Eurocodice preveda, sotto opportune ipotesi, anche l'impiego di curve di incendio naturali, che rappresentano in maniera più realistica l'evoluzione di un incendio reale nel compartimento considerato.

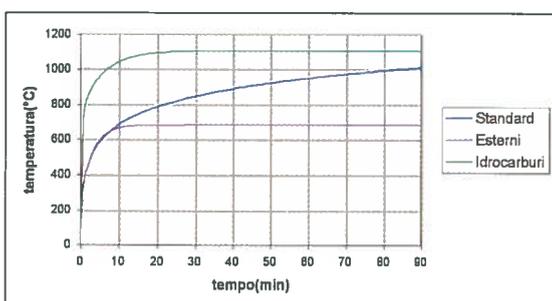


Fig. 1 - Curve di incendio normalizzate

CURVA DI RISCALDAMENTO DEGLI ELEMENTI

Nel caso si adotti un modello di analisi semplificato, entrambe le normative consentono di ottenere la temperatura degli elementi in funzione del tempo attraverso formule analitiche in termini di flussi di calore.

Poiché la temperatura è supposta uniforme sull'elemento, è opportuno verificare l'aderenza alla realtà di questa ipotesi controllando che i gradienti di temperatura lungo l'altezza siano limitati.

CARATTERISTICHE MECCANICHE DELL'ACCIAIO

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio cambiano durante l'incendio a causa del riscaldamento, condizionando ovviamente la resistenza e le deformazioni della struttura.

I due testi normativi analizzati definiscono curve di variazione della tensione di snervamento in funzione della temperatura leggermente differenti (fig. 2). Si può notare che la curva tensione di snervamento-temperatura dell'Eurocodice si mantiene sempre al di sopra della corrispondente curva UNI, permettendo un migliore sfruttamento delle capacità resistenti dell'acciaio.

MODELLO DI CALCOLO GENERALE

Il metodo generale fornito dall'Eurocodice 3 si basa su modelli analitici, che hanno lo scopo di fornire risultati realistici: per essi è necessario disporre di adeguati programmi di calcolo, generalmente agli elementi finiti, in grado di descrivere l'evoluzione dei campi di tensione e di temperatura nella struttura durante l'incendio, considerando tutti i diversi fenomeni, che possono influenzare le sollecitazioni e il comportamento delle sezioni.

In particolare si devono prendere in considerazione

- gli effetti combinati delle azioni meccaniche, delle imperfezioni geometriche e delle azioni termiche
- la dipendenza delle proprietà meccaniche dalla temperatura

- le non linearità geometriche

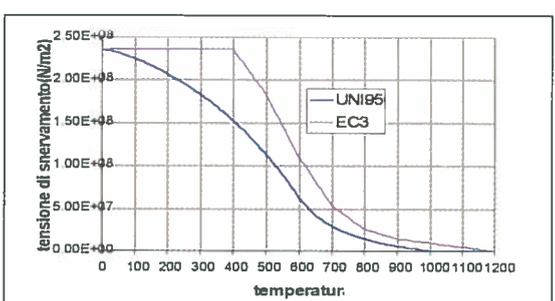
- le non linearità materiali,

considerando sezioni trasversali di forma e dimensioni arbitrarie.

LE FASI DEL CALCOLO

In generale le metodologie di calcolo impiegate prevedono modelli di risposta termica e di risposta meccanica separati, per cui la determinazione del campo di temperatura e dei campi di tensione negli elementi strutturali costituiscono fasi distinte del

Fig. 2 - Tensione di snervamento in funzione della temperatura



calcolo analitico.

Poiché il campo di temperatura negli elementi ad un certo istante t è generalmente disuniforme e caratterizzato da gradienti elevati, la sua determinazione richiede spesso un'analisi tridimensionale della struttura completa (fig. 3).

Scopo dell'analisi è quella di individuare il campo di temperatura nella struttura e la sua evoluzione nel tempo in funzione della curva di incendio adottata, sì da consentire la determinazione istante per istante, mediante l'applicazione di un adeguato modello meccanico di risposta, dei campi di tensione e di deformazione della struttura.

Ovviamente, assegnata una curva d'incendio arbitraria, l'analisi numerica può essere condotta, con diversi gradi di affinamento e di complessità, in funzione della complessità dei modelli termo-meccanici e dei legami costitutivi adottati.

La verifica, infine, consiste nel confrontare, istante per istante, le sollecitazioni di progetto con le resistenze di progetto dei diversi elementi strutturali, anch'esse variabili nel tempo. Nel piano cartesiano la temperatura e l'istante di collasso dell'elemento sono ovviamente individuati dall'intersezione delle curve sollecitazione-tempo e resistenza-tempo (vedi fig. 4).

APPLICAZIONI

Nel corso dello studio, i procedimenti di verifica delle diverse normative sono stati confrontati determinando le condizioni di collasso di alcune strutture rilevanti, in accordo con quanto descritto in precedenza ed esemplificato in fig. 4.

Nel calcolo si sono considerate le variazioni termiche sulla sezione trasversale delle aste indotte dalla curva di incendio ISO834, e si sono adottati legami costitutivi elastici dipendenti dalla temperatura.

Le verifiche delle sezioni critiche sono state condotte considerando tutti i parametri rilevanti ed adattando opportunamente, in funzione della temperatura e del tempo, i formati di verifica a freddo.

La costruzione di raffinati modelli strutturali agli elementi finiti ha permesso di valutare correttamente la complessa evoluzione della struttura nel tempo.

L'analisi ha confermato, in particolare, che la deformazione della struttura durante l'incendio può provocare, per effetto dell'interazione tra i diversi elementi strutturali, stati di sollecitazione molto complessi, dipendenti dagli effetti del secondo ordine, dalle dilatazioni impedito, dalla massività delle sezioni e conseguentemente dal disuniforme riscaldamento degli elementi e dalle variazioni dei rapporti di rigidità nel tempo. A titolo di esempio in figura 5 sono rappresentate le curve sollecitazione-tempo nella trave e nella colonna di un portale.

I campi di temperatura trovati sono molto diversi da quelli previsti nei modelli semplificati generalmente applicati in campo strutturale: ciò sottolinea la necessità di studi approfonditi per condizioni di riscaldamento non direttamente riconducibili a modelli standard.

In conclusione si può affermare che: i metodi semplificati di analisi funzionano bene per strutture ordinarie, ma non si possono applicare a casi che presentano comportamenti termici e strutturali complessi. Questi casi complessi richiedono studi più raffinati, basati su scenari d'incendio realistici.

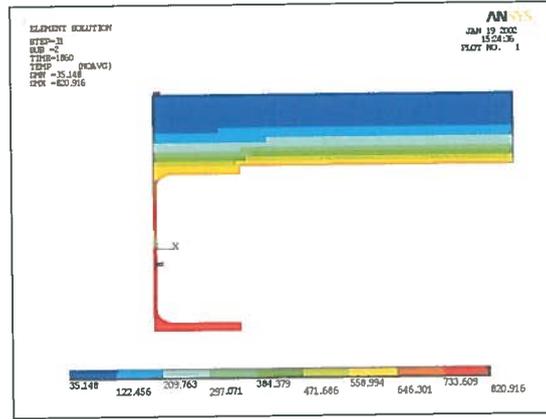


Fig. 3 - Distribuzione di temperatura su un profilo parzialmente protetto

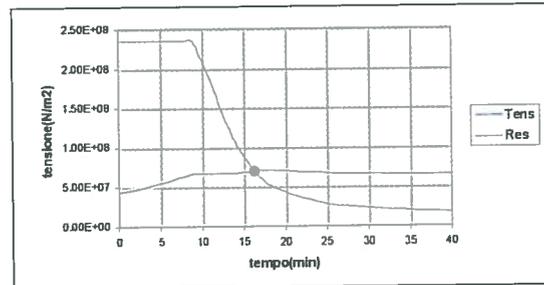


Fig. 4 - Individuazione della situazione di collasso

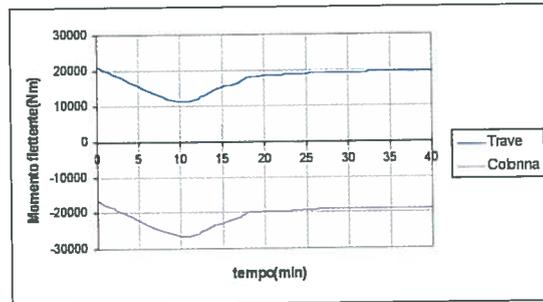


Fig. 5 - Esempio di sollecitazioni variabili nel tempo in un portale

Dr. ing. Paola Princi,

laureata presso l'Università degli Studi di Pisa con la tesi "Influenza della curva di incendio nella progettazione strutturale di un edificio di acciaio", supportata dal tirocinio presso lo Studio di Ingegneria delle Strutture di Livorno col coordinamento dell'ing. S. Pustorino.

Relatori: prof. ing. Andrea Vignoli e prof. ing. Ostilio Spadaccini.

Tesi premiata nell'ambito del concorso "Premi per tesi di laurea nel settore delle costruzioni in Acciaio 2002" finanziato da Acai-Collegio degli Ingegneri di Padova.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] L.G.Cajot, M.Fontana, J.M.Franssen, D.Joyeux, J.Kruppa, S.Pustorino, J.B.Schleich, L.Twilt et altri - Natural fire safety concept
- [2] CIRCOLARE n.91 del 14 settembre 1961 : Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile.
- [3] NI ENV 1991.1 : "Basi di calcolo ed azioni sulle strutture", Ottobre 1996.
- [4] UNI ENV 1991.2.2 : "Basi di calcolo ed azioni sulle strutture .Azioni sulle strutture esposte al fuoco", Aprile 1997.
- [5] Draft prEN 1990 : EUROCODE - "Basis of design", 1 Febbraio 2000.
- [6] UNI ENV 1993.1.2 : EUROCODICE 3 - "Regole generali. Progettazione della resistenza all'incendio", Settembre 1995.
- [7] ISO UNI 9503 : "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in acciaio", Aprile 1989.