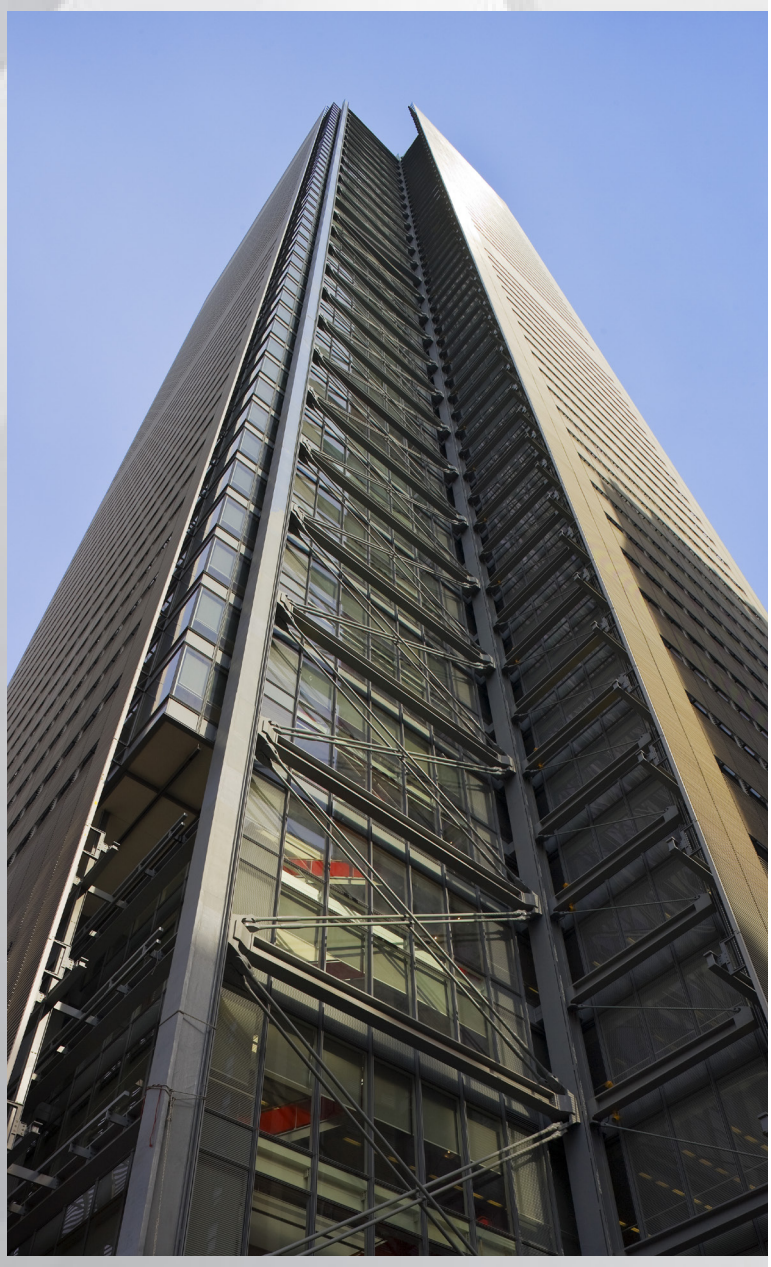
Commissione per la Sicurezza
delle Costruzioni in Acciaio
in caso d'Incendio

Sicurezza in caso di incendio
LE STRUTTURE DI ACCIAIO









ISTRUZIONI TECNICHE

Edizione III, febbraio 2024

In copertina

- KANSAI AIRPORT, Osaka - Renzo Piano Building Workshop
- BOLOGNA FIERE PADIGLIONI 29 E 30, Bologna - Studio tecnico Majowiecki
- STADIO DEL GHIACCIO INTERCABLE ARENA, Brunico – CeZ Calderan e Zanovello Architetti, Davide Perbellini
- NEW YORK TIMES BUILDING, New York - Renzo Piano Building Workshop

Sicurezza in caso di incendio

ISTRUZIONI TECNICHE

Capacità portante in caso di incendio delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo

Il presente testo è stato scritto nell'ambito delle attività della **Commissione Tecnica per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio**, istituita su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e del Corpo nazionale dei Vigili del Fuoco.

Copyright 2024 Fondazione Promozione Acciaio (FPA)
Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio.
Questo documento non deve essere copiato, riprodotto o modificato in toto o in parte per nessuno scopo senza l'autorizzazione scritta da parte di Fondazione Promozione Acciaio.

Come citare questo documento:
E. Nigro - prof. ing. Università di Napoli "Federico II", L. Ponticelli - Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, S. Pustorino – ricercatore e progettista.
ISTRUZIONI TECNICHE.
Sicurezza in caso di incendio. Capacità portante in caso di incendio delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo.
Fondazione Promozione Acciaio – Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio.
ISBN: 9791221053852

SICUREZZA IN CASO DI INCENDIO - LE STRUTTURE DI ACCIAIO
ISTRUZIONI TECNICHE

Edizione III, febbraio 2024

AUTORI

Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni di Acciaio in caso di Incendio - Fondazione Promozione Acciaio

E Nigro prof. ing. Università di Napoli "Federico II"
L Ponticelli Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
S Pustorino ricercatore, progettista

COMITATO CONSULTIVO

A Catanzaro Cimolai S.p.A.
D Magnano Renzo Piano Building Workshop
S Pinardi Studio tecnico Majowiecki

M Caciolai Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
P Cancelliere Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
M Cavriani Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
F Dattilo Capo del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco, a.r.
G Giomi Capo del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco, a.r.
E Gissi Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
A Marino Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
E Mannino Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
M Mazzaro Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
G Parisi Capo del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco
A Villotti Ufficio prevenzione incendi, Provincia autonoma di Bolzano

F Bontempi prof. ing. Università di Roma "La Sapienza"
E Cosenza prof. ing. Università di Napoli "Federico II"
R Landolfo prof. ing. Università di Napoli "Federico II", presidente UNI/CT 021/SC 03 "Strutture di acciaio",
A Occhiuzzi prof. ing. Università di Napoli "Parthenope", presidente UNI/CT 021/SC 01 "Azioni sulle strutture"
E Renzi Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
N Tondini prof. ing. Università di Trento, PT SC1.T1 EN 1991-1-2 "Actions on structures exposed to fire"

L-G Cajot Eurocode EN1994-1-2, Convenor Working Group SC4-WG2, ArcelorMittal
P Formichi Eurocode EN1990, Chairman TC250/SC10 "Bases of structural design", Università di Pisa
F Hanus Eurocode EN1993-1-2, Member of Project Team SC3.T6, ArcelorMittal
R Zaharia Eurocode EN 1991-1-2, Convenor Working Group SC1-WG4, Università Politecnica Timisoara
B Zhao CEN/TC250 Eurocode, Fire, Convenor Horizontal Group CEN/TC250, CTICM

Laboratori autorizzati per prove di resistenza al fuoco

D Borsini Laboratorio resistenza al fuoco, LAPI S.p.A.
M N Bonfatti Laboratorio resistenza al fuoco, Capannelle VVF
P Mele Laboratorio resistenza al fuoco, CSI S.p.A.
S Vasini Laboratorio resistenza al fuoco, Istituto Giordano S.p.A.

INDICE

PREFAZIONE

TERMINI E DEFINIZIONI

1. INTRODUZIONE 1

2. I REGOLAMENTI DI PREVENZIONE INCENDI: LE SOLUZIONI PROGETTUALI

2.1 Obiettivi della sicurezza antincendio, rischio di incendio e strategia antincendio 1
2.2 Resistenza al fuoco 3
2.2.1 Livelli di prestazione 3
2.2.2 Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione 4
2.2.3 Le soluzioni progettuali 4
2.2.3.1 Criteri generali 4
2.2.3.2 Soluzioni conformi e soluzioni alternative 5
2.2.3.2.1 Introduzione 5
2.2.3.2.2 Le soluzioni conformi 5
2.2.3.2.3 Le soluzioni alternative 8
2.2.4 Casi particolari 9
2.2.4.1 Elementi strutturali secondari 9
2.2.4.2 Strutture di controvento 9
2.2.4.3 Strutture vulnerabili in condizioni di incendio 9
2.3 Attività e prestazioni di resistenza al fuoco 9

3. SCENARI DI INCENDIO PER LA PROGETTAZIONE DELLE SOLUZIONI ALTERNATIVE

3.1 Introduzione 11
3.2 Descrizione di uno scenario di incendio 11
3.2.1 Introduzione 11
3.2.2 Elementi di frontiera del compartimento 11
3.2.3 Le caratteristiche termiche delle pareti 11
3.2.4 Caratteristiche delle aperture 12
3.2.5 Caratteristiche principali dell'incendio 13
3.2.6 Il carico di incendio 13
3.2.7 Curva RHR 15
3.2.8 Posizione del focolaio 16
3.3 Approccio probabilistico della sicurezza strutturale in caso di incendio 16
3.4 Gli scenari di incendio di progetto 18
3.4.1 Premessa 18
3.4.2 Identificazione dei possibili scenari di incendio 18
3.4.3 Selezione degli scenari di incendio di progetto 19
3.4.4 Descrizione quantitativa degli scenari di incendio di progetto 20
3.4.5 Durata degli scenari di incendio di progetto 20
3.4.6 Stima della curva RHR 20
3.4.6.1 Fase della propagazione 20
3.4.6.2 Effetto dei sistemi automatici di controllo dell'incendio 20
3.4.6.3 Fase dell'incendio stazionario 20
3.4.6.4 Fase di decadimento 22
3.4.7 Incendi localizzati 22
3.4.8 Focolare predefinito 22
3.4.9 Un caso particolare: gli scenari di incendio di progetto di autorimesse aperte 22

4. DETERMINAZIONE DELLE CURVE DI INCENDIO NATURALE

4.1 Introduzione 23
4.2 Fase pre-flashover 23
4.2.1 Incendi localizzati 23
4.2.2 Modelli a due zone 24
4.2.3 Combinazione tra i modelli a due zone ed i modelli di incendio localizzato 25

4.3 Incendi pienamente sviluppati....25
4.3.1 Generalità....25
4.3.2 Incendi parametrici....25
4.3.3 Modelli a una zona....26
4.3.4 Combinazione di modelli ad una zona e di modelli a 2 zone....26
4.4 Modelli di fluidodinamica computazionale (CFD)....28
4.5 Modelli per l'analisi di elementi strutturali posti all'esterno del compartimento....28

5. ANALISI TERMICA E MECCANICA DELLA STRUTTURA PORTANTE
5.1 Introduzione....29
5.2 Strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo....29
5.2.1 Coefficienti parziali per il calcolo della resistenza al fuoco....29
5.2.2 Proprietà termiche e meccaniche dei materiali....29
5.3 Analisi termica della struttura portante....30
5.3.1 Introduzione....30
5.3.2 Metodi di calcolo semplificato....30
5.3.2.1 Criteri generali....30
5.3.2.2 Fattore di sezione e fattore per effetto ombra (shadow effect)....30
5.3.3 Metodi di calcolo avanzato....31
5.3.4 Applicazioni....32
5.4 Analisi meccanica della struttura portante....33
5.4.1 Generalità....33
5.4.2 Azioni meccaniche in caso di incendio....33
5.4.3 Metodi di calcolo e progettuali....34
5.4.3.1 Introduzione....34
5.4.3.2 Dati tabellati....34
5.4.3.3 Metodi di calcolo semplificato....35
5.4.3.3.1 Introduzione....35
5.4.3.3.2 Classificazione delle sezioni di acciaio....35
5.4.3.3.3 Strutture di acciaio: elementi con sezione 1,2,3....36
5.4.3.3.4 Strutture di acciaio: elementi con sezione 4....37
5.4.3.3.5 Metodo della temperatura critica....37
5.4.3.3.6 Il Nomogramma....38
5.4.3.3.7 Strutture composte acciaio-calcestruzzo....38
5.4.3.4 Metodi di calcolo avanzato....39
5.4.3.4.1 Criteri generali....39
5.4.3.4.2 Validazione dei modelli di calcolo....40
5.4.3.4.3 Applicazioni....40
5.4.3.5 Metodi di calcolo avanzato per il progetto di solai composti acciaio-calcestruzzo (MACS+)....41
5.4.4 I telai a nodi fissi....42
5.4.5 Criteri di verifica dei collegamenti....42
5.4.5.1 Introduzione....42
5.4.5.2 Soluzioni conformi....42
5.4.5.3 Soluzioni alternative....42
5.4.6 Schematizzazione della struttura e metodi di calcolo applicati....43
5.4.7 Metodi di calcolo: riferimenti normativi....46
5.4.7.1 Introduzione....46
5.4.7.2 Strutture di acciaio....46
5.4.7.3 Strutture composte acciaio-calcestruzzo....47

BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE....48

APPENDICE A A.1 Procedura per il calcolo del carico di incendio specifico di progetto....50
A.2 Soluzioni conformi: carico di incendio non uniformemente distribuito – Esempio....51
A.3 Carico di incendio non uniformemente distribuito....54
APPENDICE B B.1 Scenari di incendio per la progettazione delle soluzioni alternative nel caso di autorimesse aperte....56

PREFAZIONE

Ho accolto con piacere l'invito che mi hanno rivolto gli autori di questo studio in quanto, prima che colleghi li considero amici. Li conosco da molti anni e li apprezzo per la loro professionalità e conoscenza della materia.
Anche se l'argomento che li accomuna è la resistenza al fuoco, ognuno di loro ha una specifica peculiarità: l'Ing. Nigro ha una pluriennale esperienza come docente universitario nel campo delle strutture; l'Ing. Ponticelli ha lavorato per molti anni presso il Laboratorio di costruzioni del Centro Studi ed Esperienze Antincendi nel settore delle prove al fuoco dei materiali da costruzione; l'Ing. Pustorino, impegnato nella ricerca applicata alle strutture per la caratterizzazione all'incendio, svolge da anni attività di libera professione.
Questo ampio spettro di competenze ha consentito agli autori di affrontare l'argomento della valutazione della capacità portante delle strutture in acciaio sottoposte all'incendio in modo completo e sinergico e di realizzare una guida tecnica che si caratterizza per la sua fruibilità sia per i professionisti che si occupano di progettazione, di ricerca e formazione, sia per gli operatori del settore che svolgono attività di controllo.
Il requisito della resistenza al fuoco è uno dei parametri più importanti nella prevenzione incendi ed è stata la prima misura di protezione passiva ad essere compiutamente disciplinata. Dal 1961, anno in cui fu emanata la circolare n. 91, la prevenzione incendi ha fatto dei notevoli passi avanti e con essa anche la normativa sulla resistenza al fuoco.
I cambiamenti intervenuti sono stati indotti dalla Direttiva Comunitaria 89/106/CE e dall'esigenza di ridurre progressivamente l'influenza delle norme prescrittive a favore di un approccio maggiormente prestazionale ed anche la normativa sulla resistenza al fuoco ha risentito di questi cambiamenti.
La regolamentazione dettata dalla circolare n.91 del 14 settembre 1961 è stata quindi superata dai decreti 16 febbraio 2007, 9 marzo 2007, 9 maggio 2007 che, come affermano gli autori, sono confluiti e trovano sintesi nel decreto 3 agosto 2015, il c.d. codice di prevenzione incendi.
Sono certo che il testo degli autori Nigro, Ponticelli e Pustorino sarà molto apprezzato da tutti coloro che operano nel settore della prevenzione incendi che necessitano di guide tecniche autorevoli per espletare al meglio la loro professione e per rimanere aggiornati su una materia in progressiva evoluzione.
Agli autori va il mio ringraziamento per il pregevole lavoro.

Roma, 8 novembre 2019

Ing. Gioacchino Giomi
già Capo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

PREFAZIONE

I recenti aggiornamenti normativi in materia di prevenzione incendi, di cui il cosiddetto Codice di Prevenzione Incendi rappresenta solo l'ultimo atto in termini cronologici, esercitano un poderoso impulso alla nascita di nuovi strumenti di supporto ai progettisti antincendio.
La resistenza al fuoco delle strutture non esula da tale necessità.
Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco è da sempre molto attento alle innovazioni scientifiche ed al progresso tecnologico nel settore specialistico delle verifiche a caldo delle costruzioni, grazie a propri laboratori all'avanguardia, a collaborazioni con le Università ed a costanti confronti con il mondo delle imprese di settore e con gli ordini Professionali.
La partecipazione del Corpo alla stesura del presente documento in seno alla Commissione per la sicurezza della Costruzioni in acciaio in caso di incendio, si inquadra, quindi, in un'esigenza naturale.
Il documento è diretto a tutte le figure aventi un ruolo di rilievo nei processi di certificazione della resistenza al fuoco delle strutture: dai produttori di protettivi antincendio ai progettisti, dalle imprese di costruzione alla comunità scientifica. L'obiettivo della pubblicazione è quello di avvicinare il mondo della progettazione strutturale standard ad un settore classicamente "di nicchia", appannaggio di pochi specialisti della materia. Ricco di esempi, dalla grafica accattivante e dall'approccio semplice e contestualmente rigoroso, il testo fornisce un excursus completo alla disciplina della resistenza al fuoco, accostando ai richiami normativi l'esemplificazione delle prescrizioni richiamate.
Nel lodare il lavoro svolto dagli autori e nel ringraziare quanti hanno contribuito alla versione finale del documento, rivolgo l'invito di utilizzarne i contenuti come sprone per i necessari approfondimenti tecnici e normativi, convinto dell'efficacia di questo passo nel cammino verso una sempre maggiore professionalizzazione del settore.
.

Roma, 24 febbraio 2020

Ing. Fabio Dattilo
Capo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

PREFAZIONE

E' con grande piacere che ho accolto l'invito degli autori a predisporre l'introduzione al lavoro di revisione delle istruzioni tecniche per la progettazione delle strutture in acciaio in caso di incendio.
La proficua collaborazione tra i rappresentanti del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco, il mondo accademico, della ricerca e della sperimentazione, con il coinvolgimento di esperti nella progettazione delle prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture nonché dei componenti dei gruppi di lavoro di revisione degli Eurocodici relativi alle strutture di acciaio, ha consentito di proseguire il lavoro di revisione ed aggiornamento delle citate istruzioni tecniche, anche per tener conto di un quadro normativo di riferimento in costante evoluzione.
Ritengo che il lavoro in questione costituisca un utile riferimento per i progettisti delle strutture e per i professionisti antincendio, proprio in considerazione della necessità di fornire agli stessi utili indicazioni per una progettazione basata su un approccio prestazionale quale alternativa al tradizionale approccio prescrittivo.
Nel documento, viene dedicato ampio spazio all'individuazione e alla "messa a punto" delle cosiddette soluzioni progettuali alternative previste dalle disposizioni tecniche di prevenzione incendi per l'implementazione della misura resistenza al fuoco, evidenziando la necessità di garantire una progettazione delle strutture in conformità sia a quanto stabilito dal Codice di prevenzione incendi sia alle previsioni delle Norme tecniche per le costruzioni. D'altra parte, appare chiaro come una corretta progettazione strutturale in caso d'incendio necessiti, sin dalle fasi iniziali, di specifiche competenze di settore sia in ambito strutturale che, più propriamente, di prevenzione incendi.
Come Capo del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco e Presidente del Comitato centrale tecnico scientifico per la prevenzione incendi, ringrazio sentitamente quanti hanno contribuito alla stesura delle istruzioni tecniche di seguito riportate che forniscono un'ampia disamina della disciplina della resistenza al fuoco e del relativo quadro normativo di riferimento.

Roma, marzo 2023

Ing. Guido Parisi
Capo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco

TERMINI E DEFINIZIONI

Soluzione conforme (deemed to satisfy provision): soluzione progettuale di immediata applicazione nei casi specificati, che garantisce il raggiungimento del collegato livello di prestazione.

Soluzione alternativa (alternative solution): soluzione progettuale alternativa alle soluzioni conformi. Il professionista antincendio è tenuto a dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione impiegando uno dei metodi di progettazione della sicurezza antincendio ammessi.

Regola tecnica orizzontale (RTO): regola tecnica di prevenzione incendi applicabile a tutte le attività.

Regola tecnica verticale (RTV): regola tecnica di prevenzione incendi applicabile ad una specifica attività o ad ambiti di essa, con specifiche indicazioni, complementari o sostitutive di quelle previste nella regola tecnica orizzontale.

Resistenza al fuoco: una delle misure antincendio di protezione da perseguire per garantire un adeguato livello di sicurezza di un'opera da costruzione in condizioni di incendio. Essa riguarda la capacità portante in caso di incendio, per una struttura, per una parte della struttura o per un elemento strutturale nonché la capacità di compartimentazione in caso di incendio per gli elementi di separazione strutturali (es. muri, solai, …) e non strutturali (es. porte, divisori, …).

Capacità portante in caso di incendio: attitudine della struttura, di una parte della struttura o di un elemento strutturale, a conservare una sufficiente resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco, tenendo conto delle altre azioni agenti.

Carico d'incendio: potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretto in base ai parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali. Limitatamente agli elementi strutturali di legno, è possibile considerarne il contributo tenendo conto del fatto che gli stessi devono altresì garantire la conseguente resistenza al fuoco. Tale contributo deve essere determinato tramite consolidati criteri di interpretazione del fenomeno. Il carico di incendio è espresso in MJ; convenzionalmente 1 MJ è assunto pari all'energia sviluppata da 0,057 kg di legna equivalente.

Carico d'incendio specifico: carico di incendio riferito all'unità di superficie lorda di piano, espresso in MJ/m2.

Carico d'incendio specifico di progetto: carico d'incendio specifico corretto in base ai parametri indicatori del rischio di incendio del compartimento antincendio e dei fattori relativi alle misure antincendio presenti. Esso costituisce la grandezza di riferimento per le valutazioni della resistenza al fuoco delle opere da costruzione.

Classe di resistenza al fuoco: intervallo di tempo espresso in minuti, definito in base al carico di incendio specifico di progetto, durante il quale il compartimento antincendio garantisce la resistenza al fuoco. È riferita ad una curva di incendio nominale.

Incendio convenzionale di progetto: incendio definito attraverso una curva di incendio che rappresenta l'andamento, in funzione del tempo, della temperatura media dei gas di combustione nell'intorno della superficie degli elementi costruttivi. La curva di incendio di progetto può essere:

a. nominale: curva adottata per la classificazione delle opere da costruzione e per le verifiche di resistenza al fuoco di tipo convenzionale;
b. naturale: curva determinata in base a modelli d'incendio e a parametri fisici che definiscono le variabili di stato all'interno del compartimento antincendio.

Incendio localizzato: focolaio d'incendio che interessa una zona limitata del compartimento antincendio, con sviluppo di calore concentrato in prossimità degli elementi costruttivi posti superiormente al focolaio o immediatamente adiacenti.

Elementi strutturali principali: elementi strutturali il cui cedimento per effetto dell'incendio comprometta almeno una delle seguenti capacità:

c. capacità portante degli altri elementi strutturali della costruzione in condizioni di incendio;
d. efficacia di elementi costruttivi di compartimentazione;
e. funzionamento dei sistemi di protezione attiva;
f. esodo in sicurezza degli occupanti;
g. sicurezza dei soccorritori.

Elementi strutturali secondari: tutti gli elementi strutturali non principali.

Compartimento antincendio: parte dell'opera da costruzione organizzata per rispondere alle esigenze della sicurezza in caso di incendio e delimitata da prodotti o elementi costruttivi idonei a garantire, sotto l'azione del fuoco e per un dato intervallo di tempo, la resistenza al fuoco. Qualora non sia prevista alcuna compartimentazione, si intende che il compartimento coincida con l'intera opera da costruzione.

CFD: fluidodinamica computazionale, metodologia di risoluzione numerica delle equazioni della fluidodinamica, Computational Fluid Dynamcs.

Flashover: passaggio allo stato di totale coinvolgimento in un incendio di materiali combustibili all'interno di un ambiente confinato.

Incendio pienamente sviluppato: stato di totale coinvolgimento di materiali combustibili in un incendio.

Modello a una zona: modello di incendio nel quale si assume una temperatura uniforme del gas contenuto nel compartimento.

Modello a due zone: modello di incendio in cui sono definite differenti zone nel compartimento: lo strato superiore, lo strato inferiore, il focolaio e il suo pennacchio, il gas di contorno e le pareti esterne. Nello strato superiore si assume una temperatura uniforme del gas.

1. INTRODUZIONE

La normativa vigente per la progettazione delle strutture in caso di incendio è sostanzialmente basata su due recenti documenti: le Norme tecniche di prevenzione incendi, riportate nel DM Interno 03-08-2015 [2], come modificato dal DM Interno 18-10-2019 [4], e le Norme tecniche per le costruzioni, riportate nel DM Infrastrutture e Trasporti 17-01-2018 [22] [1].

In questo nuovo quadro normativo la progettazione antincendio può essere condotta seguendo due distinti percorsi: si può procedere applicando le regole definite nell'ambito della legislazione prescrittiva oppure utilizzando un approccio prestazionale. Il presente documento è rivolto alle procedure di applicazione di questo nuovo quadro normativo, che è orientato in maniera significativa verso una progettazione basata sull'applicazione dell'approccio prestazionale. Mediante questo approccio è possibile ottenere una più dettagliata verifica della sicurezza in caso di incendio ed il raggiungimento di specifici obiettivi progettuali, ad esempio di ottimizzazione strutturale, di tipo architettonico e/o funzionale.

Lo scopo delle Istruzioni tecniche è di fornire al progettista di strutture di acciaio un quadro completo dei criteri previsti dalle normative vigenti, delle procedure di applicazione ivi indicate e delle metodologie di calcolo che la ricerca applicata del settore ha messo a punto per la migliore progettazione di questa tipologia strutturale.

Nel presentare le diverse metodologie di calcolo disponibili, particolare attenzione è stata prestata nel fornire le fonti bibliografiche, utili per una completa comprensione dei criteri indicati, e la definizione dei campi di applicazione di ogni metodo, al fine di poterne controllare la corretta applicazione.

In tal senso le normative nazionali citate sono integrate per gli aspetti applicativi dalle indicazioni contenute nelle "parti fuoco" degli Eurocodici strutturali (EN 1991-1-2 [24], EN 1993-1-2 [26], EN 1994-1-2 [27]), tenendo conto delle rispettive Appendici nazionali [28].

Nella prima parte del documento, capitolo 2, sono analizzati i regolamenti di prevenzione incendi e le diverse soluzioni progettuali previste, con alcune esemplificazioni valide in particolare per la progettazione delle soluzioni nell'ambito della regola tecnica prescrittiva.

I capitoli successivi, 3 e 4, sono specificamente dedicati alla procedura prevista per la progettazione svolta con approccio prestazionale ed ai metodi di calcolo relativi alla valutazione del rischio di incendio.

Infine, nel capitolo 5, sono trattate le metodologie di calcolo delle strutture di acciaio e composte acciaio/calcestruzzo, valide sia nel caso di applicazione dell'approccio prescrittivo che di quello prestazionale.

1. I DM Interno 16/2/2007, 9/3/2007 e 9/5/2007 sono sostanzialmente confluiti, con modifiche, nel citato DM Interno 3/8/2015. Il DM Interno 3/8/2015 è stato modificato, per la parte normativa, dal DM Interno 12/4/2019 e, nell'allegato tecnico, dal DM Interno 18/10/2019. La parte normativa prevede, dal 20/10/2019, l'applicazione in via esclusive del codice alle "attività soggette" non coperte da regole tecniche di prevenzione incendi "di tipo tradizionale": le cosiddette attività soggette e non normate. L'allegato tecnico sostituisce integralmente, dal 1/11/2019, l'originario allegato tecnico al DM Interno 3/8/2015 recando, tra le altre, modifiche anche alla sezione S.2 relativa alla "Resistenza al fuoco".

2. I REGOLAMENTI DI PREVENZIONE INCENDI: LE SOLUZIONI PROGETTUALI

2.1 Obiettivi della sicurezza antincendio, rischio di incendio e strategia antincendio.

Gli obiettivi primari della prevenzione incendi [4] sono:
- sicurezza della vita umana
- incolumità delle persone
- tutela dei beni e dell'ambiente.

Per raggiungere questi obiettivi le attività devono essere progettate, realizzate e gestite in modo da:
a) minimizzare le cause di incendio o di esplosione;
b) garantire la stabilità delle strutture portanti per un periodo di tempo determinato;
c) limitare la produzione e la propagazione di un incendio all' interno dell'attività;
d) limitare la propagazione di un incendio ad attività contigue;
e) limitare gli effetti di un'esplosione;
f) garantire la possibilità che gli occupanti lascino l'attività autonomamente o che gli stessi siano soccorsi in altro modo;
g) garantire la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza;
h) tutelare gli edifici pregevoli per arte e storia;
i) garantire la continuità d'esercizio per le opere strategiche;
j) prevenire il danno ambientale e limitare la compromissione dell'ambiente in caso d'incendio.

La valutazione del rischio di incendio di un'attività, strutturata come esplicitato in G.2 di [4], è necessaria per la determinazione di 3 profili di rischio:
- R_{vita}, relativo alla salvaguardia della vita umana, attribuito per ciascun compartimento e, ove necessario, per ciascuno spazio a cielo libero dell'attività;
- R_{beni}, relativo alla salvaguardia dei beni economici, attribuito all'intera attività o ad ambiti di essa, qualora solo una parte dell'attività sia da salvaguardare (es, in attività diffuse su più opere da costruzione);
- $R_{ambiente}$, relativo alla tutela dell'ambiente dagli effetti dell'incendio, attribuito all'intera attività o ad ambiti di essa, qualora solo una parte dell'attività sia a rischio di danno ambientale per incendio.

I primi due profili di rischio possono essere determinati quantitativamente mediante la metodologia riportata nella norma [4], che fornisce anche i criteri per valutare il terzo profilo di rischio. L'attribuzione dei tre profili di rischio può essere sinteticamente esemplificata come segue.
Per il profilo R_{vita}, sono previste cinque categorie A, B, C, D, E, indicative della tipologia di occupanti, ognuna delle quali è graduata con 4 livelli 1, 2, 3, 4 in funzione della velocità di crescita dell'incendio.
Si riporta di seguito la Tabella G.3-4 della norma [4] dove è indicato, in maniera non esaustiva, il profilo di rischio R_{vita} per le tipologie di destinazione d'uso più comuni.

Tipologie di destinazione d'uso	R_{vita}
Palestra scolastica	A1
Autorimessa privata	A2
Ufficio non aperto al pubblico, sala mensa, aula scolastica, sala riunioni aziendale, archivio, deposito librario, centro sportivo privato	A2-A3
Attività commerciale non aperta al pubblico (es. all'ingrosso, …)	A2-A4
Laboratorio scolastico, sala server	A3
Attività produttive, attività artigianali, impianti di processo, laboratorio di ricerca, magazzino, officina meccanica	A1-A4
Depositi sostanze o miscele pericolose	A4
Galleria d'arte, sala d'attesa, ristorante, studio medico, ambulatorio medico	B1-B2
Autorimessa pubblica	B2
Ufficio aperto al pubblico, centro sportivo pubblico, sala conferenze aperta al pubblico, discoteca, museo, teatro, cinema, locale di trattenimento, area lettura di biblioteca, attività espositiva, autosalone	B2-B3
Attività commerciale aperta al pubblico (es. al dettaglio, …)	B2-B4 [1]
Civile abitazione	Ci2-Ci3
Dormitorio, residence, studentato, residenza per persone autosufficienti	Cii2-Cii3
Camera d'albergo	Ciii2-Ciii3
Degenza ospedaliera, terapia intensiva, sala operatoria, residenza per persone non autosufficienti e con assistenza sanitaria	D2
Stazione ferroviaria, aeroporto, stazione metropolitana	E2
[1] Per raggiungere un valore ammesso fra quelli indicati alla tabella G.3-3, δ_a può essere ridotto di un livello come specificato nel comma 3 del paragrafo G.3.2.1.	

Tabella 2-1 - Profilo di rischio R_{vita} per alcune tipologie di attività (da [4])

Per il profilo R_{beni}, sono previste quattro categorie 1, 2, 3, 4, in funzione del carattere strategico dell'opera da costruzione e dell'eventuale valore storico, culturale, architettonico o artistico della stessa e dei beni in essa contenuti. Lo schema in tabella 2-2 guida il progettista nella categorizzazione di R_{beni}.

		Opera da costruzione vincolata	
		No	Si
Opera da costruzione strategica	No	$R_{beni} = 1$	$R_{beni} = 2$
	Si	$R_{beni} = 3$	$R_{beni} = 4$

Tabella 2-2 - Determinazione di R_{beni} [4]

Misure antincendio	
S1	Reazione al fuoco
S2	**Resistenza al fuoco**
S3	Compartimentazione
S4	Esodo
S5	Gestione della sicurezza antincendio
S6	Controllo dell'incendio
S7	Rivelazione ed allarme
S8	Controllo di fumi e calore
S9	Operatività antincendio
S10	Sicurezza degli impianti tecnologici e di servizio

Tabella 2-3 - Strategia antincendio [4]

Il profilo $R_{ambiente}$, può essere considerato "significativo" o "non significativo". Il rischio ambientale, se non diversamente indicato in [4] o determinato in esito a specifica valutazione del rischio, può ritenersi non significativo nelle attività civili (es. strutture sanitarie, scolastiche, alberghiere, …). Può altresì ritenersi non significativo in quegli ambiti delle attività in cui vi è la presenza di impianti di "estinzione completa" degli incendi a "disponibilità superiore", introducendo con questo, il Codice, la possibilità di ricorrere a misure proprie dell'analisi di "sicurezza funzionale" degli impianti classicamente impiegate nella progettazione di attività a rischio di incidente rilevante".

Le norme tecniche di prevenzione incendi [4] forniscono i criteri per pianificare la strategia antincendio mediante la quale, caso per caso, il progettista opera per il raggiungimento degli obiettivi primari. La strategia antincendio è composta da 10 misure tecniche di prevenzione, di protezione e gestionale, identificate dai capitoli S.1 a S.10 del DM 3/8/2015 e s.m.i. Esse sono graduate mediante livelli di prestazione, calibrati in funzione di una crescente richiesta di sicurezza. La norma specifica i criteri di attribuzione di ogni livello di prestazione per le varie misure, **anche** (ma non solo[2]) in funzione dei tre profili di rischio prima definiti. Nella fase della progettazione la definizione delle diverse misure antincendio deve condurre alla riduzione del rischio di incendio dell'attività, fino ad una soglia accettabile.
Nel presente documento l'attenzione è rivolta alla **misura antincendio della resistenza al fuoco (S2)**, in particolare alla capacità portante delle strutture in condizioni di incendio, facendo specifico riferimento alle soluzioni progettuali realizzate con strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo.

2.2 Resistenza al fuoco

2.2.1 Livelli di prestazione

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.

La prestazione di resistenza al fuoco richiesta alle strutture è modulata mediante la definizione dei seguenti 5 livelli di prestazione che possono essere attribuiti ad un'opera da costruzione in funzione dei profili di rischio:

- *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.

2. La valutazione del rischio incendio è comunque prerogativa ed obbligo del progettista, così come richiamato nel Paragrafo G.2.6 [2]. Nella dizione generica di "valutazione del rischio incendio" è ricompresa anche la valutazione del rischio esplosione.

2.2.2 Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

Le norme tecniche di prevenzione incendi [4] definiscono i criteri generalmente accettati per l'attribuzione ad una specifica opera da costruzione dei livelli di prestazione della resistenza al fuoco.
I criteri di attribuzione sono riportati in Tabella 2-4, tratta da [4].

Rispetto alla versione originaria del DM Interno 3/18/2015 [2] si noti l'introduzione del concetto di limitazione del danno rispetto anche al sedime dell'attività nel caso dei livelli di prestazione I e II e l'eliminazione di $R_{ambiente}$ non significativo ai fini dell'applicabilità dei medesimi livelli.

2.2.3 Le soluzioni progettuali

2.2.3.1 Criteri generali

1. La capacità portante del sistema strutturale in condizioni di incendio si può determinare sulla base della capacità portante propria degli elementi strutturali singoli, di porzioni di struttura o dell'intero sistema costruttivo, tenendo conto sia delle condizioni di carico e di vincolo presenti in condizioni di incendio che dell'eventuale presenza di materiali protettivi.
2. Le deformazioni ed espansioni imposte o impedite dovute ai cambiamenti di temperatura per effetto dell'esposizione al fuoco producono sollecitazioni indirette, forze e momenti nei singoli elementi strutturali, che devono essere tenuti in considerazione, ad eccezione dei seguenti casi:
   - è riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli;
   - i requisiti di sicurezza all'incendio sono valutati in riferimento a una curva nominale d'incendio.

   Di conseguenza:
   - nel caso in cui i requisiti all'incendio siano valutati in riferimento a una curva nominale d'incendio, la capacità portante del sistema strutturale in condizioni di incendio può essere determinata sulla base della capacità portante propria degli elementi strutturali singoli, tenendo conto quanto previsto al punto 1;
   - nel caso in cui i requisiti all'incendio siano valutati in riferimento a una curva naturale d'incendio, la capacità portante del sistema strutturale in condizioni di incendio deve essere determinata mediante l'analisi di porzioni di struttura o dell'intero sistema strutturale, tenendo conto quanto previsto al punto 1, a meno di verificare a priori che, per la particolare struttura oggetto di studio, l'effetto delle deformazioni ed espansioni imposte o impedite dovute ai cambiamenti di temperatura siano trascurabili.
3. Nel progetto e nelle verifiche di sicurezza all'incendio si deve tenere conto della combinazione dei carichi per azioni eccezionali previsti dalle vigenti Norme tecniche per le costruzioni [22].

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate *tutte* le seguenti condizioni: • compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione o all'esterno del confine dell'area su cui sorge l'attività medesima; • adibite ad attività afferenti ad un solo *responsabile dell'attività* e con profilo di rischio R_{beni} pari ad 1; • non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.
II	Opere da costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate *tutte* le seguenti condizioni: • compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti; • strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse o all'esterno del confine dell'area su cui sorge l'attività medesima; oppure, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione o all'esterno del confine dell'area su cui sorge l'attività medesima; • adibite ad attività afferenti ad un solo *responsabile dell'attività* e con i seguenti profili di rischio: ◦ R_{vita} compresi in A1, A2, A3, A4; ◦ R_{beni} pari ad 1; • densità di affollamento ≤ 0,2 persone/m²; • non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità; • aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per opere da costruzione destinate ad attività di particolare importanza.

Tabella 2-4 - Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione

2.2.3.2 Soluzioni conformi e soluzioni alternative

2.2.3.2.1 Introduzione

Per verificare il prescritto livello di prestazione di resistenza al fuoco sono previste due tipologie di soluzioni progettuali:

- 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, in base alle quali l'azione termica è rappresentata da curve temperatura/tempo determinate ad hoc per ciascuno scenario di incendio individuato come rappresentativo dell'evento che può verificarsi.

Per quanto visto al punto 2. del paragrafo precedente:

- 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, a meno di verificare a priori, per la particolare struttura oggetto di studio, che l'effetto delle deformazioni ed espansioni imposte o impedite dovute ai cambiamenti di temperatura sia trascurabile.

Alcune note per la progettazione delle soluzioni conformi e delle soluzioni alternative con riferimento alla schematizzazione del sistema strutturale e all'applicazione degli specifici metodi di calcolo sono riportate nel paragrafo 5.4.6.

2.2.3.2.2 Le soluzioni conformi

Criteri generali

1. Le prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni devono essere verificate in base agli incendi convenzionali di progetto rappresentati da curve nominali di incendio. Queste curve, rappresentate in Figura 2-2, sono definite nel paragrafo S.2.7 di [4] e riportate in Appendice A.1.
2. L'andamento delle temperature negli elementi deve essere valutato per l'intervallo di tempo di esposizione pari alla classe minima di resistenza al fuoco prevista per il livello di prestazione individuato.
3. La procedura per il calcolo del carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ impiegato per la definizione della classe di resistenza al fuoco è descritta nel paragrafo S.2.9 di [4]. Essa è riportata in Appendice A.2.

   Nell'ambito di questa procedura sono definiti:

   - il carico di incendio specifico q_f [MJ/m^2], relativo all'unità di superficie di riferimento;
   - il carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ [MJ/m^2], pari al carico di incendio specifico corretto in base a parametri indicatori del rischio di incendio del compartimento antincendio ed a fattori relativi alle misure tecniche antincendio ivi presenti. Tali coefficienti tengono conto del rischio di incendio presente sia in base alla dimensione del compartimento ed al tipo di attività che attraverso la presenza di determinate misure di protezione quali, ad esempio, i sistemi di controllo dell'incendio come rete di idranti, sistemi sprinkler, impianti di rivelazione ed allarme incendio, etc. I valori dei coefficienti necessari per la determinazione di $q_{f,d}$ sono definiti nelle Tabelle S.2.4-5-6 di [4] riportate in Appendice A.2.

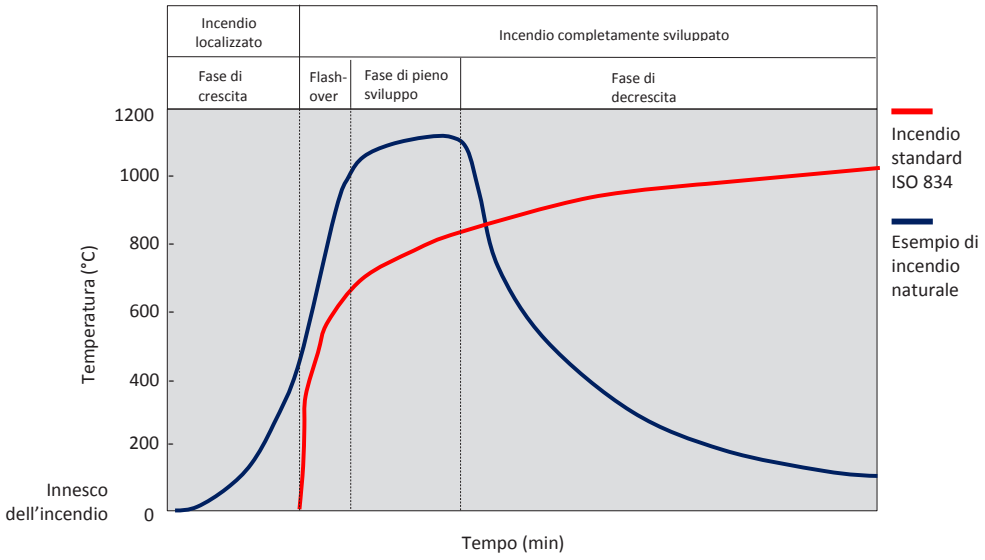


Figura 2-1 - Curva temperatura-tempo standard ISO 834 ed esempio di curva di incendio naturale

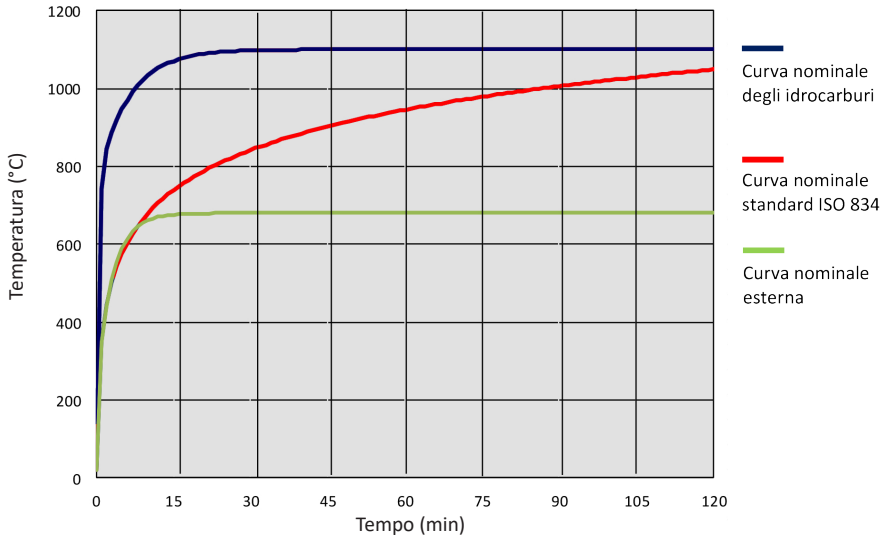


Figura 2-2 - Curve nominali d'incendio [4]

4. Nei casi di distribuzione uniforme del materiale combustibile la superficie di riferimento per il calcolo del carico di incendio specifico q_f è pari alla superficie lorda del piano del compartimento antincendio. Nei casi di distribuzione disuniforme del carico di incendio devono essere individuate le specifiche aree del compartimento in cui si ha una più severa distribuzione del carico di incendio e la superficie di riferimento per il calcolo del carico di incendio specifico q_f è assunta pari all'effettiva area di pertinenza dello stesso (vedi par. 2.3.3.2.3). In tal caso la classe di resistenza al fuoco del compartimento è pari alla maggiore tra quella calcolata con riferimento al carico di incendio assunto come uniformemente distribuito nel compartimento e quella calcolata per le specifiche aree suddette.
5. Le curve nominali di incendio devono essere applicate ad un compartimento dell'edificio alla volta, salvo il caso degli edifici multipiano dove, pur in assenza di una specifica compartimentazione di piano, la presenza di elementi orizzontali di separazione con capacità di compartimentazione adeguata nei confronti della propagazione verticale degli incendi consente di considerare separatamente il carico di incendio dei singoli piani.
6. In caso di compartimenti con elementi di compartimentazione comuni, la classe di tali elementi può essere cautelativamente pari alla maggiore delle classi di ciascun compartimento. Casi particolari possono essere valutati tenendo conto della direzione di origine dell'incendio.
7. I valori del carico d'incendio specifico di progetto e delle caratteristiche del compartimento antincendio adottati nel progetto costituiscono un vincolo d'esercizio per le attività da svolgere all'interno della costruzione: il titolare dell'attività deve operare entro i limiti stabiliti in fase progettuale alla stessa stregua dei limiti di esercizio ad esempio imposti ad un solaio in funzione della destinazione d'uso dello stesso.

Le soluzioni progettuali

Le norme tecniche di prevenzione incendi [4] fissano i requisiti minimi delle soluzioni conformi per ognuno dei livelli di prestazione individuati.
Solo i primi tre livelli sono obbligatori: il quarto ed il quinto possono essere frutto di una libera scelta progettuale o di una richiesta della committenza.

Livello I:

1. Deve essere interposta una distanza di separazione su spazio a cielo libero verso le altre opere da costruzione e verso il confine dell'area su cui sorge l'attività, definita secondo le procedure di cui al paragrafo S.3.11 di [4] e non deve comunque risultare inferiore alla massima altezza della costruzione.
2. Non è richiesta alle strutture alcuna prestazione minima di resistenza al fuoco.

Livello II:

1. Deve essere interposta una distanza di separazione su spazio a cielo libero verso le altre opere da costruzione e verso il confine dell'area su cui sorge l'attività come previsto per il livello 1.
2. La classe minima di resistenza al fuoco deve essere pari almeno a 30 o inferiore, qualora consentita dal livello di prestazione III per il carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ del compartimento in esame.

Livello III:

1. La classe minima di resistenza al fuoco è ricavata per compartimento in relazione al carico di incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ come indicato in tabella seguente:

Carico di incendio specifico di progetto	Classe minima di resistenza al fuoco
$q_{f,d} \leq 200$ MJ/m^2	Nessun requisito
$q_{f,d} \leq 300$ MJ/m^2	15
$q_{f,d} \leq 450$ MJ/m^2	30
$q_{f,d} \leq 600$ MJ/m^2	45
$q_{f,d} \leq 900$ MJ/m^2	60
$q_{f,d} \leq 1200$ MJ/m^2	90
$q_{f,d} \leq 1800$ MJ/m^2	120
$q_{f,d} \leq 2400$ MJ/m^2	180
$q_{f,d} > 2400$ MJ/m^2	240

Tabella 2-5 - Classe minima di resistenza al fuoco

Livello IV:

1. Ai fini della verifica della capacità portante in condizioni di incendio si applicano le soluzioni conformi valide per il livello di prestazione III. Non possono essere impiegate le indicazioni dei paragrafi S.2.8.2 e S.2.8.3.
2. Ai fini del controllo del danneggiamento di tutti gli elementi di compartimentazione sia orizzontali che verticali ad esclusione delle chiusure dei varchi (es. porte, serrande, barriere passive...), appartenenti sia al compartimento di primo innesco che agli altri, vanno verificati i seguenti limiti di deformabilità nelle condizioni di carico termico e meccanico previste per le soluzioni conformi del livello III:
   - $\delta_{v,max}/L = 1/100$, rapporto tra *massima inflessione* $\delta_{v,max}$ e la *luce* L degli elementi caricati verticalmente come travi e solai ortotropi;
   - $\delta_{v,max}/L = 1/100$, rapporto tra *massima inflessione* $\delta_{v,max}$ e la *luce minima* L degli elementi a piastra;
   - $\delta_{h,max}/h = 1/100$, rapporto tra il *massimo spostamento* di interpiano $\delta_{h,max}$ e l'*altezza di interpiano* h.
3. I giunti tra gli elementi di compartimentazione, se presenti, devono essere in grado di assecondare i movimenti previsti in condizioni di incendio. A tale fine è possibile impiegare giunti lineari testati in base alla norma EN 1366-4, caratterizzati dalla p*ercentuale di movimento* (M%) idonea.
4. Ai fini della capacità di compartimentazione, gli elementi di chiusura dei vani di comunicazione fra compartimenti devono essere a tenuta di fumo (EI S200) e le pareti devono essere dotate di resistenza meccanica (M) aggiuntiva, per una classe determinata come per il livello di prestazione III.

Livello V:

1. Ai fini della verifica della capacità portante in condizioni di incendio, della deformabilità (per il danneggiamento strutturale) e della compartimentazione si applicano le prescrizioni valide per il livello di prestazione IV, salvo quanto specificato al successivo punto 3
2. Non si forniscono soluzioni conformi per la verifica degli impianti ritenuti significativi ai fini della funzionalità dell'opera.
3. Ai fini del controllo del danneggiamento di tutti gli elementi strutturali vanno verificati i limiti di deformabilità imposti dalle NTC per le verifiche agli stati limite di esercizio. Dette verifiche vanno condotte nelle condizioni di carico termico e meccanico previste per le soluzioni conformi del livello di prestazione III.

Criteri applicativi

Ad eccezione di quelle relative al livello di prestazione I, le soluzioni conformi sono definite, tramite l'applicazione della Tabella 2-5, in funzione del carico di incendio specifico di progetto ($q_{f,d}$). Nel caso di distribuzione uniforme del carico di incendio questo valore viene determinato facendo riferimento alla superficie lorda del piano del compartimento antincendio considerato. Nel caso di distribuzione non uniforme del carico di incendio è necessario considerare, nelle aree in cui si ha una più severa distribuzione del carico di incendio, l'effetto dell'incendio su-gli elementi più vicini al focolaio per riconoscere eventuali eccessivi riscaldamenti delle strutture portanti.

Nell'ambito delle soluzioni conformi questa verifica viene effettuata applicando il criterio previsto in [4], par. S.2.5, ricordando in particolare che:

- il progettista determina il carico di incendio specifico di progetto con riferimento all'effettiva area di pertinenza dello stesso per ogni concentrazione specifica prevista di carico di incendio;
- La soluzione progettuale conforme viene individuata determinando la capacità portante in caso di incendio (R) degli elementi strutturali interessati mediante l'uso della Tabella 2.5.

In caso di compartimenti con elementi di compartimentazione comuni, la classe di tali elementi deve essere coerente con quella del compartimento di origine dell'incendio. In generale, la classe di resistenza al fuoco di elementi orizzontali di separazione deve essere coerente con quella del compartimento sottostante. E' da tenere presente che in fase di progetto la distribuzione del carico di incendio è documentata negli elaborati grafici che sono allegati all'Istanza di valutazione dei progetti (DM 7-8-2012, Allegato I), dove è rappresentata la destinazione

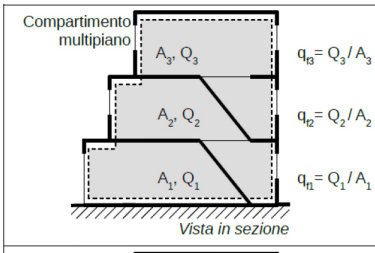
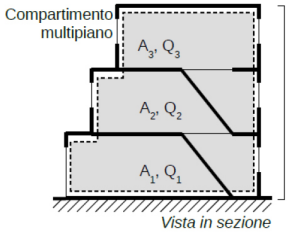
	Nel caso di compartimento *multipiano* ricadente nella fattispecie di cui al comma 6 del paragrafo S.2.5, si calcolano carichi di incendio specifici distinti per piano, pur essendo unico il compartimento.
	Nel caso di compartimento *multipiano* non ricadente nella fattispecie di cui al comma 6 del paragrafo S.2.5, la *superficie lorda del piano del compartimento* A per il calcolo del q_f è pari all'area della proiezione in pianta del compartimento. In questo esempio: $A = A_1$

Tabella 2-6 - sempi di calcolo del carico di incendio specifico qf per compartimenti multipiano (da [4])

d'uso dei locali dell'attività. Questo dato di progetto è poi verificato in occasione dei controlli previsti prima del rilascio del certificato di prevenzione incendi (D.P.R. 1-8-2011, n. 151).

Il DM 18/10/2019 [4] riporta alcuni esempi di calcolo di carichi di incendio specifici in compartimenti multipiano, illustrati nella tabella S.2-9. In Appendice A.2 è riportato un esempio di determinazione della soluzione conforme della classe di resistenza al fuoco di un compartimento adibito ad una specifica attività di autorimessa.

2.2.3.2.3 Le soluzioni alternative

Criteri generali

Le soluzioni alternative si progettano verificando le prestazioni di resistenza al fuoco per ognuno degli scenari di incendio di progetto selezionati, che fanno riferimento ad incendi di progetto rappresentati da curve naturali di incendio.

Questa verifica deve essere fatta tenendo conto dei seguenti criteri generali:

1. Per ogni scenario di incendio di progetto, l'andamento delle temperature negli elementi è valutato in riferimento ad una o più curve naturali d'incendio, tenendo conto dell'eventuale concentrazione del carico di incendio e della durata dello scenario di incendio, che è opportunamente determinata in funzione degli obiettivi di sicurezza antincendio, secondo quanto specificato nel capitolo 3.
2. Il processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto deve essere conforme a quanto indicato nel capitolo M.2 di [4] (vedi capitolo 3). Questo processo deve essere guidato dagli obiettivi di sicurezza fissati per le verifiche di resistenza al fuoco. Pertanto gli scenari di incendio di progetto selezionati per la determinazione della capacità portante sono in generale differenti, ad esempio, rispetto a quelli definiti per la salvaguardia degli occupanti.
3. Le curve naturali di incendio possono essere determinate mediante:
   a. modelli di incendio sperimentali;
   b. modelli di incendio numerici semplificati dell'Eurocodice UNI EN 1991-1-2 (curve parametriche, incendi localizzati, ove applicabili, modelli di incendio per elementi esterni al compartimento), tenendo presente quanto previsto dalla relativa Appendice nazionale [28];
   c. modelli di incendio numerici avanzati dell'Eurocodice UNI EN 1991-1-2 (modelli a zona, modelli di fluidodinamica computazionale, o CFD), tenendo presente quanto previsto dalla relativa Appendice nazionale [28].
4. Le curve di incendio naturale devono essere determinate per lo specifico compartimento antincendio. Se esse sono calcolate mediante la stima della curva RHR, secondo quanto indicato nel paragrafo M.2.6 di [4], per la loro determinazione si fa riferimento al valore del carico di incendio specifico (q_f). Negli altri casi esse sono determinate facendo riferimento al valore del carico di incendio specifico di progetto (q_{fd}), ponendo pari ad 1 i coefficienti δ_{ni} relativi alle misure antincendio che si intende modellare. La definizione delle curve di incendio naturale di progetto deve essere eseguita tenendo presente i criteri previsti nel capitolo M2 di [4].

Come per le soluzioni conformi, i valori del carico di incendio, le caratteristiche del compartimento e delle misure antincendio presenti, costituiscono un vincolo di esercizio per le atti -vità da svolgere all'interno della costruzione.

Soluzioni progettuali

Le norme tecniche di prevenzione incendi [4] definiscono i requisiti minimi delle soluzioni alternative per ognuno dei livelli di prestazione.

Livello I:

1. Compartimentazione rispetto ad altre costruzioni. Ai fini della verifica sono ritenute idonee le soluzioni conformi o alternative indicate per il livello di prestazione II della misura antincendio compartimentazione (S.3 di [4]).
2. Assenza di danneggiamento ad altre costruzioni o all'esterno del confine dell'area su cui sorge l'attività per effetto di collasso strutturale. Ai fini della verifica devono essere adottate soluzioni atte a dimostrare che il meccanismo di collasso strutturale in condizioni di incendio non arrechi danni ad altre costruzioni. Dette verifiche devono essere condotte in base agli scenari di incendio di progetto ed ai relativi incendi di progetto rappresentati da curve naturali di incendio secondo il paragrafo 2.6 di [4].

Livello II:

1. Compartimentazione rispetto ad altre costruzioni. Ai fini della verifica si utilizzano le soluzioni alternative previste per il livello di prestazione I di resistenza al fuoco.
2. Assenza di danneggiamento ad altre costruzioni o all'esterno del confine dell'area su cui sorge l'attività per effetto di collasso strutturale. Ai fini della verifica si utilizzano le soluzioni alternative previste per il livello di prestazione I di resistenza al fuoco.
3. Mantenimento della capacità portante in condizioni di incendio per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione. La capacità portante deve essere comunque tale da garantire un margine di sicurezza t_{marg} non inferiore a 100% · RSET (RSET è il tempo richiesto per l'esodo) e comunque non inferiore a 15 minuti. Pertanto, ricordando che t_{marg}=ASET-RSET, il tempo di collasso è il max{RSET+t_{marg}, 15 min} = max{2RSET, 15 min}.

Livello III:

1. Devono essere verificate le prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni in base agli scenari di incendio di progetto ed ai relativi incendi di progetto rappresentati da curve naturali di incendio.

Livelli IV-V:

1. Oltre che le verifiche previste per il livello III di prestazione, devono essere verificati i parametri di danneggiamento e di funzionalità previsti dal progettista e dalla committenza.Le soluzioni dovranno essere comunque ricercate nel rispetto delle NTC. Per il controllo del danneggiamento degli elementi strutturali per il livello di prestazione IV potranno essere adottati gli stessi limiti di deformabilità validi per le soluzioni conformi, mentre per il livello di prestazione V si potrà fare riferimento ai limiti di deformabilità imposti dalle NTC per le verifiche agli stati limite di esercizio.

Criteri applicativi

La soluzione progettuale alternativa viene individuata facendo riferimento all'azione termica rappresentata dalle curve temperatura/tempo determinate per lo scenario o gli scenari di incendio individuati come rappresentativi dell'evento che può verificarsi. Essa viene definita seguendo un iter progettuale che prevede l'esecuzione di analisi strutturali in condizioni di incendio ben più dettagliate rispetto a quelle semplificate che possono essere eseguite nell'ambito delle soluzioni conformi. A questi criteri progettuali sono dedicati i prossimi capitoli, in particolare il capitolo 5, riferendosi in particolare al caso delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo.

Come già ricordato nel caso delle soluzioni conformi, specifica attenzione deve essere prestata ai casi di distribuzione non uniforme del carico di incendio, in modo tale da tenere conto di eventuali eccessivi riscaldamenti delle strutture poste in prossimità di incendi localizzati. Operando nell'ambito delle soluzioni alternative si hanno a disposizione specifici metodi di calcolo per l'analisi degli effetti sulle strutture degli incendi di tipo localizzato. Tali metodi sono descritti nel Capitolo 4.

2.2.4 Casi particolari

2.2.4.1 Elementi strutturali secondari

1. Ai fini della verifica dei requisiti di resistenza al fuoco degli elementi strutturali secondari, il progettista deve verificare che il cedimento di tali elementi per effetto dell'incendio non comprometta:
   a. la capacità portante degli altri elementi strutturali della costruzione in condizioni di incendio;
   b. l'efficacia di elementi costruttivi di compartimentazione;
   c. il funzionamento dei sistemi di protezione attiva;
   d. l'esodo in sicurezza degli occupanti;
   e. la sicurezza dei soccorritori.

Pertanto è opportuno evidenziare che un elemento strutturale considerato secondario nelle fasi di calcolo a freddo può facilmente non essere tale nelle fasi di calcolo in condizioni d'incendio, dal momento che l'aggettivo "secondario" è riferito alla mancata compromissione di una delle condizioni di cui ai ptt. a, b, c, d ed e, piuttosto che alla minore importanza della sua funzione strutturale.

2. Ai fini della verifica dei requisiti di cui ai punti 1.d e 1.e è sufficiente verificare che la capacità portante degli elementi strutturali secondari sia garantita per un tempo tale che tutti gli occupanti dell'attività raggiungano o permangano in un luogo sicuro. Tale verifica è garantita adottando le soluzioni previste per il livello di prestazione II.

2.2.4.2 Strutture di controvento

Anche se la combinazione dei carichi in caso di incendio prevista dalla normativa nazionale [22] spesso non determina sollecitazioni nelle strutture di controventamento, in generale la prestazione di queste in caso di incendio è necessaria per garantire la stabilità della struttura in cui esse sono inserite. Ad esempio la loro prestazione è necessaria per la verifica degli schemi statici assunti per gli elementi strutturali a cui esse sono collegate. Per questo motivo la verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco di questi elementi è in generale necessaria.

2.2.4.3 Strutture vulnerabili in condizioni di incendio

1. Ai fini della verifica dei requisiti di resistenza al fuoco, per strutture vulnerabili in condizioni di incendio si intendono quelle strutture, solitamente di tipo leggero che per loro natura risultano particolarmente sensibili all'azione del fuoco. La vulnerabilità di tali strutture può essere legata alla loro ridotta iperstaticità o robustezza, alla snellezza degli elementi strutturali, alla impossibilità o all'anti economicità di appli cazione di sistemi protettivi o al pieno affidamento della resistenza a regimi membranali sensibili ai forti incrementi di temperatura. Tipici esempi di sistemi costruttivi vulnerabili nei confronti dell'incendio sono: tensostrutture, strutture pressostatiche, strutture strallate, membrane a doppia o semplice curvatura, coperture geodetiche, strutture in lega di alluminio, allestimenti temporanei in tubo e giunto, tunnel mobili, ...
2. Attesa la ridotta resistenza al fuoco delle strutture di cui al comma 1, esse si ritengono preferibilmente idonee solo per costruzioni per le quali sono richiesti i livelli di prestazione I o II.
3. Non si esclude a priori la possibilità di impiego delle strutture di cui al comma 1 per livelli di prestazione superiori al II.
4. In caso di produzioni strutturali in serie, sono ammesse valutazioni di resistenza al fuoco valide per costruzioni tipologiche o per prototipi. Il professionista antincendio provvede a certificare i requisiti di resistenza al fuoco delle strutture in opera verificando, in particolare, il rispetto delle ipotesi alla base delle verifiche di resistenza al fuoco condotte sui prototipi.

Si evidenzia che, in base alla tabella S.2-3 del DM 3/8/2015 e s.m.i. [2], non sono richiesti requisiti minimi di resistenza al fuoco alle strutture in caso di carico di incendio specifico di progetto inferiore a 200 MJ/m^2. Ciò può essere utile da rammentare da parte del progettista, ad esempio, nel caso di impiego di tensostrutture. In caso di impiego di strutture portanti vulnerabili in condizioni di incendio, come ad esempio le tensostrutture, la progettazione deve essere condotta con particolare attenzione non solo al controllo del carico di incendio specifico di progetto ma, più in generale, all'analisi dell'incendio di progetto, prestando particolare attenzione all'effetto di incendi di tipo localizzato.

2.3 Attività e prestazioni di resistenza al fuoco

Un' insieme di attività a rischio specifico di incendio, in tutto 80, elencate nel d.P.R. n. 151 del 01/08/2011 [1], sono soggette ai controlli di prevenzione incendi da parte del competente Comando dei Vigili del fuoco. Tra queste attività è utile distinguere due categorie: una prima categoria per le quali le soluzioni conformi devono essere progettate assicurando un livello minimo di resistenza al fuoco stabilito in una regola tecnica verticale (RTV, di tipo tradizionale o "post codice"), una seconda categoria per le quali le soluzioni conformi possono essere progettate senza il riferimento ad una specifica RTV.

Per quanto riguarda la prima categoria di attività, la regola tecnica [2] (cosiddetta orizzontale, RTO) modificata dal DM 18/10/2019 (aggiornamento di tutti i capitoli della RTO), dal DM 24/11/2021 [6] (errata corrige e integrazione per locali molto affollati) e dal DM 14/10/2022 [7] (aggiornamento di tre tabelle della misura antincendio S.1 – Reazione al fuoco), è completata con la pubblicazione di specifici decreti ministeriali (le RTV

"post codice"), in cui, come detto, sono individuati i livelli minimi di resistenza al fuoco della struttura portante quasi esclusivamente in sola soluzione conforme (unica eccezione la RTV per le autorimesse, nelle quali si propongono degli scenari d'incendio di progetto per autorimesse ben ventilate ai fini della valutazione avanzata della resistenza al fuoco).
Di seguito è riportato l'elenco delle RTV pubblicate successivamente alle norme tecniche di prevenzione incendi [2]:
- RTV V.4, DM Interno 08/06/2016 (uffici), [8];
- RTV V.5, DM Interno 09/08/2016 (alberghi), [9];
- RTV V.6, DM Interno 15/05/2020 (autorimesse), [10];
- RTV V.7, DM Interno 07/08/2017 (scuole), [11];
- RTV V.8, DM Interno 23/11/2018 (centri commerciali), [12];
- RTV V.9, DM Interno 06/04/2020 (asili nido), [13];
- RTV V.10, DM Interno 10/07/2020 (edifici tutelati sede di musei, gallerie, esposizioni, mostre, biblioteche e archivi), [14];
- RTV V.11, DM Interno 29/03/2021 (strutture sanitarie), [15];
- RTV V.12, DM Interno 14/10/2021 (edifici tutelati, altre attività), [16];
- RTV V.13, DM Interno 30/03/2022 (Chiusure d'ambito degli edifici civili);
- RTV V.14, DM Interno 19/05/2022 (Edifici di civile abitazione);
- RTV V.15, DM Interno 22/11/2022 (Attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico);

Negli edifici in cui si svolgono tali attività la progettazione strutturale in caso di incendio può essere condotta seguendo 2 percorsi distinti: secondo un approccio prescrittivo, nel quale la soluzione conforme definita secondo i criteri previsti dalla RTO [2] deve verificare anche il requisito minimo di resistenza al fuoco previsto dalla specifica RTV, oppure secondo un approccio prestazionale, nel quale il progettista individua la soluzione alternativa secondo i criteri definiti nella RTO [2] e secondo quanto eventualmente specificato nella corrispondente RTV.

Nel caso in cui l'attività sia regolata da una specifica RTV pubblicata antecedentemente alla RTO [2], di tipo tradizionale, il livello minimo di resistenza al fuoco delle strutture portanti dell'approccio prescrittivo è definito nella RTV stessa, mentre l'applicazione dell'approccio ingegneristico, questa volta oggetto di deroga, è regolato dai due decreti:
- D. MIN. INT. (9-03-2007), "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco", GU n. 74 del 29 marzo 2007.
- D. MIN. INT. (09-05-2007), "Direttive per l'attuazione dell'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio", Ministero dell'Interno 9 maggio 2007.

Per quanto riguarda la seconda categoria di attività, ossia le attività non regolate da una specifica RTV, le possibilità di progettare la sicurezza strutturale in caso di incendio sono disciplinate esclusivamente dal DM 03/08/2015 e s.m.i [2], in virtù dell'entrata in vigore del DM 12/04/2019 [3]. Per quelle attività non comprese nell'elenco del d.P.R. n. 151 del 01/08/2011 [1], quindi non soggette ai controlli di prevenzione incendi, la regola tecnica di riferimento per individuare il livello di prestazione di resistenza al fuoco delle strutture portanti è rappresentata dalle Norme Tecniche per le Costruzioni [22], a meno che esse non siano comprese in una specifica RTV, tradizionale o non, come attività "sotto soglia" di assoggettabilità ai controlli dei Vigili del fuoco (ad es. la RTV attività ricettive, che definisce, qualora le stesse siano ospitate in opere da costruzione con un numero di posti letto non superiore a 25, livelli di prestazione minimi per ciascuna delle misure antincendio da S.1 a S.10). Nella Figura 2-3 è schematicamente rappresentata la normativa vigente in materia di progettazione strutturale in caso di incendio e sono indicate le possibilità di impiego dei diversi approcci progettuali. In essa, a titolo esemplificativo, sono indicate alcune attività classificate nella normativa di prevenzione incendi [1].

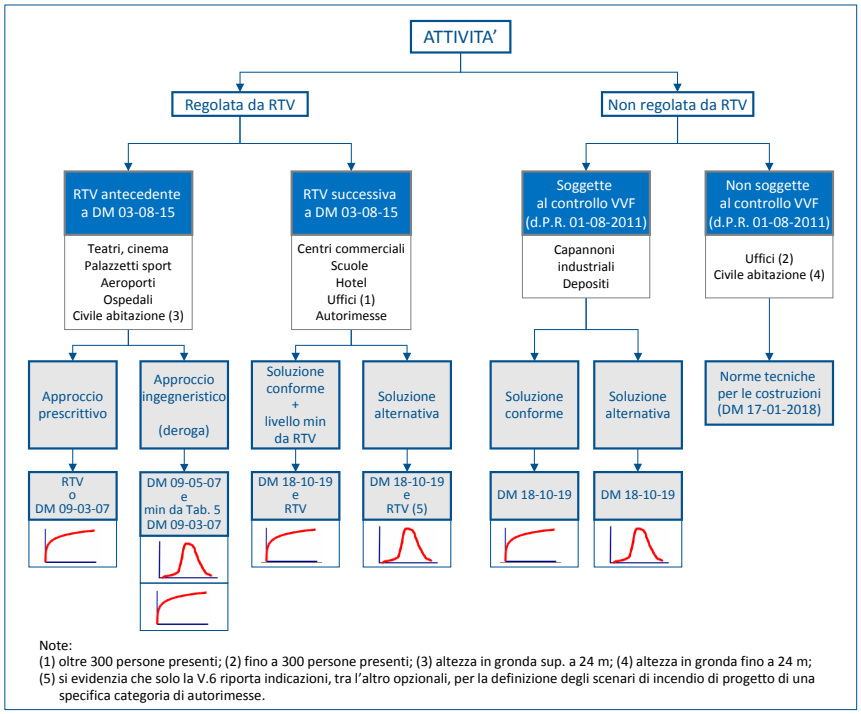


Figura 2-3 - Attività e procedure per la determinazione delle prestazioni minime di resistenza al fuoco

3. SCENARI DI INCENDIO PER LA PROGETTAZIONE DELLE SOLUZIONI ALTERNATIVE

3.1 Introduzione

Nel capitolo precedente sono state analizzate le soluzioni progettuali previste dalle norme tecniche di prevenzione incendi [4] per la verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco delle opere da costruzione.

Nel caso delle soluzioni conformi la classe minima di resistenza al fuoco è determinata in funzione del valore del carico di incendio specifico di progetto, salvo poi verificare il rispetto dei limiti inferiori previsti per alcune specifiche attività. Nel caso delle soluzioni alternative il progettista deve tenere conto dei diversi fattori che influenzano le caratteristiche di un possibile evento di incendio, individuando gli "scenari di incendio di progetto" mediante i quali è possibile determinare gli "incendi naturali di progetto".

Il presente capitolo è rivolto ai criteri previsti per la determinazione degli scenari di incendio di progetto. Sono fornite dapprima alcune indicazioni generali per l'individuazione dei parametri fisici che possono influenzare un evento di incendio, successivamente sono descritte le disposizioni normative vigenti per la selezione degli scenari di incendio di progetto.

3.2 Descrizione di uno scenario di incendio

3.2.1 Introduzione

Per eseguire l'analisi del rischio nell'ambito dell'approccio prestazionale devono essere definiti quei parametri fisici che possono influenzare un evento di incendio che può verificarsi nel compartimento analizzato e le prestazioni di resistenza al fuoco della struttura portante. Tenendo conto che la presente trattazione è rivolta al caso delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo, i parametri più importanti da definire sono:

- le dimensioni del compartimento in cui l'incendio può svilupparsi;
- il carico di incendio presente;
- la dimensione del focolaio e la sua posizione rispetto agli elementi della struttura;
- la velocità di propagazione;
- la massima produzione di calore;
- le condizioni di ventilazione presenti;
- le caratteristiche termiche delle pareti;
- le misure attive di protezione antincendio presenti.

Di seguito sono riportate alcune indicazioni generali utili per la definizione di questi parametri.

3.2.2 Elementi di frontiera del compartimento

Lo sviluppo dell'incendio è ipotizzato all'interno di un compartimento, senza propagazione ad altri compartimenti. La verifica di questa ipotesi deve essere confermata in fase progettuale mediante la verifica del comportamento degli elementi costruttivi che costituiscono la frontiera (solai, pareti, comprese le porte, ecc.) durante l'incendio.

La valutazione della capacità di costituire una barriera alla propagazione dell'incendio può essere condotta seguendo differenti opzioni:

- verifica mediante tabelle, prevista dalle norme tecniche di prevenzione incendi [4], par. S.2.12;
- verifica dei requisiti di classificazione (EI o similari) della specifica soluzione adottata, documentata sulla base della normativa europea (regolamento 311/2011 sui prodotti da costruzione) con esposizione alla curva di incendio standard ISO;
- verifica sperimentale ad hoc.

È da segnalare come la verifica della tenuta ai fumi caldi (requisito E) di un elemento di compartimentazione non sia ad oggi possibile se non con metodi di valutazione basati sulla curva standard ISO 834. Pertanto nella progettazione delle soluzioni alternative, a meno di impiegare l'opzione di metodi sperimentali ad hoc, possono essere applicate queste valutazioni avendo cura di verificare di operare a favore di sicurezza.

3.2.3 Le caratteristiche termiche delle pareti

Una parte del calore generato in un compartimento in caso di incendio viene trasmesso, per convezione e per irraggiamento, verso le pareti del compartimento.

Le perdite di calore dal compartimento attraverso le pareti sono un fattore che deve essere tenuto in conto per la determinazione delle caratteristiche dell'incendio di progetto. Per la loro valutazione devono essere note le proprietà termiche delle pareti nel campo di temperatura interessato dall'incendio.

I tre parametri mediante i quali sono caratterizzate le proprietà termiche di un materiale sono:

- il calore specifico c_p;
- la densità ρ;
- la conducibilità termica λ.

È da notare che il calore specifico e la conducibilità termica dipendono dalla temperatura. In Tabella 3-1 sono riportati, per differenti campi di temperatura, i valori delle caratteristiche termiche dei più comuni materiali, tratti da [20].

Materiale	Temperatura (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m³)	c_p (J/kg°K)
Cemento normale	20	2	2300	900
	200	1,63	2300	1022
	500	1,21	2300	1164
	1000	0,83	2300	1289
Cemento alleggerito	20	1	1500	840
	200	0,875	1500	840
	500	0,6875	1500	840
	1000	0,5	1500	840
Acciaio	20	54	7850	425
	200	47	7850	530
	500	37	7850	667
	1000	27	7850	650
Mat. protettivi a base di gesso	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
Sealing cement	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
CaSi board	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
	1050	0,157	450	1440
Legno	20	0,1	450	1113
	250	0,1	450	1125
	450	0,1	450	1135
	1050	0,1	450	1164
Muratura	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164
Vetro	20	0,78	2700	840

Tabella 3-1 - Caratteristiche termiche dei materiali [20]

3.2.4 Caratteristiche delle aperture

La severità di un incendio che si sviluppa in un ambiente chiuso dipende dalla quantità di aperture presenti, che possono influenzare le condizioni di areazione dei locali. Un incendio può essere controllato dalla ventilazione: in tal caso un aumento delle aperture provoca in genere un aumento della temperatura massima dei gas caldi. Se invece esso è controllato dal combustibile, un aumento delle aperture provoca in genere una riduzione della temperatura massima dei gas caldi.
La temperatura che porta alla rottura delle vetrate non resistenti al fuoco è generalmente variabile tra 100 e 500 °C, in base al tipo di telaio, alla qualità delle vetrate, al metodo di posa, allo spessore, alle dimensioni, al numero di strati del vetro, ecc. In assenza di dati specifici su questo argomento, un utile approccio progettuale è quello indicato da [24], riportato di seguito.

La progettazione può essere condotta facendo riferimento a due condizioni estreme, sulla base della temperatura dei gas caldi in prossimità delle vetrate all'interno dei locali:
Condizione 1
- il 90% dell'area vetrata è considerata aperta dall'inizio dell'incendio.Questo scenario copre, tra le altre cose, la rottura volontaria delle finestre causata dai soccorritori.

Condizione 2
- in caso di vetri singoli: a 100 °C il 50% della superficie vetrata è assunta aperta; a 250 °C il 90% della superficie delle vetrate è considerata aperta;
- in caso di vetri doppi: a 200 °C il 50% della superficie vetrata è assunta aperta; a 400 °C il 90% della superficie vetrata è considerata aperta;
- in caso di vetrate triple con telaio in acciaio: a 300 °C il 50% della superficie vetrata è assunta aperta; a 500 °C il 90% della superficie della vetrata è considerata aperta.

Seguendo questo approccio il progettista, dopo aver analizzato entrambe le condizioni, assume in fase di progetto la condizione più severa.

Se un elemento vetrato è assunto in fase di progetto con una specifica prestazione di resistenza al fuoco, le temperature di riferimento di questa prestazione devono essere opportunamente documentate conformemente alla normativa vigente [4], tenendo conto sia del comportamento del materiale che del telaio della chiusura.
In fase di progettazione devono essere considerate tutte le aperture vetrate presenti nel compartimento.

Quando nel compartimento è presente un sistema di evacuazione dei fumi il suo funzionamento può influenzare l'evoluzione dell'incendio.
In questi casi esso può essere opportunamente considerato nella determinazione dell'incendio di progetto. In caso contrario, deve essere opportunamente predisposta l'interruzione della ventilazione meccanica in caso di incendio.

3.2.5 Caratteristiche principali dell'incendio

Durante lo sviluppo un incendio reale presenta in genere 5 fasi:

1. Fase iniziale o fase di innesco: l'incendio si sviluppa a bassa temperatura con durata spesso difficile da stimare. È caratterizzato da una varietà di fenomeni della combustione e si può avere una fase di crescita lenta (vale a dire senza la presenza di fiamme o di un focolaio molto evidente), con fiamme molto piccole non molto visibili o con fiamme più evidenti a carattere incandescente.
2. Fase di crescita, chiamata "pre-flashover" (incendio localizzato): si tratta del periodo di propagazione dell'incendio fino al "flashover" (sviluppo di incendio generalizzato in tutto il compartimento). La durata di questa fase dipende soprattutto dalle caratteristiche del compartimento e dei materiali combustibili presenti.
3. "Flashover": se presente, è la transizione tra la fase dell'incendio localizzato e quella dell'incendio generalizzato, dovuta all'accensione spontanea dei gas combustibili, ad esempio quando la temperatura dei gas dello strato caldo raggiunge un valore sufficientemente elevato.
4. Fase di sviluppo completo o fase "post-flashover": questa fase corrisponde ad un incendio generalizzato, la cui durata dipende dal carico di incendio e dalla ventilazione. E' caratterizzata da una velocità di combustione relativamente stabile.
5. Fase decrescente: l'incendio inizia a diminuire fino a quando tutti i materiali combustibili sono completamente bruciati e non viene più liberata energia dal focolaio.

3.2.6 Il carico di incendio

Il carico di incendio rappresenta il potenziale termico netto della totalità dei materiali combustibili contenuti in uno spazio, corretto mediante alcuni parametri indicativi della partecipazione alla combustione dei singoli materiali. In sostanza esso rappresenta l'energia totale [MJ] disponibile nel compartimento in caso di incendio. La determinazione del carico di incendio può essere condotta secondo un approccio deterministico, tenendo conto dei materiali effettivamente presenti nel compartimento, secondo la procedura riportata nel paragrafo 2.2.3.2.1 e in Appendice A.2. In Tabella 3-2 sono riportati i valori raccomandati [24] del potere calorifico inferiore Hi [MJ/kg] di comuni materiali combustibili. La determinazione del carico di incendio specifico di progetto di un determinato compartimento può essere fatta utilizzando il software Claraf, versione 3.0 [29], Classificazione di resistenza al fuoco delle Costruzioni secondo le norme tecniche di prevenzioni incendi D.M. 3/8/2015 [2].
Per specifiche destinazioni d'uso la stima del carico di incendio può essere condotta secondo un approccio probabilistico, assumendo il valore corrispondente al frattile 80% della sua distribuzione statistica. I dati disponibili per l'applicazione di questo approccio, tratti da [4] e da [24], sono riportati in Tabella 3-3.

Come già segnalato, particolare attenzione deve essere prestata ai casi di distribuzione non uniforme del carico di incendio. In generale, a meno di assunzione di ipotesi a favore di sicurezza, la definizione del carico di incendio di progetto deve essere opportunamente dettagliata in modo da poter riconoscere il valore di questo dato di progetto nelle diverse aree del compartimento.

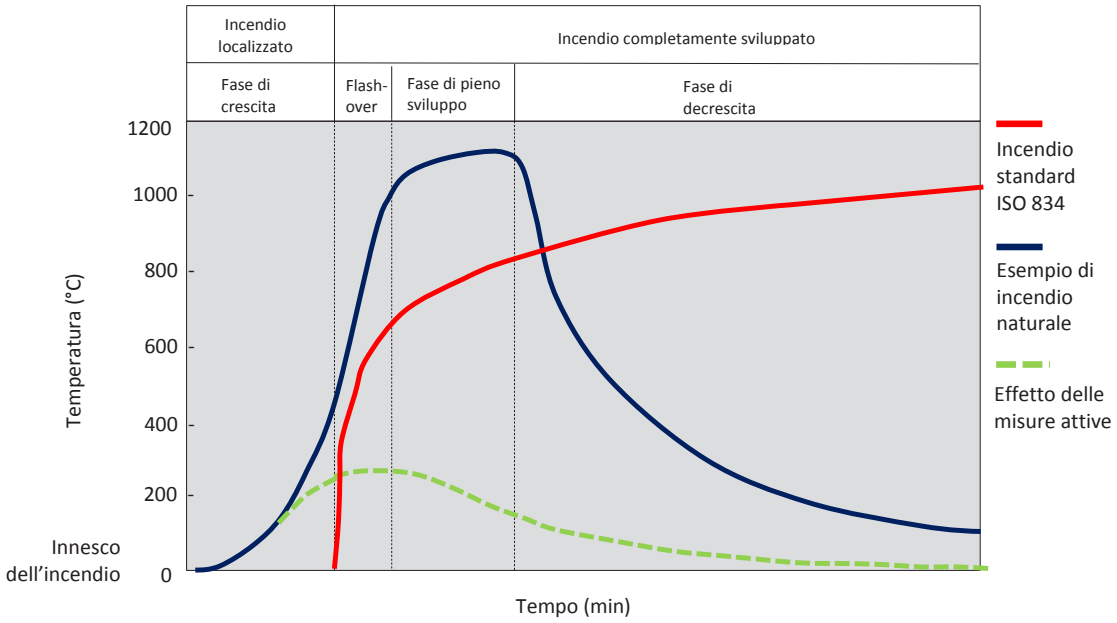


Figura 3-1 - Le diverse fasi di sviluppo di un incendio reale

Solids	
Wood	17,5
Other cellulosic materials • Clothes • Cork • Cotton • Paper, cardboard • Silk • Straw • Wool	20
• Carbon • Anthracit • Charcoal • Coal	30
Chemicals	
Paraffin series • Methane • Ethane • Propane • Butane	50
Olefin series • Ethylene • Propylen • Butene	45
Aromatic series • Benzene • Toluene	40
Alcohols • Methanol • Ethanol • Ethyl alcohol	30
Fuels • Gasoline, petroleum • Diesel	45
Pure hydrocarbons plastics •Polyethylene • Polystyrene • Polypropylene	40
Other products	
ABS (plastic)	35
Polyester (plastic)	30
Polyisocyanerat and polyurethane (plastics)	25
Polyvinylchloride, PVC (plastic)	20
Bitumen, asphalt	40
Leather	20
Linoleum	20
Rubber tyre	30
NOTE The values given in this table are not applicable for calculating energy content of fuels.	

Tabella 3.2 - Valori raccomandati del potere calorifico inferiore Hi [MJ/kg] di comuni materiali combustibili [24]

Attività	Valore medio [MJ/m²]	Frattile 80% [MJ/m²]
Civili abitazioni	780	948
Ospedali (stanza)	230	280
Alberghi (stanza)	310	377
Biblioteche	1500	1824
Uffici	420	511
Scuole	285	347
Centri commerciali	600	730
Teatri (cinema)	300	365
Trasporti (spazio pubblico)	100	122

Tabella 3-3 - Densità di carico di incendio per differenti attività [MJ/m²] [4], [24]

3.2.7 Curva RHR

Una volta che il carico di incendio è stato definito, deve essere noto con quale velocità esso brucerà. Questo dato è definito mediante la definizione della curva RHR.

La curva RHR (Rate of Heat Release, tasso di rilascio termico) rappresenta la potenza termica rilasciata al variare del tempo durante la combustione di un determinato carico di incendio. Uno stesso carico di incendio (coincidente con l'area sottesa alla curva RHR), bruciando più o meno velocemente, può determinare temperature dei gas molto differenti e, quindi, incendi di progetto molto diversi tra loro (Figura 3-2).

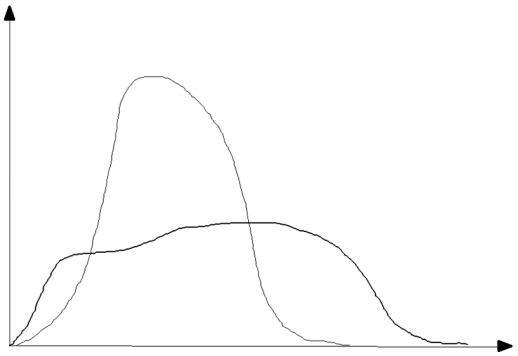


Figura 3-2 - Curve RHR corrispondenti alla stessa quantità di carico di incendio.

La curva RHR determina l'aumento della temperatura dei gas e la propagazione dei gas e dei fumi nel compartimento. Un generico incendio inizia solitamente in una piccola zona e poi si propaga durante una successiva fase di sviluppo. In assenza di mezzi di estinzione, a seconda che durante il processo di propagazione ci sia o meno sufficiente ossigeno per sostenere la combustione, il fenomeno può evolvere in due modi differenti. In un primo caso, una volta che l'incendio ha raggiunto il massimo sviluppo senza alcuna limitazione di ossigeno, la RHR è limitata dal carico di incendio disponibile (*incendio controllato dal combustibile)*. Nel secondo caso, se la misura delle aperture nel compartimento è troppo piccola per permettere l'ingresso di una quantità sufficiente di aria, l'ossigeno disponibile limita l'aumento della RHR *(incendio controllato dalla ventilazione*).

Entrambi i tipi di incendio, controllato dal combustibile o controllato dalla ventilazione, possono svilupparsi manifestando il *flashover*. Questo fenomeno segna la transizione da un incendio di tipo localizzato ad un incendio che coinvolge tutti i materiali combustibili presenti nel compartimento.

L'aumento del tasso di calore rilasciato, RHR, fino al suo valore massimo (vedi Figura 3-3), è rappresentato con la seguente relazione:

$RHR = (t / t_{\alpha})^2$ dove:

RHR tasso di calore rilasciato dall'incendio durante la fase crescente (MW);

t tempo (s);

t_{α} costante assunta in funzione della destinazione d'uso dei locali (vedi Tabella 3-6).

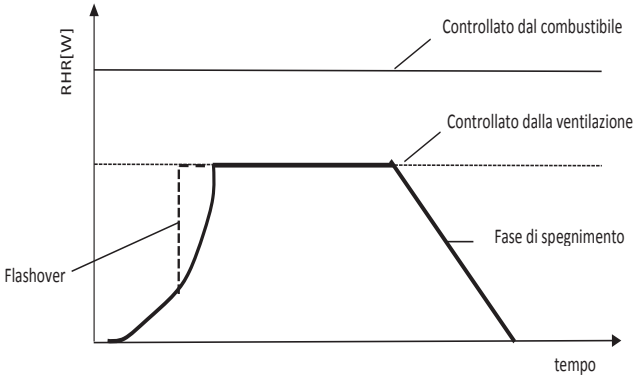


Figura 3-3 – Curva RHR, tasso di calore rilasciato in funzione del tempo.

Si riconoscono tre fasi dell'incendio: fase crescente, stazionaria (post flashover) e decrescente.

Il parametro t_{α} condiziona la fase di crescita dell'incendio, più lenta o più rapida, ed è indicato nelle normative per differenti destinazioni d'uso e materiali presenti nel compartimento (vedi Tabella 3-6, tratta da [4]).

Dopo la fase crescente, la curva RHR segue una fase costante (plateau) con un valore massimo di RHR corrispondente alla condizione di incendio controllato dal combustibile o dalla ventilazione (Figura 3-3).

La fase di decadimento viene schematizzata con una decrescenza lineare di RHR. Basandosi sui risultati di prove sperimentali, si può stimare che questa fase inizi quando circa il 70% di tutto il carico di incendio è stato bruciato.

3.2.8 Posizione del focolaio

In fase di progetto devono essere considerate le posizioni del focolaio che determinano le situazioni più critiche, in termini di massime temperature raggiunte nelle strutture portanti. In generale esse dipendono da 3 tipi di situazioni:

- fattori che influenzano lo sviluppo dell'incendio (carico di incendio,ventilazione, dimensione del compartimento, ...);
- caratteristiche della struttura (tipo, schema statico, dimensioni, carichi, …);
- posizione delle sezioni critiche degli elementi strutturali (ad esempio posizione del focolaio sotto la mezzeria di una trave semplicemente appoggiata).

Nel caso in cui l'incendio diventi generalizzato la posizione del focolaio assume minore importanza, poiché l'incendio si sviluppa in tutto il compartimento e le temperature massime tendono a diventare uniformemente distribuite; al contrario, in caso di incendio localizzato, la posizione del focolaio assume molta importanza perché le temperature massime dei gas possono essere molto diverse tra loro nelle diverse zone del compartimento.

3.3 Approccio probabilistico della sicurezza strutturale in caso di incendio

Nell'ambito degli studi svolti per la stesura della normativa tecnica armonizzata tra i Paesi della Comunità Europea, che hanno dato luogo alla versione attuale degli Eurocodici, sono stati raccolti ed analizzati dati statistici di incendi reali. Le fonti dei dati utilizzati sono [31]:

- Svizzera, 40'000 incendi che hanno causato danni maggiori di 1'000'000 CHF dal 1986 al 1995;
- Francia, incendi in edifici industriali dal 1983 al 1984 e tutti gli interventi dei vigili del fuoco del 1995 (312'910 incendi);
- Olanda, incendi in edifici industriali dal 1983 al 1985;
- Finlandia, incendi del 1995 (2'109 incendi);
- Finlandia, incendi dal 1996 al 1999;
- Lussemburgo, incendi dal 1995 al 1997;
- Database sugli effetti degli sprinkler da USA, Finlandia, Germania, Francia, Australia e UK.

La verifica di sicurezza delle strutture soggette ad incendio è sviluppata applicando il metodo semiprobabilistico agli stati limite, con riferimento a condizioni di stato limite ultimo, detto anche dei coefficienti parziali, definito nella norma:

- EN 1990 Criteri generali di progettazione strutturale - Appendice C: Criteri generali per il progetto ai coefficienti parziali e l'analisi dell'affidabilità [23].

Operativamente questo metodo si applica mediante una procedura di calcolo del carico di incendio di progetto di un'attività, che è riportata nella norma EN 1991-1-2, Appendice E.

È da segnalare che questo metodo di calcolo non è stato recepito nell'ambito della normativa nazionale vigente. Nell'Appendice nazionale [28] della norma EN 1991-1-2 il paragrafo E.1 non è stato adottato ed è stato sostituito dai criteri previsti normativa nazionale vigente.

L'approccio probabilistico previsto dagli Eurocodici è comunque qui riportato al fine di documentare i dati statistici raccolti ed i criteri applicati per la valutazione dell'affidabilità della sicurezza strutturale in caso di incendio nell'ambito di questa normativa.

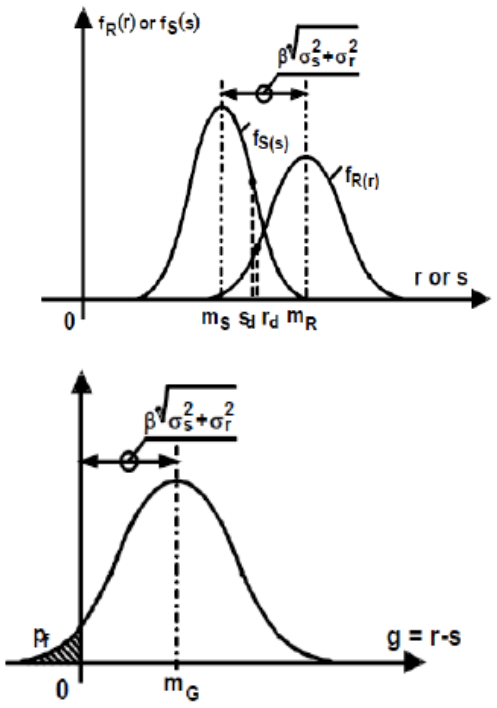


Figura 3-4 – Approccio probabilistico, basato sulla distribuzione di Gumbel, tipo I.

L'affidabilità della soluzione strutturale, basata sull'applicazione del metodo dei coefficienti parziali, è determinata mettendo a confronto la probabilità di accadimento di un evento con una probabilità limite ammissibile secondo la seguente espressione:

$$p_f \text{ (failure probability)} \leq p_t \text{ (target probability)}$$

dove:

- la probabilità limite ammissibile, per un edificio ordinario la cui vita utile è pari a 50 anni, è assunta pari a 7.23×10^{-5} (1.3×10^{-6} per anno);
- la probabilità di accadimento di un evento di crisi strutturale in caso di incendio è valutata mediante la metodologia dell'albero degli eventi.

Un esempio di albero degli eventi relativo al caso dello sviluppo di un incendio in un ufficio di area pari a 150 m^2 è riportato in Figura 3-5. In questo esempio la probabilità di accadimento dell'incendio è valutata mediante la probabilità dei singoli eventi che lo caratterizzano, in particolare:

- un incendio si inneschi;
- gli occupanti non riescano a spegnerlo;
- le misure di protezione attiva sprinkler non abbiano successo nello spegnimento;
- l'intervento delle squadre di soccorso non determina lo spegnimento.

La probabilità dell'evento è data dal prodotto delle probabilità di accadimento dei singoli eventi che lo caratterizzano, moltiplicato per il valore di progetto dell'area del compartimento A_{fi}:

$$p_{fi} = p_1\, p_2\, p_3\, p_4\, A_{fi}$$

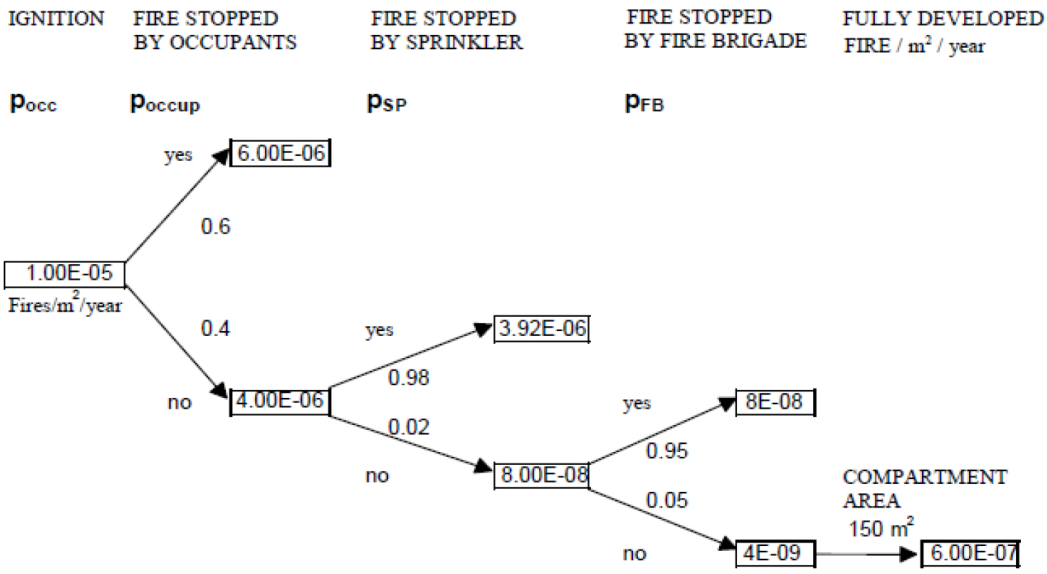


Figura 3-5 – Esempio di albero degli eventi per il caso dello sviluppo di un incendio in un ufficio di 150 m²

Applicando la procedura probabilistica sono stati determinati i coefficienti parziali δ_{q1}, δ_{q2}, δ_{ni} necessari per definire il carico di incendio specifico di progetto, a partire dal carico di incendio di riferimento (frattile 80%), previsti dalla norma EN 1991-1-2, Appendice E, che sono riportati in Tabella 3-3.

Maggiori dettagli sull'applicazione del metodo dei coefficienti parziali e sulla conseguente analisi dell'affidabilità della sicurezza strutturale in caso di incendio possono essere trovati in [19], [20].

Area in pianta del compartimento A_f [m²]	Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q1}
25	1,10
250	1,50
2 500	1,90
5 000	2,00
10 000	2,13

Pericolo di attivazione dell'incendio δ_{q2}	Esempi di utilizzi
0,78	Gallerie d'arte, musei, piscine
1,00	Uffici, residenze, alberghi, industria cartaria
1,22	Stabilimenti di macchinari e motori
1,44	Laboratori chimici, officine di verniciatura
1,66	Stabilimenti di fuochi di artificio o vernici

δ_{ni} 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		0,87	0,61 oppure 0,78		0,9 oppure 1 oppure 1,5	1,0 oppure 1,5	1,0 oppure 1,5

Tabella 3-3 – Fattori δ utilizzati per la determinazione del carico di incendio di progetto secondo EN 1991-1-2 [24][2]

3. Queste tabelle **non** sono applicabili in ambito nazionale in quanto non recepite dall'Appendice Nazionale [28].

3.4 Gli scenari di incendio di progetto

3.4.1 Premessa

Nell'ambito della progettazione di una soluzione alternativa gli scenari di incendio rappresentano la descrizione dettagliata di eventi che possono ragionevolmente verificarsi.

Al fine di consentire la valutazione del progetto da parte delle competenti strutture dei Vigili del fuoco, le norme tecniche di prevenzione incendi [4] indicano la procedura da seguire per definire gli scenari di incendio di progetto in caso di applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio.

Questa procedura comprende *l'identificazione, la selezione e la quantificazione* degli scenari di incendio di progetto e, mediante lo studio di questi, la verifica del raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio fissati.

3.4.2 Identificazione dei possibili scenari di incendio

L'identificazione dei possibili scenari di incendio può essere condotta sviluppando uno specifico albero degli eventi a partire da ogni evento iniziatore pertinente e credibile. Il processo può essere svolto in maniera qualitativa oppure in maniera quantitativa se vengono impiegati dati statistici desunti da fonti autorevoli e condivise.

L'albero degli eventi rappresenta uno schema di sequenza di eventi, che intercorrono dall'evento iniziatore, come può essere l'innesco di un focolaio, alle fasi successive che dipendono dai vari fattori considerati, quali l'intervento dei sistemi di sicurezza antincendio ed il comportamento degli occupanti.

In pratica sono individuati diversi percorsi che corrispondono ciascuno ad uno scenario; ripetendo il processo per tutti i possibili fattori considerati, mediante l'albero degli eventi è possibile rappresentare tutti i possibili scenari di incendio.

Un esempio di costruzione dell'albero degli eventi è rappresentato in Figura 3-6, tratta da [27]. Si tratta della progettazione di un'attività con destinazione d'uso uffici in un edificio alto, eseguita per la verifica della capacità portante delle strutture. L'attività è servita da un sistema di rivelazione ed allarme e da un impianto di spegnimento automatico tipo sprinkler.

L'albero degli eventi, sviluppato considerando la combinazione degli stati dei soli eventi principali, ha condotto alla definizione di 7 scenari di incendio.

Ogni scenario di incendio identificato deve essere descritto in relazione ai suoi tre aspetti fondamentali: le caratteristiche dell'incendio, le caratteristiche dell'attività e le caratteristiche degli occupanti. In generale la descrizione di uno scenario di incendio deve comprendere:

a. evento iniziatore caratterizzato da un focolaio d'incendio e dalle condizioni dell'ambiente circostante;
b. propagazione dell'incendio e dei prodotti della combustione;
c. azione degli impianti tecnologici e di protezione attiva contro l'incendio;
d. azioni eseguite dai componenti della squadra aziendale dedicata alla lotta antincendio presenti nell'ambiente;
e. distribuzione e comportamento degli occupanti.

Per l'identificazione degli scenari d'incendio il D.M. 03/08/2015 [2] indica come riferimenti bibliografici i seguenti documenti:

- ISO 16732-1, "Fire safety engineering - Fire risk assessment – Part 1: General";
- NFPA 551, "Guide for the evaluation of fire risk assessment".

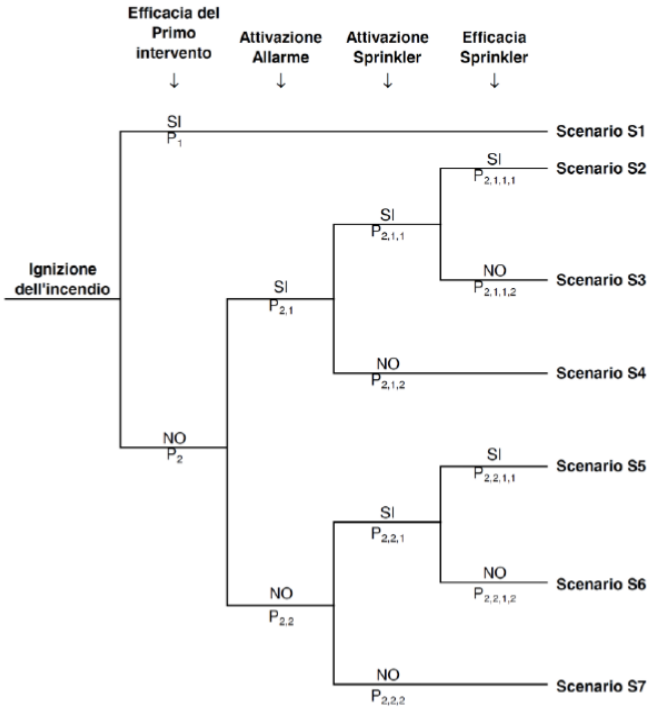


Figura 3-6 – Esempio di albero degli eventi per un' attività adibita ad uffici [27].

3.4.3 Selezione degli scenari di incendio di progetto

Tra i possibili scenari di incendio, in generale molti, teoricamente infiniti, il progettista antincendio seleziona i *più gravosi* tra gli scenari di incendio *credibili* [2], ottenendo così gli scenari di incendio di progetto.

La selezione degli scenari di incendio di progetto è effettuata facendo riferimento all'albero degli eventi già sviluppato. La selezione effettuata deve essere tale che gli scenari di incendio di progetto rappresentino per l'attività un livello di rischio di incendio non inferiore a quello compiutamente descritto dall'insieme di tutti gli scenari di incendio.

In tal modo le soluzioni progettuali, che sono dimensionate in modo tale da verificare le soglie di prestazione richieste nell'ambito degli scenari di incendio di progetto, garantiscono i prefissati gradi di sicurezza anche nei confronti di tutti gli altri scenari di incendio. La valutazione del *rischio R* connesso a ciascuno scenario di incendio è data dal prodotto della *probabilità P* di accadimento dello scenario per le *conseguenze C* che lo stesso scenario può provocare:

$$R = P \cdot C$$

In tal modo nell'albero degli eventi già sviluppato ogni scenario di incendio viene caratterizzato in termini della sua probabilità di accadimento, delle conseguenze che lo stesso scenario può provocare e quindi da un parametro di rischio che indirizza il progettista nella selezione degli scenari di incendi di progetto. In pratica, combinando probabilità e conseguenze di ogni scenario, si può definire una classificazione del rischio (Risk-ranking), cioè si classificano gli scenari in base al loro rischio.

Per la selezione degli scenari d'incendio di progetto il D.M. 03/08/2015 [2] indica come riferimento bibliografico i seguenti documenti:

- ISO/TS 16733-1, "Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires – Part 1: Selection of design fire scenarios";
- NFPA 101, "Life Safety Code".

Nell'esempio precedentemente citato è stata eseguita la selezione degli scenari di incendio di progetto applicando la norma ISO/TS 16733-1. Nella Figura 3-7 è riportato l'albero degli eventi determinato per l'analisi della sicurezza strutturale, comprendente la classificazione del rischio di ogni scenario di incendio, effettuata sulla base delle probabilità di accadimento e della quantificazione delle conseguenze.

Si noti come lo scenario di incendio corrispondente al non funzionamento dell'impianto di spegnimento automatico (scenario SS7a), pur essendo caratterizzato da una probabilità di accadimento molto bassa, sia caratterizzato da un alto valore di quantificazione delle conseguenze e quindi del rischio. Pertanto questo scenario è stato incluso negli scenari di incendio di progetto ed è stato oggetto di verifica rispetto alle soglie di prestazione richieste per la progettazione della capacità portante del sistema strutturale dell'attività.

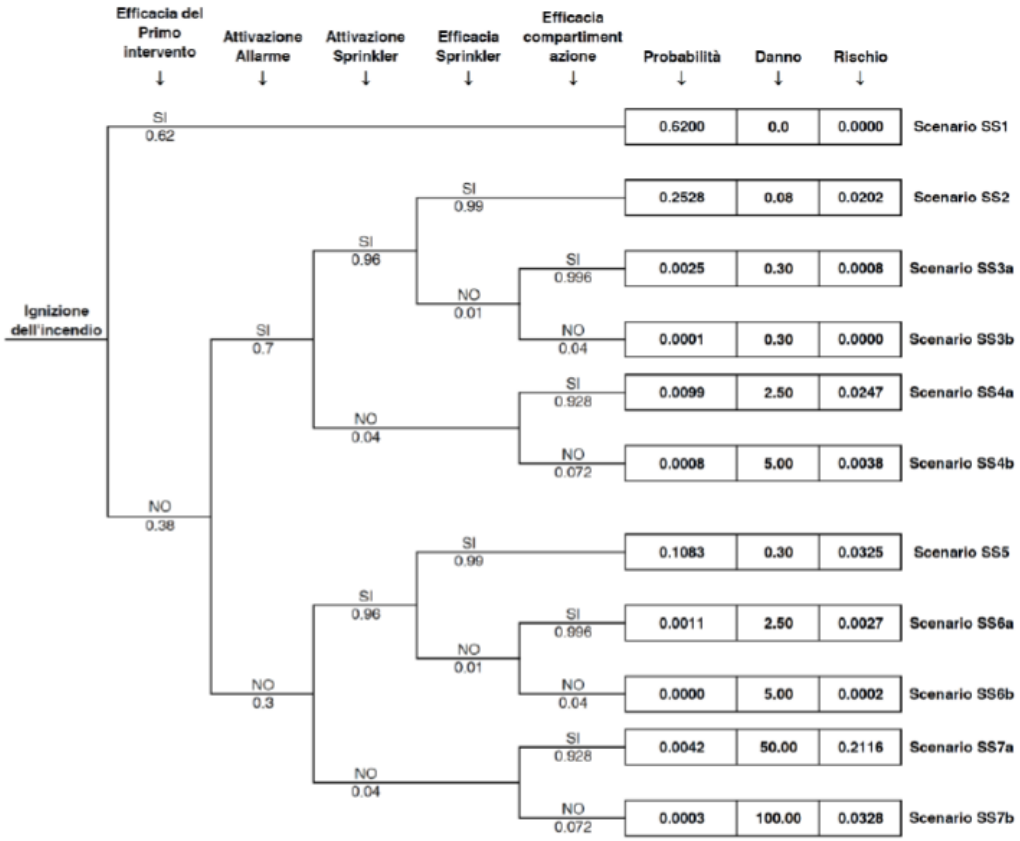


Figura 3-7 – Edificio ad uso uffici: albero degli eventi per la sicurezza strutturale [27]

3.4.4 Descrizione quantitativa degli scenari di incendio di progetto

La terza fase della procedura prevista per la definizione degli scenari di incendio è la descrizione quantitativa degli scenari di incendio di progetto. In relazione alla finalità dell'analisi, i dati di input relativi ad attività, occupanti ed incendio devono essere specificati in maniera dettagliata. Le norme di prevenzione incendi [4] forniscono nel paragrafo M.2.4 un elenco dettagliato dei dati da inserire in questa descrizione. In una specifica progettazione alcuni aspetti della descrizione possono assumere maggiore o minore importanza a seconda dell'obiettivo della sicurezza antincendio assunto. Ad esempio, nell'ambito della progettazione della capacità portante degli elementi strutturali (vedi Tabella 3-5), se l'obiettivo di sicurezza antincendio è la salvaguarda della vita, risulta di particolare importanza la descrizione del comportamento degli occupanti, se è il mantenimento della capacità portante in caso di incendio, questa descrizione assume una minore importanza.

3.4.5 Durata degli scenari di incendio di progetto

La durata dello scenario di incendio di progetto dipende dagli obiettivi di sicurezza da raggiungere, secondo quanto riportato nella Tabella M.2-1 di [4], che di seguito è riportata.

3.4.6 Stima della curva RHR

La metodologia per costruire le curve naturali d'incendio è riportata in [4], paragrafo M.2.6. Nei prossimi paragrafi sono descritte le varie fasi di un incendio naturale facendo riferimento alla Figura 3-8.

3.4.6.1 Fase della propagazione

L'incendio inizia normalmente come localizzato. Nella fase della propagazione la superficie dell'incendio aumenta secondo un'equazione parabolica (equazione M.2-1 di [4]) in base a un parametro t_α (150, 300 o 600 secondi), che rappresenta il tempo dopo il quale si ha una potenza termica di 1 MW.

$$RHR(t) = 1000 \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \quad \text{per } t < t_A$$

dove:

RHR(t) potenza termica rilasciata dall'incendio [kW]
t tempo [s]
t_α tempo necessario affinché la potenza termica rilasciata dall'incendio raggiunga il valore di 1000 kW, come definito nel capitolo G.3 [4] [s]

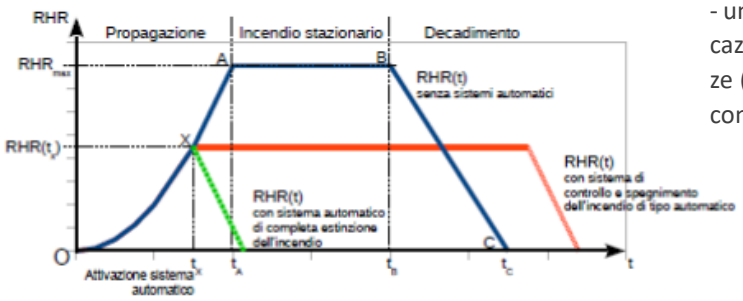


Figura 3-8 - Fasi dell'incendio da [4]

Per alcune tipologie di materiali combustibili e per alcune attività il valore di tα può essere desunto rispettivamente dalle Tabelle 3-5 e 3-6, tratte da [4]. Per le altre attività esso può essere determinato con considerazioni basate sul giudizio esperto per analogia.

3.4.6.2 Effetto dei sistemi automatici di controllo dell'incendio

L'impiego di sistemi automatici di controllo dell'incendio può influenzare la progettazione delle prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture di acciaio. Nella progettazione delle soluzioni alternative se ne tiene conto sia nella selezione degli scenari di incendio nell'ambito dell'analisi di rischio descritta nel par. 3.4.3, sia nella determinazione delle curve di rilascio termico (RHR), il cui sviluppo può essere influenzato dall'attivazione e dall'efficacia di tali sistemi. Facendo riferimento a quanto previsto da [4] (paragrafi M.1.8 e M.2.6.2), nel grafico della Figura 3-8 sono indicati due esempi di evoluzione della curva RHR relativi al caso in cui l'impianto sia a disponibilità superiore. In un caso, ci si riferisce al funzionamento di un sistema di controllo e spegnimento dell'incendio di tipo automatico, nell'altro caso al funzionamento di un sistema automatico di completa estinzione dell'incendio.

In presenza di questo tipo di impianto le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture possono essere valutate mediante i criteri previsti per le soluzioni alternative. Ciò si ottiene applicando i metodi dell'analisi di sicurezza funzionale per valutare l'affidabilità dei sistemi automatici di controllo dell'incendio nell'ambito dell'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio, in particolare con la determinazione degli scenari d'incendio di progetto e con la loro verifica. In pratica tra gli scenari di incendio devono essere considerati anche quelli in cui l'impianto o sistema automatico di controllo dell'incendio sia considerato non funzionante e devono essere eseguite le seguenti analisi:

- un'analisi di sicurezza funzionale dell'impianto o sistema automatico di controllo dell'incendio per calcolare, in termini di probabilità (P), la sua affidabilità;
- un'analisi strutturale per calcolare, in termini di conseguenze (C), i danni provocati;
- una specifica analisi di rischio (par. 3.4.3), basata sulla quantificazione delle probabilità di accadimento (P) e delle conseguenze (C), per valutare analiticamente se il rischio (R) possa essere considerato trascurabile.

Nei casi in cui queste analisi siano concluse con una valutazione di rischio (R) trascurabile, gli scenari di incendio di progetto possono comprendere solo gli eventi in cui l'incendio è controllato o estinto dall'impianto. In questi casi è quindi necessario determinare l'istante di tempo in cui c'è l'attivazione del sistema o impianto e il corrispondente valore della potenza termica limitata dagli effetti del sistema o impianto (tale assunzione deve essere supportata da dati di letteratura o da normazione e documentazione tecnica consolidata, come previsto da [4]). L'eventuale assenza tra gli scenari di incendio di progetto degli scenari corrispondenti al non funzionamento degli impianti è particolarmente significativa per la verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco della struttura portante e deve essere opportunamente giustificata dai risultati dell'analisi di rischio condotta. Una trattazione di questo tipo è eseguita in [38]. E' comunque evidente che, nel caso in cui la selezione degli scenari di incendio di progetto sia stata eseguita senza effettuare l'analisi di rischio degli scenari corrispondenti al non-funzionamento di uno specifico impianto (Fire Risk Assessment), tra gli scenari di incendio di progetto devono sempre essere inclusi gli eventi corrispondenti al non funzionamento di tali impianti, anche in presenza di impianti progettati con migliorata affidabilità, in quanto tale caratteristica non è stata utilizzata nella suddetta analisi di rischio.

Obiettivo di sicurezza antincendio	Durata minima degli scenari di incendio di progetto
Salvaguardia della vita degli occupanti	Dall'evento iniziatore fino al momento in cui tutti gli occupanti dell'attività raggiungono o permangono in un luogo sicuro. Se il luogo sicuro è prossimo o interno all'opera da costruzione, devono essere valutate eventuali interazioni tra il mantenimento della capacità portante dell'opera da costruzione ed il luogo sicuro.
Salvaguardia della vita dei soccorritori	Dall'evento iniziatore fino a 5 minuti dopo il termine delle operazioni previste per i soccorritori o l'arrivo delle squadre dei Vigili del fuoco presso l'attività. Il tempo di riferimento per l'arrivo dei Vigili del fuoco può essere assunto pari alla media dei tempi d'arrivo desunti dall'*Annuario statistico dei Vigili del fuoco* (http://www.vigilfuoco.it), considerando i dati dell'ultimo anno disponibile, riferiti all'ambito provinciale.
Mantenimento della capacità portante in caso d'incendio	Dall'evento iniziatore fino all'arresto dell'analisi strutturale, in fase di raffreddamento, al momento in cui gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti

Tabella 3-5 – Durata minima degli scenari d'incendio di progetto (Tabella M.2-1 di [4])

Soltanto nei casi in cui gli scenari d'incendio nei quali l'impianto o sistema automatico di controllo dell'incendio sia non funzionante abbiano un rischio trascurabile e quindi possono non essere considerati in fase di progettazione delle prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture portanti, l'impianto o sistema automatico di controllo dell'incendio è effettivamente a disponibilità superiore, in quanto rispondente a quanto stabilito da [4] al punto M.1.8 comma 5: "Qualora i sistemi di protezione attiva siano considerati ai fini della riduzione della potenza termica rilasciata dall'incendio RHR(t) (capitolo M.2) o comunque contribuiscano a mitigare gli effetti dell'incendio, devono essere installati sistemi a disponibilità superiore".
Queste valutazioni, di tipo impiantistico e strutturale, devono essere condotte in maniera sinergica e organica sin dall'inizio della progettazione. L'assenza o carenza di una di esse renderebbe incompleta l'analisi di rischio, con la conseguente selezione degli scenari d'incendio di progetto, e porterebbe ad una soluzione progettuale alternativa non valida.

Infine è da segnalare [4] come l'intervento manuale effettuato dalle squadre antincendio non possa essere considerato in fase progettuale ai fini della modifica dell'andamento della curva RHR(t).

3.4.6.3 Fase dell'incendio stazionario

Nei casi in cui l'energia termica potenzialmente contenuta nel compartimento antincendio sia sufficiente a produrre il flashover si ipotizza che, anche dopo il flashover, la curva cresca con andamento ancora proporzionale a t_2 fino al tempo t_A, che corrisponde alla massima potenza RHR_{max} rilasciata dall'incendio nello specifico compartimento antincendio.
Dopo il tempo t_A, nella fase di incendio stazionario, la potenza termica prodotta dall'incendio si assume stabilizzata al valore massimo RHR_{max}.
Per alcune destinazioni d'uso il valore unitario di RHR_{max} può essere desunto dai prospetti dell'appendice E dell'Eurocodice 1, UNI EN 1991 -1-2 (Tabella 3-7).
La fase di incendio stazionario termina al tempo t_B, tempo di inizio della fase di decadimento, in cui il 70% dell'energia termica inizialmente disponibile è stata rilasciata nel compartimento antincendio.

δ_q	t_α [1]	Criteri
1	600 s lenta	Ambiti di attività con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m², oppure ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo trascurabile all'incendio.
2	300 s media	Ambiti di attività ove siano presenti prevalentemente materiali o altri combustibili che contribuiscono in modo moderato all'incendio.
3	150 s rapida	Ambiti con presenza di significative quantità di materiali plastici impilati, prodotti tessili sintetici, apparecchiature elettriche e elettroniche, materiali combustibili non classificati per reazione al fuoco (capitolo S.1). Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con 3,0 m < h ≤ 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS3 oppure attività classificate HHP1, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti con impianti tecnologici o di processo che impiegano significative quantità di materiali combustibili. Ambiti con contemporanea presenza di materiali combustibili e lavorazioni pericolose ai fini dell'incendio.
4	75 s ultra-rapida	Ambiti ove avvenga impilamento verticale di significative quantità di materiali combustibili con h > 5,0 m [2]. Stoccaggi classificati HHS4 oppure attività classificate HHP2, HHP3 o HHP4, secondo la norma UNI EN 12845. Ambiti ove siano presenti o in lavorazione significative quantità di sostanze o miscele pericolose ai fini dell'incendio, oppure materiali plastici cellulari/espansi o schiume combustibili non classificati per la reazione al fuoco.
A meno di valutazioni più approfondite da parte del progettista (es. dati di letteratura, misure dirette, ...), si ritengono *non significative* ai fini della presente classificazione almeno le quantità di materiali nei compartimenti con carico di incendio specifico $q_f \leq 200$ MJ/m². [1] Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio. [2] Con h altezza d'impilamento.		

Tabella 3-6 – Velocità caratteristica prevalente di crescita dell'incendio [4]

Velocità massima di rilascio di calore RHR_f			
Destinazione d'uso	Velocità di crescita dell'incendio	t_α [s]	RHR_f [kW/m^2]
Alloggio	Media	300	250
Ospedale (stanza)	Media	300	250
Albergo (stanza)	Media	300	250
Biblioteca	Veloce	150	500
Ufficio	Media	300	250
Classe di una scuola	Media	300	250
Centro commerciale	Veloce	150	250
Teatro (cinema)	Veloce	150	500
Trasporti (spazio pubblico)	Lenta	600	250

Tabella 3-7 - Velocità di crescita dell'incendio e RHRf per differenti destinazioni d'uso [24]

3.4.6.4 Fase di decadimento

La fase di decadimento si conclude al raggiungimento del tempo $t_{C,}$ trascorso il quale la potenza termica inizialmente disponibile è completamente consumata.

3.4.7 Incendi localizzati

Nei casi in cui il carico di incendio sia sufficientemente isolato, la dimensione massima del focolaio può essere limitata all'area coperta dal combustibile e non raggiunge l'intero vano. In questi casi l'energia termica rilasciata nel compartimento antincendio può non essere sufficiente a produrre le condizioni del flashover. Se ciò avviene l'incendio rimane localizzato.

Quando l'obiettivo dell'indagine è la capacità portante delle strutture, l'analisi degli incendi localizzati assume particolare importanza in quanto le massime temperature raggiunte dagli elementi strutturali possono essere molto differenti a seconda della loro posizione rispetto al focolaio dell'incendio.

3.4.8 Focolare predefinito

Qualora si intenda omettere le valutazioni in merito alla descrizione quantitativa del focolare descritta nei punti precedenti, possono essere impiegati i focolai predefiniti descritti in [4], paragrafo M.2.7. L'impiego di questi focolai è escluso nel caso in cui si valuti che i focolai attesi risultino più gravosi.

3.4.9 Un caso particolare: gli scenari di incendio di progetto delle autorimesse aperte

Nel caso delle autorimesse dotate di adeguata ventilazione naturale, aventi le caratteristiche di cui al paragrafo V.6.7.1 della RTV autorimesse, oltre alla procedura descritta nei paragrafi precedenti, in fase di progettazione è possibile fare ricorso agli scenari di incendio di progetto indicati in [10] (RTV Autorimesse) per la verifica della capacità portante in caso di incendio.

Queste indicazioni sono riportate in Appendice B1.

4. DETERMINAZIONE DELLE CURVE DI INCENDIO NATURALE

4.1 Introduzione

Sono disponibili diversi metodi di calcolo, di tipo semplificato ed avanzato, che permettono la determinazione della curva di incendio naturale rappresentativa di uno scenario di incendio di progetto. La normativa vigente [4], [24], comprende modelli pre-flashover (modelli di incendio localizzati e modelli a 2 zone), modelli post-flashover (per incendi generalizzati) e modelli completi per l'analisi di tutte le fasi dell'incendio (modelli di campo fluidodinamico). In generale, per analizzare l'intero fenomeno può essere necessario impiegare più modelli, in quanto lo scenario d'incendio comprende le 2 fasi: la fase dell'incendio localizzato, prima del flash-over, e quella dell'incendio generalizzato, dopo il flash-over.

4.2 Fase pre-flashover

4.2.1 Incendi localizzati

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

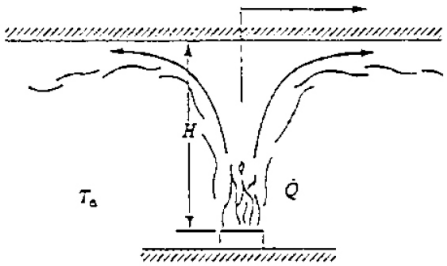


Figura 4-1 - Schema di un incendio localizzato

Questa situazione è ben rappresentata da un modello a due zone, che schematizza le condizioni di incendio pre-flashover.

Questo modello non distingue la differente azione termica sugli elementi presenti nel compartimento, visto che le temperature dei gas sono schematizzate uguali alla temperatura media di ogni zona.
L'azione termica sugli elementi strutturali vicini al focolaio può essere valutata mediante specifici modelli di calcolo. In particolare i modelli di tipo sperimentale di Heskestad o Hasemi, indicati nell'Appendice C della norma EN 1991-1-2, 2005 [24], consentono di valutare l'effetto locale su elementi soprastanti l'incendio, ad esempio le travi del soffitto ed i solai. Nella nuova versione della stessa norma [25], il cui report finale è disponibile come documento di progetto, questi metodi di calcolo sono estesi anche alla valutazione dell'azione termica su elementi verticali posti in vicinanza del focolaio.
Il procedimento fornito dall'Appendice C di EN 1991-1-2 [24] permette di calcolare la lunghezza della fiamma e la temperatura lungo il suo asse (Fig. 4.2) in caso di fiamma che non impatta il soffitto (caso A), mentre nel caso di fiamma impattante (caso B) permette di determinare il flusso termico all'altezza del soffitto, ma non la temperatura o il flusso termico ricevuto da un elemento verticale (colonna) che si trova ad una data distanza dal focolaio.

Il metodo sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca europeo LOCAFI [35] permette di superare questi limiti, che fino ad oggi venivano affrontati attribuendo cautelativamente all'intera colonna la temperatura stimata alla sua sommità (ovvero all'altezza del soffitto). Il concetto chiave consiste nel discretizzare l'incendio in una fiamma virtuale solida costituita da cilindri e corone circolari che, in base al grado di definizione adottato, può assumere una forma praticamente liscia.

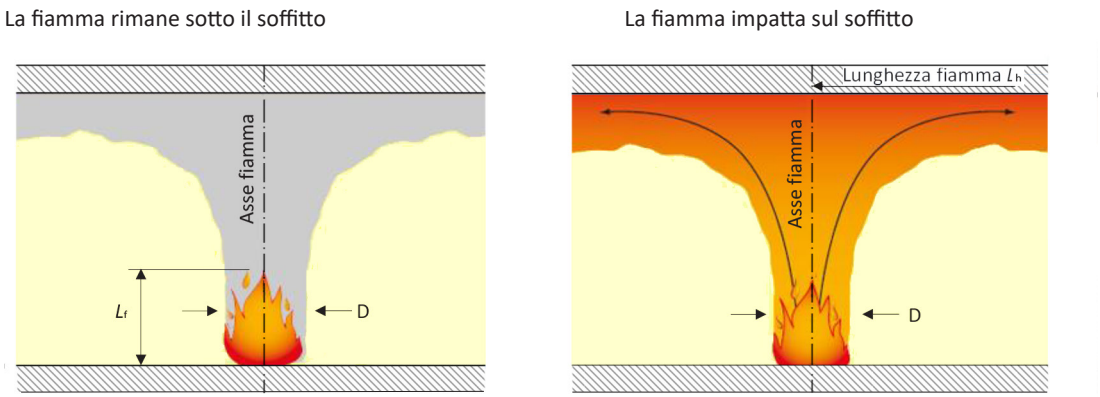


Figura 4-2 -Modelli di fiamma di un incendio localizzato

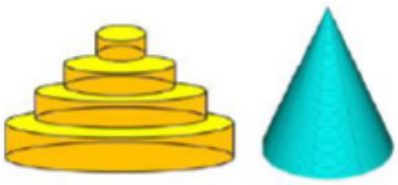


Figura 4-3 - Modellazione di un incendio localizzato secondo un diverso grado di approssimazione

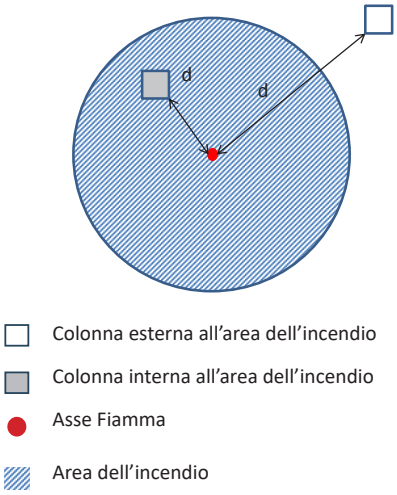


Figura 4-4 - Posizione relativa tra incendio e colonna

Il flusso termico radiante dalla fiamma virtuale solida viene così calcolato in ogni punto dello spazio mediante la teoria della trasmissione del calore per irraggiamento. Noto il flusso termico può essere determinata la temperatura della colonna in acciaio in ogni posizione del compartimento. Se la colonna è avvolta dalle fiamme, la temperatura dell'elemento è principalmente influenzata dalla trasmissione di calore per convezione, mentre se essa si trova al di fuori della fiamma, la sua temperatura è principalmente influenzata dalla trasmissione di calore per irraggiamento. Una completa trattazione del metodo di calcolo è presente nel report [35].

Sia il metodo di calcolo dell'azione termica sugli elementi che si trovano in prossimità di un focolaio, proposti in Appendice C della norma EN 1991-1-2 [24], [25], sia il metodo LOCAFI [35], sono validi nel seguente campo di applicazione:
- diametro del focolaio ≤ 10 m;
- rilascio termico Q ≤ 50 MW.

Recenti studi [41] hanno consentito di verificare come la validità del metodo sia confermata anche al di fuori dei limiti di questo campo di applicazione. Nell'Appendice Nazionale [28] questi metodi di calcolo sono indicati con carattere informativo.

4.2.2 Modelli a due zone

I modelli a zona sono modelli numerici che calcolano lo sviluppo della temperatura dei gas in funzione del tempo integrando le equazioni differenziali ordinarie esprimenti le leggi di conservazione della massa e dell'energia in ogni zona del compartimento. Essi sono basati sull'ipotesi fondamentale, non rigorosa[3], che la temperatura dei gas sia uniforme in ogni zona.
L'applicazione di un modello a zona richiede la definizione dei seguenti dati:
- dati geometrici, come le dimensioni del compartimento, delle aperture e delle partizioni;
- le proprietà termiche dei materiali costituenti le pareti, i soffitti ed i pavimenti;
- i dati dell'incendio, in generale definiti nella curva RHR di progetto.

I principali risultati della simulazione sono le temperature dei gas in ogni zona, ma possono essere individuate anche le temperature nelle pareti, i flussi attraverso le aperture e l'evoluzione, in funzione del tempo, dello spessore di ogni zona.
La Figura 4.5 mostra come un compartimento viene schematizzato mediante un modello a due zone, con la rappresentazione dei differenti termini del bilancio di massa ed energia.

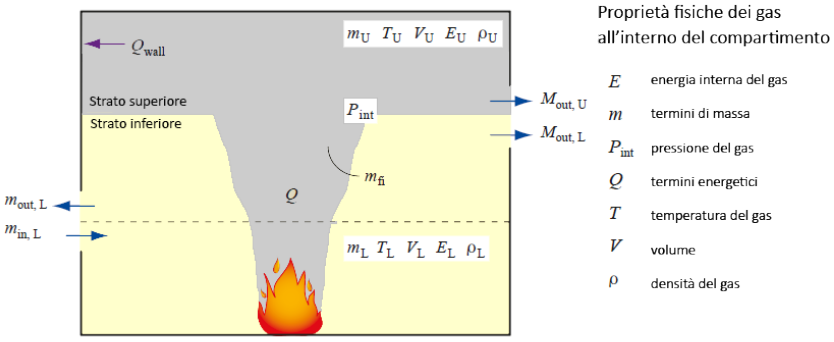


Figura 4-5 - Schema del compartimento in un modello a due zone

[3] A causa di ciò, ove necessario, questo metodo deve essere applicato in combinazione con il metodo degli incendi localizzati (vedi paragrafo 4.2.3).

4.2.3 Combinazione tra i modelli a due zone ed i modelli di incendio localizzato

In un incendio localizzato la distribuzione della temperatura dei gas all'interno del compartimento può essere stimata mediante un modello a due zone. In questo modello la temperatura dei gas è calcolata nell'ipotesi che essa si mantenga uniforme all'interno di ogni zona.
La temperatura media dei gas caldi così calcolata è generalmente sufficientemente accurata per l'analisi di fenomeni globali, quali la quantità di fumi che fuoriescono dal compartimento, la probabilità che si verifichi il flashover, ecc.

Quando è necessario valutare il comportamento di elementi strutturali posti in vicinanza dell'incendio, l'ipotesi di temperatura uniforme può non essere sicura ed il modello a due zone deve essere combinato con le formule degli incendi localizzati (paragrafo 4.2.1).

In tal caso è raccomandato di assumere, in ogni posizione dell'elemento strutturale, la massima temperatura dei gas calcolata intorno all'elemento con i due modelli, come mostrato nella Figura 4.6 per la trave soprastante il focolaio.

4.3 Incendi pienamente sviluppati

4.3.1 Generalità

Per modellare un incendio pienamente sviluppato all'interno di un edifico esistono differenti modelli. In questo capitolo vengono descritti quelli previsti nell'ambito della normativa vigente [24].

4.3.2 Incendi parametrici

Gli incendi parametrici sono modelli semplificati che tengono conto di alcuni parametri fisici che influenzano lo sviluppo di un incendio in un determinato compartimento.

Come gli incendi nominali, essi sono definiti da relazioni temperatura-tempo in cui, mediante i parametri previsti dal metodo, si tiene conto dei principali fattori che influenzano l'evoluzione dell'evento.
I parametri presi in considerazione sono:
- la geometria del compartimento,
- le aperture presenti nelle pareti e/o nella copertura
- il carico di incendio nel compartimento,
- la tipologia e la natura dei diversi elementi che formano la frontiera del compartimento.

Gli incendi parametrici sono basati sull'ipotesi che la temperatura dei gas sia uniforme nel compartimento, ipotesi che limita il loro campo di applicazione ad incendi post-flashover in compartimenti di dimensioni limitate. Rispetto agli incendi nominali, essi tuttavia costituiscono un significativo passo avanti nell'analisi delle reali caratteristiche di un generico incendio, pur essendo basati su semplici espressioni analitiche che non richiedono la specifica applicazione di programmi per computer.
La formulazione degli incendi parametrici è riportata nella norma UNI EN 1991-1-2 [24], Allegato A.
Essa è valida per compartimenti aventi superficie fino a 500 m², senza aperture nel soffitto e per un'altezza interna massima del compartimento di 4 m.

Limiti sono anche definiti per le proprietà termiche delle pareti e per le dimensioni delle aperture.
È interessante notare come la formulazione degli incendi parametrici riportata nell'Allegato A della norma UNI EN 1991-1-2, nel caso in cui per il fattore di apertura O e per la capacità di assorbimento termico per l'intero compartimento b, si assumano i seguenti valori:

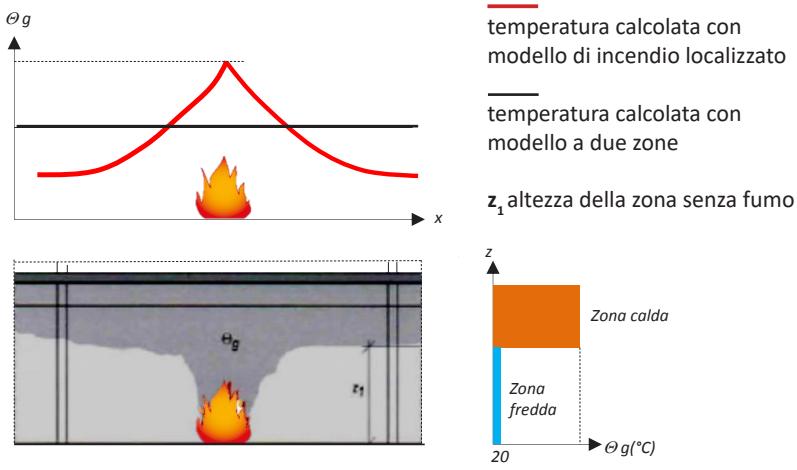


Figura 4-6 – Combinazione di un modello a 2 zone (T della zona calda uniforme) con un modello di incendio localizzato

- O = 0,04 [$m^{1/2}$],
- b = 1160 [$J/m^2s^{1/2}K$],

fornisca una curva temperatura-tempo molto simile, nel tratto crescente, alla curva temperatura-tempo ISO standard (Figura 4.7).

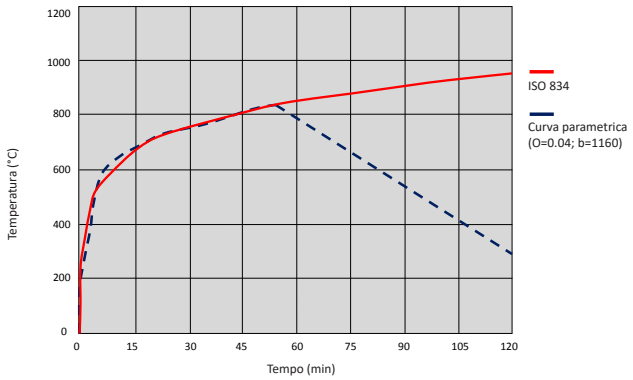


Figura 4-7 - Incendio standard ISO 834 e incendio parametrico

Nell'Appendice Nazionale [28] il metodo di calcolo degli incendi parametrici è indicato con carattere informativo.

4.3.3 Modelli a una zona

I modelli a zona sono già stati introdotti nel paragrafo 4.2.2, dove è riportata una breve descrizione di un modello a due zone. Il campo di applicazione di un modello a due zone è la fase pre-flashover dell'incendio. Per l'analisi di un incendio pienamente sviluppato devono essere utilizzati i modelli ad una zona. Un modello ad una zona è basato sull'ipotesi fondamentale che, durante l'incendio, la temperatura dei gas all'interno del compartimento sia uniforme. Pertanto la loro applicazione è valida in condizioni di incendio post-flashover. I dati che devono essere forniti sono più dettagliati di quelli necessari per gli incendi parametrici e sono gli stessi di quelli visti per i modelli a due zone. La Figura 4.8 mostra come viene schematizzato un compartimento, con la rappresentazione dei diversi termini del bilancio della massa e dell'energia.

4.3.4 Combinazione di modelli ad una zona e a due zone

La scelta del modello a zone impiegato per l'analisi dello scenario di incendio considerato deve essere effettuata tenendo presente il suo campo di applicazione. Per le applicazioni rivolte alla valutazione della capacità portante delle strutture in caso di incendio in [20] è proposta la seguente procedura:

- la prima applicazione è eseguita con il modello a due zone;
- successivamente si verifica se, nel caso specifico trattato, si ha il passaggio alla fase post-flashover;
- di conseguenza, si procede o meno al passaggio dal modello a due zone a quello a una zona.

Tenendo presente che i risultati di un "modello a due zone" contengono due variabili principali:

- la temperatura della zona superiore T_u;
- l'altezza dell'interfaccia delle due zone H_i

le seguenti quattro condizioni possono limitare l'applicazione di un "modello a due zone" [20]:

- Condizione 1 (C1): $T_u > 500$ °C
  l'elevata temperatura dei prodotti di combustione (superiore a 500°C) porta al flashover, a causa del flusso di radiazione sul restante carico di incendio del compartimento;
- Condizione 2 (C2): $H_i < H_q$ e $T_u > T_{ignizione}$
  l'abbassamento del livello dell'interfaccia (Hi) comporta che il combustibile si trovi nella zona dei fumi (massima altezza del combustibile Hq) e, se lo strato di fumi ha una temperatura elevata (superiore a Tignizione, assunta pari a 300°C), porta alla propagazione dell'incendio in tutto il compartimento per ignizione del combustibile;
- Condizione 3 (C3): $H_i < 0{,}1H$
  l'altezza dell'interfaccia (Hi) si abbassa e porta ad uno spessore dello strato inferiore molto piccolo, che non è compatibile con una schematizzazione a due zone;
- Condizione 4 (C4): $A_{fi} > 0{,}5\ A_f$
  la superficie dell'incendio (Af_i) è troppo grande rispetto alla superficie del compartimento (A_f), a tal punto da non rappresentare più un incendio localizzato.

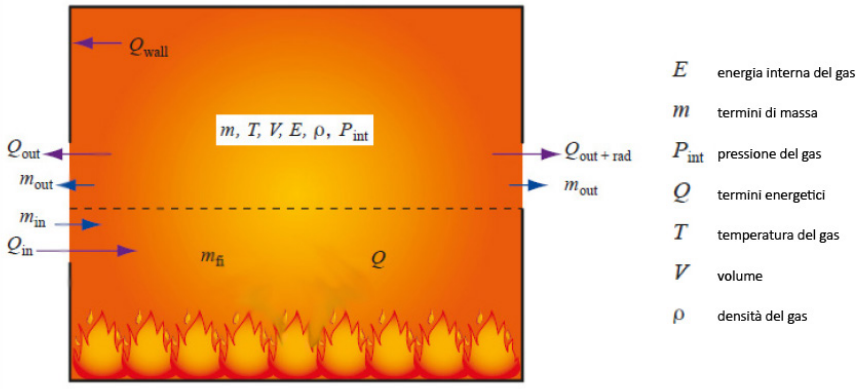


Figura 4-8 - Schema di un compartimento in un modello ad una zona

Se è verificata una di queste 4 condizioni, il modello a 2 zone deve essere trasformato in un modello a 1 zona. E' da notare che le condizioni 1 o 2 portano ad una variazione della velocità iniziale di rilascio di calore. Questa modifica della curva RHR avviene come mostrato in Fig. 4.9: la curva modificata (tratteggiata) si manifesta a causa del flash-over (incendio generalizzato) e dell'ossigeno disponibile. Essa ovviamente copre la stessa superficie della curva iniziale. L'approccio sopra descritto è mostrato nello schema della Figura 4-10, tratto da [32]. Questo diagramma mostra in quali condizioni (modellazione a due zone o a una zona) devono essere determinate le curve di progetto della temperatura dei gas.

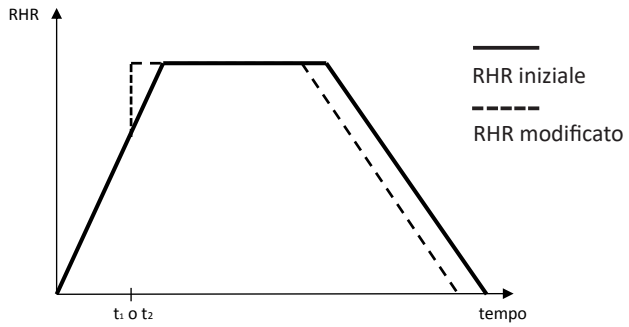


Figura 4-9 - Curve RHR di progetto

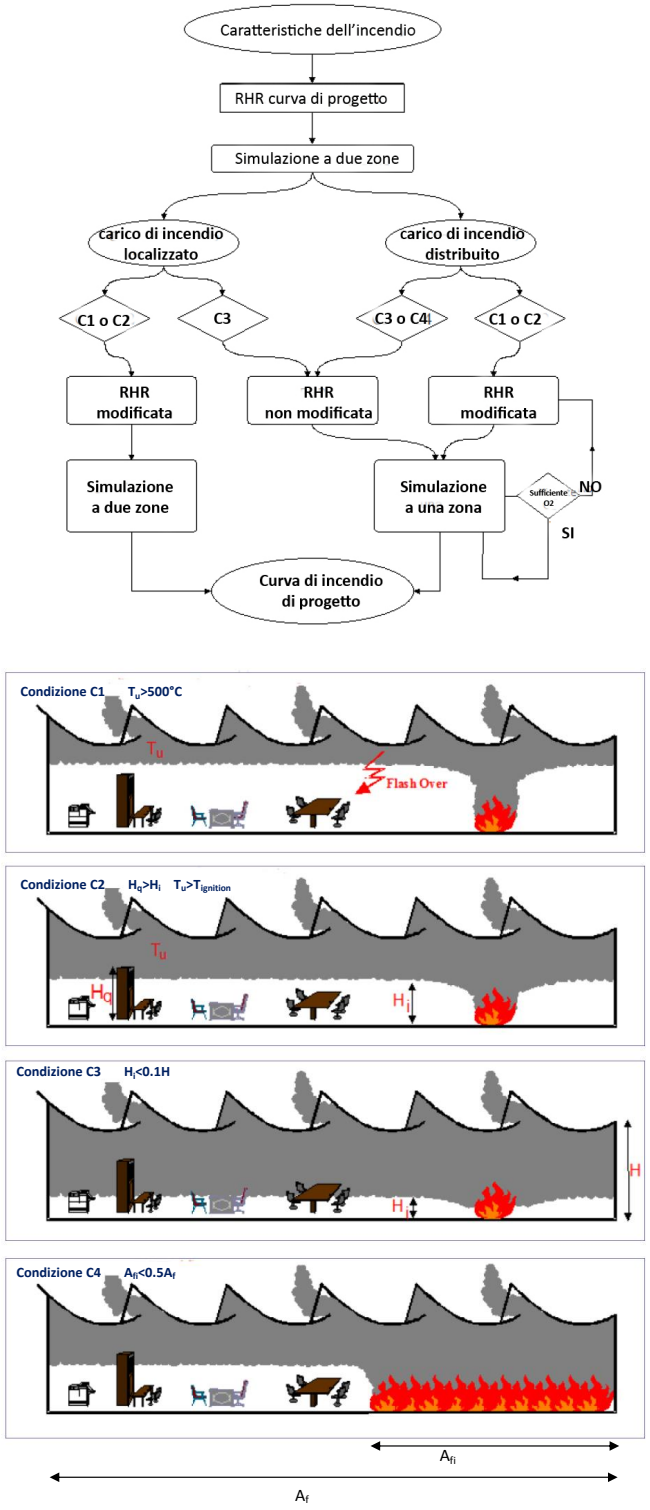


Figura 4 -10- Combinazione di modelli a una zona e a due zone

4.4 Modelli di fluidodinamica computazionale (CFD)

Tra i modelli di incendio avanzati la norma EN 1991-1-2 comprende i modelli di fluidodinamica computazionale (CFD), che forniscono l'evoluzione della temperatura in un compartimento con una distribuzione dipendente puntualmente dalla posizione e dal tempo.

Le caratteristiche di questi modelli sono specificate in Appendice D di EN 1991-1-2 [24].

4.5 Modelli per l'analisi di elementi strutturali posti all'esterno del compartimento

Nelle norme EN 1991-1-2 [24], Appendice B, e EN 1993-1-2 [26], Appendice B, è fornito un metodo per il calcolo del flusso termico su elementi esterni, rispetto al compartimento in cui si sviluppa l'incendio, in caso di presenza di aperture lungo le pareti verticali del compartimento. Tali elementi risultano soggetti ad una azione termica inferiore rispetto agli elementi interni al compartimento, ma non trascurabile, poiché dovuta sia alle fiamme che fuoriescono dalle aperture che all'irraggiamento dal compartimento stesso. Pertanto nel calcolo si considerano:

- il flusso termico per irraggiamento dal compartimento;
- il flusso termico per irraggiamento e convezione dovuto alle fiamme che escono dalle aperture;
- il flusso termico per irraggiamento e convezione verso l'atmosfera esterna;
- le dimensioni e la posizione degli elementi strutturali rispetto alle aperture.

Per l'applicazione del metodo devono essere opportunamente schematizzate tutte le parti della parete esterna, come finestre o aperture, che non hanno specifica resistenza al fuoco.

L'area totale delle finestre in una parete esterna viene assunta come segue:

- se l'area della finestra è meno del 50% dell'area della parete esterna di riferimento del compartimento, pari all'area totale della finestra;
- se l'area della finestra è più del 50% dell'area della parete esterna di riferimento del compartimento,
  a. pari all'area totale della parete;
  b. pari al 50% dell'area della parete.

Il metodo è definito con uno specifico campo di applicazione:

- dimensioni del compartimento non superiori a 70 m in lunghezza, 18 m in larghezza e 5 m in altezza.

Nell'Appendice Nazionale [28] esso è indicato con carattere informativo.

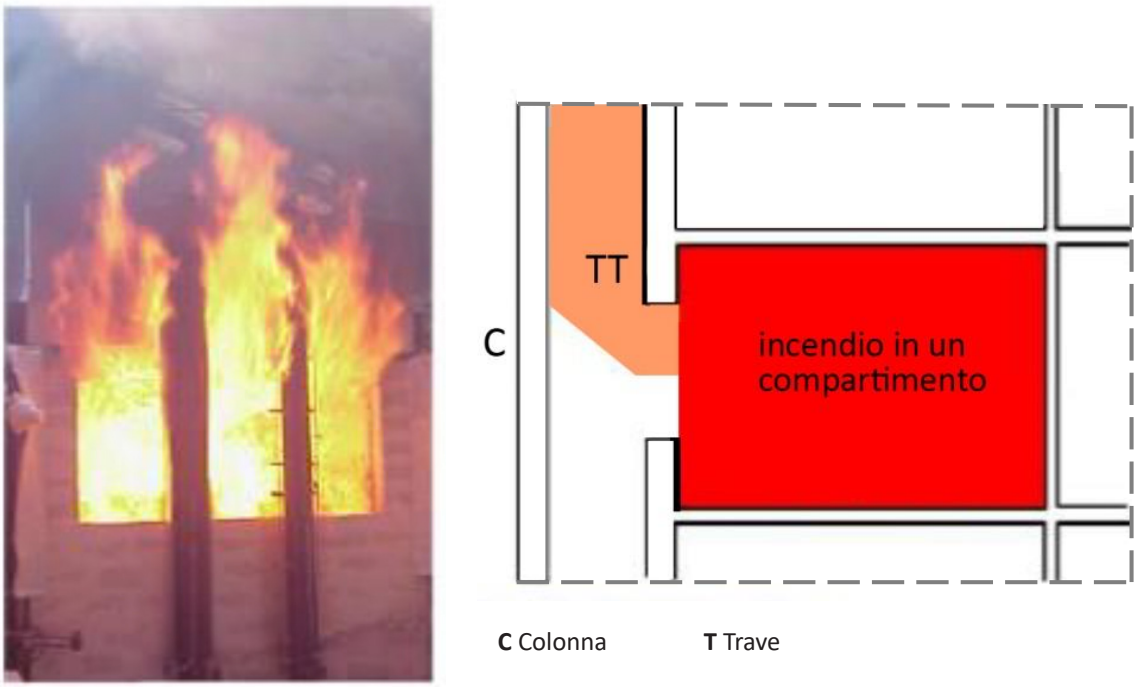


Figura 4 -11 – Criteri di progetto in condizioni di incendio per elementi strutturali posti all'esterno

5. ANALISI TERMICA E MECCANICA DELLA STRUTTURA PORTANTE

5.1 Introduzione

Nel corso dell'incendio gli elementi della struttura portante di un edificio sono soggetti ad azioni di tipo meccanico e di tipo termico. Le prime sono dovute ai carichi permanenti e agli altri carichi presenti che agiscono sulla struttura, le seconde sono dovute all'incremento di temperatura dei gas nel compartimento in cui si sviluppa l'incendio e sono determinate dalle condizioni di trasferimento del calore sulle sezioni degli elementi strutturali. A causa delle azioni termiche si ha un aumento della temperatura degli elementi strutturali. Questo fenomeno, chiamato **risposta termica** della struttura, potenzialmente porta ad una dilatazione degli elementi strutturali 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 determina il processo chiamato **risposta meccanica** della struttura.

Nel presente capitolo sono dapprima trattati i metodi di calcolo disponibili per valutare la risposta termica, successivamente quelli utilizzabili per valutare la risposta meccanica delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo.

5.2 Strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo

5.2.1 Coefficienti parziali

In accordo alla normativa vigente [22], [26], [27], i valori di progetto delle proprietà meccaniche dei materiali $X_{fi,d}$ sono definite come segue:

$$X_{fi,d} = k_{\Phi} X_k / \gamma_{M,fi}$$

dove:

X_k è il valore caratteristico o nominale della proprietà meccanica del materiale per il progetto a temperatura ambiente;

k_{Φ} è una proprietà meccanica del materiale $X_{fi,d} / X_k$, dipendente dalla temperatura del materiale (vedi paragrafo 5.2.2);

$\gamma_{M,fi}$ è il coefficiente parziale per la pertinente proprietà del materiale, per la situazione di incendio.

Per il progetto delle strutture di acciaio i coefficienti parziali dell'acciaio $\gamma_{M,fi}$ qualunque sia il tipo di proprietà, sono assunti pari a 1.

5.2.2 Proprietà termiche e meccaniche dei materiali

Le proprietà termiche e meccaniche dell'acciaio e del calcestruzzo a temperature elevate sono definite nelle norme UNI EN 1993-1-2 [26] e UNI EN 1994-1-2 [27].

Queste proprietà (Figura 5-1) sono riportate nelle Appendici D.1 e D.2.

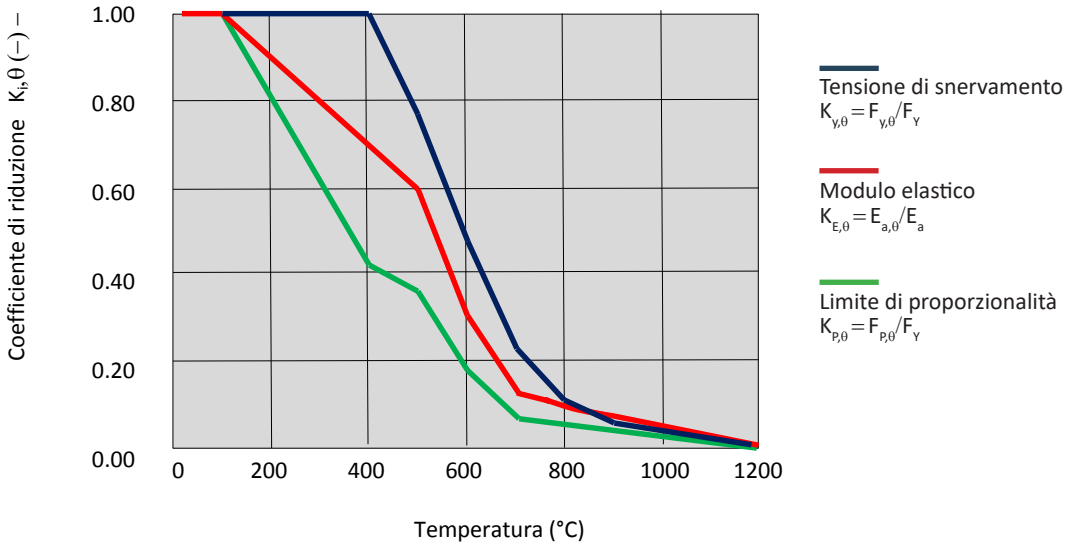


Figura 5-1 – Curve di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio con la temperatura (da [26])

5.3 Analisi termica della struttura portante

5.3.1 Introduzione

I metodi di calcolo previsti per analizzare la risposta termica delle strutture di acciaio e composte acciaio-calcestruzzo, [24], [25], [26], [27] sono di tipo semplificato o avanzato.

5.3.2 Metodi di calcolo semplificato

5.3.2.1 Criteri generali

I metodi di calcolo semplificato sono basati su equazioni che permettono di determinare la temperatura degli elementi in modo approssimato.

Per le strutture in acciaio, generalmente, essi si basano sull' ipotesi di distribuzione uniforme della temperatura su tutta la sezione trasversale, o nelle parti in cui essa può essere opportunamente suddivisa: ipotesi sufficientemente realistica tenendo conto della relativamente alta conduttività termica del materiale. Nelle sezioni di acciaio realizzate con una soletta superiore questa distribuzione della temperatura non è sufficientemente realistica e quindi, per tenere conto della più bassa temperatura della flangia superiore a contatto con la soletta, in questi metodi viene introdotto un coefficiente di riduzione, k, della temperatura.

Riferimenti normativi:

- strutture di acciaio
  norma UNI-EN-1993-1-2 (par. 4.2.5).
- strutture composte acciaio-calcestruzzo
  norma UNI- EN-1994-1-2, per le seguenti tipologie di elementi:
  - solette composte con lamiera grecata non protette (par. 4.3.2) e protette (par. 4.3.3);
  - travi composte (par. 4.3.4);
  - colonne composte (par. 4.3.5).

5.3.2.2 Fattore di sezione e fattore effetto ombra (shadow effect)

Il fattore di sezione è definito come il rapporto tra l'area attraverso cui si trasferisce il calore e il volume di acciaio dell'elemento, considerando che:

- per protezioni scatolari l'area di trasferimento del calore è assunta come l'area interna alla protezione scatolare;
- per le sezioni di acciaio con una soletta superiore si trascura il trasferimento di calore sul lato verso la soletta.

In caso di elementi di acciaio non protetti aventi sezione costante, il fattore di sezione può essere definito come il rapporto tra il perimetro della sezione di acciaio esposto all'incendio e l'area di tale sezione.

Il coefficiente k_{sh}, tiene conto del fatto che, nel caso delle sezioni di acciaio non protette, si ha un flusso di calore per irraggiamento ridotto a causa della loro forma concava.

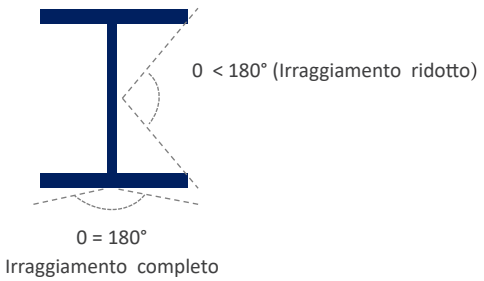


Figura 5-3 – Effetto ombra e fattore di sezione in caso di sezioni non protette

Nel caso delle sezioni protette non è previsto l'uso del coefficiente per effetto ombra.

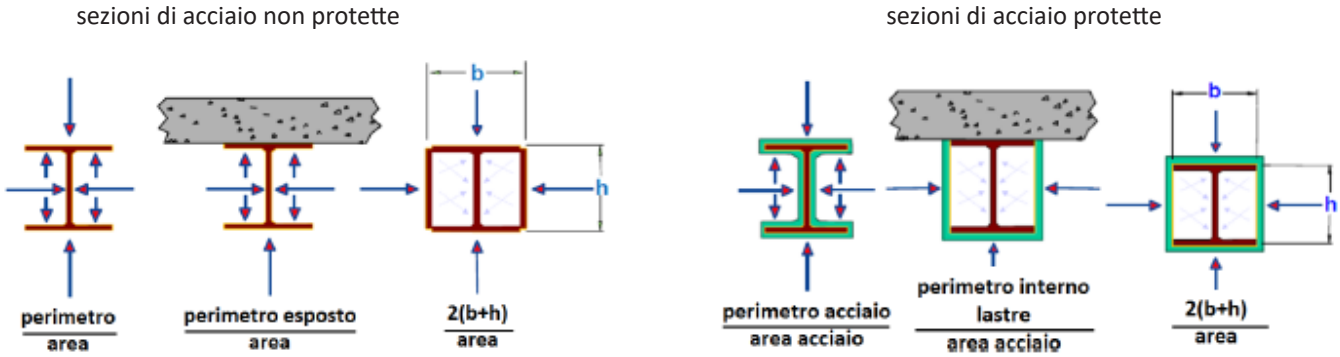


Figura 5-2 - Determinazione del fattore di sezione

5.3.3 Metodi di calcolo avanzato

I metodi di tipo avanzato per l'analisi termica sono basati sull'applicazione del calcolo agli elementi finiti. In tal caso, tenendo conto dell'azione termica dovuta all'incendio e delle specifiche condizioni al contorno, viene determinata la temperatura di ogni elemento in cui la struttura è discretizzata.

Riferimenti normativi:

- strutture di acciaio, norma UNI-EN-1993-1-2 [26], paragrafo 4.3.2;
- strutture composte acciaio-calcestruzzo, norma UNI-EN-1994-1-2 [27], paragrafo 4.4.2.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di applicazione dei metodi di calcolo avanzato per l'analisi della risposta termica di elementi composti acciaio-calcestruzzo.

Nella Figura 5-4 è presentata la risposta termica di una trave di acciaio non protetto con una soletta di calcestruzzo posta sull'ala superiore, esposta nella parte inferiore ad un incendio naturale [20].

Si può vedere che la temperatura nella flangia inferiore e nell'anima della trave di acciaio sono praticamente identiche. L'aumento di temperatura nella flangia superiore avviene con un certo ritardo, a causa del calore perso verso il calcestruzzo, relativamente freddo, della soletta posta superiormente.

Nella Fig. 5-5 è rappresentata la distribuzione 2D di temperatura in una soletta di calcestruzzo gettata su una lamiera grecata di acciaio, dopo 120 minuti di esposizione all'incendio standard, calcolata con il software DIANA [20]. Inoltre, è eseguita una comparazione tra il campo di temperatura calcolato ed il risultato di prove sperimentali. Risulta un buon accordo tra prove sperimentali e teoria, specialmente nelle aree critiche, nella parte superiore delle nervature (ossia la posizione D nella parte destra della Figura 5-5). Si noti che la distribuzione della temperatura nella soletta è significativamente non uniforme a causa del valore relativamente basso della conduttività termica del calcestruzzo..

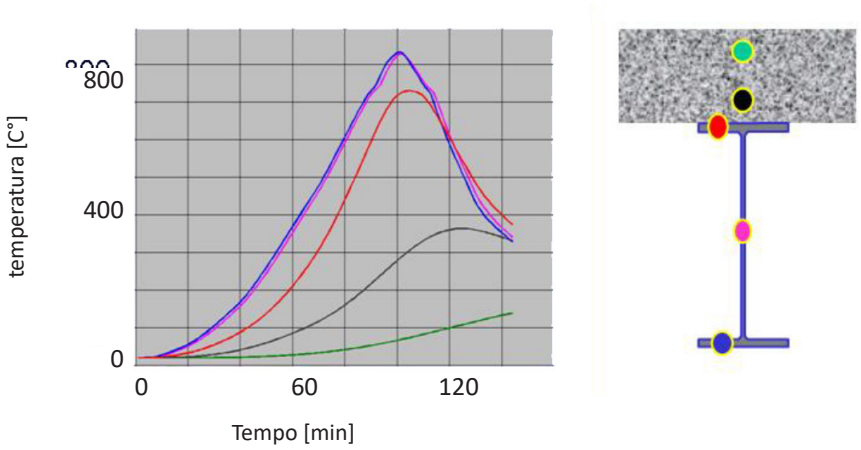
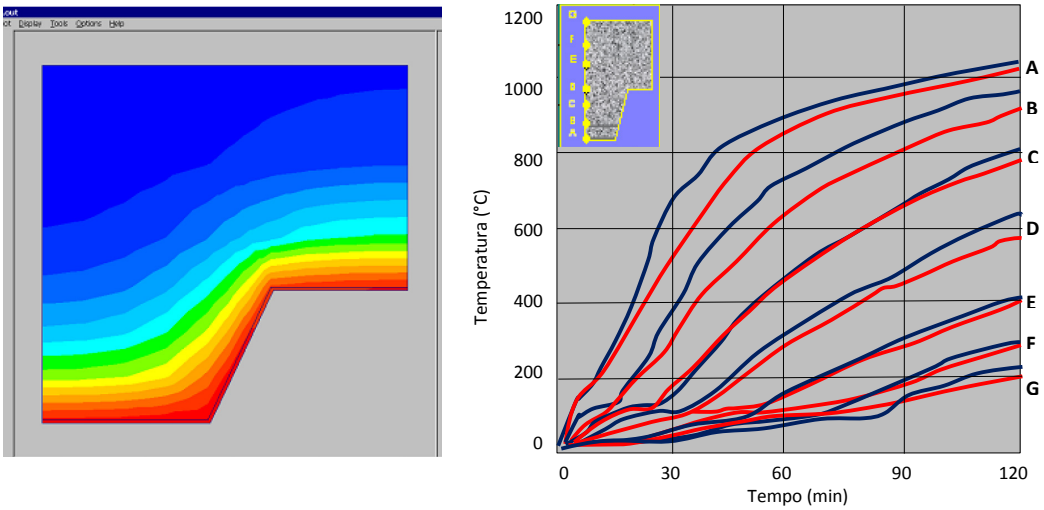


Figura 5-4 - Risposta termica: trave di acciaio/solaio di calcestruzzo (2D) - [32]



simulazione numerica confronto tra simulazione e prove

Figura 5-5 - Risposta termica: solaio composto acciaio-calcestruzzo (2D)- [32]

5.3.4 Applicazioni

Una pratica applicazione dei metodi di calcolo semplificato per l'analisi della risposta termica di strutture di acciaio, utilizzabile nell'ambito delle soluzioni conformi, è riportata nel Nomogramma [30]. In questo documento, utile soprattutto per valutazioni preliminari della resistenza al fuoco di strutture di acciaio, sono riportate le curve di riscaldamento di elementi di acciaio, protetti e non protetti, esposti alla curva di incendio standard ISO 834. È da tenere presente che, nel caso di impiego di elementi strutturali protetti, è necessario eseguire l'analisi termica utilizzando i dati relativi ai sistemi di protezione in accordo alla documentazione tecnica dei prodotti impiegati, derivante dalla loro qualificazione sperimentale conforme alle norme di prova della serie EN 13381, secondo quanto stabilito dalla normativa vigente [4].

In termini generali, tenendo conto delle ipotesi di calcolo previste per le soluzioni conformi e per le soluzioni alternative (vedi paragrafo 2.2.3.1), si possono individuare i seguenti campi di applicazione dei metodi di calcolo disponibili per l'analisi termica di strutture di acciaio:

- metodi di calcolo semplificato per la progettazione delle soluzioni conformi;
- metodi di calcolo avanzato per la progettazione delle soluzioni alternative.

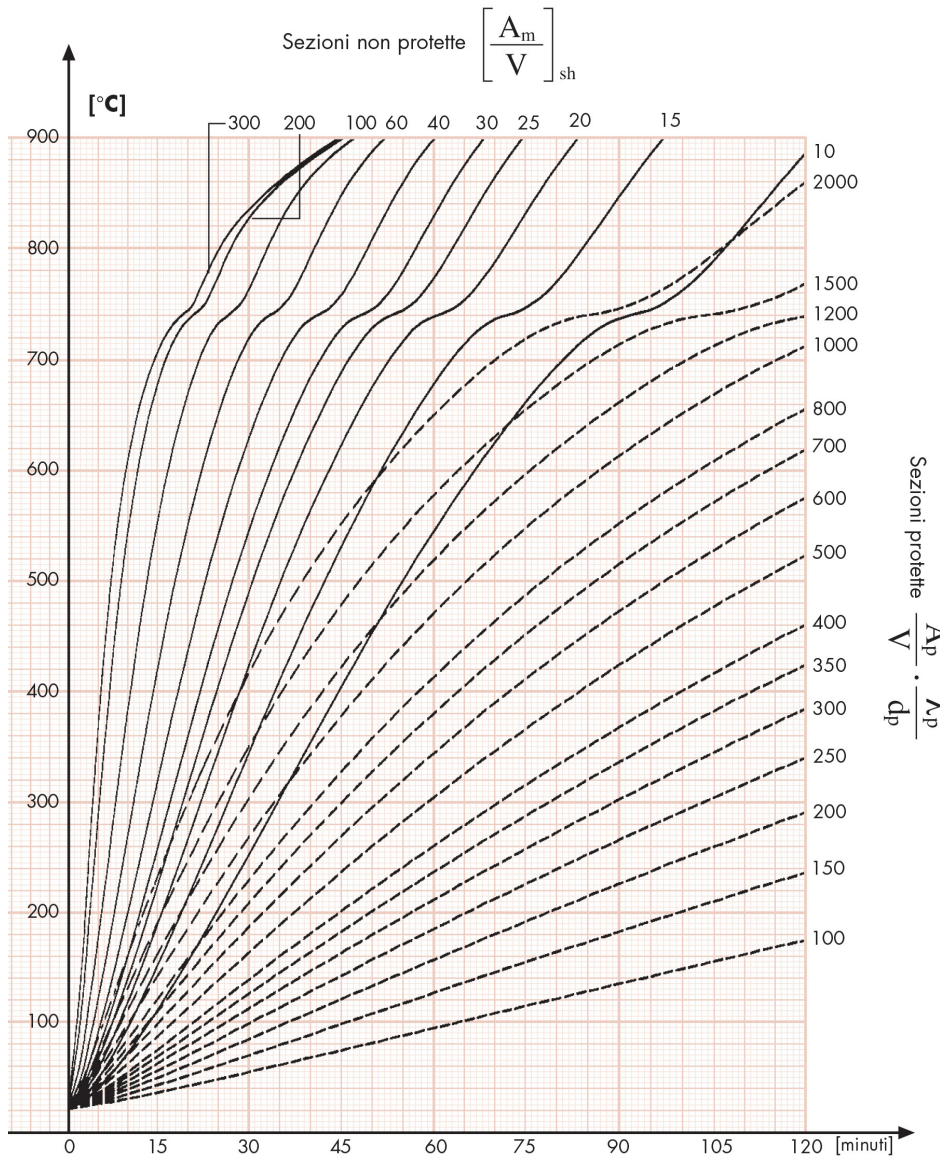


Figura 5-6 - Risposta termica di elementi strutturali di acciaio: il Nomogramma [30]

5.4 Analisi meccanica della struttura portante

5.4.1 Generalità

Nell'ambito della normativa tecnica per la progettazione strutturale antincendio le strutture di acciaio sono distinte in:
- non protette;
- protette con materiali protettivi antincendio;
- protette da schermi termici.

La valutazione della risposta meccanica in condizioni di incendio può essere eseguita mediante:
- prove sperimentali;
- metodi di calcolo e progettuali.

I metodi di calcolo e progettuali, a cui è principalmente rivolta la presente trattazione, sono definiti nelle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici (per le strutture di acciaio, la norma UNI-EN-1993-1-2 [26], per le strutture composte acciaio-calcestruzzo, la norma UNI EN 1994-1-2 [27]) e completati con le disposizioni previste nelle relative Appendici Nazionali [28].

Una procedura generale per la valutazione della capacità portante delle strutture di acciaio in condizioni di incendio può essere così delineata:
- determinazione delle azioni meccaniche in condizioni di incendio;
- applicazione dei metodi di calcolo disponibili, tenendo presente il pertinente campo di applicazione;
- analisi di aspetti specifici del caso trattato, come ad esempio la verifica dei collegamenti tra differenti elementi strutturali o l'analisi di particolari dettagli costruttivi che non sono compresi nei metodi di calcolo generali applicati.

5.4.2 Azioni meccaniche 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 [22]. Essi sono determinati mediante la seguente formula:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \ldots.$$

dove:
G_1 e G_2 valore caratteristico delle azioni permanenti;
P presollecitazione;
A_d azioni eccezionali;
Q_{k1} valore caratteristico dell'azione principale variabile;
ψ_{2j} coefficiente di combinazione per i valori quasi permanenti delle azioni variabili;
Q_{kj} valori caratteristici delle azioni variabili secondarie.

I valori raccomandati dei coefficienti di combinazione sono riportati nella tabella 5-1.

Tab. 2.5.I – *Valori dei coefficienti di combinazione*

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 5-1 - Valori dei coefficienti di combinazione [22]

Una notazione impiegata nei metodi di calcolo è il livello di carico per la situazione di incendio . Esso è definito come:

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$$

dove:
E_d e $E_{d,fi}$ indicano rispettivamente la capacità portante a temperatura ambiente e le sollecitazioni di progetto in condizioni di incendio.

Esso può essere determinato con la seguente relazione:

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

dove $\gamma_{Q,1}$ è il coefficiente parziale per l'azione variabile principale 1.

Il livello di carico $\eta_{fi,t}$ dipende fortemente dal fattore $\Psi_{fi,1}$ che varia in funzione della destinazione d'uso dell'edificio.
In EN 1993-1-2 (strutture di acciaio) e EN 1994-1-2 (strutture composte), è fornita la figura 5-7 per mostrare l'influenza sul livello di carico sia del rapporto dei carichi $Q_{k,1}$ / G_k, sia del coefficiente $\Psi_{fi,1}$

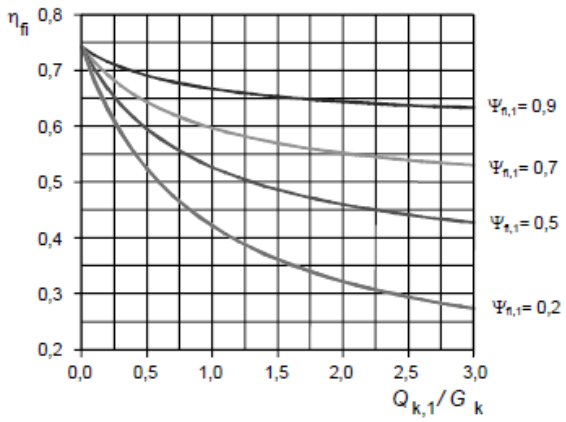


Fig. 5-7 – Variazione del coefficiente di riduzione $\eta_{fi,}$ con il rapporto di carico Qk,1 / Gk

5.4.3 Metodi di calcolo e progettuali

5.4.3.1 Introduzione

I metodi di calcolo e progettuali previsti per la determinazione della capacità portante in caso di incendio sono i seguenti:
- metodo tabellare[4];
- metodi semplificati;
- metodi avanzati.

A questi va aggiunto il metodo della temperatura critica, associabile per tipologia ai metodi di calcolo semplificati, che è un metodo di calcolo tradizionalmente applicato per il progetto delle strutture di acciaio.

5.4.3.2 Dati tabellati

Le tabelle sono definite facendo riferimento ad uno specifico livello di carico e sono utilizzabili nell'ambito di analisi di strutture con esposizione all'incendio standard ISO 834, quindi soltanto per la progettazione delle soluzioni conformi.

I dati riportati nelle tabelle sono basati principalmente sui risultati di prove sperimentali e approfonditi con valutazioni analitiche. Tutti i valori sono correlati alla specifica curva di incendio standard, al livello di carico, alle dimensioni minime della sezione, alla necessaria area delle barre di armatura e al loro minimo ricoprimento di calcestruzzo. Questi valori sono inseriti in una o più tabelle per consentire una veloce determinazione delle prestazioni di resistenza al fuoco dell'elemento strutturale.
Sono disponibili tabelle per elementi composti acciaio-calcestruzzo, non per elementi di acciaio. In particolare, nella norma EN 1994-1-2 [27], sono presenti tabelle per la seguente tipologia 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.

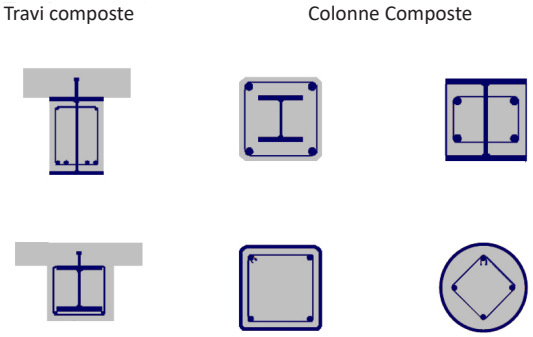


Figura 5-8 – Elementi strutturali composti acciaio-calcestruzzo progettabili con dati tabellati (soluzione conforme)

[4] E' da notare che nell'ambito della normativa nazionale sono presenti tabelle, riportate nel DM 16/02/2007 e nel DM 03/08/2015 [2], impiegate per la verifica degli elementi strutturali in cemento armato, che consentono l'applicazione del cosiddetto "metodo tabellare". Le tabelle qui introdotte, relative alle strutture composte acciaio-calcestruzzo e negli Eurocodici, EN1994-1-2 [27], sono da considerare come un'esplicitazione semplificata del metodo analitico, da inquadrare quindi nelle procedure nazionali della prevenzione incendi come "metodo analitico".

5.4.3.3 Metodi di calcolo semplificato

5.4.3.3.1 Introduzione

I metodi di calcolo semplificato si basano su ipotesi conservative applicabili a singoli elementi. In generale la loro applicazione è adatta quindi alla progettazione delle soluzioni conformi.

Solitamente essi sono definiti sotto l'ipotesi di una temperatura uniforme dell'acciaio nella sezione trasversale e introducendo la modifica della resistenza di progetto definita per la progettazione a temperatura ordinaria, in modo da tenere conto delle proprietà meccaniche dell'acciaio ad elevate temperature.

Questi metodi sono disponibili sia per elementi di acciaio, che per elementi composti acciaio-calcestruzzo.

La verifica è effettuata confrontando le caratteristiche della sollecitazione agenti con le corrispondenti caratteristiche resistenti degli elementi, entrambe valutate nella situazione di incendio:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

dove:

$E_{fi,d}$ è l'effetto di progetto delle azioni nella situazione di incendio;

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

Nella norma UNI EN 1993-1-2 [26], riferita alle sezioni di acciaio, sono considerate separatamente le sezioni di classe di duttilità 1, 2 e 3 dalle sezioni di classe 4.

Nella norma EN1994-1-2 [27], riferita alle strutture composte acciaio-calcestruzzo, sono stati esplicitati i metodi di verifica per alcuni casi tipici di colonne, di travi e di solette.

5.4.3.3.2 Classificazione delle sezioni di acciaio

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, definite sulla base della snellezza delle varie parti di cui è composta la sezione. Le 4 classi di duttilità delle sezioni rette degli elementi strutturali sono:

- *Classe 1:* quando la sezione soggetta a momento è in grado di sviluppare una cerniera plastica avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi strutturale condotta con il metodo plastico, senza subire riduzioni della resistenza;
- *Classe 2:* quando la sezione può essere soggetta ad un momento pari al momento resistente plastico, ma con capacità rotazionale limitata;
- *Classe 3:* quando la sezione può essere soggetta ad un momento non superiore al momento elastico e le tensioni calcolate nelle fibre estreme compresse possono raggiungere la tensione di snervamento, ma l'instabilità locale impedisce lo sviluppo del momento resistente plastico;
- *Classe 4:* quando nella sezione l'instabilità locale, in una o più parti della sezione, sopraggiunge prima dello snervamento di una qualunque fibra.

La classificazione definita per il calcolo agli stati limite ultimi è riportata nelle norme in vigore per la progettazione delle strutture di acciaio (NTC 2018 [22] e Eurocodici UNI EN 1993-1-1 e UNI EN 1993-1-3).

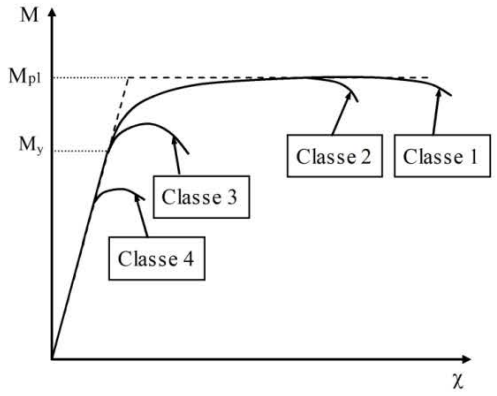


Fig. 5-9 – Diagrammi momento-curvatura (M-χ) per le diverse classi di sezioni

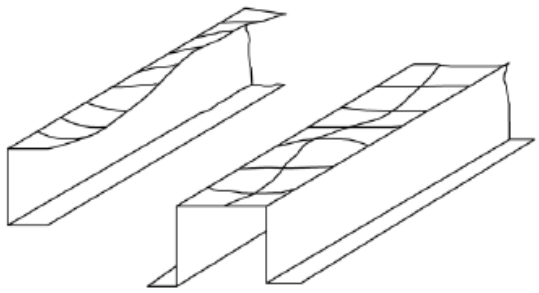


Fig. 5-10 – Instabilità locale di profili sottili

Nel caso della verifica di resistenza al fuoco, poiché durante l'esposizione all'incendio variano la tensione di snervamento ed il modulo elastico del materiale, il rischio di instabilità locali è differente da quello che si ha a temperatura ambiente: perciò è necessario ridefinire la classe delle sezioni e tenere conto della variazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio in funzione della temperatura. Pertanto, la classificazione delle sezioni in condizioni di incendio viene fatta utilizzando gli stessi valori limite per le snellezze degli elementi che compongono le sezioni, ma adottando il valore di ε ridotto rispetto a quello a definito per la classificazione a temperatura ambiente:

$$\varepsilon = 0.85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Pertanto la classe di una sezione di acciaio può essere diversa, eventualmente maggiore, nel calcolo della resistenza al fuoco rispetto a quella definita nel calcolo della resistenza meccanica a temperatura ambiente.

5.4.3.3.3 Elementi in acciaio con sezione di classe 1,2,3.

In generale le procedure utilizzate per calcolare la resistenza di progetto delle membrature in caso di incendio sono uguali a quelle utilizzate per la verifica agli stati limite ultimi a temperatura ordinaria, modificate per tenere conto che le proprietà meccaniche dell'acciaio sono differenti a causa delle variazioni di temperatura.

Nella norma EN 1993-1-2 [26], paragrafo 4.2.3, sono riportate le formule da utilizzare per il calcolo della resistenza in condizioni di incendio di elementi soggetti a differenti tipi di sollecitazione:

- aste tese (par. 4.2.3.1)
- aste compresse di classe di duttilità 1, 2, e 3 (par. 4.2.3.2)
- aste inflesse di classe di duttilità 1 e 2 (par. 4.2.3.3)
- aste inflesse di classe di duttilità 3 (par. 4.2.3.4)
- aste presso-inflesse di classe di duttilità 1, 2, e 3 (par. 4.2.3.5)

Inoltre sono riportate:

- le formule per la verifica a taglio delle sezioni in condizioni di incendio (par. 4.2.3.3 e 4.2.3.4).
- le formule per tenere conto dei possibili fenomeni di instabilità a flessione e a flesso-torsione in condizioni di incendio (par. 4.2.3.2, 4.2.3.3 e 4.2.3.4).

In pratica i metodi di calcolo semplificato possono essere ricondotti ai seguenti due casi principali:

1. Elementi non soggetti a fenomeni di instabilità

In questo caso il procedimento si basa sul diagramma di verifica della sezione alle elevate temperature. L'elemento può essere soggetto sia sforzo normale che a momento flettente, ma deve avere una lunghezza di inflessione limitata, tanto da rendere trascurabile l'effetto di fenomeni di instabilità flessionale e di instabilità flesso-torsionale.

La resistenza dell'elemento si ottiene sulla base della resistenza della sua sezione trasversale, considerata riscaldata uniformemente, riducendone il valore in funzione della temperatura (figura 5-11).

La temperatura dell'elemento è considerata uniforme ma sono introdotti alcuni fattori, chiamati "fattori di adattamento", che tengono conto dei gradienti sulla sezione (k_1) e della presenza di zone più fredde in prossimità degli appoggi di travi continue (k_2). I fattori di adattamento sono differenti in caso di sezioni protette e non protette (Figura 5-12).

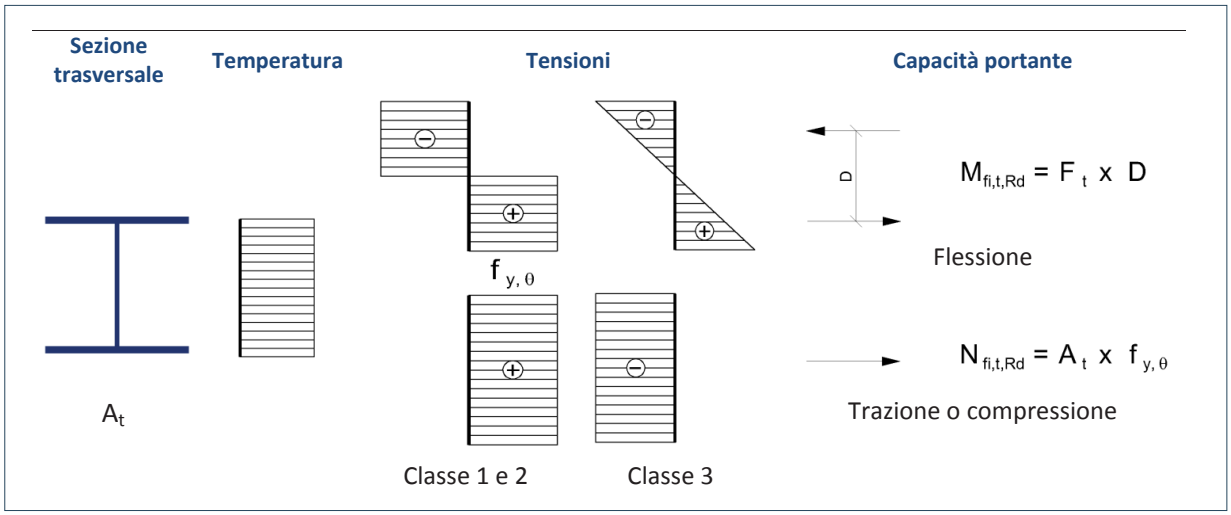


Figura 5-11 – Criteri di progetto della capacità portante di elementi di acciaio in condizioni di incendio

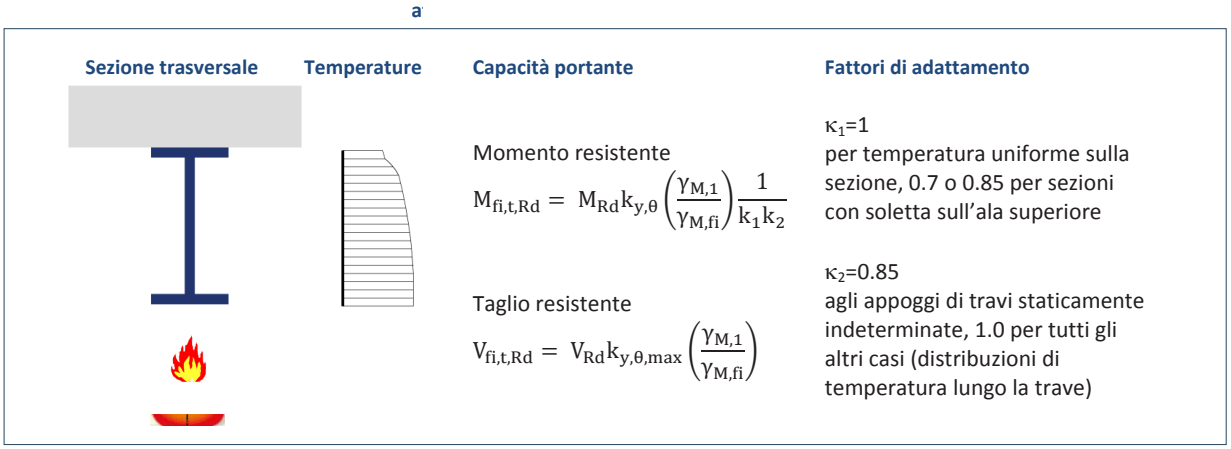


Figura 5-12 – Elementi con sezioni di classe 1,2,3: fattori di adattamento per distribuzione di temperatura non uniforme

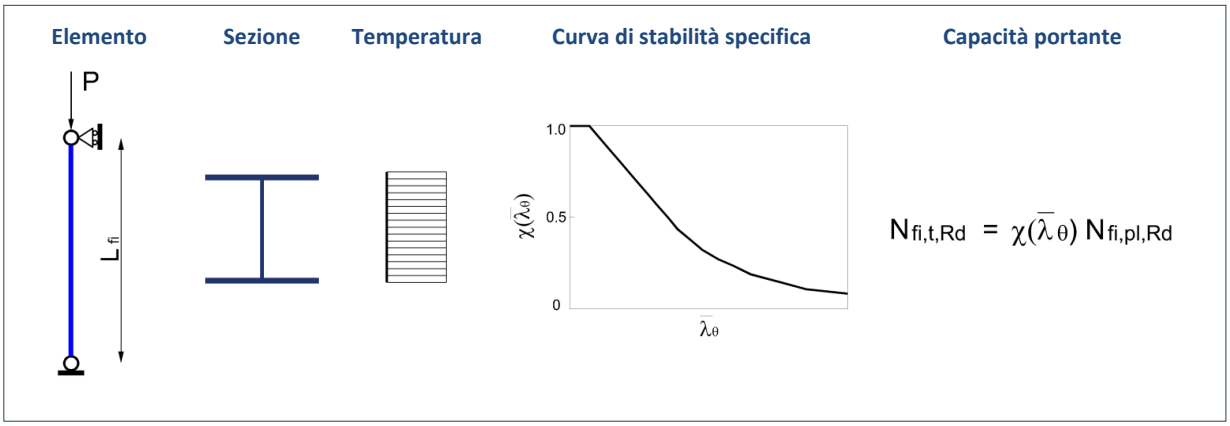


Figura 5-13 – Criteri di progetto di elementi di acciaio in condizioni di incendio: fenomeni di instabilità.

2. Elementi soggetti a fenomeni di instabilità

In questo caso la procedura tiene conto delle curve di instabilità degli elementi, valide per la situazione di progetto a temperatura ambiente, adattate per la situazione di incendio; possono essere analizzati elementi soggetti a compressione, a momento flettente e a una loro combinazione, come colonne snelle sottoposte a carico eccentrico, travi sottoposte a svergolamento, ecc.; in questo caso, in maniera analoga a quanto fatto nel progetto a temperatura ambiente, la procedura tiene conto di entrambe le sollecitazioni combinando i modelli per la verifica alle singole azioni.

In generale, la capacità portante viene ridotta attraverso il coefficiente relativo alla curva di instabilità (ad es. χ (λθ)) che dipende dalla snellezza relativa in condizioni di incendio (λθ); tale snellezza dipende a sua volta dalla resistenza della sezione, dalla sua rigidezza e dalla sua lunghezza di instabilità in condizioni di incendio.

Analogo procedimento si adotta per la verifica nei confronti dei fenomeni di svergolamento (Figura 5-13).

5.4.3.3.4 Elementi di acciaio con sezione di classe 4

Gli elementi di acciaio aventi sezione di classe 4, soggetti a sollecitazioni differenti dalla trazione, devono essere sottoposti a verifiche specifiche nei confronti di possibili instabilità locali. Gli elementi soggetti a trazione sono analizzati con i metodi validi per le sezioni di classe 1,2,3.

Nella norma EN 1993-1-2 [26], paragrafo 4.2.3.6, il metodo di calcolo semplificato è basato sulla seguente ipotesi:

- la temperatura critica delle sezioni di classe 4 di duttilità è assunta pari a 350°C.

Il metodo è confermato nell'Appendice nazionale [28].

In alternativa è possibile procedere ad un calcolo più preciso sulla base di una specifica procedura descritta nella norma EN 1993-1-2, Appendice E [26].

5.4.3.3.5 Metodo della temperatura critica

Il metodo della temperatura critica, riportato nella norma EN 1993-1-2 [26], paragrafo 4.2.4, è un metodo semplificato di verifica della capacità portante in condizioni di incendio, definito utilizzando una distribuzione di temperatura uniforme nella sezione di acciaio, in cui la verifica è effettuata nel dominio della temperatura.

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:

$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,o}}$ 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 [28];

$R_{fi,d,o}$ 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. Il suo campo di applicazione è limitato ai seguenti casi:

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

5.4.3.3.6 Il Nomogrammma

Nell'ambito delle applicazioni dei metodi di calcolo semplificato di strutture di acciaio in caso di incendio è utile citare il caso del Nomogramma [30]: si tratta di uno strumento di semplice impiego per la valutazione preliminare della resistenza al fuoco degli elementi strutturali, protetti e non protetti. Nella parte di sinistra del grafico sono riportate le curve per la determinazione della *temperatura critica,* in funzione del grado di utilizzazione dell'elemento in caso di incendio e delle sue condizioni di esposizione al fuoco. La *temperatura critica* corrisponde al verificarsi del collasso di un elemento strutturale in presenza di una distribuzione di temperatura uniforme.

Le curve suddette sono utilizzabili nel caso di elementi di acciaio tesi e inflessi per i quali possono essere trascurati i fenomeni di instabilità flesso-torsionale. L'applicazione del Nomogramma è completata con la parte destra del grafico, già presentata al paragrafo 5.3.2.5, dove è rappresentata la risposta termica degli elementi strutturali di acciaio, protetti e non protetti.

Come già ricordato, è da tenere presente che, nel caso di impiego di elementi strutturali protetti, è necessario eseguire l'analisi termica utilizzando i dati relativi ai sistemi di protezione in accordo alla documentazione tecnica dei prodotti impiegati, derivante dalla loro qualificazione sperimentale conforme alle norme di prova della serie EN 13381, secondo quanto stabilito dalla normativa vigente [4].

5.4.3.3.7 Strutture composte acciaio-calcestruzzo

Nella norma EN1994-1-2 [27] sono stati esplicitati i criteri di calcolo semplificato per l'analisi di alcuni elementi tipici:

1. travi composte acciaio-calcestruzzo in presenza delle seguenti sollecitazioni:
   - flessione delle sezioni trasversali critiche (par. 4.3.4.1.2);
   - taglio verticale (par. 4.3.4.1.3);
   - taglio longitudinale (par. 4.3.4.1.5).
2. solai composti da lamiera grecata;
3. colonne composte (par. 4.3.5).

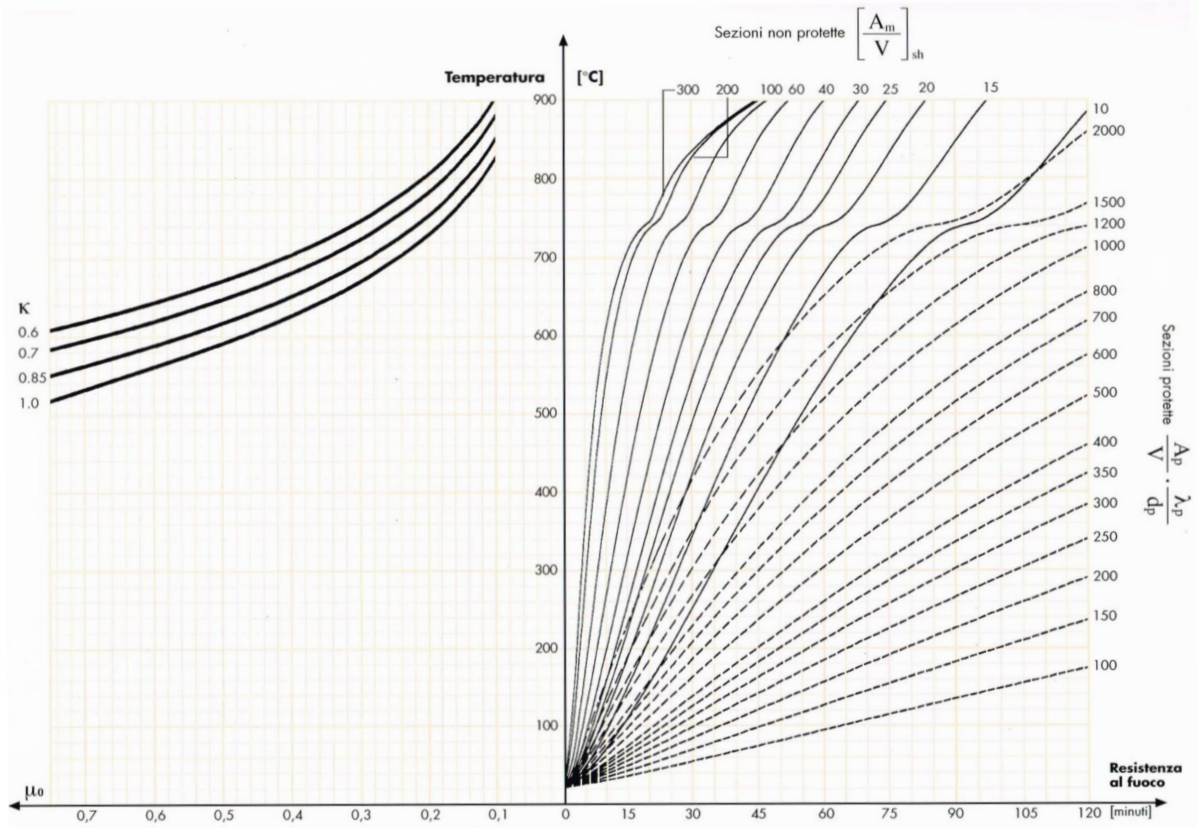


Figura 5-14 – Nomogramma [30]

5.4.3.4 Metodi di calcolo avanzato

5.4.3.4.1 Criteri generali

I metodi di calcolo avanzato consentono di analizzare il comportamento delle strutture soggette a reali condizioni di incendio.

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 ed i vincoli 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 [26] e EN 1994-1-2 [27]. 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).

Un modello di calcolo di tipo avanzato deve essere in grado di analizzare il comportamento della struttura durante tutta l'esposizione all'incendio assunta in fase di progetto. A questo scopo è necessario eseguire l'analisi dell'incendio, mediante uno specifico modello di incendio (vedi capitolo 3), e la conseguente analisi della risposta termica e della risposta meccanica degli elementi strutturali. In generale la risposta termica e la risposta meccanica degli elementi strutturali possono essere condotte con analisi separate (disaccoppiamento di analisi termica e meccanica), anche se spesso sono eseguite con la stessa analisi.

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), oppure essere limitati da ipotesi restrittive (ad esempio considerare solo il comportamento di elementi con sezioni di classe di duttilità 1 o 2). In questi casi è compito del progettista integrare con specifiche verifiche di sicurezza le analisi eseguite con il software, in modo da completare l'applicazione condotta con l'ausilio del programma di calcolo impiegato.

L'insieme dei programmi di calcolo oggi disponibili per l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato all'analisi delle strutture di acciaio o acciaio-calcestruzzo soggette ad incendio può essere suddiviso in due ampi gruppi: il primo è costituito da programmi di calcolo specialistici che sono stati sviluppati, in genere in ambiente universitario o di ricerca, appositamente per le analisi strutturali in condizioni di incendio; il secondo è costituito da programmi di calcolo commerciali di carattere generale, che possono essere adattati al fine di effettuare analisi strutturali in caso di incendio. Alcuni programmi disponibili per le analisi in condizioni di incendio sono: ADAPTIC, FEAST, SAFIR, VULCAN, ABAQUS e DIANA. Di questi i primi quattro appartengono al primo gruppo, mentre ABAQUS e DIANA sono programmi commerciali agli elementi finiti di carattere generale.

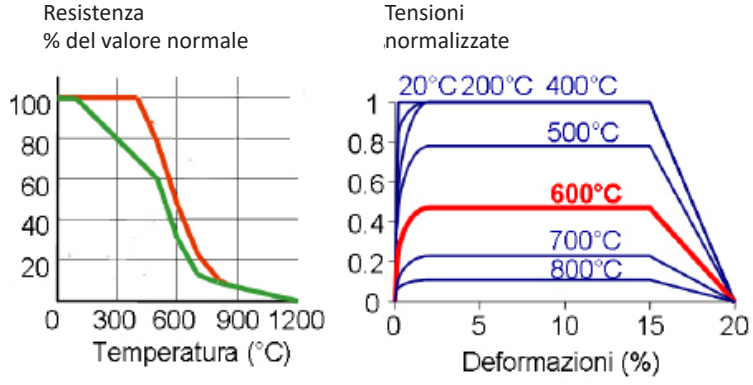


Figura 5-15 – Proprietà meccaniche dell'acciaio strutturale ad elevata temperatura

5.4.3.4.2 Validazione dei modelli di calcolo

I programmi di calcolo impiegati per l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato devono essere opportunamente validati. La norma EN 1993-1-2 [26], 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 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 [22] 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*".

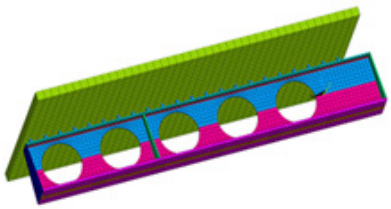
Tenendo presente quanto sopra riportato, l'impiego di un programma di calcolo per le analisi strutturali in condizioni di incendio di tipo avanzato prevede i seguenti presupposti

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

5.4.3.4.3 Applicazioni

Un esempio di applicazione dei metodi di calcolo avanzato è illustrato in Figura 5-16 relativamente ad una trave di acciaio alveolare analizzata in condizioni di incendio standard. Il ricorso all'impiego di un metodo di calcolo avanzato è dovuto al fatto che nessuno dei metodi semplificati previsti negli Eurocodici è applicabile a questi elementi. Il comportamento strutturale in condizioni di incendio di questi elementi è stato preliminarmente osservato mediante l'analisi dei risultati di specifiche prove sperimentali, che hanno consentito di validare i metodi di calcolo applicati. Questa validazione ha compreso non solo il comportamento globale (inflessione, tempi di collasso, ecc.), ma anche i meccanismi di collasso che si sono verificati durante l'esposizione all'incendio. Nell'esempio illustrato si può notare che sia il comportamento globale (inflessione della trave in funzione del tempo di esposizione) che i meccanismi di collasso possono essere opportunamente riprodotti e controllati mediante i modelli di calcolo applicati.

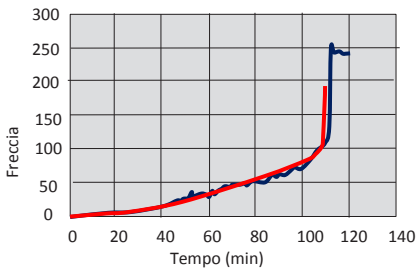
Il metodo avanzato per la valutazione della resistenza al fuoco delle strutture con curve naturali non può essere applicato in presenza di protettivi, dal momento che questi ultimi sono testati, sia in merito alla variazione delle loro proprietà termomeccaniche al fuoco che all'aderenza o in generale al mantenimento delle condizioni iniziali di posa in opera che assicurano la loro funzione protettiva degli elementi strutturali, solo con riferimento a sole curve nominali, le quali hanno un riscaldamento sempre crescente e non contemplano fasi di raffreddamento, che potrebbero invece incidere negativamente, ed in maniera in ogni caso ad oggi non certificabile, sul reale comportamento del protettivo. Su tale importante aspetto la comunità scientifica internazionale ed i vari stakeholders del settore delle costruzioni, così come anche il CNVVF, si stanno interrogando per individuare una possibile soluzione tecnica e normativa.



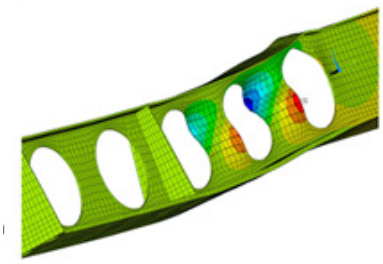
Modello di calcolo



Prova sperimentale in scala reale: fase di rottura



Confronto analisi numerica/prova sperimentale



Analisi numerica: fase di rottura

Figura 5-16 – Applicazione dei metodi di calcolo avanzato al caso di travi alveolari composte in condizioni di incendio [32]

L'unica possibilità al momento che è certamente lecita consiste nel condurre analisi termostrutturali avanzate, che sono una parte del metodo avanzato, sull'intera struttura con protettivi esposta a curva nominale coincidente con quella utilizzata per qualificare il/i protettivo/i con campagne sperimentali, come riportato nel/i rapporto/i di valutazione dei protettivi stessi.

5.4.3.5 Metodi di calcolo avanzato per il progetto di solai composti acciaio-calcestruzzo (MACS+)

La capacità portante in condizioni di incendio dei solai composti acciaio-calcestruzzo può essere sensibilmente migliorata grazie al contributo fornito dall'azione membranale agente nelle solette realizzate in calcestruzzo armato, che sono connesse alle travi di acciaio per mezzo di connettori.
Una serie di test sperimentali eseguiti su edifici in scala reale ha portato alla definizione di specifiche raccomandazioni tecniche per la progettazione di questa tipologia di solai. A seguito di queste sperimentazioni è stato elaborato un metodo di calcolo per la progettazione di strutture portanti a telaio in acciaio, realizzate mediante travi e solai composti acciaio-calcestruzzo.
Questo procedimento consente l'analisi globale della struttura del solaio, in cui una parte delle travi può essere progettata come travi non protette, mantenendo un livello di sicurezza equivalente a quello ottenuto mediante i metodi di calcolo tradizionali.

La trattazione completa del metodo di calcolo è riportata nel report del progetto di ricerca RFCS MACS+ "Azione membranale nelle strutture composte acciaio-calcestruzzo in condizioni di incendio" [34]. Nell'ambito della ricerca è stato implementato uno specifico software per l'applicazione del metodo di calcolo.

Questo metodo di calcolo, se applicato a strutture portanti analizzate con esposizione alla curva di incendio standard ISO834, è utilizzabile nell'ambito delle soluzioni progettuali conformi, come un metodo di calcolo di tipo avanzato, seguendo i criteri e le limitazioni previste dalla norma UNI EN 1994-1-2 [27] relativa alla progettazione in caso di incendio delle strutture composte in acciaio-calcestruzzo. Se applicato a strutture portanti analizzate con esposizione a curve di incendio naturali, esso è utilizzabile nell'ambito delle soluzioni progettuali alternative, come un metodo di calcolo di tipo avanzato, seguendo i criteri e le limitazioni previste dalla stessa norma UNI EN 1994-1-2 [27].

È importante sottolineare l'attenzione necessaria al progetto dei particolari costruttivi, che sono funzionali allo sviluppo della duttilità richiesta per il corretto comportamento del sistema strutturale in condizioni di incendio.

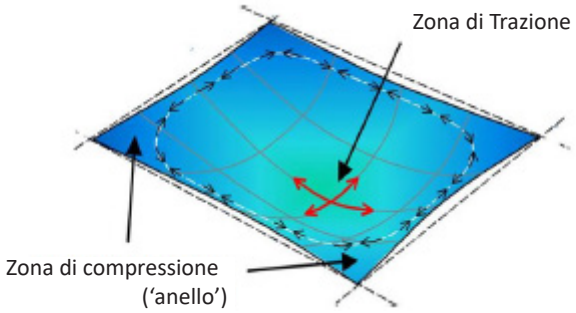


Figura 5-17 – Schematizzazione dell'azione membranale in solai in assenza di vincoli orizzontali perimetrali [34]

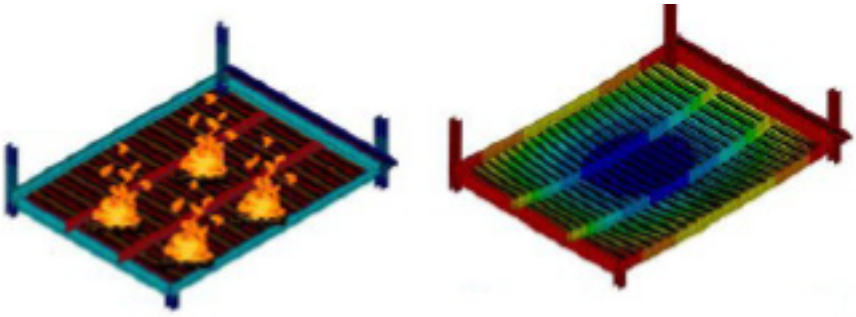


Figura 5-18 – FRACOF Fire Test: solaio composto acciaio-calcestruzzo soggetto ad incendio [34]

5.4.4 I telai a nodi fissi

Nel caso di telai a nodi fissi, in cui ogni piano corrisponde a un distinto compartimento antincendio, nella norma EN 1993-1-2 [26] è indicato il seguente schema per la determinazione delle lunghezze di instabilità delle colonne:

- in un piano intermedio la lunghezza di instabilità lfi di una colonna continua può essere assunta pari a l_{fi}=0.5L e nell'ultimo piano pari a l_{fi}=0.7L, dove L è l'altezza di interpiano nel piano corrispondente (vedi Figura 5-19).

5.4.5 Criteri di verifica dei collegamenti

5.4.5.1 Introduzione

I criteri di verifica dei collegamenti delle strutture di acciaio in caso di incendio sono indicati nella norma EN 1993-1-2 [26]. Essi sono basati sui procedimenti forniti per l'analisi delle strutture a temperatura ambiente, indicati nella norma EN 1993-1-8.

Temperatura θ_a	Fattore di riduzione per bulloni $K_{b,\theta}$ (Trazione e taglio)	Fattore di riduzione di saldature $K_{w,\theta}$
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1000	0,000	0,000

Tabella 5-5 – Fattori di riduzione di resistenza per bulloni e saldature (EN 1993-1-2 [26])

5.4.5.2 Soluzioni conformi

Nell'ambito delle soluzioni conformi, trattandosi di strutture esposte all'incendio standard, è previsto il metodo semplificato riportato nella norma EN 1993-1-2 [26], par. 4.2.1. Secondo questo metodo i collegamenti bullonati e saldati sono verificati se sono soddisfatte le seguenti ipotesi:

- la resistenza termica (d_f/λ_f) dell'eventuale sistema protettivo del giunto risulta non minore della resistenza termica minima delle eventuali protezioni degli elementi collegati;
- il coefficiente di utilizzazione μ_0 del giunto risulta non maggiore del valore massimo dei corrispondenti coefficienti degli elementi collegati;
- la resistenza del giunto è stata verificata a temperatura ambiente in accordo a quanto stabilito dalla norma EN 1993-1-8.

Dove:

- d_f è lo spessore del materiale di protezione (d_f = 0 per gli elementi non protetti);
- λ_f è la conducibilità termica del materiale di protezione dal fuoco.

In alternativa è possibile utilizzare il procedimento di verifica riportato nella stessa norma, EN 1993-1-2 [26], Appendice C, sia per le connessioni bullonate che per quelle saldate.

Come nel caso delle aste di acciaio, anche la verifica dei collegamenti viene eseguita tenendo conto della resistenza ridotta in funzione della temperatura. Nella tabella seguente sono riportati i fattori di riduzione da impiegare a questo scopo.

5.4.5.3 Soluzioni alternative

Per la verifica delle soluzioni alternative il procedimento di verifica dei collegamenti è indicato nella norma EN 1993-1-2 [26], Appendice D. In tal caso devono essere considerate le sollecitazioni presenti durante l'esposizione all'incendio per la durata dell'evento considerato.

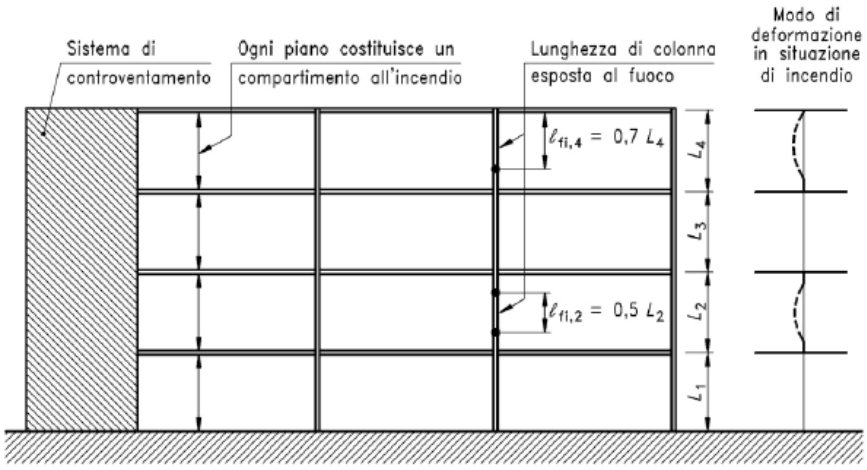


Figura 5-19 – Lunghezza libera di inflessione di colonne in caso d'incendio nel caso di telai controventati

5.4.6 Schematizzazione della struttura e metodi di calcolo applicati

La verifica della risposta meccanica di una struttura esposta all'incendio può essere fatta mediante tre diverse schematizzazioni:

- analisi di singoli elementi, in cui ogni elemento della struttura è analizzato considerandolo separatamente dagli altri e assumendo le condizioni di vincolo, con appropriate condizioni al contorno, pari a quelle presenti all'inizio dell'incendio;
- analisi di parti della struttura o sottostrutture, in cui è presa in considerazione una parte della struttura, usando appropriate condizioni al contorno per rappresentare la sua interazione con le altre parti della struttura;
- analisi globale dell'intera struttura.

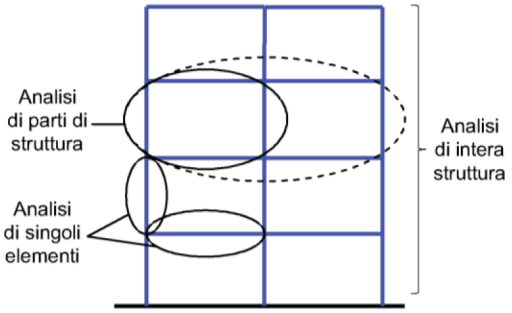


Figura 5-20 – Schematizzazioni della struttura per l'analisi della risposta meccanica in condizioni di incendio

L'analisi per singoli elementi, definita nella norma EN 1993-1-2 [26], prevede che l'effetto delle azioni statiche sia determinato a tempo t=0 sec, considerando le combinazioni per la situazione eccezionale di incendio stabilite in [22]. In questa schematizzazione devono essere considerati gli effetti delle deformazioni termiche risultanti dai gradienti termici sulla sezione trasversale degli elementi, mentre possono essere trascurati gli effetti delle dilatazioni termiche assiali o nel piano. Per l'analisi di parti della struttura, la sottostruttura deve essere individuata sulla base delle deformazioni e delle dilatazioni termiche che si possono verificare, in modo che l'interazione con altre parti della struttura possa essere approssimata per mezzo di vincoli e condizioni al contorno indipendenti dal tempo durante l'esposizione all'incendio. In pratica la scelta della sottostruttura deve essere fatta in modo tale da rappresentare con buona approssimazione il comportamento reale della struttura durante l'esposizione all'incendio.

Nella sottostruttura devono essere considerate le azioni indirette dell'incendio (variazione delle proprietà del materiali, variazioni della rigidezza, effetti delle dilatazioni e deformazioni, modalità di collasso). In queste ipotesi le condizioni di vincolo agli appoggi, le forze e i momenti al contorno della sottostruttura possono essere assunti costanti durante l'esposizione all'incendio. Alcuni criteri per la definizione della sottostruttura possono essere trovati in [38]. Nell'analisi dell'intera struttura devono essere considerate le azioni indirette dell'incendio.

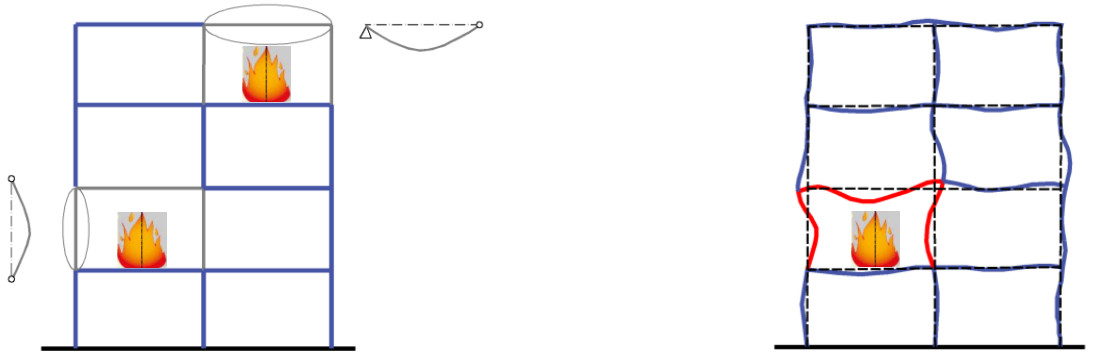


Figura 5-21 – Analisi per elementi e analisi globale della struttura

Tenendo conto di quanto previsto dalla normativa vigente per la definizione delle soluzioni conformi e delle soluzioni alternative (capitolo 2), in merito a queste tre possibili schematizzazioni della struttura possono essere fatte le seguenti osservazioni:

- l'analisi per singoli elementi, di più facile applicazione, si impiega nel caso di esposizione della struttura ad un incendio nominale, cioè nel caso della progettazione di soluzioni conformi; a meno che, per lo specifico caso oggetto di analisi, sia dimostrato che l'effetto delle deformazioni ed espansioni imposte o impedite dovute ai cambiamenti di temperatura siano trascurabili o a favore di sicurezza, l'analisi per singoli elementi non è consentita nel caso di strutture analizzate con esposizione ad un incendio naturale, cioè nel caso della progettazione di soluzioni alternative;
- l'analisi di parti della struttura o l'analisi globale dell'intera struttura si impiegano nel caso della progettazione di strutture analizzate con esposizione ad un incendio naturale, ossia nel caso della progettazione di soluzioni alternative; esse possono essere applicate anche nel caso di strutture analizzate con curve nominali di incendio, ossia nel caso della progettazione di soluzioni conformi, ad esempio per l'analisi di casi di strutture di particolare importanza.

Nella seguente tabella sono indicati alcuni criteri generali validi per la schematizzazione della struttura da applicare per la determinazione delle soluzioni progettuali.

Ovviamente la schematizzazione della struttura deve tenere presente il campo di applicazione dei metodi di calcolo utilizzati. Nella Tabella 5-7 sono indicati i criteri generali validi per la schematizzazione della struttura da impiegare per ognuno dei diversi metodi di calcolo disponibili nell'ambito della progettazione delle soluzioni conformi, ossia in caso di analisi eseguite con esposizione della struttura all'incendio nominale standard. Si può notare che:

- tutti e tre i metodi di calcolo disponibili (tabelle, metodi semplificati ed avanzati) possono essere impiegati nel caso di analisi di singoli elementi;
- l'analisi di parti della struttura e l'analisi dell'intera struttura possono essere eseguite mediante l'applicazione dei modelli di calcolo avanzato.

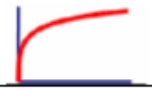
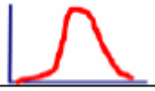
SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E SOLUZIONI PROGETTUALI	Soluzioni Conformi 	Soluzioni alternative 
Analisi per singoli elementi	SI	NO
Analisi per parti della struttura	SI	SI
Analisi globale della struttura	SI	SI

Tabella 5-6 – Criteri generali di analisi della struttura per la determinazione delle soluzioni progettuali

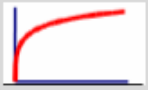
SOLUZIONI CONFORMI 			
SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E METODI DI CALCOLO	Dati tabellati	Metodi di calcolo semplificato	Metodi di calcolo avanzato
Analisi per singoli elementi	SI	SI	SI
Analisi per parti di struttura	NO	NO	SI
Analisi globale della struttura	NO	NO	SI

Tabella 5-7 – Soluzioni conformi e metodi di calcolo

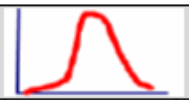
SOLUZIONI ALTERNATIVE 			
SCHEMATIZZAZIONE DELLA STRUTTURA E METODI DI CALCOLO	Dati tabellati	Metodi di calcolo semplificato	Metodi di calcolo avanzato
Analisi per singoli elementi	NO	NO	NO
Analisi per parti di struttura	NO	NO	SI
Analisi globale della struttura	NO	NO	SI

Tabella 5-8 – Soluzioni alternative e metodi di calcolo

Nella Tabella 5-8 sono indicate le possibili schematizzazioni della struttura per i diversi metodi di calcolo applicabili nell'ambito della progettazione delle soluzioni alternative, ossia in caso di analisi eseguite con esposizione della struttura all'incendio naturale. Si può notare che:

- l'applicazione dei dati tabellati non è ammessa, perché i valori delle tabelle sono riferiti al caso di esposizione alla curva di incendio nominale standard;
- l'applicazione dei metodi di calcolo semplificato non è ammessa, essendo essi applicabili a singoli elementi;
- l'applicazione dei metodi di calcolo avanzato, con analisi di parti della struttura o dell'intera struttura, è possibile per la progettazione delle soluzioni alternative.
-

Tutti i metodi di analisi previsti nell'ambito delle cosiddette parti fuoco degli Eurocodici sono rappresentati nello schema di Figura 5-22. La loro applicazione deve essere eseguita tenendo conto delle relazioni sopra descritte tra i metodi di calcolo applicati e il tipo di analisi eseguita.

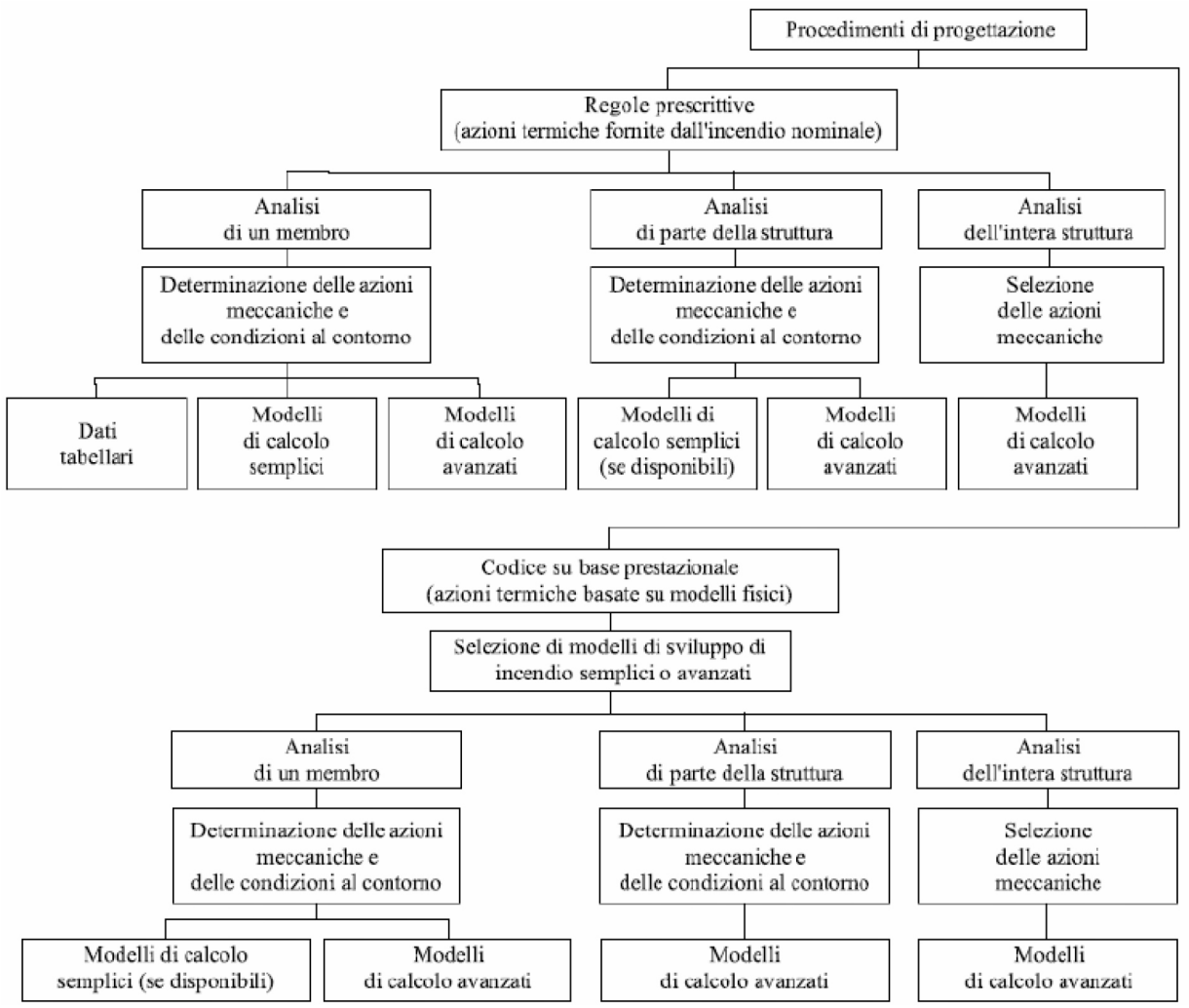


Fig. 5-22 – Metodi di calcolo e progettuali previsti dalle parti fuoco degli Eurocodici

5.4.7 Metodi di calcolo: riferimenti normativi

5.4.7.1 Introduzione

Le norme tecniche di prevenzione incendi [4], al paragrafo S.2.4, indicano le prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture che devono essere verificate dalle soluzioni progettuali.

Di seguito sono riepilogati i metodi di calcolo e progettuali previsti dalle norme vigenti per la valutazione della capacità portante in condizioni di incendio delle strutture di acciaio e delle strutture composte acciaio-calcestruzzo.

5.4.7.2 Strutture di acciaio

I metodi di calcolo e progettuali previsti per le strutture di acciaio sono indicati nella norma UNI EN 1993-1-2 [26]. Essi devono essere applicati tenendo conto di quanto previsto dalla relativa Appendice Nazionale [28].

Nella seguente tabella, dove sono distinte le soluzioni progettuali conformi, ossia valutate con esposizione alla curva di incendio standard, dalle soluzioni progettuali alternative, ossia valutate con esposizione alla curva di incendio naturale, il segno "√" indica che il metodo in questione è applicabile, il segno "-" significa che non lo è.

Paragrafo	Titolo	Incendio ISO 834	Incendio naturale
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 5-2 – Metodi di calcolo secondo EN 1993-1-2

5.4.7.3 Strutture composte acciaio-calcestruzzo

I metodi di calcolo e progettuali previsti per le strutture composte acciaio-calcestruzzo sono indicati nella norma UNI EN 1994-1-2 [27]. Essi devono essere applicati tenendo conto di quanto previsto dalla relativa Appendice Nazionale [28].

Nella seguente tabella, dove sono distinte le soluzioni progettuali conformi, ossia valutate con esposizione alla curva di incendio standard, dalle soluzioni progettuali alternative, ossia valutate con esposizione alla curva di incendio naturale, il segno "√" indica che il metodo in questione è applicabile, il segno "-" significa che non lo è.

Paragrafo	Titolo	Incendio ISO 834	Incendio naturale
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 RIEMPITE 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 5-3 – Metodi di calcolo secondo EN 1994-1-2

BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE

1. d.P.R. n. 151 del 01/08/2011 "Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi, a norma dell'articolo 49, comma 4 -quater, del decreto-legge 31 maggio 2010, n. 78, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 luglio 2010, n. 122"
2. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica orizzontale, DM Interno 03/08/2015;
3. DM Interno 12/04/2019, Modifiche al decreto 3 agosto 2015, recante l'approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139;
4. DM Interno 18/10/2019, Modifiche all'allegato 1 al decreto del Ministro dell'interno 3 agosto 2015, recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139»;
5. DM Interno 14/02/2020, "Aggiornamento della sezione V dell'allegato 1 al decreto 3 agosto 2015, concernente l'approvazione di norme tecnIche di prevenzione incendi";
6. DM Interno 24/11/2021, Modifiche all'allegato 1 del decreto del Ministero dell'Interno del 3 agosto 2015, concernente l'approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi;
7. DM Interno 14/10/2022, Modifiche al decreto 26 giugno 1984, concernente «Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi», al decreto del 10 marzo 2005, concernente «Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali e' prescritto il requisito della sicurezza in caso d'incendio» e al decreto 3 agosto 2015 recante «Approvazione di norme tecniche di prevenzione incendi, ai sensi dell'articolo 15 del decreto legislativo 8 marzo 2006, n. 139»
8. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.4, DM Interno 08/06/2016 (Uffici);
9. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.5, DM Interno 09/08/2016 (Alberghi);
10. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.6, DM Interno 15/05/2020 (Autorimesse), che ha sostituito il precedente D.M. 21/02/2017;
11. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.7, DM Interno 07/08/2017 (Scuole);
12. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.8, DM Interno 23/11/2018 (Centri commerciali);
13. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.9, DM Interno 06/04/2020 (Asili nido);
14. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.10, DM Interno 10/07/2020 (Edifici tutelati aperti al pubblico, destinati a contenere musei, gallerie, esposizioni, mostre, biblioteche e archivi);
15. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.11, DM Interno 29/03/2020 (Strutture sanitarie);
16. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.12, DM Interno 14/10/2021 (Edifici tutelati aperti al pubblico, altre attività);
17. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.13, DM 30/03/2022 (Chiusure d'ambito degli edifici civili);
18. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.14, DM 19/05/2022 (Edifici di civile abitazione);
19. Norme tecniche di prevenzione incendi - Regola tecnica verticale V.15, DM 22/11/2022 (Attività di intrattenimento e di spettacolo a carattere pubblico);
20. Nota DCPREV prot. N. 9962 del 24/07/2020, "Decreto 3 agosto 2015 e s.m.i. – Capitolo S.2 – Implementazione di soluzioni alternative di resistenza al fuoco. Chiarimenti e indirizzi applicativi";
21. Lettera circolare DCPREV prot. N. 17496 del 18/12/2020, "Requisiti tecnici antincendio per autorimesse con superficie non superiore a 300 m2";
22. Norme tecniche per le costruzioni - DM Infrastrutture e Trasporti 17/01/2018;[23]
23. UNI EN 1990:2014, Eurocodice: Criteri generali di progettazione strutturale;
24. UNI EN 1991-1-2, Eurocodice 1: Azioni sulle strutture – Parte 1-2: Azioni generali -Azioni sulle strutture esposte al fuoco", 2005;
25. 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;
26. UNI EN 1993-1-2, Eurocodice 3: Progettazione delle strutture in acciaio - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio;
27. UNI EN 1994-1-2, Eurocodice 4: Progettazione delle strutture composte acciaio-calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio;
28. 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;
29. Claraf, versione 3.0, Classificazione di resistenza al fuoco delle Costruzioni secondo le norme tecniche di prevenzioni incendi D.M. 3/8/2015, del Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del soccorso e della difesa civile, Direzione Centrale per la Prevenzione incendi, Ufficio per la protezione passiva, protezione attiva, settore merceologico e laboratori;
30. Nomogramma – Metodo grafico di valutazione della resistenza al fuoco di strutture in acciaio (basato su EN 1993-1-2 Luglio 2005), Fondazione Promozione Acciaio, 2010;
31. Competitive steel buildings through natural fire safety concept. ECSC Research 7210-SA/125,126,213,214,323,423,522,623,839,937, 1994-98. Final report 2002 - EUR 20360 EN;
32. DIFISEK+, ECSC (European Coal and Steel Community) Valorization project, 2008;
33. FRACOF "Fire behavior of Steel and Composite Floor Systems", 2010;
34. MACS+, ECSC Valorization project, 2012;
35. LOCAFI+, ECSC Valorisation project, 2018;
36. Instruction Technique – Etude de stabilité au feu a l'aide d'une approche performancielle. Grand-Duche de Luxembourg, ITM-SST 1551.1, Septembre 2012;
37. Pustorino S., Princi P., Nigro E., Caciolai M., Ponticelli L., Applicazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio alla progettazione strutturale di autorimesse aperte, fuori terra ed a spazio aperto ai sensi del D.M. 21/02/2017, Fondazione Promozione Acciaio, 2017;
38. Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P., Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio, 2010 (2019) U. Hoepli Editore;
39. Nigro E., Del Prete I., Cefarelli G., Ferraro A., Sannino D., Manfredi G. (2012). Fire Safety Engineering per Edifici Alti. Costruzioni Metalliche, n. 6, Novembre/Dicembre 2012, ACAI, pp.45-56, ISSN: 0010-9673;
40. Del Prete I., Cefarelli G., Nigro E.. Application of criteria for selecting fire scenarios for structures within fire safety engineering approach. Journal of Building Engineering, Elsevier, pp. 208-217, 2016. doi:10.1016/j.jobe.2016.10.010;
41. Tondini N., Thauvoye C., Hanus F., Vassart O., Development of an analytical model to predict the radiative heat flux to a vertical element due to a localized fire, 2019 Fire Safety Journal;
42. P. Cancelliere, D. de Silva, A. Marino, E. Nigro, L. Possidente, P. Princi, S. Pustorino, N. Tondini. Impiego di un impianto a disponibilità superiore nel progetto delle prestazioni di resistenza al fuoco di strutture di acciaio. Ingenio, 2021.

APPENDICE A

A.1 Curve nominali d'incendio

Tratte da [4], di seguito sono riportate le definizioni delle curve nominali d'incendio.

S.2.7 Curve nominali d'incendio

1. Ai fini della definizione delle soluzioni conformi di resistenza al fuoco, le classi di resistenza al fuoco sono di norma riferite all'incendio convenzionale rappresentato dalla curva nominale standard seguente:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \qquad \text{S.2-1}$$

dove:

θ_g	temperatura media dei gas di combustione	[°C]
t	tempo	[minuti]

2. Nel caso di incendi di quantità rilevanti di idrocarburi o altre sostanze con equivalente velocità di rilascio termico, ed esclusivamente per la determinazione della capacità portante delle strutture, la curva di incendio nominale standard deve essere sostituita con la curva nominale degli idrocarburi seguente:

$$\theta_g = 1080\,(1 - 0{,}325 \cdot e^{-0{,}167t} - 0{,}675 \cdot e^{-2{,}5t}) + 20 \qquad \text{S.2-2}$$

dove:

θ_g	temperatura media dei gas di combustione	[°C]
t	tempo	[minuti]

3. Nel caso di incendi sviluppatisi all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno, per queste ultime la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale esterna seguente:

$$\theta_g = 660\,(1 - 0{,}687 \cdot e^{-0{,}32t} - 0{,}313 \cdot e^{-3{,}8t}) + 20 \qquad \text{S.2-3}$$

dove:

θ_g	temperatura media dei gas di combustione	[°C]
t	tempo	[minuti]

A.2 PROCEDURA PER IL CALCOLO DEL CARICO DI INCENDIO SPECIFICO DI PROGETTO.

Tratta da [4], di seguito è riportata la procedura prevista per il calcolo del carico di incendio specifico di progetto.

S.2.9 Procedura per il calcolo del carico di incendio specifico di progetto

1. Il valore del carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ è determinato secondo la seguente relazione:

$$q_{f,d} = \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \cdot q_f \qquad \text{S.2-4}$$

dove:

$q_{f,d}$ carico d'incendio specifico di progetto [MJ/m²]

δ_{q1} fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione alla dimensione del compartimento e i cui valori sono definiti nella tabella S.2-6.

δ_{q2} è il fattore che tiene conto del rischio di incendio in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento e i cui valori sono definiti nella tabella S.2-7.

$\delta_n = \prod_i \delta_{ni}$ è il fattore che tiene conto delle differenti *misure antincendio* del compartimento ed i cui valori sono definiti nella tabella S.2-8.

q_f è il valore nominale del carico d'incendio specifico da determinarsi secondo la formula: [MJ/m²]

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \psi_i}{A} \qquad \text{S.2-5}$$

dove:

g_i massa dell'i-esimo materiale combustibile [kg]

H_i potere calorifico inferiore dell'i-esimo materiale combustibile; i valori di H_i dei materiali combustibili possono essere determinati per via sperimentale in accordo con UNI EN ISO 1716, dedotti dal prospetto E3 della norma UNI EN 1991-1-2, oppure essere mutuati dalla letteratura tecnica [MJ/kg]

m_i fattore di partecipazione alla combustione dell'i-esimo materiale combustibile pari a 0,80 per il legno e altri materiali di natura cellulosica e 1,00 per tutti gli altri materiali combustibili

ψ_i fattore di limitazione della partecipazione alla combustione dell'i-esimo materiale combustibile pari a:

0 per i materiali contenuti in contenitori appositamente progettati per resistere al fuoco per un tempo congruente con la classe di resistenza al fuoco e comunque classe minima almeno EI 15 (es. armadi resistenti al fuoco per liquidi infiammabili, …);

0,85 per i materiali contenuti in contenitori non combustibili, che conservino la loro integrità durante l'esposizione all'incendio e non appositamente progettati per resistere al fuoco (es. fusti, contenitori o armadi metallici, …);

1 in tutti gli altri casi (es. barattoli di vetro, bombolette spray, …);

A *superficie lorda* del piano del compartimento o, nel caso degli incendi localizzati, *superficie lorda* effettiva di distribuzione del carico di incendio. [m²]

Nota Si riporta un esempio di calcolo nella tabella S.2-9

Superficie lorda del compartimento [m²]	δ_{q1}	Superficie lorda del compartimento [m²]	δ_{q1}
A < 500	1,00	2500 ≤ A < 5000	1,60
500 ≤ A < 1000	1,20	5000 ≤ A < 10000	1,80
1000 ≤ A < 2500	1,40	A ≥ 10000	2,00

Tabella S.2-6: Parametri per la definizione del fattore δ_{q1}

Classi di rischio	Descrizione	δ_{q2}
I	Aree che presentano un basso rischio di incendio in termini di probabilità di innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	0,80
II	Aree che presentano un moderato rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione di un incendio e possibilità di controllo dell'incendio stesso da parte delle squadre di emergenza	1,00
III	Aree che presentano un alto rischio di incendio in termini di probabilità d'innesco, velocità di propagazione delle fiamme e possibilità di controllo dell'incendio da parte delle squadre di emergenza	1,20

Tabella S.2-7: Parametri per la definizione del fattore δ_{q2}

Misura antincendio minima		δ_{ni}	
Controllo dell'incendio di livello di prestazione III (capitolo S.6)	rete idranti con protezione interna	δ_{n1}	0,90
	rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n2}	0,80
Controllo dell'incendio di livello di prestazione IV (capitolo S.6)	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna	δ_{n3}	0,54
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna	δ_{n4}	0,72
	sistema automatico ad acqua o schiuma e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n5}	0,48
	altro sistema automatico e rete idranti con protezione interna ed esterna	δ_{n6}	0,64
Gestione della sicurezza antincendio di livello di prestazione II [1] (capitolo S.5)		δ_{n7}	0,90
Controllo di fumi e calore di livello di prestazione III (capitolo S.8)		δ_{n8}	0,90
Rivelazione ed allarme di livello di prestazione III (capitolo S.7)		δ_{n9}	0,85
Operatività antincendio di livello di prestazione IV (capitolo S.9)		δ_{n10}	0,81
[1] Gli addetti antincendio devono garantire la presenza continuativa durante le 24 ore.			

Tabella S.2-8: Parametri per la definizione dei fattori δ_{ni}

2. Qualora, in alternativa all'equazione S.2-5, si pervenga alla determinazione di q_f attraverso una valutazione statistica del carico di incendio per la specifica attività, si deve far riferimento a valori con probabilità di superamento < 20%. Considerazioni aggiuntive utili a tale scopo sono fornite nel paragrafo S.2.9.1.
3. In caso di presenza di strutture portanti lignee nel compartimento va seguita la procedura di cui al paragrafo S.2.9.2
4. Fatto salvo quanto indicato al comma 6 del paragrafo S.2.5, lo spazio di riferimento generalmente coincide con il compartimento antincendio considerato e il carico di incendio specifico è quindi riferito alla *superficie lorda del piano* del

compartimento stesso, nell'ipotesi di una distribuzione sufficientemente uniforme del carico di incendio.

5. In caso di marcata e ben identificata distribuzione *disomogenea* del carico di incendio, il valore del *carico d'incendio specifico* q_f è riferito anche all'effettiva distribuzione dello stesso.

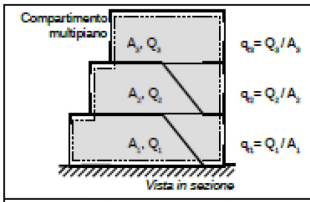
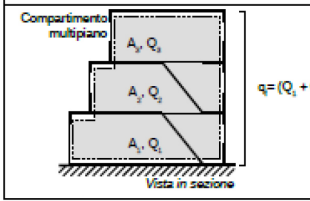
	Nel caso di compartimento *multipiano* ricadente nella fattispecie di cui al comma 6 del paragrafo S.2.5, si calcolano carichi di incendio specifici distinti per piano, pur essendo unico il compartimento.
	Nel caso di compartimento *multipiano* non ricadente nella fattispecie di cui al comma 6 del paragrafo S.2.5, la *superficie lorda del piano del compartimento* A per il calcolo del q_f è pari all'area della proiezione in pianta del compartimento. In questo esempio: $A = A_1$

Tabella S.2-9: Esempi di calcolo del carico di incendio specifico q_f per compartimenti multipiano

S.2.9.1 Indicazioni aggiuntive sulla determinazione statistica del carico di incendio

1. Per calcolare il valore al frattile 80% del carico di incendio partendo da valori reperiti in letteratura tecnica, da considerare come valori medi, è necessario moltiplicare il valore medio per un coefficiente amplificativo, secondo i seguenti criteri:
   a. per attività con variabilità molto limitate per quanto riguarda il mobilio o le merci in deposito, come ad esempio abitazioni, alberghi, ospedali, uffici e scuole è possibile scegliere un valore del coefficiente moltiplicativo compreso tra 1,20 e 1,50;
   b. per attività con variabilità maggiori per quanto riguarda il mobilio o le merci in deposito, come ad esempio centri commerciali, grandi magazzini attività industriali è possibile scegliere un valore del coefficiente moltiplicativo compreso tra 1,20 e 1,75.

   All'interno di tali intervalli può essere individuato il valore del coefficiente appropriato alla trattazione del caso in esame.
2. Nell'appendice E della norma UNI EN 1991-1-2 è presente la tabella S.2-10 ove sono riportate le densità di carico di incendio per diverse destinazioni d'uso, sia come valore medio che come frattile 80%.

Attività	Valore medio [MJ/m^2]	Frattile 80% [MJ/m^2]
Civili abitazioni	780	948
Ospedali (stanza)	230	280
Alberghi (stanza)	310	377
Biblioteche	1500	1824
Uffici	420	511
Scuole	285	347
Centri commerciali	600	730
Teatri (cinema)	300	365
Trasporti (spazio pubblico)	100	122

Tabella S.2-10: Densità di carico di incendio da UNI EN 1991-1-2

A.3 CARICO DI INCENDIO NON UNIFORMEMENTE DISTRIBUITO SOLUZIONI CONFORMI: ESEMPIO DI CALCOLO DEL CARICO DI INCENDIO DI PROGETTO

Nel capitolo 2, al paragrafo 2.3.3.2, è stato richiamato il metodo di calcolo indicato nella normativa vigente [2] per la determinazione della soluzione conforme di un compartimento in cui è presente un carico di incendio non uniformemente distribuito.
Di seguito è riportato un esempio di applicazione di tale metodo al caso di un'autorimessa aperta, classificata secondo la specifica RTV di tipo SA o SB, che viene progettata per il livello III di prestazione.
Il layout dell'autorimessa, gli schemi delle strutture portanti e la distribuzione degli autoveicoli previsti sono riportati nella Fig. A.3-2. Il valore del carico di incendio relativo a un'autovettura e a un veicolo commerciale (VAN) sono assunti rispettivamente pari a 6789 MJ e a 18900 MJ (tratti da [10]). In particolare è stata assunta la presenza di autovetture e di veicoli commerciali (1 ogni 7 posti auto, in analogia a quanto previsto nello scenario tipo S.2 di [10]).

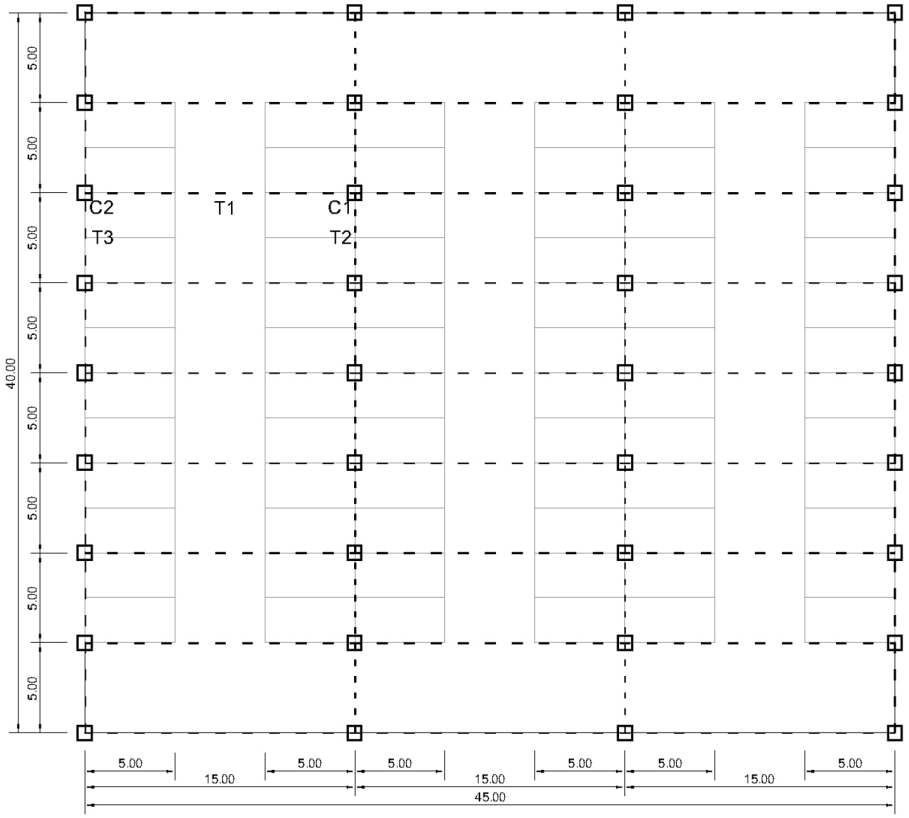
Sulla base di questi dati di progetto sono stati ottenuti i valori del carico di incendio specifico di progetto utili, nell'ambito delle soluzioni conformi, per la definizione della classe di resistenza al fuoco. L'esempio è risolto considerando tre diverse aree del compartimento (vedi Fig. A-3-2):
- nella prima (caso A) si è fatto riferimento all'area complessiva del compartimento, ossia alla superfice di 1800 m^2;
- nella seconda (caso B, che riguarda in particolare le colonne tipo C1 e le travi tipo T1 e T2) si è fatto riferimento all'area di stazionamento centrale, ossia alla superficie di 300 m^2;
- nella terza (caso C, che riguarda in particolare le colonne tipo C2 e le travi tipo T1 e T3) si è fatto riferimento all'area di stazionamento, ossia alla superficie di 150 m^2.

Tenendo conto dei coefficienti correttivi del carico di incendio riportati in tabella, la classe del compartimento è pertanto pari alla maggiore dei casi esaminati ovvero 45, che è determinata dai risultati dei casi B e C.
Si osservi che la RTV autorimesse, di cui al D.M. 15/05/2020 [10] prevede per un'autorimessa aperta, di tipo SA o SB, una classe minima di resistenza al fuoco pari a 30[7]. Quindi in tal caso la classe minima calcolata per la soluzione conforme prevale sulla classe minima imposta dalla RTV.

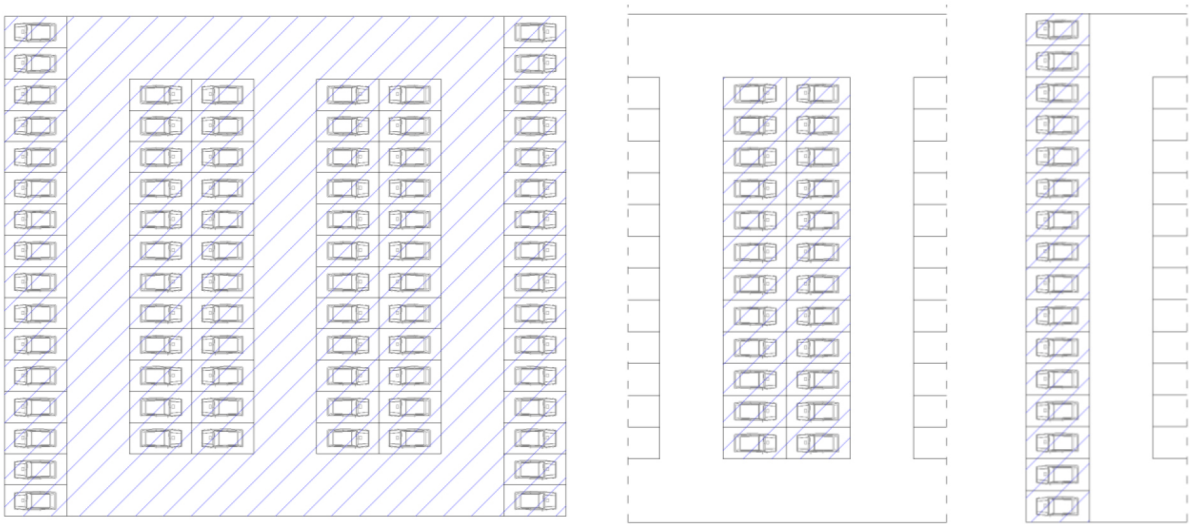
Nel caso di un'autorimessa chiusa la stessa norma prevede una classe minima di resistenza al fuoco pari a 60 o 90 minuti, a seconda che si tratti di autorimesse di tipo HA, HB, oppure HC e HD. In questo caso, considerando gli stessi conteggi eseguiti precedentemente validi per l'autorimessa chiusa, la classe minima imposta dalla RTV prevarrebbe ovviamente su quella calcolata per la soluzione conforme qualora minore. Si evidenzia anche la dipendenza della classe di resistenza al fuoco di un'autorimessa dall'altezza antincendi dell'opera da costruzione di cui fa parte, prevedendo salti da 30 a 60 e da 60 a 90 qualora tale valore sia maggiore di 24 m.



Fig. A.3-1 - Esempio di applicazione: autorimessa aperta, tipo SA o SB.



Pianta strutture e layout posti auto



Caso A Caso B Caso C

Caso	Area di pertinenza del carico d'incendio	N. Autoveicoli		Fattori δ (ipotesi di protezione attiva)				$q_{f,d}$	R
	m^2	Auto	VAN	δq1	δq2	δn2	δn9	MJ/mq	Liv. III
A	1800	62	10	1.4	1	0.8	0.85	323	30
B	300	21	3					632	45
C	150	11	1					594	45
CLASSE DEL COMPARTIMENTO									45

Figura A.3-2 – Esempio di applicazione: autorimessa.

APPENDICE B
SCENARI DI INCENDIO PER LA PROGETTAZIONE DELLE SOLUZIONI ALTERNATIVE NEL CASO DI AUTORIMESSE APERTE - (Tratto da RTV Autorimesse, DM 21-02-2017)

Tratti da [4], RTV Autorimesse, di seguito sono riportati i criteri indicati per la definizione degli scenari che possono essere adottati nella progettazione delle soluzioni alternative di autorimesse aperte aventi le caratteristiche di seguito specificate.

E' da notare che i criteri riportati al punto 8 possono essere risolti in forma più puntuale impiegando la più estesa trattazione degli incendi localizzati riportata in Appendice C di [25].

V. 6.7 Metodi

V.6.7.1 Scenari per la verifica della capacità portante in caso di incendio

1. Ai fini dell'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio, possono essere adottate le indicazioni di seguito riportate.
2. Possono essere impiegati gli *scenari d'incendio di progetto* (cap.M2) descritti nel presente paragrafo per le autorimesse aventi entrambe le seguenti caratteristiche:
   a) autorimessa aperta le cui aperture di smaltimento costituiscano almeno il 50% della superficie complessiva della facciata su cui sono attestate;
   b) autorimessa fuori terra ed a spazio aperto.
3. Per la definizione degli incendi naturali di progetto, si considerano le curve RHR(t) di cui alle tabelle V.6-5, V.6-6 e V. 6-7 in cui il tempo è riferito all'istante d'innesco del veicolo.

Tempo dopo l'innesco [s]	0	240	960	1440	1500	1620	2280	4200
RHR(t) [kW]	0	1400	1400	5500	8300	4500	1000	0

Tabella V.6- 5: Curva RHR(t) per autoveicolo (primo innesco, RHR_{max} = 8300 kW)

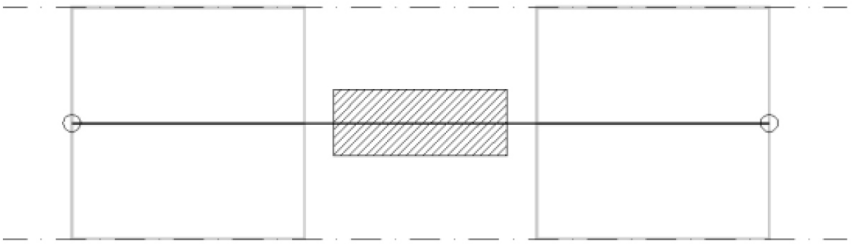
Tempo dopo l'innesco [s]	0	60	600	960	1020	1140	1800	3720
RHR(t) [kW]	0	2400	2400	5500	8300	4500	1000	0

Tabella V.6- 6:Curva RHR(t) per autoveicolo (propagaz. al successivo veicolo, RHR_{max} = 8300 kW)

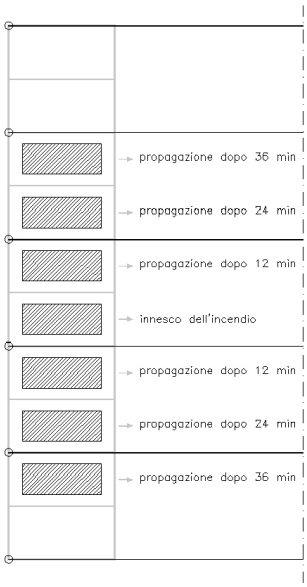
Tempo dopo l'innesco [s]	0	300	900	1500
RHR(t) [kW]	0	18000	18000	0

Tabella V.6- 7: Curva RHR(t) per autoveicolo commerciale (primo innesco e propagazione al successivo veicolo, RHR_{max} = 18000 kW)

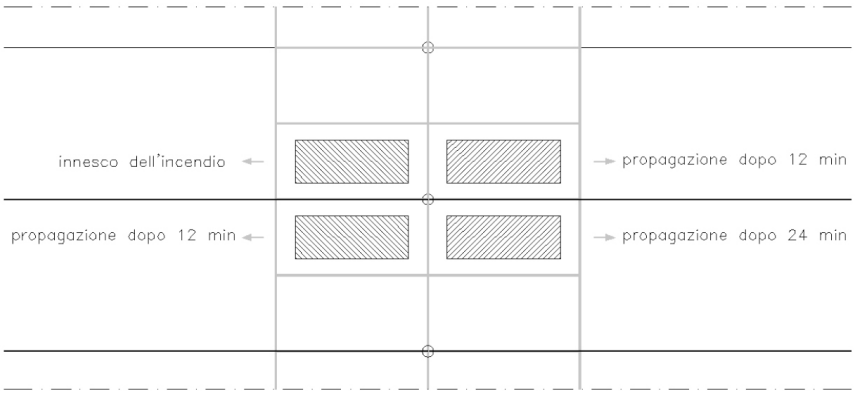
4. Con riferimento alla disposizione tipica di parcheggio all'interno di un'autorimessa, il tempo di propagazione dell'incendio da un veicolo al veicolo adiacente può essere assunto pari a 12 minuti.
5. Gli scenari di incendio di progetto da impiegare (Illustrazione V 6-1) sono i seguenti:



a) *scenario S1: caratterizzato dall'incendio di un autoveicolo commerciale in corrispondenza della mezzeria della trave o del solaio;*



b) *scenario S2: caratterizzato dalla propagazione simmetrica dell'incendio a partire dall'autoveicolo centrale con un tempo di ritardo dell'innesco pari a 12 minuti, coinvolgendo complessivamente 7 veicoli. Tra questi deve essere prevista la presenza di un autoveicolo commerciale posto al centro, quindi incendiato per primo, o di fianco al primo autoveicolo innescato;*



c) *Scenario S3: caratterizzato dall'incendio di 4 veicoli posti intorno ad una colonna. L'incendio si avvia da uno di essi, dopo 12 minuti si propaga a 2 veicoli, dopo ulteriori 12 minuti si propaga all'ultimo veicolo; uno dei veicoli deve essere un autoveicolo commerciale.*

Illustrazione V.6- 1 : Schematizzazione degli scenari di incendio di progetto

6. Gli scenari descritti sono adattati caso per caso in relazione ad eventuali conformazioni particolari del piano di parcamento.

7. Nell'illustrazione V.6-2 si riportano a titolo esemplificativo le curve RHR(t) nel caso dello scenario di incendio di progetto S3, supponendo che il secondo veicolo ad incendiarsi sia un *autoveicolo commerciale*.

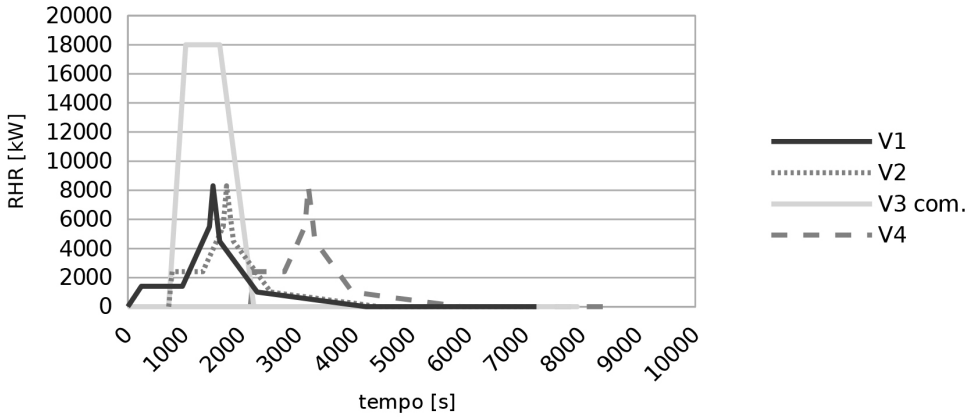


Illustrazione V.6- 2: Curve RHR(t) per lo scenario S3

8. Nel caso di adozione di modelli di incendio numerici semplificati dell'Eurocodice UNI EN 1991-1-2 rappresentativi di incendi localizzati, gli stessi vanno applicati con le seguenti prescrizioni:

    a) per la determinazione della temperatura di una colonna ci si riferisce cautelativamente al riscaldamento della trave posta sulla sua sommità;

    b) per gli scenari S2 ed S3, nel caso di modello di incendio localizzato con fiamma non impattante il soffitto, la definizione del flusso termico necessaria per il modello di riscaldamento degli elementi strutturali è condotta cautelativamente con riferimento all'incendio con fiamma impattante il soffitto.

V.6.6 Metodi

V.6.6.1 Scenari per la verifica della capacità portante in caso di incendio

1. Ai fini dell'applicazione dei metodi dell'ingegneria della sicurezza antincendio, possono essere adottate le indicazioni di seguito riportate.
2. Possono essere impiegati gli *scenari d'incendio di progetto* (capitolo M.2) descritti nel presente paragrafo per le autorimesse aventi le seguenti caratteristiche:
   a. autorimesse aperte le cui aperture di smaltimento costituiscano almeno il 50% della superficie complessiva della facciata su cui sono attestate;
   b. autorimesse con compartimenti fuori terra organizzate senza box auto.
3. Per la definizione degli incendi naturali di progetto, si considerano le curve RHR(t) di cui alle tabelle V.6-5, V.6-6, V.6-7 in cui il tempo è riferito all'istante d'innesco del veicolo.
4. Con riferimento alla disposizione tipica di parcheggio all'interno di un'autorimessa, il tempo di propagazione dell'incendio da un veicolo al veicolo adiacente può essere assunto pari a 12 minuti.
5. Gli scenari di incendio di progetto da impiegare (illustrazione V.6-1) sono i seguenti:
   a. scenario S1: caratterizzato dall'incendio di un *autoveicolo commerciale* in corrispondenza della mezzeria della trave o del solaio;
   b. scenario S2: caratterizzato dalla propagazione simmetrica dell'incendio a partire dall'*autoveicolo* centrale con un tempo di ritardo dell'innesco pari a 12 minuti, coinvolgendo complessivamente 7 veicoli. Tra questi deve essere prevista la presenza di un *autoveicolo commerciale* posto al centro, quindi incendiato per primo, o di fianco al primo *autoveicolo* innescato;
   c. scenario S3: caratterizzato dall'incendio di 4 veicoli posti intorno ad una colonna. L'incendio si avvia da uno di essi, dopo 12 minuti si propaga a 2 veicoli, dopo ulteriori 12 minuti si propaga all'ultimo veicolo; uno dei veicoli deve essere un *autoveicolo commerciale*.
6. Gli scenari descritti sono adattati caso per caso in relazione ad eventuali conformazioni particolari del piano di parcamento.
7. Nell'illustrazione V.6-2 si riportano a titolo esemplificativo le curve RHR(t) nel caso dello scenario di incendio di progetto S3, supponendo che il secondo veicolo ad incendiarsi sia un *autoveicolo commerciale*.
8. Nel caso di adozione di modelli di incendio numerici semplificati dell'Eurocodice UNI EN 1991-1-2 rappresentativi di incendi localizzati, gli stessi vanno applicati con le seguenti prescrizioni, in assenza di indicazioni più precise:

Nota Ad esempio, un utile riferimento di dettaglio è costituito dal metodo LOCAFI.

   a. per la determinazione della temperatura di una colonna ci si riferisce cautelativamente al riscaldamento della trave posta sulla sua sommità;
   a. per gli scenari S2 ed S3, nel caso di modello di incendio localizzato con fiamma non impattante il soffitto, la definizione del flusso termico necessaria per il modello di riscaldamento degli elementi strutturali è condotta cautelativamente con riferimento all'incendio con fiamma impattante il soffitto.

9. In caso di presenza di sistemi di controllo dell'incendio di tipo automatico, all'istante t_x di entrata in funzione dell'impianto automatico (capitolo M.2):
   a. le curve di progetto di cui alle tabelle V.6-5, V.6-7 possono essere ridotte fino al 50% della potenza termica indicata, mantenendo l'analogo andamento temporale;
   b. può essere escluso l'effetto di propagazione dell'incendio ad altri autoveicoli.

Nota A differenza degli incendi di materiali in deposito, la carrozzeria degli autoveicoli influenza l'efficacia dei sistemi automatici di controllo dell'incendio; pertanto la curva di rilascio della potenza termica non può essere limitata al valore raggiunto dall'incendio all'istante t_x di attivazione degli stessi sistemi ma si possono comunque ridurre percentualmente i valori della potenza termica rilasciata, conservandone lo stesso andamento nel tempo. Utili riferimenti sono acquisibili dalla norma prEN 12101-11.

Tempo dopo l'innesco [s]	0	240	960	1440	1500	1620	2280	4200
RHR(t) [kW]	0	1400	1400	5500	8300	4500	1000	0

Tabella V.6-5: Curva RHR(t) per autoveicolo (primo innesco; carico di incendio pari a 6789 MJ)

Tempo dopo l'innesco [s]	0	60	600	960	1020	1140	1800	3720
RHR(t) [kW]	0	2400	2400	5500	8300	4500	1000	0

Tabella V.6-6: Curva RHR(t) per autoveicolo (propagazione al successivo veicolo; carico di incendio pari a 6747 MJ)

Tempo dopo l'innesco [s]	0	300	900	1500
RHR(t) [kW]	0	18000	18000	0

Tabella V.6-7: Curva RHR(t) per autoveicolo commerciale (primo innesco e propagazione al successivo veicolo; carico di incendio pari a 18900 MJ)

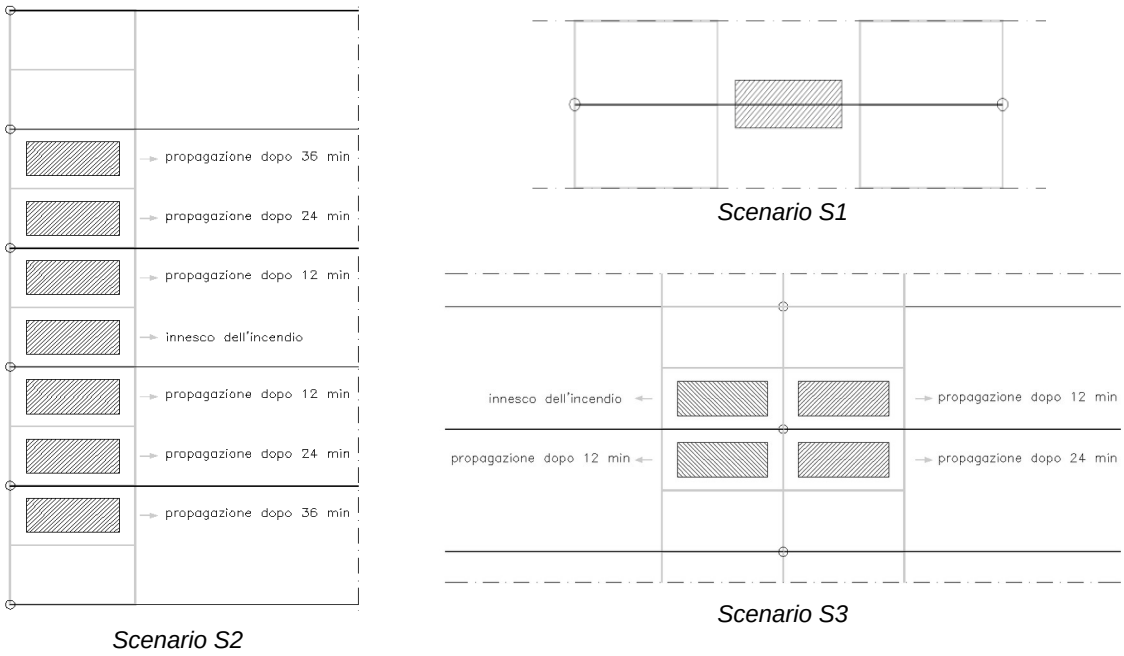


Illustrazione V.6-1: Schematizzazione degli scenari di incendio di progetto

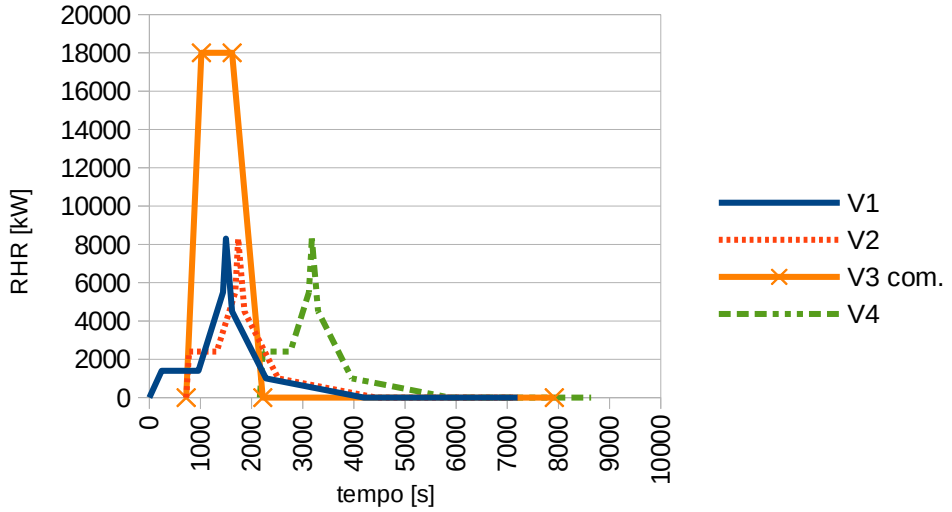


Illustrazione V.6-2: Curve RHR(t) per lo scenario S3

ISTRUZIONI TECNICHE PER LA SICUREZZA DELLE STRUTTURE DI ACCIAIO IN CASO DI INCENDIO

La progettazione delle **prestazioni di resistenza al fuoco delle strutture** di un'opera da costruzione può essere eseguita seguendo un approccio di tipo prescrittivo, con le cosiddette **soluzioni conformi,** oppure un approccio di tipo prestazionale, con le cosiddette **soluzioni alternative.** E' questa una delle più importanti novità della vigente normativa di prevenzione incendi, introdotta con i decreti del Ministero dell'Interno del 3 agosto 2015 e del 18 ottobre 2019.

Queste **Istruzioni tecniche** forniscono un quadro generale dei metodi di calcolo disponibili per il progetto delle prestazioni di resistenza al fuoco delle **strutture di acciaio**. Partendo dalle indicazioni utili per la definizione delle più semplici soluzioni progettuali, le soluzioni conformi, esse forniscono istruzioni per affrontare le fase del progetto delle soluzioni alternative (modello dell'incendio, determinazione del trasferimento di calore sulla struttura portante ed analisi del comportamento strutturale ad elevate temperature), con riferimenti ai diversi metodi di calcolo disponibili e ai corrispondenti campi di applicazione, in modo da guidare verso un'efficace e corretta individuazione delle soluzioni progettuali.
L'applicazione dei **metodi dell'ingegneria antincendio** al **progetto strutturale** è fondata sulla coniugazione delle due discipline, l'ingegneria strutturale e l'ingegneria antincendio. In tal modo è possibile ottenere i migliori risultati di una progettazione di tipo prestazionale, che consentono di ricercare obiettivi di diversa natura, specifici del singolo progetto, ad esempio rivolti all'incremento della sicurezza di una particolare attività o di una parte specifica della struttura di un'attività, a specifiche soluzioni progettuali di tipo architettonico-funzionale, a obiettivi di semplificazione costruttiva, di economia o di ottimizzazione della manutenzione delle opere da costruzione.

Le **Istruzioni tecniche** sono rivolte in particolare ai **progettisti delle strutture e della sicurezza** ed agli **organismi di controllo della sicurezza**. Per i progettisti esse forniscono una guida alla scelta del più appropriato approccio da impiegare per la specifica esigenza progettuale, mediante l'identificazione delle procedure previste dalla normativa vigente e dei metodi di calcolo che possono essere utilizzati in ogni fase della progettazione. La presentazione dei diversi metodi di calcolo è accompagnata da indicazioni utili per l'individuazione dei parametri progettuali necessari per la loro applicazione e del relativo campo di applicazione, fornendo pertanto utili indicazioni per il confronto con gli organismi di controllo nella fase di approvazione dei progetti.

Il volume è stato scritto nell'ambito delle attività della **Commissione tecnica per la sicurezza delle costruzioni di acciaio in caso di incendio,** nelle quali il tema della progettazione è sviluppato prestando particolare attenzione all'evoluzione della ricerca e della normativa. Gli argomenti trattati hanno carattere prettamente multidisciplinare, per questo il volume si avvale di un **Comitato consultivo** di esperti costituito ad hoc, che comprende i settori delle professioni impegnate nella progettazione e nella realizzazione delle strutture di acciaio, della normativa strutturale ed antincendio, della ricerca e della sperimentazione.

Fondazione
Promozione Acciaio

Fondazione Promozione Acciaio
Via Vivaio 11 - 20122 Milano
Tel. +39 02.86313020 - Mail. segreteria@fpacciaio.it
www.promozioneacciaio.it