

LE PRESTAZIONI DI RESISTENZA AL FUOCO DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO: LA SPECIFICA TECNICA NEL PROGETTO DI PREVENZIONE INCENDI

Documento a cura di:



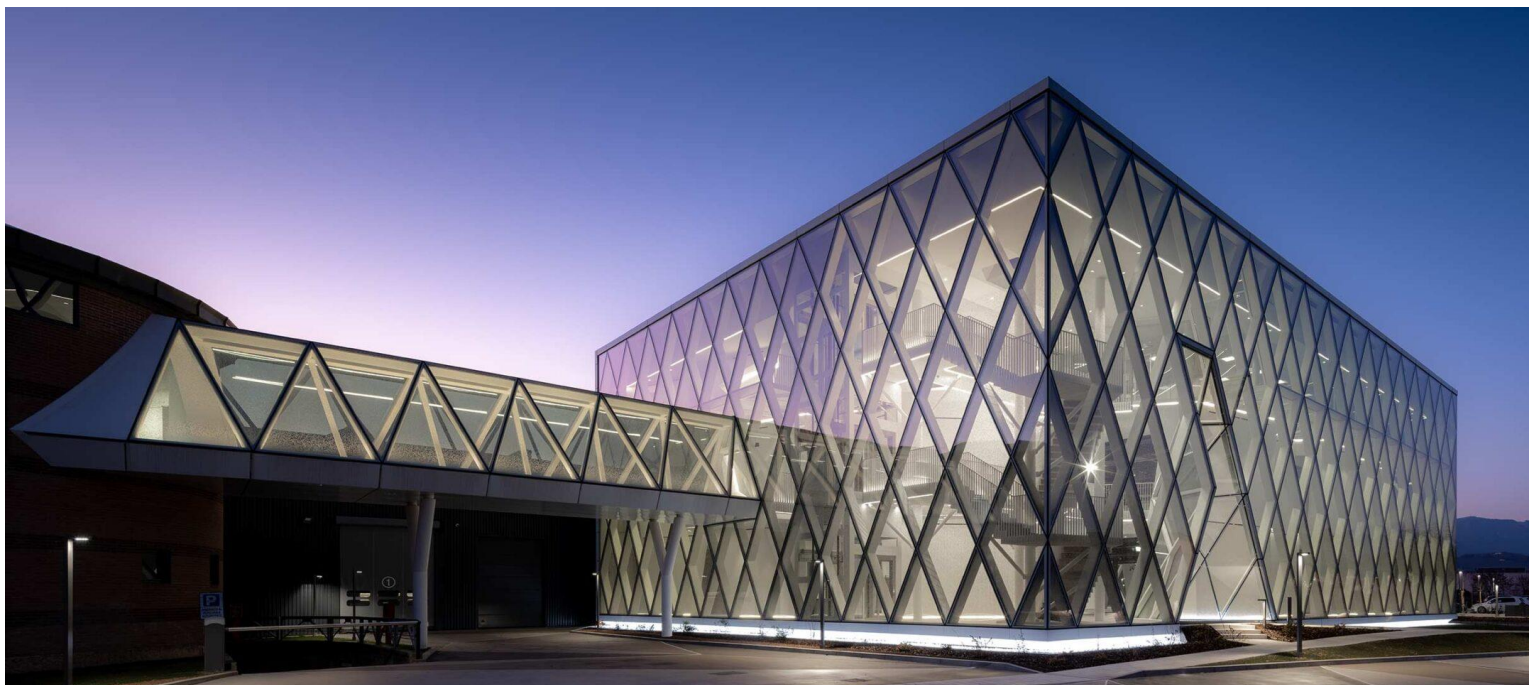
Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'Incendio



MINISTERO
DELL'INTERNO



Fondazione
Promozione Acciaio





Il presente articolo è frutto delle attività della Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio. Il Tavolo Tecnico-Scientifico permanente è stato istituito il 20 gennaio 2006 su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco ed è finalizzato a valutare i risultati della ricerca nazionale ed europea, all'analisi tecnica della norma nazionale e confronto con quella europea al fine di fornire contributi tecnici per un suo aggiornamento. La Commissione fornisce strumenti appropriati all'organo di controllo per la valutazione della sicurezza delle strutture in acciaio in caso di incendio e volti a garantire l'aggiornamento professionale dei tecnici impegnati nell'attività di prevenzione incendi.

La Commissione è composta da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale, da docenti universitari e da liberi professionisti:

- Prof. Ing. Emidio Nigro (Coordinatore) - Ordinario di Strutture Speciali e Tecnica delle Costruzioni Università Federico II di Napoli;
- Ing. Mauro Caciolai – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco;
- Ing. Andrea Marino – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco;
- Ing. Sandro Pustorino – Libero professionista

Prestano la loro collaborazione su aspetti specifici in merito alla sicurezza strutturale e alla protezione attiva:

- Ing. Luca Ponticelli – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ing. Piergiacomo Cancelliere – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
- Ing. Armando De Rosa – Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

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

© Documento di proprietà di Fondazione Promozione Acciaio.
Diritti di riproduzione riservati
Pubblicazione: Aprile 2024

LE PRESTAZIONI DI RESISTENZA AL FUOCO DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO: LA SPECIFICA TECNICA NEL PROGETTO DI PREVENZIONE INCENDI

AUTORI

A. Marino, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
E. Nigro, Università degli Studi di Napoli "Federico II"
S. Pustorino, SIS Ingegneria.

SOMMARIO

Nel presente articolo l'attenzione è centrata sulla specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco nel progetto di prevenzione incendi, con particolare riferimento al caso di un edificio realizzato con strutture di acciaio, ossia la specifica tecnica della Misura S2 che auspicabilmente potrebbe essere prima o poi prevista ai sensi del Codice di prevenzione incendi [1]. Nell'ambito del Codice di prevenzione incendi, il concetto di specifica tecnica del progetto di prevenzione incendi è definito al momento solo nell'ambito delle misure di protezione attiva. Esso rimanda alle Specifiche tecniche degli impianti di protezione attiva contro l'incendio, come riscontro alla relativa documentazione progettuale richiesta dal D.M. 20.12.2012 nell'ambito dei procedimenti di prevenzione incendi. In sostanza "la specifica d'Impianto" nel Codice di prevenzione incendi è un elemento necessario del progetto di prevenzione incendi da sottoporre al parere di conformità quando un determinato impianto è impiegato nella soluzione progettuale delle misure tecniche S6, S7 o S8. Nel caso in cui la strategia antincendio del progetto di prevenzione incendi preveda una determinata prestazione di resistenza al fuoco, è chiara, ma ad oggi non esplicitamente prevista dal normatore, la medesima necessità di predisporre una specifica tecnica delle soluzioni progettuali individuate per la Misura S2. Nel documento è tracciata la sintesi dei dati tecnici necessari per redigere la specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco di una struttura portante di acciaio, compresi i dati relativi a eventuali componenti integrativi impiegati nella soluzione progettuale, come ad esempio specifici sistemi di protezione passiva o specifici impianti di protezione attiva, il cui contributo è considerato nella prestazione di resistenza al fuoco. Tale specifica deve comprendere il richiamo della norma di riferimento applicata in fase di progettazione, i metodi di calcolo impiegati per la verifica della prestazione, la qualificazione dei materiali impiegati, in particolare quella degli eventuali sistemi protettivi, e i contenuti della specifica d'impianto necessari per considerare l'eventuale contributo degli impianti di protezione attiva. L'importanza della specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco di un edificio è segnalata anche per individuare il corretto percorso delle prestazioni professionali dei progettisti antincendio e strutturali durante la fase della progettazione, oltre che dei professionisti impegnati nella successiva fase della realizzazione (direzione dei lavori, collaudo strutturale, certificazione e asseverazione nell'ambito della SCIA antincendio) ed infine dell'esercizio dell'attività per la corretta manutenzione dell'edificio. Non è da sottovalutare anche l'importanza di questa specifica per consentire la fattibilità di future modifiche dell'attività, oltreché nelle procedure di rinnovo della validità della prestazione di resistenza al fuoco e della relativa asseverazione.

Tenendo conto dei criteri normativi vigenti per la progettazione della prestazione di resistenza al fuoco delle strutture di acciaio, la specifica tecnica è stata distinta in:

- soluzioni progettuali conformi, per strutture di acciaio non protette e per strutture protette;
- soluzioni progettuali alternative;

e, facendo riferimento anche a quanto previsto nel recente articolo, Prontuario delle soluzioni progettuali e check list [10], in:

- nuove costruzioni;
- costruzioni esistenti.

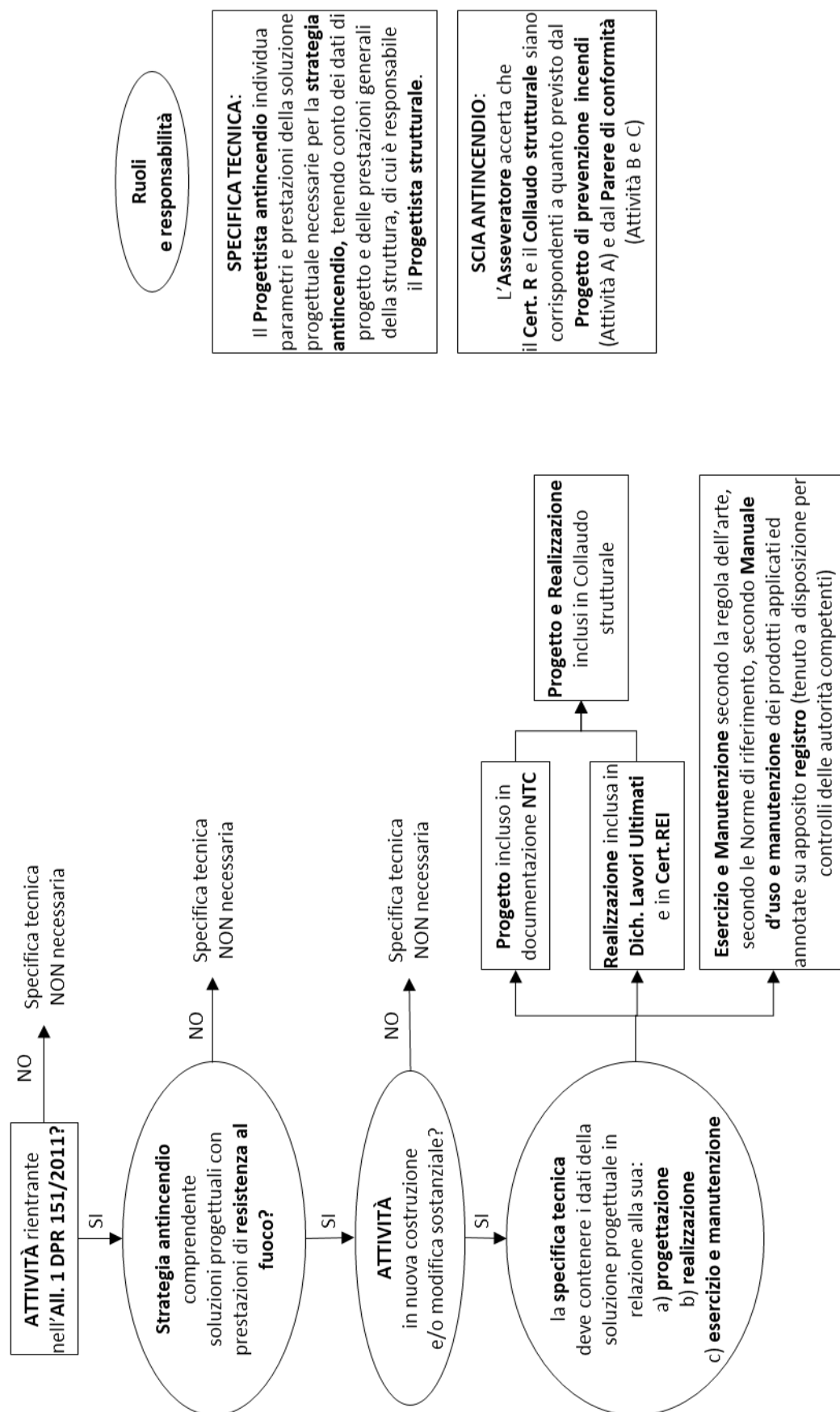


Figura 1- Schema generale della prestazione di resistenza al fuoco e ruolo della specifica tecnica nel progetto di prevenzione incendi

1. INTRODUZIONE

La prestazione di **resistenza al fuoco** di un'opera da costruzione è definita nel progetto di prevenzione incendi, nel quale il progettista, una volta stabiliti scopo ed obiettivi di sicurezza antincendio ed effettuata la valutazione del rischio, individua le n. 10 misure tecniche della strategia antincendio dell'attività o delle attività che si svolgono nell'opera da costruzione.

La determinazione del livello di prestazione della resistenza al fuoco, misura S.2 del Codice di prevenzione incendi [1], avviene sulla base dei criteri di attribuzione definiti nella normativa stessa, tenendo conto delle caratteristiche dell'attività e della progettazione delle altre n. 9 misure previste dalla progettazione antincendio. Oltre che nell'ambito del **progetto di prevenzione incendi**, la prestazione di resistenza al fuoco di un'opera da costruzione deve essere definita e documentata secondo quanto previsto dalle Norme tecniche per le costruzioni [2], nell'ambito del **progetto strutturale** e delle previste procedure di esecuzione dei lavori. Nel recente articolo [9] è stato illustrato l'iter operativo delle procedure previste per questa prestazione (Figura 1), a partire dalle fasi della progettazione, delle operazioni di esecuzione e collaudo delle opere e della certificazione SCIA antincendio necessaria per l'inizio dell'attività. In esso si è voluto in particolare indicare i principi l'armonizzazione, la razionalizzazione e la semplificazione delle diverse fasi operative, al fine di ottenere un'applicazione coerente con le normative tecniche vigenti.

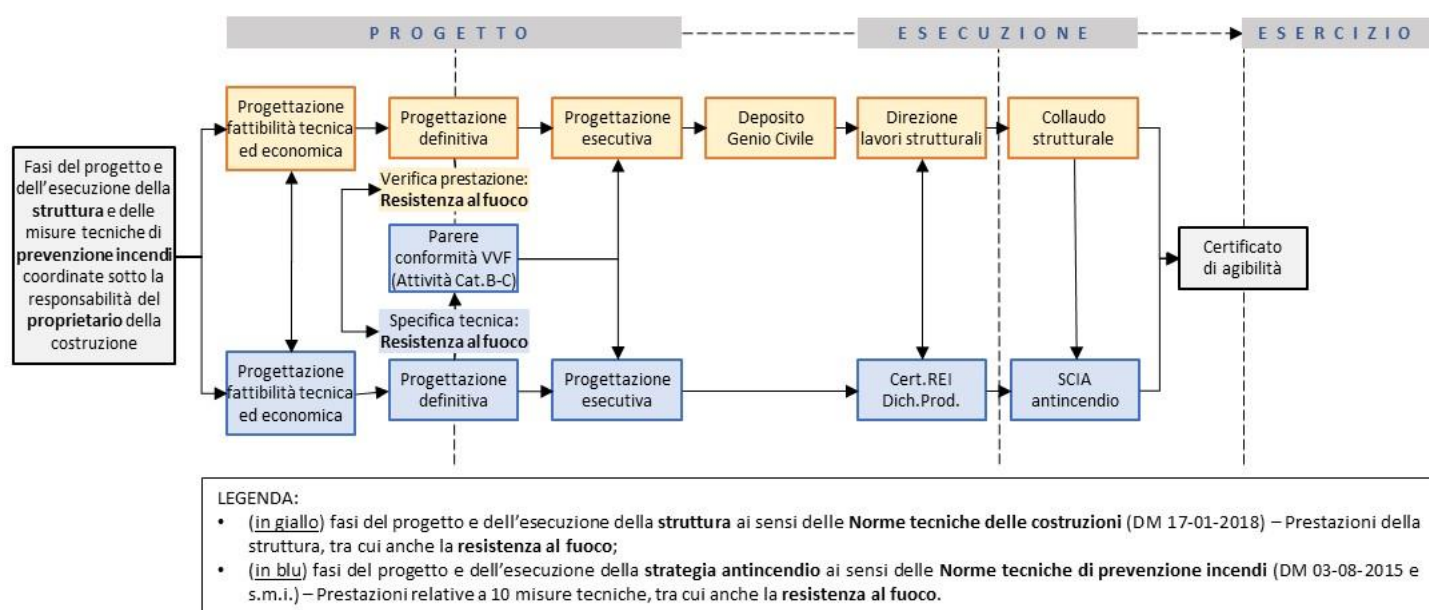


Figura 2 – Iter operativo per la realizzazione della resistenza al fuoco delle strutture

Nell'iter operativo illustrato in Figura 1 assume particolare importanza il ruolo della **specifica tecnica** della **prestazione della resistenza al fuoco** del progetto di prevenzione incendi, che può essere così definito: documento di sintesi dei dati tecnici che descrivono le prestazioni di resistenza al fuoco della struttura dell'edificio. Tale specifica deve riportare tutti i dati della struttura impiegati per eseguire la valutazione della prestazione di resistenza al fuoco e, ovviamente, deve essere coerente con quanto previsto nella progettazione strutturale.

Essa comprende il richiamo della norma di progettazione che si intende applicare, i metodi di calcolo applicati per la quantificazione della prestazione di resistenza al fuoco e i dati necessari per individuare come il caso specifico trattato sia compreso nel campo di applicazione del metodo impiegato.

È da sottolineare il fatto che la specifica tecnica della resistenza al fuoco è un documento essenziale sia della strategia antincendio dell'attività nel progetto di prevenzione incendi, sia della progettazione strutturale dell'edificio. Quindi esso deve contenere tutti i dati necessari affinché siano correttamente impostate le procedure progettuali e di esecuzione dei lavori previste, come ad esempio il Parere di conformità VVF, laddove necessario, il Collaudo strutturale e la SCIA antincendio.

Nel presente articolo, facendo riferimento alla tipologia di soluzioni progettuali previste nell'ambito della normativa vigente, sono illustrate le caratteristiche generali della specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco, distinguendo tra:

- soluzioni progettuali conformi;
- soluzioni progettuali alternative.

Analogamente a quanto riportato nel recente articolo, Prontuario delle soluzioni progettuali e check list [10], sono anche distinti i casi di:

- nuove opere da costruzione;
- opere da costruzione esistenti.

2. LE SOLUZIONI PROGETTUALI: IL QUADRO NORMATIVO E I CRITERI DI CALCOLO

La **resistenza al fuoco** riguarda la capacità portante di una struttura e la capacità di compartimentazione degli elementi di separazione strutturali (es. muri, solai, ...) e non strutturali (es. porte, divisori, ...) che, in condizioni di incendio, devono essere determinate per un tempo minimo necessario al raggiungimento degli obiettivi primari di prevenzione incendi.

Nell'ambito della normativa vigente [1], la prestazione di resistenza al fuoco richiesta alle strutture è modulata mediante la definizione dei seguenti n. 5 livelli di prestazione, che possono essere attribuiti ad un'opera da costruzione in funzione dei profili di rischio determinati:

- | | |
|------------------------------|---|
| - Livello di prestazione I | Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale. |
| - Livello di prestazione II | Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione. |
| - Livello di prestazione III | Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio. |
| - Livello di prestazione IV | Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione. |
| - Livello di prestazione V | Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa. |

Per progettare un livello di prestazione di resistenza al fuoco nell'ambito della normativa vigente [1], sono previste due tipologie di soluzioni:

- le **soluzioni conformi**, definite secondo un approccio prescrittivo, nel quale l'azione termica è rappresentata da una curva temperatura/tempo di tipo nominale, quale ad esempio la curva di incendio standard ISO 834;

- le **soluzioni alternative**, definite secondo un approccio prestazionale, nel quale l'azione termica è rappresentata da curve temperatura/tempo determinate ad hoc (o anche da flussi termici) per ciascuno degli scenari di incendio individuati.

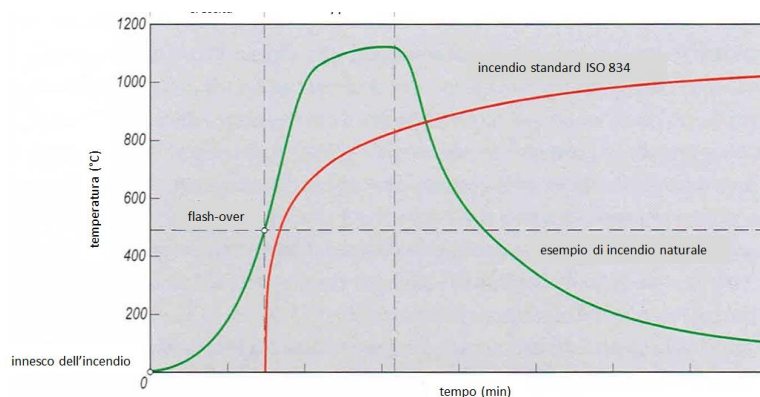


Figura 3 - Curva temperatura-tempo standard ISO 834 ed esempio di curva di incendio naturale

Tenendo conto dei criteri generali (2.2.3.1) con cui le due tipologie di soluzioni progettuali sono definite, valgono le seguenti regole di progettazione, molto importanti ai fini della corretta progettazione della prestazione di resistenza al fuoco:

- le soluzioni conformi possono essere progettate facendo riferimento alla capacità portante propria degli elementi strutturali singoli,
- le soluzioni alternative devono essere progettate facendo riferimento alla capacità portante di porzioni di struttura o dell'intero sistema strutturale, in modo tale da considerare l'effetto delle deformazioni ed espansioni imposte o impedito dovute ai cambiamenti di temperatura, in altre parole le sollecitazioni indirette.

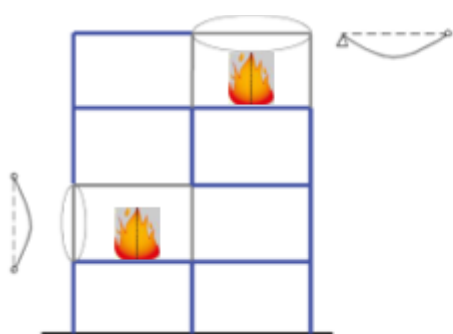


Figura 4 - Soluzioni conformi: analisi per singoli elementi

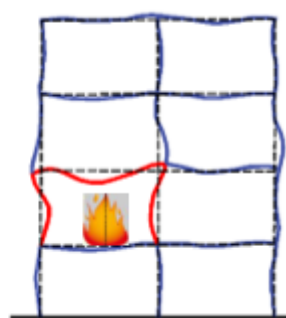


Figura 5 - Soluzioni alternative: analisi globale

SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E SOLUZIONI PROGETTUALI	Soluzioni Conformi	Soluzioni alternative
Analisi per singoli elementi	SI	NO
Analisi per parti della struttura	SI	SI
Analisi globale della struttura	SI	SI

Tabella 1 - Criteri generali di analisi della struttura per la determinazione delle prestazioni di resistenza al fuoco

I criteri di analisi e le metodologie di calcolo previsti per la progettazione e la verifica della prestazione di resistenza al fuoco delle due soluzioni progettuali, le soluzioni conformi e le soluzioni alternative, sono sostanzialmente differenti. Pertanto, i contenuti della specifica tecnica della resistenza al fuoco, di seguito illustrati, sono stati differenziati.

3. MISURA S.2: LA PRESTAZIONE DI RESISTENZA AL FUOCO - LA SPECIFICA TECNICA DEL PROGETTO DI PREVENZIONE INCENDI

3.1 Le soluzioni progettuali conformi

3.1.1 Schema generale della progettazione

Lo schema generale del progetto della resistenza al fuoco di una soluzione conforme può essere rappresentato come nella Figura 5:

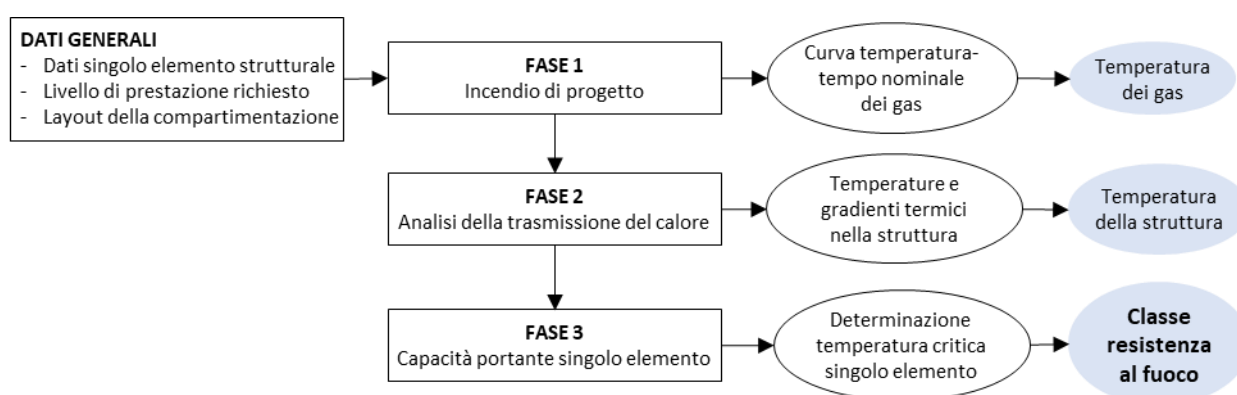


Figura 6 - Soluzione progettuale conforme: schema generale della progettazione della resistenza al fuoco

3.1.2 I dati generali

Nella progettazione di un'opera da costruzione (vedi schema Figura 1) il progetto di prevenzione incendi deve essere coerente con i dati della progettazione generale. In particolare, la specifica tecnica delle prestazioni di resistenza al fuoco deve riportare i dati del progetto strutturale necessari per la determinazione della soluzione progettuale.

Pertanto, la specifica tecnica della Misura S2, resistenza al fuoco, deve contenere:

1) I dati della struttura.

I dati della struttura, relativamente a geometria e materiali, devono essere coerenti con quelli riportati:

- nella documentazione tecnica del progetto strutturale [2];
- nella documentazione tecnica del CERT.REI [1].

Questo concetto implica alcune caratteristiche essenziali della progettazione della prestazione di resistenza al fuoco:

- la progettazione strutturale e la progettazione antincendio devono essere fasi tra loro integrate, nel senso che una non può essere sviluppata senza i dati dell'altra;
- nel caso di attività esistenti, la progettazione antincendio non può prescindere dalla conoscenza dei dati della struttura esistente e del loro dimensionamento statico.

2) Il livello di prestazione e la classe di resistenza al fuoco prevista delle strutture.

Nell'ambito delle soluzioni progettuali conformi, il livello di prestazione della resistenza al fuoco previsto nella strategia antincendio dell'attività è direttamente collegato ai minuti di resistenza al fuoco della struttura, che devono essere verificati facendo riferimento ad una curva di incendio nominale: ad esempio, al livello di prestazione II corrisponde la prestazione minima di resistenza al fuoco pari a R30, oltre a minime distanze di separazione da garantire verso altre opere da costruzione.

3) Il layout della compartimentazione e la classe di ogni compartimento.

Nell'ambito di un'attività, il layout della compartimentazione prevista nella strategia antincendio determina i limiti della prestazione di resistenza al fuoco richiesta agli elementi strutturali, uguali all'interno dello stesso compartimento, ma in generale diversi da compartimento a compartimento.

3.1.3 Fase 1: l'incendio di progetto

In questa fase deve essere definito l'incendio di progetto impiegato per la determinazione della prestazione della resistenza al fuoco.

A questo scopo nella specifica tecnica è sufficiente indicare:

- la curva di incendio nominale adeguata all'analisi di rischio eseguita (Figura 6);
- la durata dell'incendio di progetto per il quale deve essere verificata la prestazione di resistenza al fuoco delle strutture, pari alla classe del compartimento.

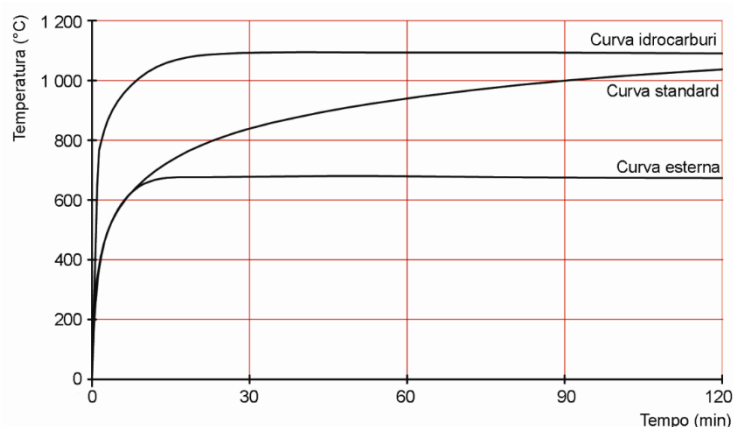


Figura 7 - Soluzione progettuale conforme: curve temperature-tempo dell'incendio di progetto

3.1.4 Fase 2: l'analisi termica della struttura

In caso d'incendio, la struttura portante è soggetta all'azione termica che interessa gli elementi strutturali, producendo un incremento della temperatura all'interno delle loro sezioni. Questo fenomeno, chiamato **risposta termica della struttura**, è influenzato dalle condizioni di esposizione all'incendio della struttura e potenzialmente porta ad una dilatazione termica degli elementi strutturali e ad una riduzione delle proprietà meccaniche delle loro parti riscaldate.

I metodi di calcolo e progettuali disponibili per eseguire la valutazione della risposta termica delle strutture sono definiti nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici (per le strutture di acciaio, la norma UNI-EN-1993-1-2 [6], per le strutture composte acciaio-calcestruzzo, la norma UNI EN 1994-1-2 [7]) e completati con le disposizioni previste nelle relative Appendici Nazionali [8]. Nel caso delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio sono disponibili ¹:

- metodi semplificati, più adatti alla progettazione delle soluzioni conformi;
- metodi avanzati.

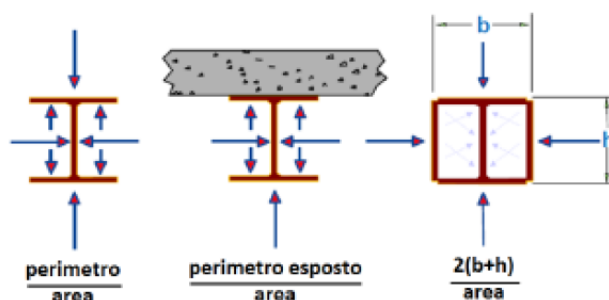


Figura 8 - Determinazione del fattore di sezione di elementi di acciaio non protetti

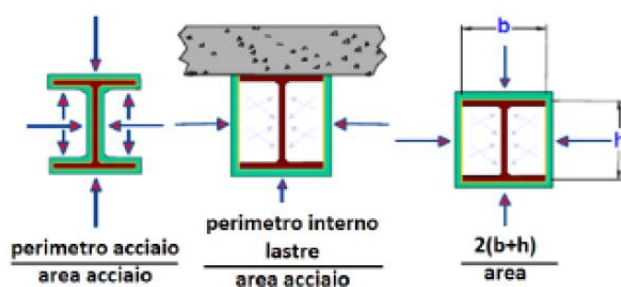


Figura 9 - Determinazione del fattore di sezione di elementi di acciaio protetti

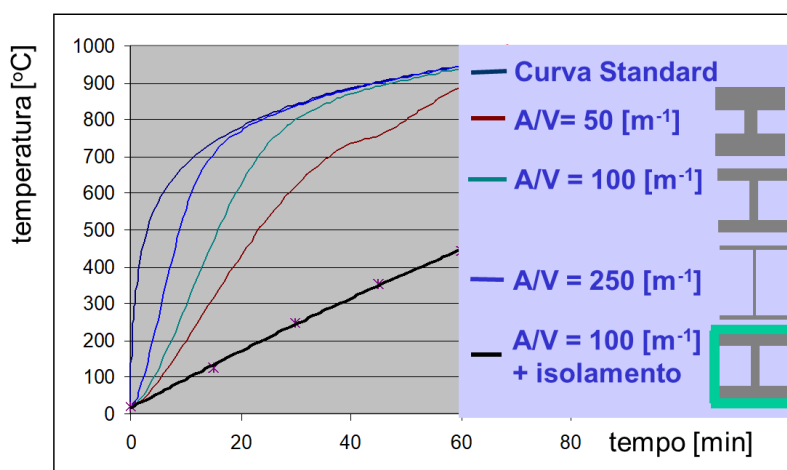


Figura 10 - Influenza del fattore di sezione sull'incremento della temperatura degli elementi di acciaio, non protetti e protetti

¹Nella normativa italiana [1] i metodi tabellari previsti nell'ambito degli Eurocodici [7] per le strutture composte acciaio-calcestruzzo sono considerati metodi analitici semplificati

Nel caso di una sezione di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo di tipo non protetto, i dati necessari per l'applicazione dei metodi di calcolo semplificato sono:

- la temperatura critica di ogni elemento strutturale;
- il fattore di sezione di ogni elemento strutturale di acciaio (5.3.2.2).

Nel caso di una sezione di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo di tipo protetto, ai dati precedenti devono essere aggiunti:

- la tipologia del sistema protettivo impiegato ed il prodotto impiegato (nome commerciale);
- il rapporto di valutazione del prodotto impiegato, rilasciato in accordo alla specifica parte della norma della serie EN 13381, comprendente il range dei fattori di sezione degli elementi strutturali proteggibili in funzione della temperatura critica degli elementi strutturali;
- la specifica di applicazione del sistema protettivo prevista per il prodotto impiegato, da considerare insieme ai criteri di esecuzione della struttura di acciaio;
- la specifica prevista per la manutenzione del sistema protettivo.

3.1.5 Fase 3: determinazione della capacità portante in caso di incendio

3.1.5.1 Introduzione

Durante la fase della risposta termica, la struttura è soggetta anche alle azioni meccaniche presenti in caso di incendio e si sviluppa il processo chiamato **risposta meccanica della struttura**, nel quale è necessario verificare se la struttura sia in grado di soddisfare le condizioni di stabilità necessarie per garantire la sicurezza in caso di incendio.

3.1.5.2 Analisi dei carichi in caso di incendio

In situazione di incendio, i carichi meccanici applicati alle strutture sono determinati facendo riferimento alla combinazione eccezionale dei carichi prevista nel D.M. 17/01/2018 [2]. Essi sono determinati mediante la seguente formula:

$$G_{k,1} + G_{k,2} + P_k + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

dove:

G_{k1} e G_{k2}	valore caratteristico delle azioni permanenti (peso proprio e carichi portati);
P_k	sollecitazione di precompressione caratteristica, se presente;
A_d	azioni eccezionali (coincidenti con le sollecitazioni indirette generate dall'incendio);
ψ_{22}	coefficiente di combinazione per i valori quasi permanenti delle azioni variabili;
Q_{k1}	valore caratteristico dell'azione principale variabile;
ψ_{2i}	coefficiente di combinazione per i valori quasi permanenti delle altre azioni variabili;
Q_{ki}	valori caratteristici delle azioni variabili secondarie.

I valori raccomandati dei coefficienti di combinazione sono riportati nella tabella seguente.

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E - Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Tabella 2 - Valori dei coefficienti di combinazione [2]

L'analisi dei carichi nella combinazione delle azioni in caso di incendio è uno degli elementi previsti nella relazione di calcolo delle strutture, ai sensi delle Norme tecniche per le costruzioni DM 17-01-2018. Questo dato di progetto, come i dati della struttura, deve essere presente nella specifica tecnica e deve essere coerente con quanto previsto nel progetto strutturale.

3.1.5.3 Metodi di calcolo

3.1.5.3.1 Introduzione

I metodi di calcolo e progettuali disponibili per eseguire la valutazione della risposta meccanica di una struttura in condizioni di incendio sono definiti nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici (per le strutture di acciaio, la norma UNI-EN-1993-1-2 [16], per le strutture composte acciaio-calcestruzzo, la norma UNI EN 1994-1-2 [7]) e completati con le disposizioni previste nelle relative Appendici Nazionali [8]. Nel caso delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio sono disponibili:

- tabelle per il progetto delle strutture composte acciaio-calcestruzzo (5.4.3.2)²;
- metodi semplificati (5.4.3.3);
- metodi avanzati (5.4.3.3.4), più adatti alla progettazione delle soluzioni alternative.

3.1.5.3.2 Classe di duttilità delle sezioni di acciaio in condizioni di incendio

Ai fini della determinazione della resistenza al fuoco degli elementi delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo, un aspetto importante è la determinazione della:

- **classe di duttilità** delle sezioni di acciaio in condizioni di incendio (5.4.3.3.2).

La classificazione delle sezioni trasversali ha lo scopo di valutare l'entità della limitazione della resistenza e della capacità rotazionale delle sezioni trasversali per effetto delle instabilità locali, legate alla snellezza degli elementi che compongono la sezione stessa.

²Nella normativa italiana [1] sono considerati metodi analitici

Le sezioni di acciaio sufficientemente tozze sono in grado di sopportare una significativa rotazione o compressione senza deformazioni locali e possono sviluppare la completa plasticizzazione della sezione. Al contrario, nelle sezioni troppo sottili si determinano grandi deformazioni locali in presenza di livelli di carico inferiori al limite di elasticità della sezione.

Per tenere conto di questi comportamenti, nell'ambito della normativa relativa alle strutture di acciaio, sono individuate 4 classi di duttilità, Figura 10), definite sulla base della snellezza delle varie parti di cui è composta la sezione e determinate mediante i criteri previsti dalla norma EN 1993-1-2 [6].

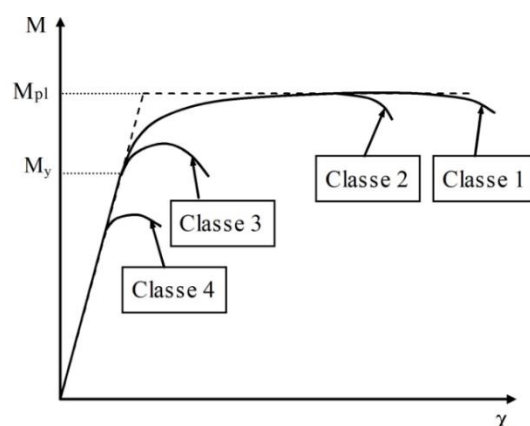


Figura 11 – Diagrammi momento-curvatura per le diverse classi di duttilità delle sezioni di acciaio

La classe di duttilità influenza in modo significativo i criteri di verifica degli elementi di acciaio. Ad esempio, gli elementi di classe 4, a meno di eseguire verifiche dettagliate di tipo avanzato, sono elementi da considerare con temperatura critica non superiore a 350°C.

È quindi essenziale che questi dati del progetto siano presenti nella specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi.

3.1.5.3.3 Tabelle per le strutture composte acciaio-calcestruzzo

Le tabelle sono previste nella norma EN 1994-1-2 [7] e sono definite per esposizioni all'incendio standard ISO 834. Quindi sono valide soltanto per la progettazione delle soluzioni conformi.

I valori della resistenza al fuoco sono correlati alla specifica curva di incendio standard e ai seguenti dati di progetto:

- livello di carico;
- dimensioni minime della sezione;
- area delle barre di armatura e loro minimo ricoprimento di calcestruzzo.

Sono presenti tabelle per le seguenti tipologie di elementi:

- travi composte acciaio-calcestruzzo con trave di acciaio parzialmente o completamente incassata nel calcestruzzo;
- colonne composte acciaio-calcestruzzo con profilo parzialmente o completamente incassato nel calcestruzzo;
- colonne composte acciaio-calcestruzzo con sezione di acciaio tubolare (CHS o RHS) riempita di calcestruzzo.

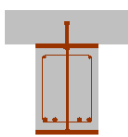
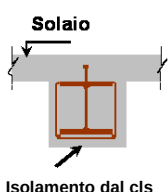
Travi composte	Colonne composte	
		
		

Figura 12 - Elementi strutturali progettabili con dati tabellati (soluzione conforme)

Nella specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi è necessario riportare i dati richiesti nelle tabelle per l'applicazione del metodo.

3.1.5.3.4 Metodi semplificati

3.1.5.3.4.1 Introduzione

I metodi di calcolo semplificati sono basati sui criteri validi per il progetto degli elementi strutturali a temperatura ambiente, con l'introduzione di parametri definiti per tenere conto del comportamento della struttura a temperature elevate. In generale è utile distinguerli in:

- metodi di calcolo semplificati generali;
- metodi di calcolo semplificati validi per elementi di acciaio non soggetti a fenomeni di instabilità, come ad esempio il metodo della temperatura critica.

Nel caso di elementi di tipo protetto, i metodi di calcolo sopra indicati sono utilizzati per determinare un parametro necessario per il dimensionamento della soluzione di acciaio protetta, ossia:

- la temperatura critica dell'elemento di acciaio,

che rappresenta, quindi, insieme al fattore di sezione dell'elemento ed alla caratterizzazione del sistema protettivo utilizzato, un dato essenziale da inserire nella specifica tecnica di questa tipologia di elementi.

3.1.5.3.4.2 Metodi generali

I metodi semplificati generali sono riportati nelle parti fuoco degli Eurocodici 3 e 4, EN 1993-1-2 e EN 1994-1-2. Essi hanno diverse formulazioni per tenere conto delle diverse tipologie di impiego degli elementi strutturali di acciaio.

Nella norma EN 1993-1-2 vi sono i metodi semplificati generali per il calcolo della capacità portante di elementi di acciaio in condizioni di incendio per elementi uniformemente riscaldati, ossia esposti su 4 lati, non soggetti a fenomeni di instabilità (Figura 12).

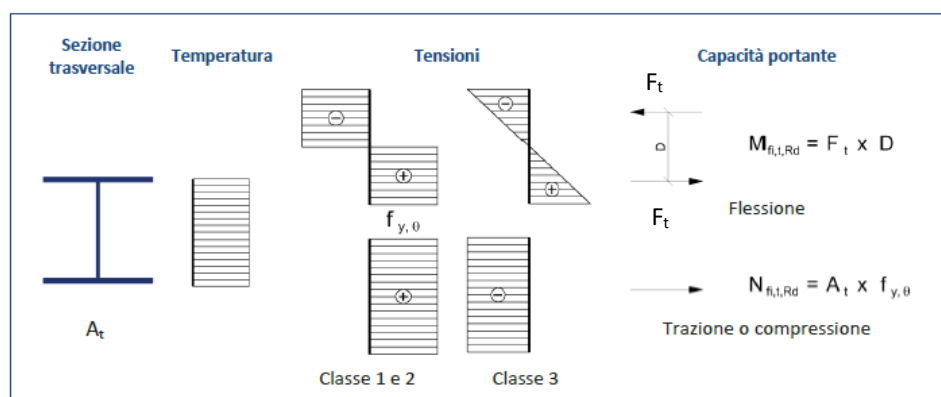


Figura 13 - Criteri di progetto della capacità portante di elementi di acciaio in condizioni di incendio
Tali metodi possono tenere conto del non uniforme riscaldamento degli elementi (elementi esposti su 3 lati, Fig. 14).

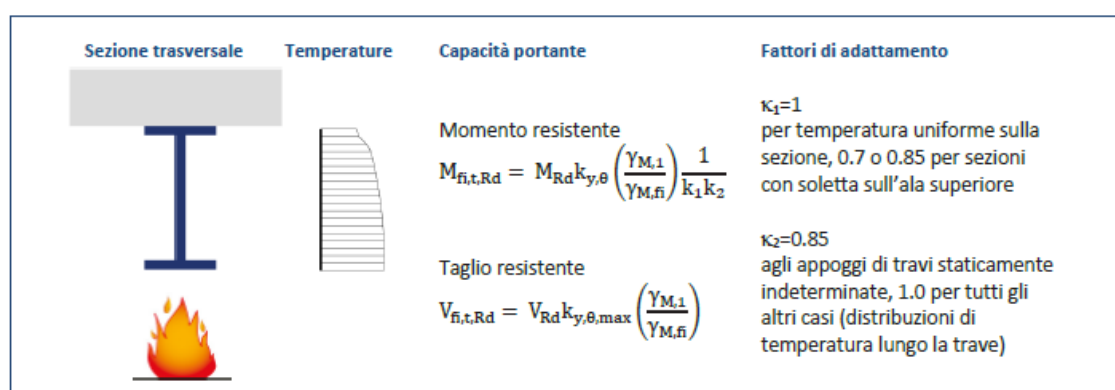


Figura 14 - Elementi con sezioni di Classe 1,2,3: fattori di adattamento per distribuzione di temperatura non uniforme

Vi sono poi i metodi semplificati generali per il calcolo della capacità portante di elementi di acciaio in condizioni di incendio per elementi uniformemente riscaldati soggetti a instabilità per compressione (Fig. 15), flessione e torsione.

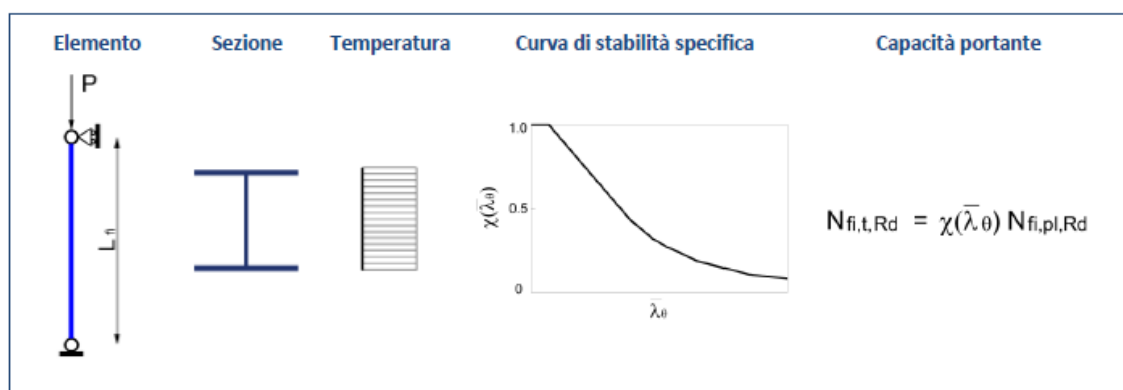


Figura 15 - Criteri di progetto di elementi di acciaio in condizioni di incendio: fenomeni di instabilità

Nella norma EN 1994-1-2 vi sono i metodi semplificati generali per la determinazione della capacità portante di travi composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio (Fig. 16).

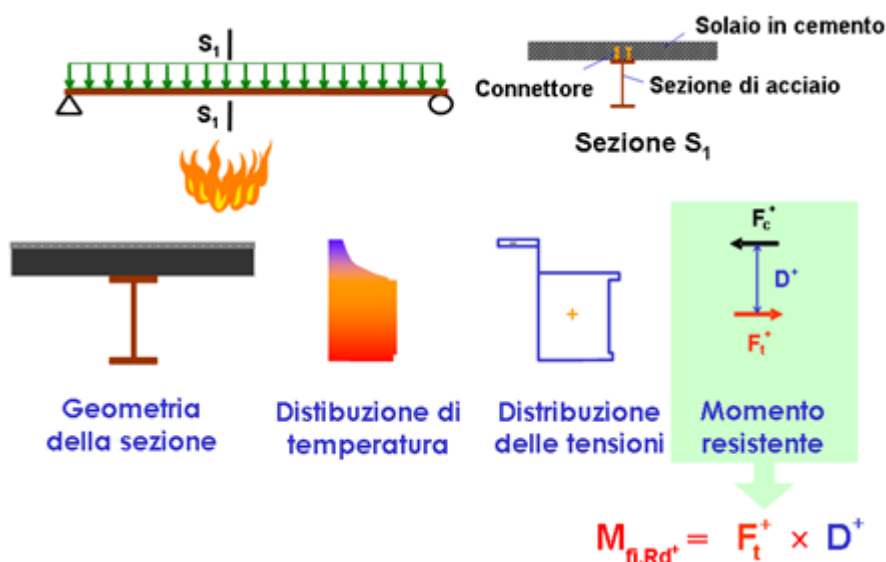


Figura 16 - Soluzioni progettuali conformi: metodo di calcolo semplificato applicato a una trave composta acciaio-clc

Nella norma EN 1994-1-2 vi sono i metodi semplificati generali per la determinazione della capacità portante di colonne composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio (Fig. 17).

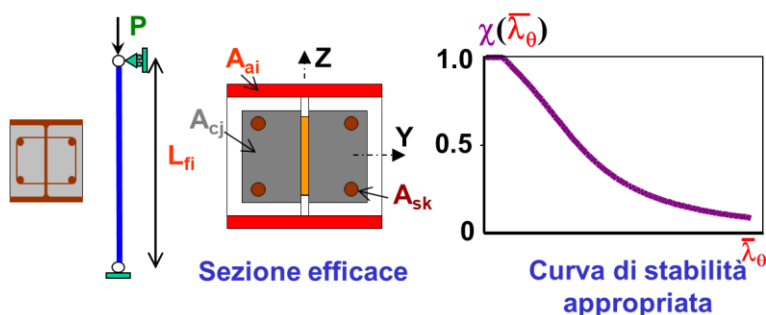


Figura 17 - Soluzioni progettuali conformi: metodo di calcolo semplificato applicato a una colonna composta acciaio-clc

3.1.5.3.4.3 Metodo della temperatura critica

Il metodo della temperatura critica è un metodo semplificato di verifica della capacità portante di singoli elementi di acciaio in condizioni di incendio, effettuata nel dominio della temperatura, definito utilizzando una distribuzione di temperatura uniforme nella sezione di acciaio.

Questo metodo permette di determinare la temperatura critica dell'elemento strutturale sulla base del livello di carico agente, espresso per mezzo del fattore di utilizzazione μ_0 :

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \cdot \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482$$

dove:

$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$ è il fattore di utilizzazione;

$E_{fi,d}$ è l'effetto di progetto delle azioni nella situazione di incendio, secondo EN 1991-1-2, integrato dal rispettivo NAD [8];

$R_{fi,d,0}$ è la resistenza di progetto dell'elemento nella situazione di incendio, al tempo $t=0$.

Questo metodo è valido per elementi strutturali aventi sezione di acciaio riscaldata uniformemente, nei casi in cui siano verificate tutte le seguenti condizioni:

- gli effetti delle deformazioni sulla stabilità dell'elemento strutturale sono trascurabili;
- i fenomeni di instabilità sono trascurabili;
- non sono presenti sezioni di classe di duttilità 4.

3.1.5.3.4.4 Le Istruzioni tecniche

Le Tabelle 3 e 4, tratte da [11], riportano l'elenco dei metodi di calcolo disponibili nella normativa vigente (EN 1993-1-2, EN 1994-1-2) per la determinazione della capacità portante di elementi strutturali di acciaio e composti acciaio-calcestruzzo in condizioni di incendio. Si rimanda a [11] per ogni ulteriore approfondimento.

Paragrafo	Titolo	Incendio ISO 834
1	GENERALITA'	✓
2	CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE	✓
3	PROPRIETA' DEI MATERIALI	✓
4	PROGETTAZIONE STRUTTURALE ANTINCENDIO	✓
4.1	Generalità	✓
4.2	Modelli di calcolo semplificati	
4.2.1	Generalità	✓
4.2.2	Classificazione delle sezioni trasversali	✓
4.2.3	Resistenza	✓
4.2.4	Temperatura critica	✓
4.2.5	Sviluppo della temperatura nell'acciaio	✓
4.3	Modelli di calcolo avanzati	
4.3.1	Generalità	✓
4.3.2	Risposta termica	✓
4.3.3	Risposta meccanica	✓
4.3.4	Validazione dei modelli avanzati di calcolo	✓
Appendice A	INCRUDIMENTO DELL'ACCIAIO AL CARBONIO A TEMPERATURE ELEVATE	✓
Appendice B	TRASFERIMENTO DI CALORE A STRUTTURE DI ACCIAIO ESTERNE	✓
Appendice C	ACCIAIO INOSSIDABILE	✓

Tabella 3 - Metodi di calcolo secondo EN 1993-1-2

Paragrafo	Titolo	Incendio ISO 834
1	GENERALITA'	✓
2	CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE	✓
3	PROPRIETA' DEI MATERIALI	✓
4	PROCEDURE DI PROGETTAZIONE	
4.1	Introduzione	✓
4.2	Dati tabellari	✓
4.3	Modelli di calcolo semplificati	✓
4.4	Modelli di calcolo avanzati	✓
5	DETTAGLI COSTRUTTIVI	✓
Appendice A	RELAZIONI TENSIONE-DEFORMAZIONE A TEMPERATURE ELEVATE PER GLI ACCIAI STRUTTURALI	✓
Appendice B	RELAZIONI TENSIONE-DEFORMAZIONE A TEMPERATURE ELEVATE PER IL CALCESTRUZZO CON AGGREGATI SILICEI	✓
Appendice C	RELAZIONI TENSIONE-DEFORMAZIONE DEL CALCESTRUZZO ADATTATE AGLI INCENDI NATURALI CON UN RAMO DI RISCALDAMENTO DECRESCENTE DA UTILIZZARE NEI MODELLI DI CALCOLO AVANZATI	-
Appendice D	MODELLO PER IL CALCOLO DELLA RESISTENZA AL FUOCO DI SOLETTE COMPOSTE NON PROTETTE ESPOSTE AL FUOCO AL DI SOTTO DELLA SOLETTA SECONDO LA CURVA TEMPERATURA-TEMPO NORMALIZZATA	✓
Appendice E	MODELLO PER IL CALCOLO DEI MOMENTI RESISTENTI POSITIVO E NEGATIVO DI UNA TRAVE DI ACCIAIO COLLEGATA AD UNA SOLETTA DI CALCESTRUZZO E ESPOSTA ALL'INCENDIO AL DI SOTTO DELLA SOLETTA DI CALCESTRUZZO	✓
Appendice F	MODELLO PER IL CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE POSITIVO E NEGATIVO DI UNA TRAVE DI ACCIAIO PARZIALMENTE RIVESTITA COLLEGATA AD UNA SOLETTA DI CALCESTRUZZO E ESPOSTA ALL'INCENDIO AL DI SOTTO DELLA SOLETTA DI CALCESTRUZZO SECONDO LA CURVA TEMPERATURA-TEMPO NORMALIZZATA	✓
Appendice G	MODELLO DI SOMMA BILANCIATA PER IL CALCOLO DELLA RESISTENZA AL FUOCO DI PILASTRI COMPOSTI CON SEZIONI DI ACCIAIO PARZIALMENTE RIVESTITE, PER FLESSIONE INTORNO ALL'ASSE DEBOLE, ESPOSTE ALL'INCENDIO DA TUTTI I LATI DEL PILASTRO SECONDO LA CURVA TEMPERATURA-TEMPO NORMALIZZATA	✓
Appendice H	MODELLO DI CALCOLO SEMPLIFICATO PER SEZIONI CAVE RIEMPIE DI CALCESTRUZZO ESPOSTE ALL'INCENDIO DA TUTTI I LATI DEL PILASTRO SECONDO LA CURVA TEMPERATURA-TEMPO NORMALIZZATA	✓
Appendice I	PIANIFICAZIONE E VALUTAZIONE DI MODELLI SPERIMENTALI	✓

Tabella 4 - Metodi di calcolo secondo EN 1994-1-2

3.1.6 I collegamenti

Sia per le strutture in acciaio sia per quelle composte acciaio calcestruzzo è necessario progettare adeguatamente la resistenza al fuoco dei collegamenti. A tal fine si richiamano le indicazioni previste per le strutture in acciaio e composte acciaio calcestruzzo rispettivamente dall'appendice D della EN 1993-1-2 e dalla sezione 5 della EN 1994-1-2.

Anche in soluzione alternativa, oltre che per edifici esistenti (sia in soluzione conforme sia alternativa), valgono le medesime indicazioni per la corretta progettazione e verifica di resistenza al fuoco dei collegamenti; in assenza di tale progettazione, le risultanze dei sofisticati metodi avanzati non avrebbero significato fisico e tecnico.

3.1.7 La specifica tecnica nel progetto di prevenzione incendi

Solitamente la progettazione di una soluzione conforme è eseguita mediante l'applicazione dei metodi di calcolo semplificato.

Questa deve essere documentata nella specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi indicando almeno:

- la norma di riferimento in cui il metodo è previsto;
- i dati di progetto impiegati per l'applicazione del metodo;
- l'indicazione del campo di applicazione previsto dal metodo;

oltre che ovviamente i risultati che definiscono la soluzione progettuale.

A conclusione della disamina riportata nei paragrafi precedenti sui principali criteri della progettazione della prestazione di resistenza al fuoco di una struttura di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo, di seguito è riepilogato quanto in generale deve contenere la specifica tecnica della soluzione conforme della Misura S2 del progetto di prevenzione incendi.

Nel caso delle strutture di acciaio di tipo non protetto:

- Elaborati grafici e descrittivi dell'opera da costruzione per la caratterizzazione geometrica e meccanica della sua struttura portante;
- Layout della compartimentazione e classe dei compartimenti;
- Determinazione del livello di prestazione;
- Valutazione del carico di incendio specifico di progetto per ogni compartimento;
- Classe di resistenza al fuoco richiesta di ogni compartimento sulla base del carico di incendio;
- Prescrizioni da RTV se presente;
- Scelta della curva di incendio nominale di progetto;
- Materiali della struttura e loro proprietà meccaniche in caso di incendio;
- Schema statico degli elementi della struttura;
- Analisi dei carichi in condizione di incendio;
- Risposta termica di ogni elemento della struttura;
- Tipologia e classe di duttilità in caso di incendio di ogni elemento strutturale;
- Metodo di calcolo impiegato (Tab. A/B) per la verifica degli elementi strutturali;
- Dati strutturali dei collegamenti e metodo di verifica impiegato.

Nel caso delle strutture di acciaio di tipo protetto:

- Elaborati grafici e descrittivi dell'opera da costruzione per la caratterizzazione geometrica e meccanica della sua struttura portante;
- Layout della compartimentazione e classe dei compartimenti;
- Determinazione del livello di prestazione;
- Valutazione del carico di incendio specifico di progetto per ogni compartimento;
- Classe di resistenza al fuoco richiesta di ogni compartimento sulla base del carico di incendio;
- Prescrizioni da RTV se presente;
- Scelta della curva di incendio nominale di progetto;
- Materiali della struttura e loro proprietà meccaniche in caso di incendio;
- Dati del sistema protettivo impiegato e del rapporto di valutazione eseguito ai sensi della Norma EN 13381;

- Schema statico degli elementi della struttura;
- Fattore di sezione di ogni elemento della struttura;
- Analisi dei carichi in condizione di incendio;
- Tipologia e classe di duttilità in caso di incendio di ogni elemento della struttura;
- Temperatura critica di ogni elemento della struttura;
- Metodo di calcolo impiegato (Tab. A/B) e temperatura critica di ogni elemento della struttura;
- Dati strutturali dei collegamenti e della loro protezione;
- Specifica di applicazione e della manutenzione del sistema protettivo.

3.2 Le soluzioni progettuali alternative

3.2.1 Schema generale della progettazione

Lo schema generale della progettazione della resistenza al fuoco di una soluzione **alternativa** può essere rappresentato come nella Figura 18

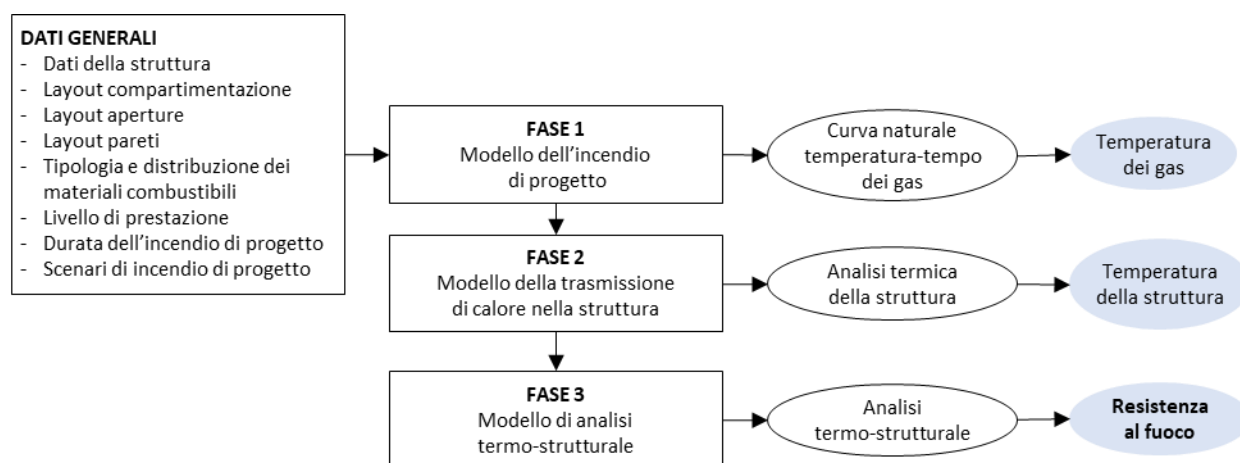


Figura 18 - Soluzione progettuale alternativa: schema generale della progettazione della resistenza al fuoco

3.2.2 Dati generali

Come già ricordato per le soluzioni conformi, il progetto di prevenzione incendi deve essere coerente con i dati della progettazione generale. In particolare, la specifica tecnica delle prestazioni di resistenza al fuoco deve riportare i dati del progetto strutturale necessari per la determinazione della soluzione progettuale, unitamente, ovviamente, agli altri dati di progetto impiegati, non presenti nel progetto strutturale.

Rispetto al caso delle soluzioni conformi, nella progettazione delle soluzioni alternative, per le quali normalmente si ricorre all'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio (di seguito FSE), risulta ancora più necessaria sin da subito la stretta collaborazione e sinergia tra il professionista antincendio, unica figura per legge che può operare quando si ricorre al predetto approccio, e il progettista strutturale, dal momento che l'individuazione degli scenari d'incendio di progetto, che sono i più gravosi ed allo stesso tempo ragionevolmente credibili che possono verificarsi nell'attività, non può prescindere da un primo dimensionamento delle strutture e dalla conseguente individuazione degli elementi più sensibili agli effetti dell'incendio.

Inoltre, la risposta termica della struttura può determinare la scelta da parte dei progettisti di modificare alcuni elementi strutturali o di aggiungerne altri, di cambiare lo schema statico, di introdurre o modificare i materiali strutturali, ecc., per cui ciò ha riflessi almeno sulle fasi 2 e 3 di Figura 17, talvolta anche sulla fase 1, in particolare per quanto riguarda la posizione dei focolari. Analogamente alle soluzioni conformi, è importante associare alle preliminari verifiche a freddo della struttura anche quelle a caldo, finché dimensionamento a freddo ed a caldo siano entrambi sotto controllo.

Tutto ciò per sottolineare come la specifica tecnica in soluzione alternativa abbia significato non solo per le fasi della progettazione, la quale deve essere condotta necessariamente in maniera contestuale sin dall'inizio tra professionista antincendio e progettista strutturale, ma anche per la fase esecutiva della costruzione e durante la vita dell'opera, quale sintesi degli aspetti principali da attenzionare in fase di controllo.

Tenendo conto delle caratteristiche delle soluzioni alternative, di seguito è riportato un elenco generale dei dati di progetto che devono essere presenti nella specifica tecnica:

- 1) il livello di prestazione della resistenza al fuoco individuato nella strategia antincendio;
- 2) i dati della struttura, che devono essere coerenti con quelli riportati:
 - nella documentazione tecnica del progetto strutturale [2];
 - nella documentazione tecnica del CERT.REI [3];
- 3) il layout della compartimentazione;
- 4) il layout delle aperture, comprendente anche le caratteristiche relative allo sviluppo dell'incendio degli elementi di chiusura;
- 5) il layout delle pareti, comprendente anche le caratteristiche relative allo sviluppo dell'incendio degli elementi di parete;
- 6) la tipologia e la distribuzione dei materiali combustibili oppure la destinazione d'uso dei locali, comprendente la distribuzione dei materiali combustibili, necessaria per la valutazione dell'effetto degli incendi localizzati;
- 7) la durata dell'incendio di progetto;
- 8) le soglie di prestazione, espresse nel dominio del tempo in funzione del livello di prestazione dell'opera da costruzione (vedasi indicazioni in merito contenute nella nota DCPREV n. 9962 del 24/07/2020);
- 9) gli scenari di incendio di progetto, definiti specificatamente per gli obiettivi dell'analisi della resistenza al fuoco, e comprendenti per ciascuno di essi almeno:
 - la posizione e la dimensione del focolaio iniziale;
 - la curva RHR dell'incendio di progetto;
- 10) i restanti elementi dell'analisi preliminare prevista nell'applicazione FSE.

3.2.3 Fase 1: l'incendio naturale di progetto

3.2.3.1 Aspetti generali

La progettazione di una soluzione alternativa è basata sull'incendio naturale di progetto, che è determinato per ognuno degli scenari di incendio di progetto, rappresentato da curve naturali o campo di flussi termici.

La normativa vigente [1], [4] comprende i seguenti metodi di calcolo per la determinazione dell'incendio naturale di progetto impiegato per la valutazione delle prestazioni di resistenza al fuoco:

1) modelli di incendio semplificato, tra cui:

- modelli di incendio localizzato (incendio pre-flashover);
- incendio parametrico (incendio pienamente sviluppato);

che sono definiti sulla base dei seguenti parametri:

- curva RHR di progetto;
- area dell'incendio;
- proprietà termiche delle pareti;
- area delle aperture di ventilazione;
- altezza del soffitto;

2) modelli di incendio avanzati, che comprendono:

- modelli a zone (Nota: l'impiego dei modelli a 2 zone richiede in genere anche l'impiego combinato dei modelli di incendio localizzato)
- modelli di campo fluidodinamico;

che sono definiti sulla base:

- della geometria esatta dei compartimenti;
- delle caratteristiche dei materiali combustibili.

I dati necessari per l'applicazione dei modelli di incendio impiegati non possono essere omessi nella specifica tecnica della soluzione progettuale alternativa, in quanto fondamentali per il prosieguo del calcolo termico e meccanico e per la comprensione dei risultati.

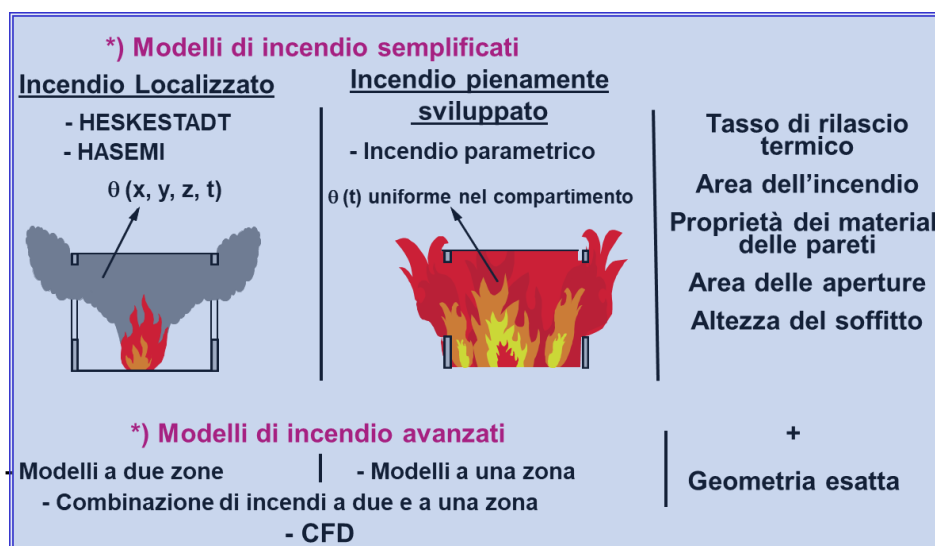


Figura 19 - Modelli per il calcolo dell'incendio naturale di progetto

3.2.3.2 Influenza delle misure di protezione attiva: l'approccio semi-probabilistico previsto dagli Eurocodici

L'influenza delle misure di protezione attiva sullo sviluppo dell'incendio naturale di progetto è stata definita nel quadro normativo degli Eurocodici, nelle cosiddette parti fuoco, mediante un criterio sviluppato con l'obiettivo di

garantire, nel progetto della resistenza al fuoco, lo stesso livello di affidabilità previsto per le altre azioni considerate nell'ambito della sicurezza strutturale degli edifici.

Note tecniche sull'applicazione di tale approccio sono riportate nelle Istruzioni tecniche [11, paragrafo 3.3].

Con riferimento a questo approccio, è da segnalare che:

- tale metodologia non è applicabile in ambito nazionale, ai sensi dell'Appendice Nazionale redatta nel 2018;
- l'Appendice Nazionale del 2018 non è stata pubblicata in Gazzetta Ufficiale, per cui ufficialmente il documento in vigore è l'Appendice Nazionale pubblicata nel 2013 [8];
- la stessa metodologia, ai sensi della normativa vigente, DM 03-08-2015 e s.m.i., è impiegata per la progettazione delle soluzioni conformi, ai fini della determinazione del carico d'incendio specifico di progetto e della corrispondente classe minima di resistenza al fuoco;
- per la progettazione delle soluzioni alternative è introdotto il concetto degli impianti a disponibilità superiore, che non è accompagnato da esaustivi criteri di applicazione.

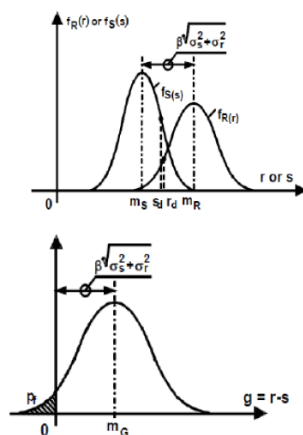


Figura 3-4 – Approccio probabilistico, basato sulla distribuzione di Gumbel, tipo I.

Figura 20 - Approccio probabilistico, basato sulla distribuzione di Gumbel, tipo I

Area in pianta del compartimento A_i [m ²]	Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q1}	Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q2}	Esempi di utilizzi
25	1,10	0,78	Gallerie d'arte, musei, piscine
250	1,50	1,00	Uffici, residenze, alberghi, industria cartaria
2 500	1,90	1,22	Stabilimenti di macchinari e motori
5 000	2,00	1,44	Laboratori chimici, officine di verniciatura
10 000	2,13	1,66	Stabilimenti di fuochi di artificio o vernici

δ_n funzione delle misure di lotta attiva contro l'incendio											
Spegnimento automatico dell'incendio			Rivelazione automatica dell'incendio			Spegnimento manuale dell'incendio					
Sistemi di estinzione ad acqua automatici	Adduzione indipendente di acqua			Rivelazione e allarme incendio automatici		Trasmissione automatica di allarme ai Comandi dei Vigili del fuoco	Squadre di Vigili del fuoco operanti sul posto	Squadre di Vigili del fuoco operanti dall'esterno	Percorsi di accesso sicuro	Dispositivi di lotta contro l'incendio	Sistemi di evacuazione dei fumi
	0	1	2	Mediante calore	Mediante fumo						
δ_{n1}	δ_{n2}			δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 oppure 0,73		0,67	0,61 oppure 0,78		0,9 oppure 1 oppure 1,5	1,0 oppure 1,5	1,0 oppure 1,5

Tabella 5 - Fattori δ_{ni} utilizzati per la determinazione del carico di incendio di progetto secondo EN 1991-1-2 [4]

3.2.3.3 Influenza delle misure di protezione attiva: gli impianti a disponibilità superiore

Nella normativa nazionale, DM 03-08-2015 e s.m.i., le caratteristiche dell'incendio naturale di progetto possono essere sensibilmente influenzate dalla presenza di impianti di spegnimento automatico, se questi sono progettati con le caratteristiche di impianti a disponibilità superiore. L'impiego di questo tipo di impianti deve essere accompagnato da analisi del rischio molto dettagliate, basate su valutazioni specialistiche di tipo impiantistico e gestionale, che definiscono la probabilità di funzionamento dell'impianto, sotto la responsabilità del progettista dell'impianto e del titolare dell'attività, e su valutazioni di tipo strutturale, che definiscono le relative conseguenze del fallimento dell'impianto, sotto la responsabilità del progettista strutturale. Nella fase della progettazione di prevenzione incendi è molto importante che questo approccio sia documentato in forma completa, in modo tale che esso sia considerato correttamente in tutti gli ambiti della progettazione, sia antincendio che strutturale. La sua applicazione può portare alla realizzazione di opere senza il dimensionamento della prestazione di resistenza al fuoco delle strutture portanti: se i risultati di questo approccio venissero messi in dubbio in una fase successiva del progetto, antincendio o strutturale, potrebbe essere problematico intervenire se la progettazione strutturale fosse stata completata, o, ancora peggio, se la realizzazione fosse stata già eseguita. Per questi motivi, nel caso di impiego di un impianto a disponibilità superiore, in particolare di un impianto di spegnimento automatico dell'incendio, è fondamentale che la specifica tecnica della Misura S2 Resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi riporti i dati completi dell'analisi di rischio eseguita, in modo tale che non ci siano incertezze nel completamento della fase della progettazione strutturale dell'opera da costruzione.

3.2.4 Fase 2: l'analisi termica della struttura

3.2.4.1 Aspetti generali

Dopo l'analisi dell'incendio naturale di progetto, l'iter progettuale di una soluzione alternativa prevede l'analisi termica della struttura. L'incendio naturale di progetto determina sulla struttura portante azioni di tipo termico, che sono determinate dalle condizioni di trasferimento di calore sulle sezioni degli elementi strutturali. L'analisi di questo fenomeno, chiamato **risposta termica della struttura**, è molto importante, perché potenzialmente porta ad una dilatazione degli elementi strutturali, all'insorgere di sollecitazioni indirette per effetto della presenza di vincoli o spostamenti imposti o impediti e ad una riduzione delle proprietà meccaniche delle loro parti riscaldate.

3.2.4.2 La sottostruttura

Per valutare la risposta termica della struttura in un determinato scenario di incendio di progetto è necessario definire un passo importante della progettazione della soluzione alternativa:

- la determinazione della **sottostruttura**, ossia della porzione di struttura significativa per eseguire l'analisi dello scenario di incendio di progetto ai fini della valutazione della prestazione di resistenza al fuoco.

Nel caso in cui non sia definita o definibile la sottostruttura, la determinazione della risposta termica per l'incendio di progetto sarà eseguita con riferimento all'intera struttura in oggetto.

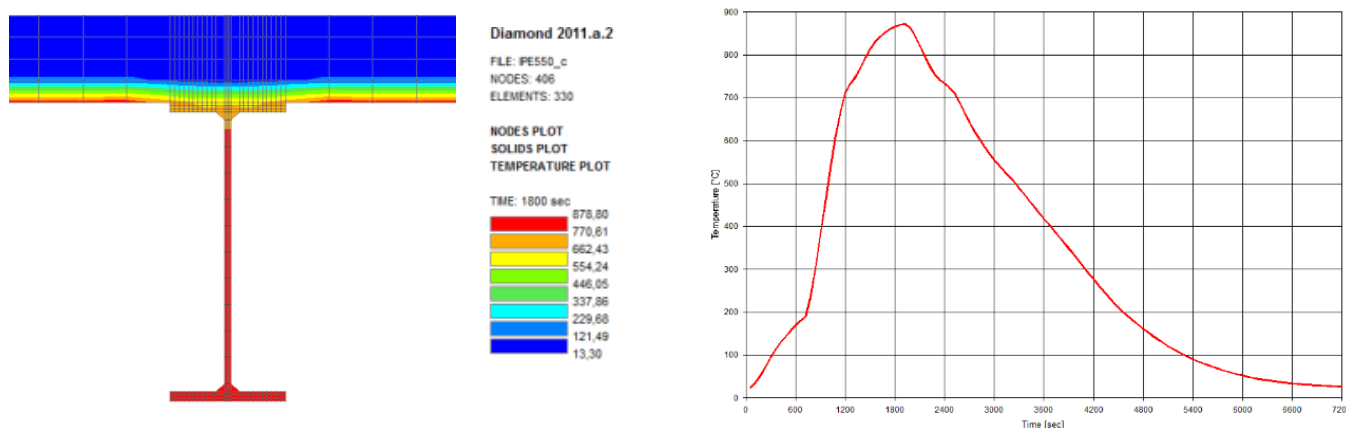
3.2.4.3 Metodi di calcolo

I metodi di calcolo previsti per analizzare la risposta termica delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo sono i:

- metodi avanzati

definiti nelle parti fuoco degli Eurocodici (EN 1993-1-2, EN 1994-1-2), tenendo conto di quanto previsto dalle relative Appendici Nazionali.

Essi sono basati sull'applicazione del calcolo agli elementi finiti, con la quale, tenendo conto dell'azione termica dovuta all'incendio e delle specifiche condizioni al contorno, viene determinata innanzitutto la temperatura di ogni elemento in cui la struttura è discretizzata.



Risposta termica al tempo t – Andamento della temperatura in un elemento della struttura

Figura 21 – Analisi termica di una trave composta acciaio-calcestruzzo

Nella specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi in soluzione alternativa è necessario riportare i dati della risposta termica della struttura. A questo scopo è necessario riportare:

- le condizioni al contorno degli elementi esposti all'incendio;
- i dati di progetto dell'applicazione del metodo agli elementi finiti;
- il modello di calcolo impiegato per eseguire l'analisi e le relative proprietà previste dalla normativa vigente (vedi paragrafo seguente);
- i principali risultati della risposta meccanica della struttura.

3.2.4.4 Validazione dei codici di calcolo

I programmi di calcolo impiegati per l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato devono essere opportunamente validati.

Questo concetto è chiaramente richiamato nelle normative di riferimento, sia nell'ambito della prevenzione incendi [1], sia nell'ambito della progettazione strutturale [2], sia nell'ambito degli Eurocodici [5], [7], [8].

La norma EN 1993-1-2, [6], prevede che la validazione sia fatta sulla base di test sperimentali, attraverso analisi di sensibilità, verificando i parametri critici per assicurare che il modello corrisponda ai principi fisico ingegneristici.

Una metodologia di validazione dei programmi di calcolo impiegati per analisi strutturali in condizioni di incendio è contenuta nella norma ISO/TR 16730-4 "Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods. Part 4: Example of a structural model".

Con riferimento all'impiego di programmi di calcolo per le analisi strutturali, le Norme tecniche per le costruzioni [2] prevedono che *“il progettista, dovrà controllare l'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti. Il progettista dovrà quindi esaminare preliminarmente la documentazione a corredo del software per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico. In tal senso la documentazione, che sarà fornita dal produttore o dal distributore del software, dovrà contenere una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, l'individuazione dei campi d'impiego, nonché casi prova interamente risolti e commentati, per i quali dovranno essere forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione”*.

Più sintetiche, ma coerenti ed altrettanto cogenti, sono le previsioni di cui al punto M.1.9 del Codice di prevenzione incendi.

Tenendo presente quanto sopra, l'impiego di un programma di calcolo per le analisi strutturali in condizioni di incendio di tipo avanzato deve garantire i seguenti presupposti:

- che siano acquisiti dagli sviluppatori del programma di calcolo i dati della validazione del programma per l'analisi di strutture in condizioni di incendio;
- che siano eseguite dal progettista analisi comprese nel campo di applicazione per il quale il programma è stato validato.

Tenendo conto dell'importanza della fase di calcolo nella progettazione di una soluzione alternativa per la prestazione di resistenza al fuoco, è evidente quanto sia fondamentale l'importanza di riportare nella specifica tecnica della soluzione progettuale i dati della validazione del codice di calcolo impiegato per la determinazione della risposta termica della struttura.

3.2.5 Fase 3: determinazione della capacità portante in caso di incendio

3.2.5.1 Aspetti generali

Come già detto, la risposta termica potenzialmente porta ad una dilatazione degli elementi strutturali, all'insorgere di sollecitazioni indirette per effetto della presenza di vincoli o spostamenti imposti o impediti e ad una riduzione delle proprietà meccaniche delle loro parti riscaldate. A seconda dello schema statico della struttura portante, la dilatazione termica degli elementi strutturali può essere contrastata, provocando la nascita di tensioni e sollecitazioni negli elementi strutturali (azioni indirette) e l'aumento delle deformazioni della struttura (effetti del secondo ordine). La combinazione di questi fenomeni determinati dall'aumento della temperatura con gli effetti delle azioni di tipo meccanico, unitamente alla riduzione di resistenza e rigidezza, determina il processo chiamato **risposta meccanica** della struttura.

In quest'ultima fase dello schema procedurale sono quindi eseguite le verifiche della prestazione di resistenza al fuoco della struttura che, a seconda del livello di prestazione definito nella strategia antincendio dell'attività, possono consistere in:

- verifica dei meccanismi di collasso (livelli di prestazione I e II);
- verifica delle condizioni di stabilità necessarie per garantire la sicurezza in caso di incendio (livello II e III);
- controllo dei danni provocati dall'incendio di progetto (livello IV e V).

3.2.5.2 La sottostruttura

Come già visto per la risposta termica, per determinare la risposta meccanica della struttura in un determinato scenario di incendio di progetto, è necessario definire un passo importante della progettazione della soluzione alternativa:

- la determinazione di almeno una **sottostruttura**, ossia della porzione di struttura significativa per eseguire l'analisi dello scenario di incendio di progetto, ai fini della valutazione della prestazione di resistenza al fuoco.

Nel caso in cui non sia definita o definibile almeno una sottostruttura, la determinazione della capacità portante per l'incendio di progetto sarà eseguita con riferimento all'intera struttura in oggetto.

3.2.5.3 Analisi dei carichi in caso di incendio

L'analisi dei carichi meccanici per la combinazione delle azioni in caso di incendio deve essere sviluppata con gli stessi criteri previsti per le soluzioni conformi.

Per i contenuti della specifica tecnica valgono quindi le stesse note riportate al paragrafo 3.1.5.3.

3.2.5.4 Metodi di calcolo

I metodi di calcolo disponibili per eseguire la valutazione della risposta meccanica delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio di una soluzione alternativa sono definiti nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici, UNI-EN-1993-1-2 [6] e UNI EN 1994-1-2 [7], tenendo conto delle disposizioni previste nelle relative Appendici Nazionali [8]. Essi sono solo i:

- metodi avanzati,

in quanto le tabelle per il progetto delle strutture composte acciaio-calcestruzzo e i metodi semplificati sono validi solo per la progettazione delle soluzioni conformi.

I metodi di calcolo avanzato consentono di analizzare il comportamento di una struttura completa, o di una porzione di struttura, soggetta all'incendio naturale di progetto. La loro applicazione è basata sulle seguenti ipotesi:

- il calcolo deve essere coerente con la teoria della meccanica delle strutture, tenendo conto dei cambiamenti delle proprietà meccaniche dei materiali in funzione della temperatura;
- ogni possibile meccanismo di collasso non incluso nel metodo di calcolo, ad esempio le instabilità locali o la rottura per taglio, deve essere considerato in fase di progettazione (ad esempio impedendolo con mezzi opportuni);
- è possibile analizzare strutture esposte a qualsiasi curva di incendio, a patto che siano note le proprietà dei materiali per l'intervallo di temperatura considerato;
- il calcolo deve essere in grado di considerare gli effetti delle tensioni e delle deformazioni indotte dalla variazione di temperatura, con riferimento sia agli incrementi di temperatura che ai gradienti termici, sull'intera struttura o porzione di struttura considerata;

- il modello di calcolo impiegato per l'analisi della risposta meccanica deve tenere conto:
 - degli effetti combinati delle azioni meccaniche, delle imperfezioni geometriche e delle azioni termiche, comprese le sollecitazioni indirette dovute alle dilatazioni termiche contrastate;
 - delle proprietà meccaniche dei materiali dipendenti dalla temperatura;
 - degli effetti delle non-linearità geometriche;
 - degli effetti delle non-linearità delle proprietà dei materiali, inclusi gli effetti sfavorevoli delle serie di carico e scarico sulla rigidezza strutturale.

In fase di progettazione, particolare attenzione deve essere prestata al controllo delle deformazioni della struttura, in modo da garantire la compatibilità tra le varie parti della struttura stessa ed i vincoli interni ed esterni. Per quanto riguarda le strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo, le proprietà meccaniche dei materiali in funzione della temperatura sono indicate rispettivamente nelle norme EN 1993-1-2 [6] e EN 1994-1-2 [7]. Il codice di calcolo impiegato deve pertanto utilizzare opportune curve di legame tensioni-deformazioni variabili con la temperatura rispondenti a queste proprietà (vedi Figura 5-15).

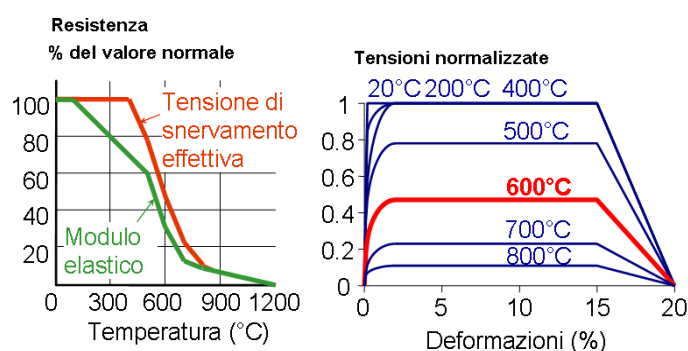
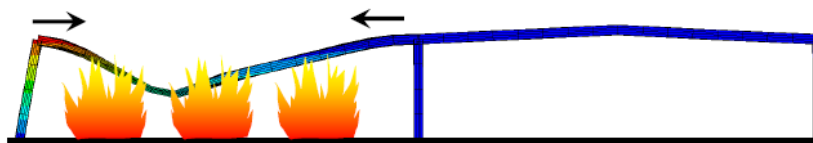


Figura 22 – Proprietà meccaniche dell'acciaio strutturale ad elevata temperatura

Un modello di calcolo di tipo avanzato deve essere in grado di analizzare il comportamento della struttura durante tutta l'esposizione all'incendio prevista dalla strategia antincendio del progetto di prevenzione incendi. A questo scopo, dopo aver eseguito l'analisi dell'incendio mediante uno specifico modello, è necessario eseguire la conseguente analisi della risposta termica e della risposta meccanica della porzione di struttura individuata o dell'intera struttura. In generale la risposta termica e la risposta meccanica possono essere condotte con analisi separate, ma spesso sono eseguite con lo stesso codice di calcolo.

È da tenere presente che un programma di calcolo, pur specializzato per l'analisi delle strutture in condizioni di incendio, può non comprendere l'analisi di tutti i fenomeni che devono essere considerati in un modello di calcolo avanzato: alcuni software possono non includere l'analisi di alcune verifiche (ad esempio la verifica a taglio degli elementi), oppure essere limitati da ipotesi restrittive (ad esempio considerare solo il comportamento di elementi con sezioni di classe di duttilità 1). In questi casi è compito del progettista integrare le analisi eseguite con il software con specifiche verifiche di sicurezza, in modo da completare l'applicazione condotta con l'ausilio del programma di calcolo impiegato. Tra le ulteriori progettazioni e verifiche rientrano certamente quelle relative ai collegamenti tra elementi strutturali.

Nella seguente figura sono indicati schematicamente i criteri progettuali per controllare i meccanismi di collasso della struttura portante esposta all'incendio di un edificio industriale (livello di prestazione I di resistenza al fuoco).



Schema della deformata della struttura di acciaio esposta all'incendio durante la fase di collasso



FLUMILOG, verifica sperimentale del comportamento delle strutture di acciaio di edifici industriali esposte all'incendio

Nella seguente figura è riportato, tratto da [12], il confronto della risposta meccanica di tipo avanzato di un capannone con struttura di acciaio (livello di prestazione II di resistenza al fuoco) esposta ad uno scenario di incendio di progetto, eseguita con due diversi codici di calcolo.

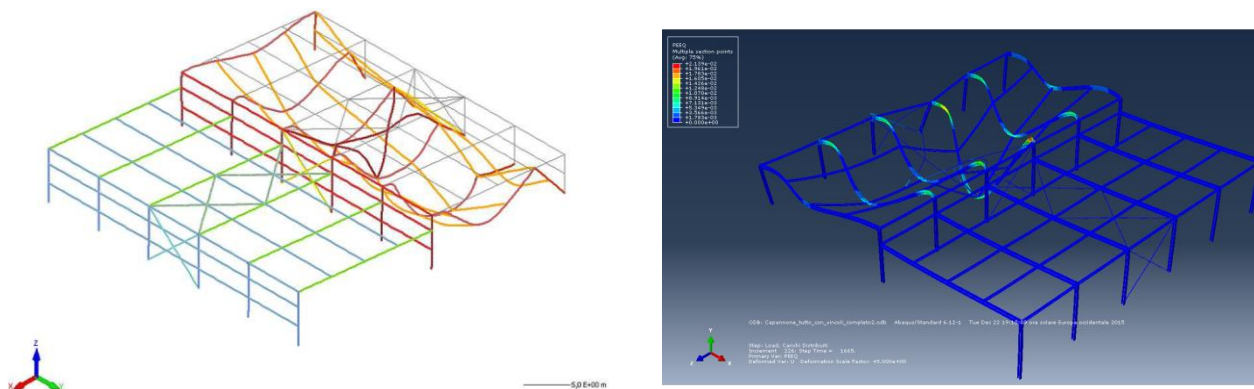


Figura 23 – Modelli strutturali in condizioni di incendio (fase della rottura) di un capannone industriale

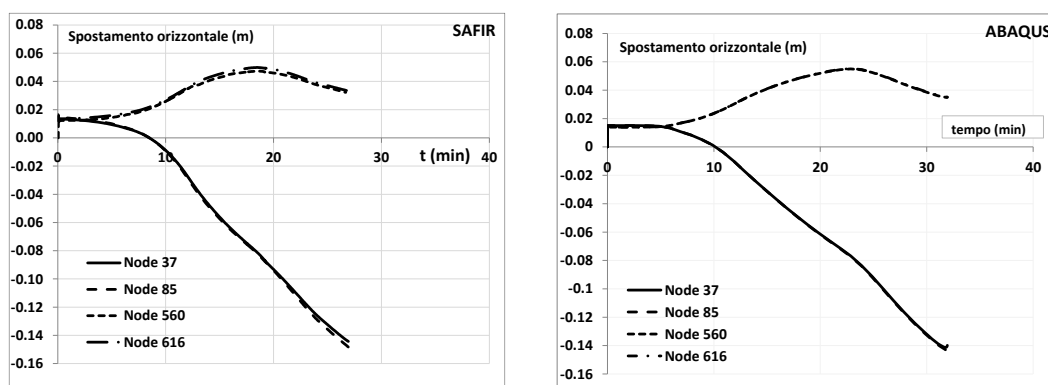


Figura 24 - Controllo dello spostamento testa colonna (Safir vs Abacus)

Nella seguente figura è riportata, tratto da [13], l'analisi termica e meccanica di tipo avanzato di uno scenario d'incendio della sottostruttura determinata per un edificio di acciaio realizzato con un solaio composto acciaio-calcestruzzo adibito ad autorimessa (livello di prestazione III di resistenza al fuoco).

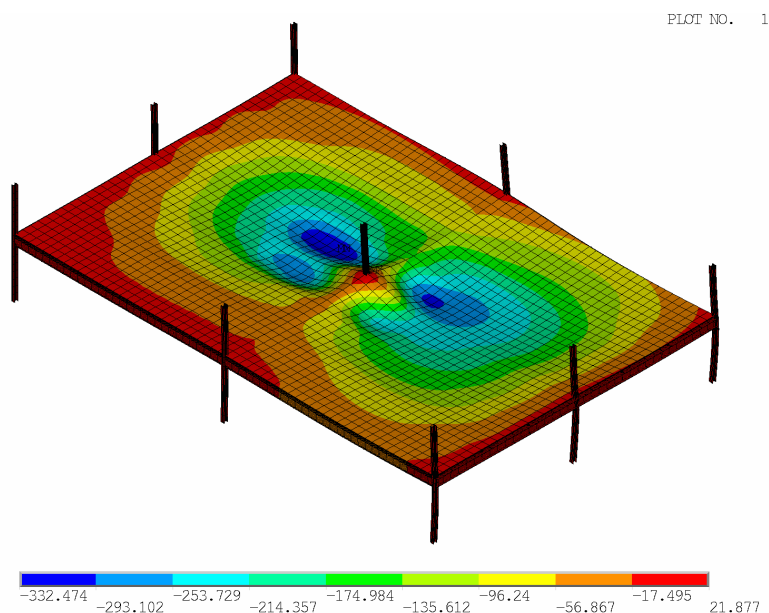


Figura 25 - Modelli strutturali in condizioni di incendio di un edificio in acciaio adibito ad autorimessa

3.2.5.5 Validazione dei codici di calcolo

Valgono ovviamente le considerazioni fatte nel paragrafo 3.2.4.4 in merito alla validazione del codice di calcolo impiegato anche per la determinazione della risposta meccanica della struttura.

3.2.6 La specifica tecnica del progetto di prevenzione incendi

La progettazione di una soluzione alternativa richiede l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato. Nella specifica tecnica della prestazione di resistenza al fuoco del progetto di prevenzione incendi questo approccio deve essere documentato indicando almeno:

- la norma di riferimento in cui il metodo è previsto;
- i dati di progetto e i modelli di calcolo impiegati per l'applicazione del metodo;

oltre che ovviamente i risultati che definiscono la soluzione progettuale.

A conclusione della disamina riportata nei paragrafi precedenti sui principali criteri della progettazione della prestazione di resistenza al fuoco di una struttura di acciaio o composta acciaio-calcestruzzo, di seguito è riepilogato quanto in generale deve contenere la specifica tecnica della soluzione alternativa della Misura S2 del progetto di prevenzione incendi.

- Elaborati grafici e descrittivi dell'opera da costruzione per la caratterizzazione geometrica e meccanica della sua struttura portante;
- Layout della compartimentazione;
- Layout delle aperture, comprendente anche le caratteristiche degli elementi di chiusura;
- Layout delle pareti, comprendente anche le caratteristiche degli elementi di parete;

- Tipologia e distribuzione dei materiali combustibili oppure la destinazione d'uso dei locali (con schemi per la valutazione dell'effetto degli incendi localizzati);
- Carico di incendio di progetto per ogni compartimento ed eventuale analisi degli effetti delle misure di protezione attiva;
- Determinazione del livello di prestazione;
- Indicazioni da RTV se presente;
- la durata dell'incendio di progetto;
- le soglie di prestazione, espresse nel dominio del tempo in funzione del livello di prestazione dell'opera da costruzione (vedasi indicazioni in merito contenute nella nota DCPREV n. 9962 del 24/07/2020);
- gli scenari di incendio di progetto, definiti specificatamente per gli obiettivi dell'analisi strutturale, e comprendenti per ciascuno di essi almeno:
 - la posizione del focolaio iniziale;
 - la curva RHR dell'incendio di progetto;
 - i restanti elementi dell'analisi preliminare prevista nell'applicazione FSE;
- Eventuali analisi di affidabilità e di rischio eseguita per l'impiego di impianti a disponibilità superiore;
- Materiali della struttura e loro proprietà meccaniche in caso di incendio;
- Analisi dei carichi sulla struttura in condizione di incendio;
- Tipologia e classe di duttilità in caso di incendio di ogni elemento strutturale;
- Per ogni scenario di incendio di progetto:
 - metodo di calcolo e software impiegato per determinare l'incendio naturale di progetto;
 - determinazione della eventuale sottostruttura di calcolo per la verifica del livello di prestazione;
 - metodo di calcolo e software impiegato per determinare la risposta termica della sottostruttura;
 - metodo di calcolo software impiegato per determinare la risposta meccanica della struttura;
 - Dati dei collegamenti della struttura e criteri di verifica impiegati;
- Dati della validazione per la condizione di calcolo strutturale in condizione di incendio dei software di calcolo impiegati.

3.3 Il caso degli edifici esistenti

3.3.1 Introduzione

La normativa vigente di prevenzione incendi non prevede ulteriori criteri specifici per la progettazione e la verifica della prestazione di resistenza al fuoco degli edifici esistenti rispetto a quelli di nuova costruzione, fermo restando quanto stabilito dal capitolo 8 delle NTC 2018. I criteri per definire le soluzioni progettuali sono quelli già visti nei precedenti paragrafi. Questi casi progettuali diventano particolarmente impegnativi nelle seguenti situazioni:

- cambi di destinazione d'uso dei locali o la necessità di rispettare nuove normative in vigore nel caso di importanti ristrutturazioni possono comportare la necessità di progettare prestazioni di resistenza al fuoco maggiori rispetto a quelle con cui la struttura è stata inizialmente progettata;
- non disponibilità di dati di progetto sufficienti per un'adeguata conoscenza della struttura, che consenta la determinazione della prestazione di resistenza al fuoco;
- non disponibilità di dati di progetto sufficienti per riconoscere il contributo di sistemi protettivi antincendio già da tempo installati.

Sia in soluzione conforme sia in alternativa la specifica tecnica è la medesima prevista per i nuovi edifici, con la sola differenza che deve contenere, in aggiunta, i dati inerenti alla conoscenza della struttura, derivanti da rilievi e da indagini conoscitive documentali e strumentali.

3.3.2 Soluzioni progettuali conformi

Il punto di partenza della progettazione delle strutture esistenti è l'analisi dei dati di progetto, con cui si deve individuare il livello di conoscenza degli elementi strutturali. A questo proposito, le Norme tecniche per le Costruzioni, [2], individuano i seguenti "livelli di conoscenza", sulla base della geometria della struttura, dei dettagli costruttivi, delle proprietà dei materiali, delle connessioni tra i diversi elementi e delle loro presumibili modalità di collasso:

- **LC1**, si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, poiché non si dispone dei disegni costruttivi, i dettagli costruttivi siano stati ricavati sulla base di un progetto simulato e con indagini limitate in-situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti (i dati raccolti devono essere tali da consentire verifiche locali di resistenza), poiché non si dispone di informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali (provenienti dai disegni costruttivi o dai certificati di prova), si siano adottati i valori usuali della pratica costruttiva dell'epoca, convalidati da prove limitate in-situ sugli elementi più importanti; il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1,35**. La valutazione della sicurezza è, in genere, eseguita mediante analisi lineare, statica o dinamica; le informazioni raccolte devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.
- **LC2**, si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, i dettagli costruttivi siano noti, o parzialmente dai disegni costruttivi originali integrati da indagini limitate in situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti, o a seguito di una indagine estesa in situ (i dati raccolti devono essere tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza, oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare), le caratteristiche meccaniche dei materiali siano note in base ai disegni costruttivi, integrati da prove limitate in situ (se i valori ottenuti dalle prove in situ sono minori dei corrispondenti valori indicati nei disegni di progetto, si eseguono prove estese in situ), o con prove estese in situ; il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1,2**. La valutazione della sicurezza è eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici; le informazioni raccolte sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelle riguardanti i dettagli strutturali, devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.
- **LC3**, si intende raggiunto quando sia stata effettuata l'analisi storico-critica commisurata al livello considerato, la geometria della struttura sia nota in base ai disegni originali (effettuando un rilievo visivo a campione per verificare l'effettiva corrispondenza del costruito ai disegni) o a un rilievo, i dettagli costruttivi siano noti, o dai disegni costruttivi originali integrati da indagini limitate in situ sulle armature e sui collegamenti presenti negli elementi più importanti, o a seguito di una indagine esaustiva in situ (i dati raccolti devono essere tali da consentire, nel caso si esegua un'analisi lineare, verifiche locali di resistenza,

oppure la messa a punto di un modello strutturale non lineare), le caratteristiche meccaniche dei materiali siano note in base ai disegni costruttivi e ai certificati originali di prova, integrati da prove limitate in situ (se i valori ottenuti dalle prove in situ sono minori dei corrispondenti valori indicati nei certificati originali di prova, si eseguono prove esaustive in situ), o con prove esaustive in situ; il corrispondente fattore di confidenza è **FC=1**. La valutazione della sicurezza è eseguita mediante metodi di analisi lineare o non lineare, statici o dinamici; le informazioni raccolte sulle dimensioni degli elementi strutturali, insieme a quelle riguardanti i dettagli strutturali, devono consentire la messa a punto di un modello strutturale idoneo.

Se sono presenti rivestimenti protettivi già da tempo installati, agli aspetti precedenti vanno aggiunte le analisi necessarie per il riconoscimento del loro contributo alla prestazione di resistenza al fuoco. A questo proposito, il principale suggerimento è di ricercare nell'edificio esistente la possibilità di ricavare i cosiddetti campioni di sacrificio, necessari soprattutto nel caso dei protettivi di tipo reattivo, per consentire la verifica dell'efficienza dei sistemi protettivi mediante prove di laboratorio. Questa nota, richiamata anche nel recente articolo [14], segnala come questa dotazione sia un importante requisito da non trascurare nella fase di progetto e realizzazione di una nuova costruzione.

3.3.3 Soluzioni progettuali alternative

Anche per le soluzioni alternative, il punto di partenza della progettazione è il controllo della disponibilità dei dati di progetto, che consentono un sufficiente livello di conoscenza degli elementi della struttura, come sopra illustrato.

Nel caso delle soluzioni alternative la progettazione può avvalersi di strategie progettuali non percorribili con le soluzioni conformi: ricercare le soluzioni progettuali adeguate alle prestazioni di resistenza al fuoco della struttura. Queste soluzioni progettuali possono essere riconosciute mediante l'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio, sebbene con questi può essere comunque richiesta la modifica o l'adeguamento delle strutture per resistere ai cimenti termici degli incendi naturali di ogni scenario d'incendio di progetto. In questo caso è possibile individuare i livelli di utilizzazione dei locali, in termini di quantità e distribuzione di materiali combustibili, che sono compatibili con le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture, e verificare se essi sono compatibili con le future utilizzazioni dei locali fissate in fase di progetto. Ovviamente, a conclusione del progetto, queste limitazioni devono essere fissate nella gestione dei locali della nuova attività.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero dell'Interno. DM 3 agosto 2015 e s.m.i., «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139»;
- [2] Ministero Infrastrutture e Trasporti. DM 17 gennaio 2018, Norme tecniche per le costruzioni;
- [3] UNI EN 1990:2014, Eurocodice: Criteri generali di progettazione strutturale;
- [4] UNI EN 1991-1-2, Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 1-2: Azioni generali -Azioni sulle strutture esposte al fuoco”, 2004;
- [5] UNI EN 1991-1-2 (Final draft PT SC1.T1, CEN TC250, ottobre 2017), Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 1-2: Azioni generali -Azioni sulle strutture esposte al fuoco”, 2017;
- [6] UNI EN 1993-1-2, Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio, 2005;
- [7] UNI EN 1994-1-2, Eurocodice 4: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio, 2005;
- [8] Appendici Nazionali EN 1990, EN 1991-1-2, EN 1993-1-2, EN 1994-1-2, Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 31 luglio 2012, Gazzetta Ufficiale del 27 marzo 2013;
- [9] La prestazione di resistenza al fuoco: armonizzazione, razionalizzazione e semplificazione delle fasi di progetto, esecuzione, collaudo e SCIA antincendio. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2022;
- [10] A. Marino, E. Nigro, S. Pustorino. Prontuario delle soluzioni progettuali e check list. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2022;
- [11] Istruzioni tecniche. Sicurezza in caso di incendio: le strutture di acciaio, Edizione III. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2022;
- [12] S. Pustorino, P. Princi., E. Nigro, A. Ferraro, F. Bontempi, C. Crosti Progettazione delle strutture di acciaio di capannoni industriali mediante l'applicazione dei metodi di ingegneria della sicurezza antincendio. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2016;
- [13] M. Caciolai, E. Nigro, L. Ponticelli, P. Princi, S. Pustorino. Applicazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio alla progettazione strutturale di autorimesse aperte. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2018.
- [14] A. Marino, E. Nigro, S. Pustorino. La prestazione di resistenza al fuoco delle strutture di acciaio protette. Commissione tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio, 2024.