

LA RESISTENZA AL FUOCO DELLE COSTRUZIONI DI ACCIAIO

**ai sensi delle Norme tecniche di prevenzione incendi
e delle Norme tecniche per le costruzioni**

martedì 5 novembre 2024 - ore 9:00 / 17:00

Aula Magna, ISA - Istituto Superiore Antincendi, Via del Commercio 13, Roma

ORGANIZZATO DA



Fondazione
Ordine degli Ingegneri
Provincia di Roma

IN COLLABORAZIONE CON



CON IL PATROCINIO DI

oice



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI

La prestazione di resistenza al fuoco delle costruzioni di acciaio: criteri progettuali e metodi di calcolo

Prof. ing. Emidio NIGRO

Di.St. - Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Università di Napoli Federico II

E-mail: emidio.nigro@unina.it



DIPARTIMENTO
DI ECCELLENZA
MUR

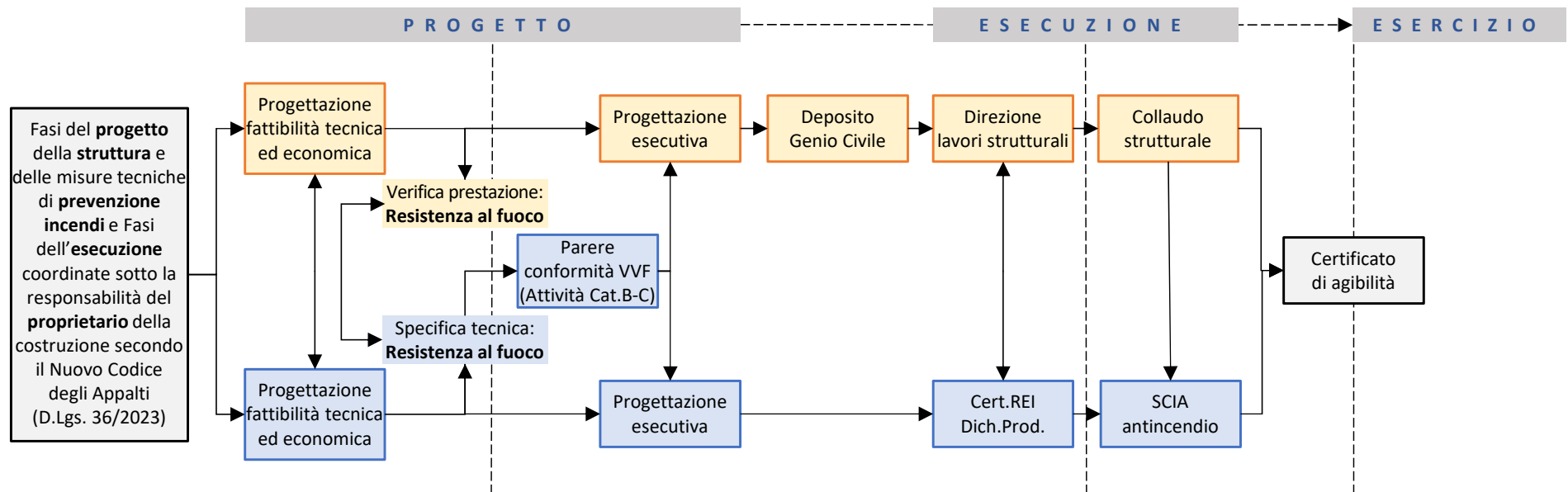
QUADRO NORMATIVO PER LA SICUREZZA STRUTTURALE

Italiane

Ministero dell'Interno Decreto 16 febbraio 2007	}	D.M. 03/08/2015 NORME TECNICHE DI PREVENZIONE INCENDI
Ministero dell'Interno Decreto 9 marzo 2007		
Ministero dell'Interno Decreto 9 maggio 2007		
Ministero Infrastrutture DM 17 gennaio 2018		<i>Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»</i>
Circolare NTC2018 n. 7 del 21 gennaio 2019		<i>Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni» di cui al D.M. 17 gennaio 2018</i>
EN 1990	Europee	<i>Eurocodice – Criteri generali di progettazione strutturale</i>
EN 1991-1-2		<i>Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture – Parte 1-2: <u>Azioni sulle strutture esposte al fuoco</u></i>
EN 1992-1-2		<i>Eurocodice 2 – Progettazione delle <u>strutture di calcestruzzo</u> – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio</i>
EN 1993-1-2		<i>Eurocodice 3 – Progettazione delle <u>strutture di acciaio</u> – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio</i>
EN 1994-1-2		<i>Eurocodice 4 – Progettazione delle <u>strutture composte acciaio-calcestruzzo</u> – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio</i>

RESISTENZA AL FUOCO: razionalizzazione e semplificazione delle fasi operative

ITER DELLE FASI OPERATIVE: (schema)



LEGENDA:

- (in giallo) fasi del progetto e dell'esecuzione della **struttura** ai sensi delle **Norme tecniche delle costruzioni** (DM 17-01-2018) – Prestazioni della struttura, tra cui anche la **resistenza al fuoco**;
- (in blu) fasi del progetto e dell'esecuzione della **strategia antincendio** ai sensi delle **Norme tecniche di prevenzione incendi** (DM 03-08-2015 e s.m.i.) – Prestazioni relative a 10 misure tecniche, tra cui anche la **resistenza al fuoco**.

La sicurezza strutturale in caso di incendio – NTC 2008/2018

2.5.3 COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

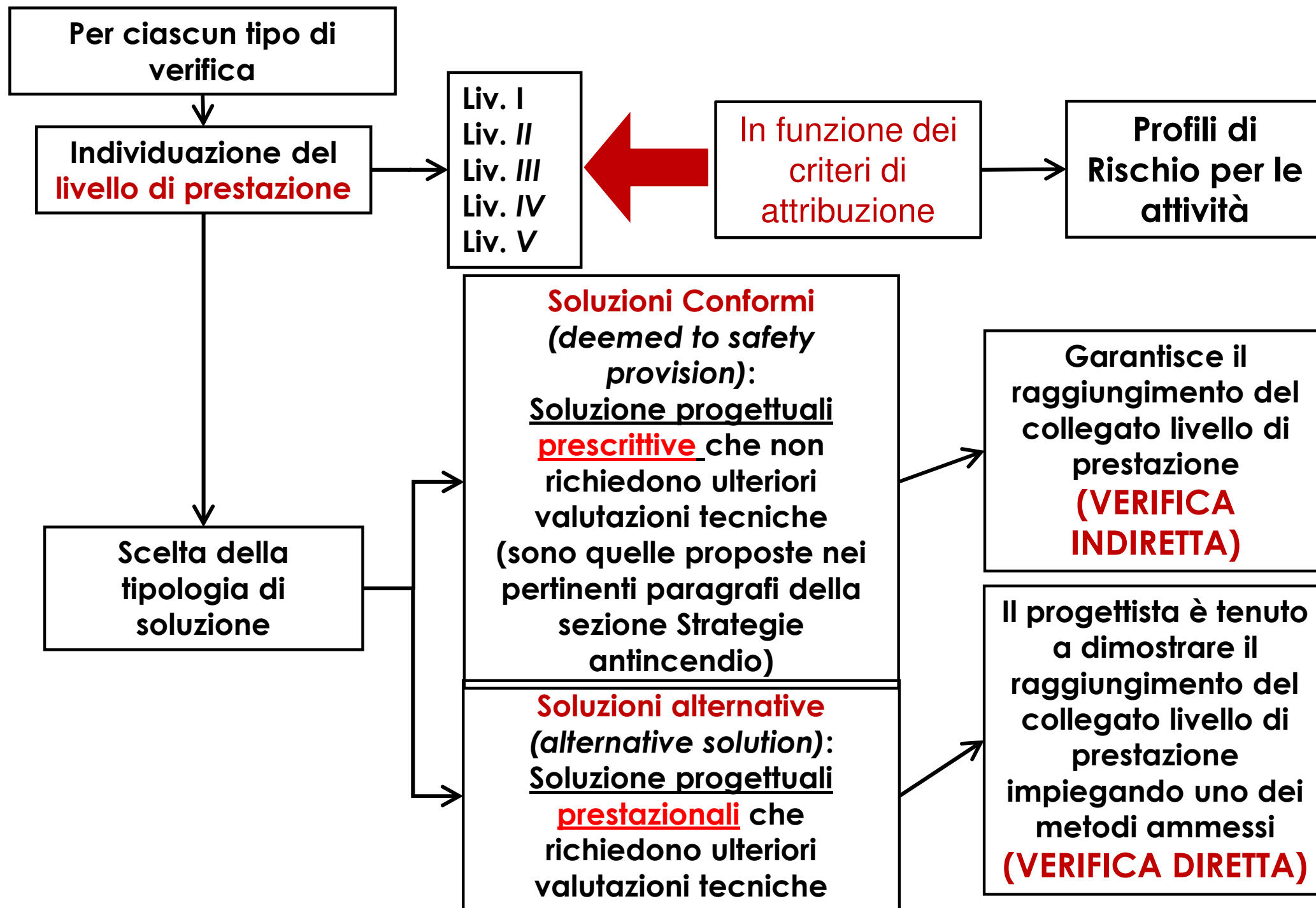
$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

Nelle combinazioni per SLE, si intende che vengono omessi i carichi Q_{kj} che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi G_2 .

D.M. 03/08/2015 - Norme Tecniche di Prevenzione Incendi



LIVELLI DI PRESTAZIONE

RESISTENZA AL FUOCO

D.M. 3 agosto 2015 e s.m.i (D.M. 18 ottobre 2019) – NTC 2018

Il nuovo **Codice di Prevenzione Incendi (D.M. 03/08/2015 e s.m.i. – D.M 18/10/2019)** modificano lievemente i livelli di prestazione per la resistenza al fuoco:

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

Tabella S.2-1: Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco

Procedura di analisi della resistenza al fuoco

L'analisi della resistenza al fuoco può essere così articolata:

- individuazione dell'**incendio di progetto** appropriato alla costruzione in esame;
- analisi della evoluzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali (**Analisi termica**);
- analisi del comportamento meccanico delle strutture esposte al fuoco (**Analisi meccanica**);
- **verifiche di sicurezza**.

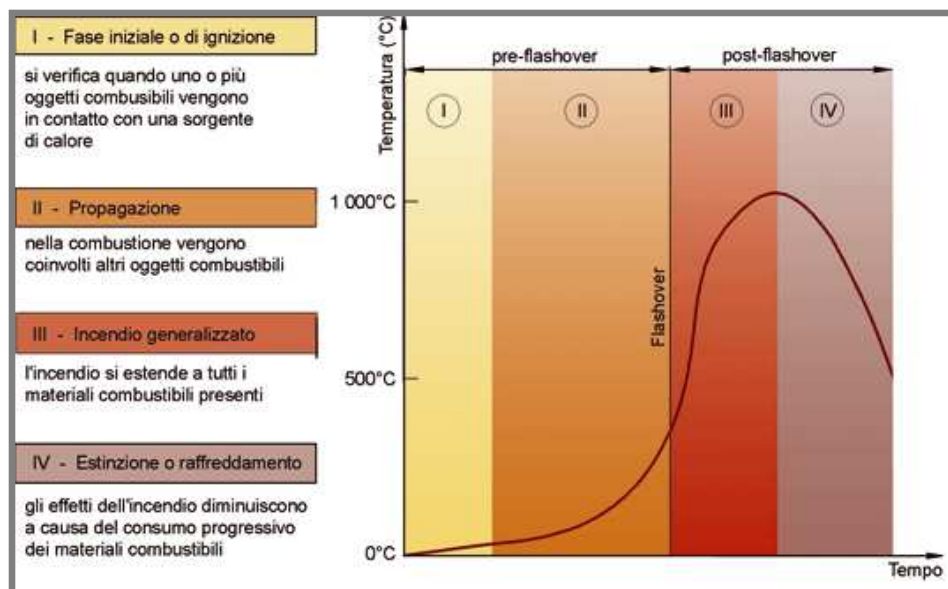


APPROCCIO INGEGNERISTICO vs APPROCCIO PRESCRITTIVO

- ✓ Metodo paritetico e alternativo all'approccio di tipo tradizionale (approccio prescrittivo)

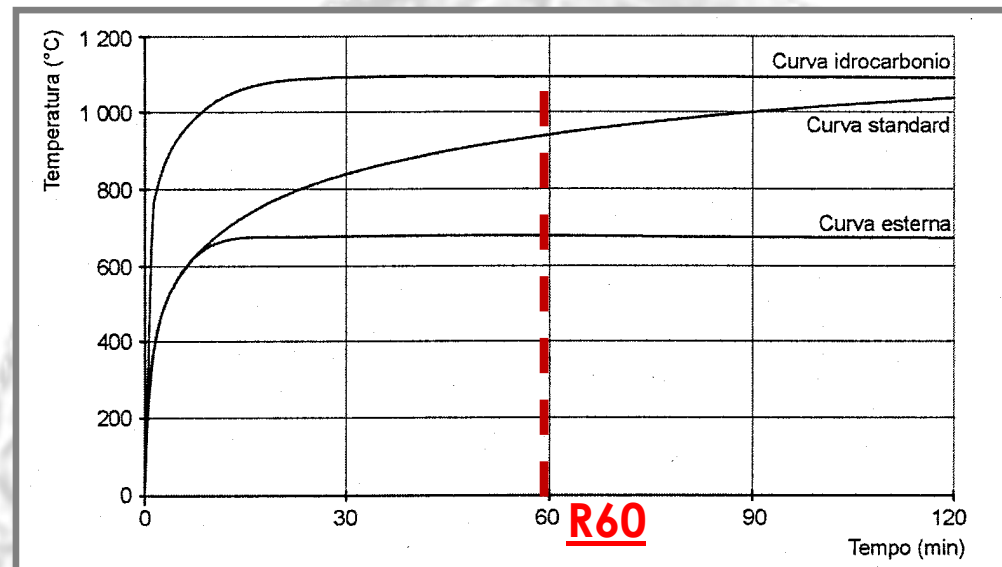
APPROCCIO INGEGNERISTICO (SOLUZIONI ALTERNATIVE)

Analisi con l'utilizzo di incendi naturali
sulla base degli scenari di incendio

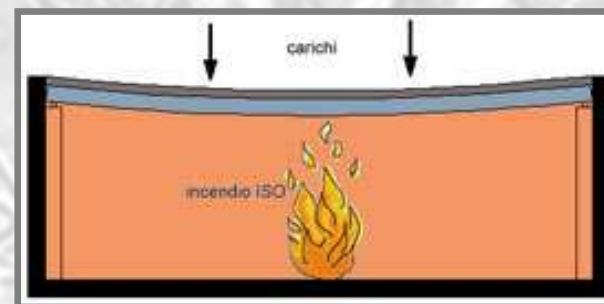


APPROCCIO PRESCRITTIVO (SOLUZIONI CONFORMI)

Analisi con incendi nominali



Prove in forno



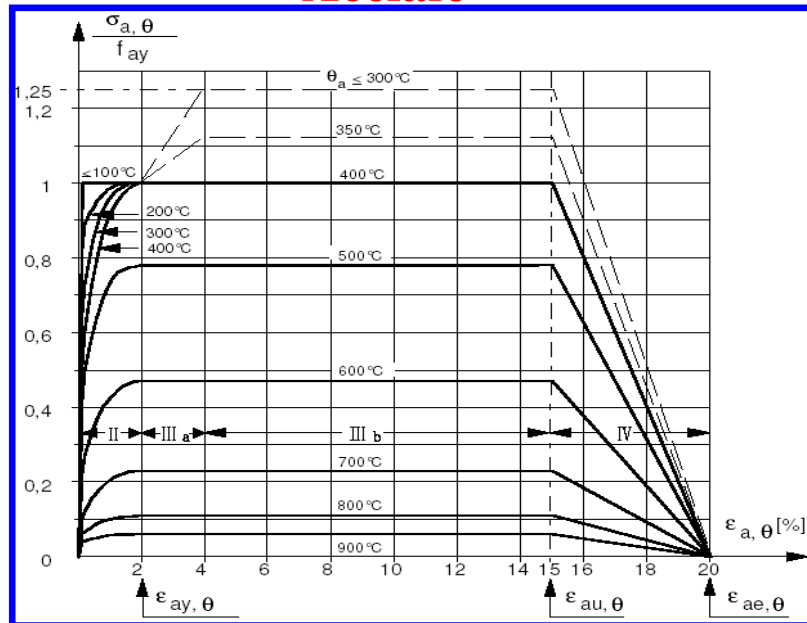
EFFETTI DELL'INCENDIO SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c}$$

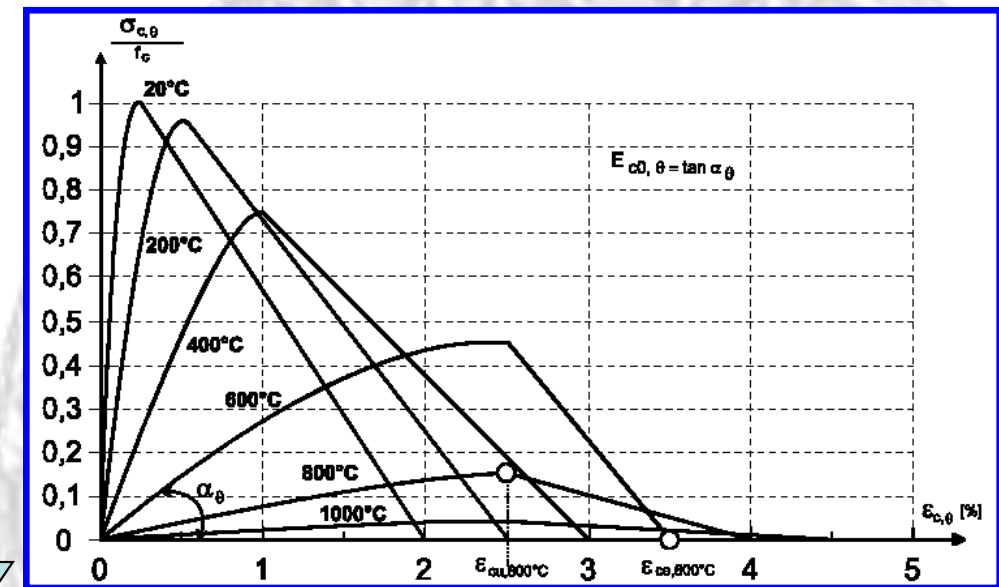
**RISCALDAMENTO DEI
MATERIALI COSTRUTTIVI**

**RIDUZIONE DI RESISTENZA E RIGIDEZZA DEL SINGOLO MATERIALE
COSTRUTTIVO, IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA RAGGIUNTA**

Acciaio



Calcestruzzo



RIDUZIONE DI RESISTENZA DELL'ELEMENTO STRUTTURALE

CURVE DI RIDUZIONE DELLA RESISTENZA ($k_{y,\theta}$) E DELLA RIGIDEZZA ($k_{E,\theta}$) DELL'ACCIAIO

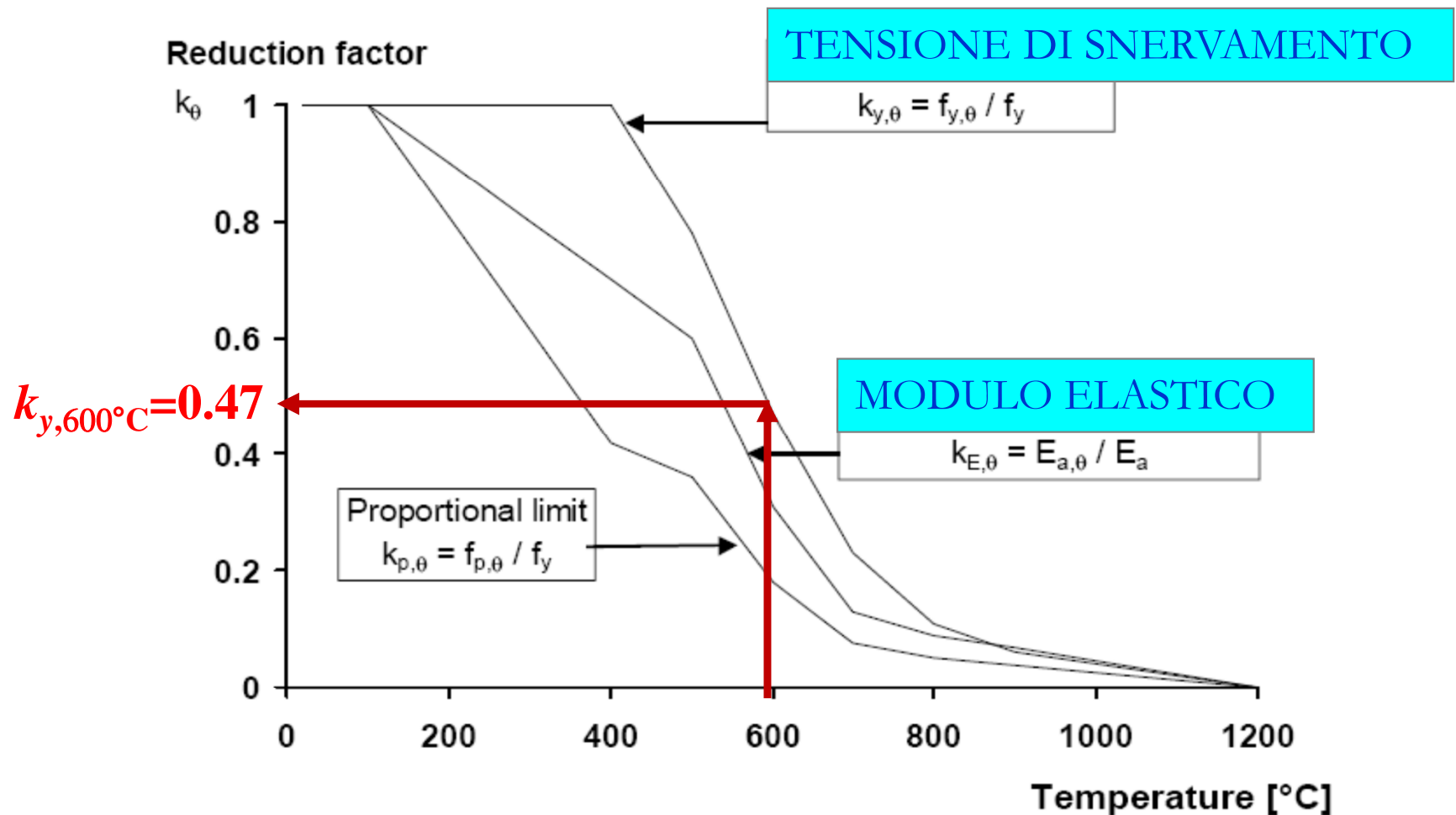


Figure 3.2: Reduction factors for the stress-strain relationship of carbon steel at elevated temperatures

LA VERIFICA DI RESISTENZA AL FUOCO

...

La resistenza al fuoco è la capacità di una costruzione, di una parte di essa o di un elemento costruttivo di mantenere, per un tempo prefissato, la capacità portante, l'isolamento termico e la tenuta alle fiamme, ai fumi e ai gas caldi della combustione nonché tutte le altre prestazioni se richieste.

LA VERIFICA DI RESISTENZA AL FUOCO

■ Nel dominio del tempo:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,richiesto}$$

(tempo di resistenza al fuoco di progetto $\geq$ tempo di resistenza al fuoco richiesto)

■ Nel dominio delle resistenze:

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

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

(resistenza in condizioni di incendio al tempo t $\geq$ sollecitazione in condizioni di incendio al tempo t)

■ Nel dominio delle temperature:

$$\Theta_{d,t} \leq \Theta_{cr,d}$$

(temperatura dell'elemento al tempo t $\leq$ temperatura critica dell'elemento)

LA SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO

VERIFICA DI RESISTENZA AL FUOCO:

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

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

(resistenza in condizioni di incendio al tempo t $\geq$ sollecitazione in condizioni di incendio al tempo t)

Combinazione di carico eccezionale in presenza di incendio:

$$G_{k,1} + G_{k,2} + P_k(t) + \sum_{i=1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d(t)$$

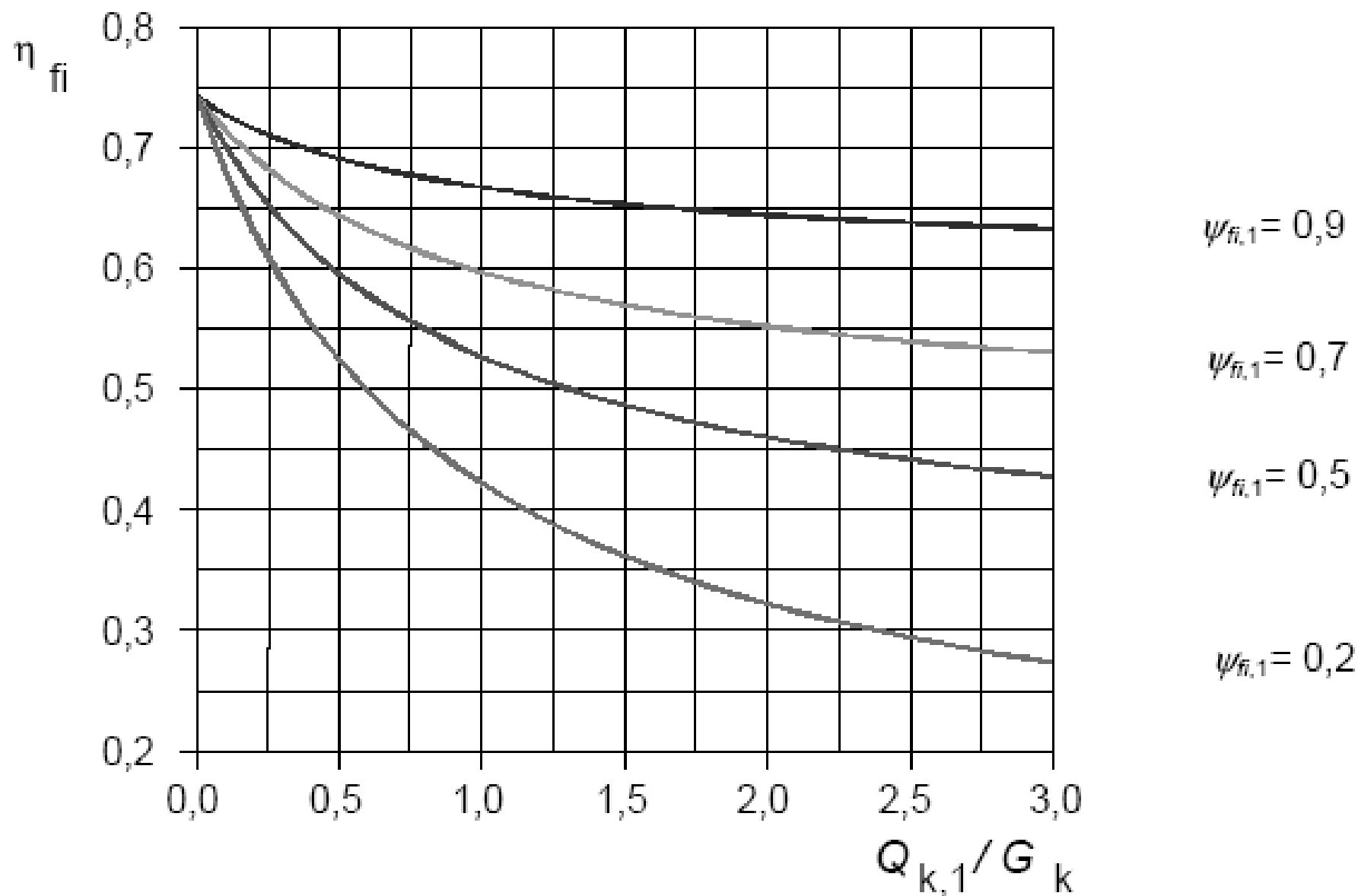
NTC 2018

Combinazione di carico
quasi permanente

Azione dell'incendio
di progetto

$$E_{fi,d,t}$$

LIVELLO DI PROGETTO IN CONDIZIONI DI INCENDIO



$$F_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot F_d$$

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_2 \cdot \xi}{\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi} = \frac{1.0 + \psi_2 \cdot \xi}{1.4 + 1.5 \cdot \xi}, \quad \text{con } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k}$$

Per gli usuali valori di ξ risulta: $\eta_{fi} = (0.5 \div 0.7)$

VERIFICA DI RESISTENZA DI UN ELEMENTO STRUTTURALE SOGGETTO AD INCENDIO

Verifica di sicurezza per esposizione a curva di incendio standard

Sovraresistenza iniziale

■ Nel dominio delle resistenze:

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

■ Nel dominio delle temperature:

$$\Theta_{d,t} \leq \Theta_{cr,d}$$

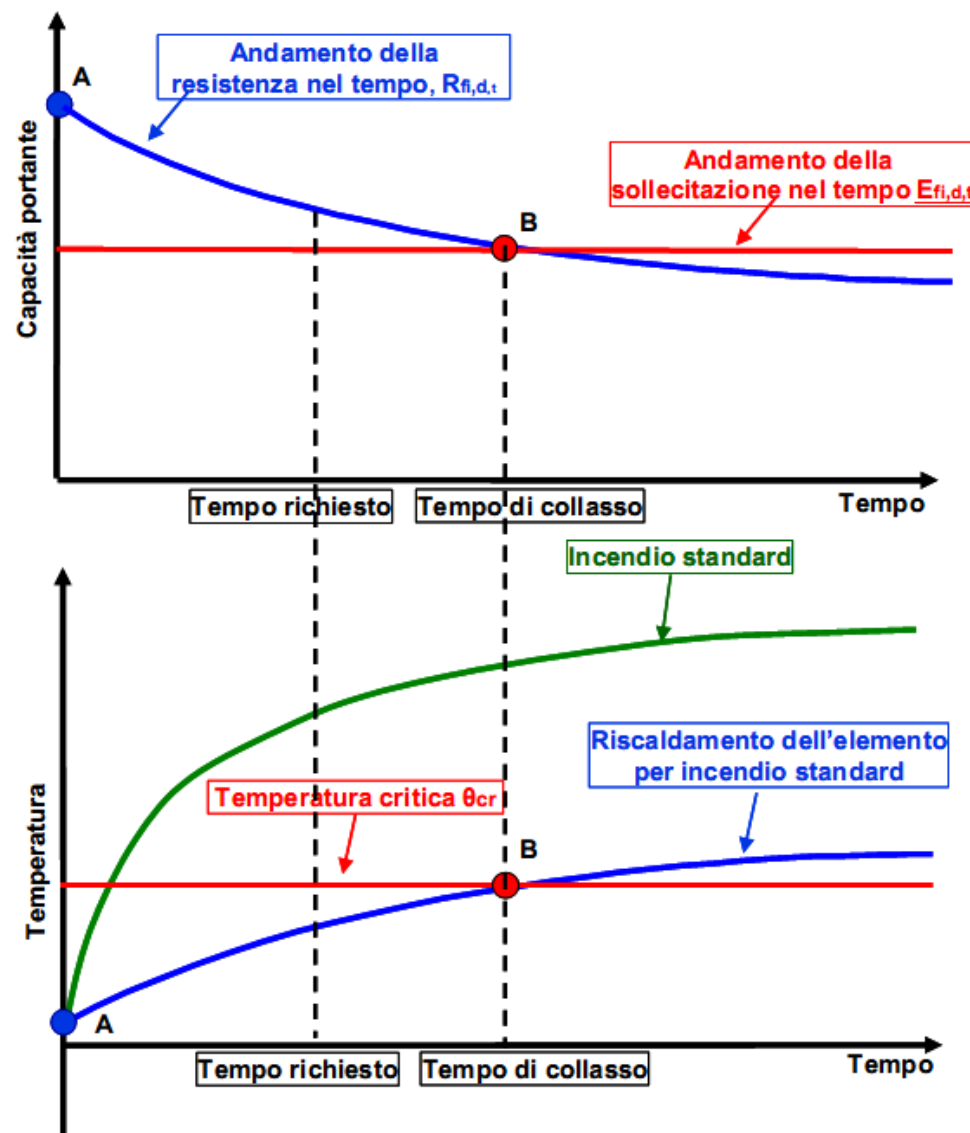


Figura 5.6 Verifica di sicurezza nel caso di esposizione all'incendio standard.

VERIFICA DI RESISTENZA DI UN ELEMENTO STRUTTURALE SOGGETTO AD INCENDIO

Verifica di sicurezza per esposizione a curva di incendio naturale

Sovraresistenza iniziale

■ Nel dominio delle resistenze:

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

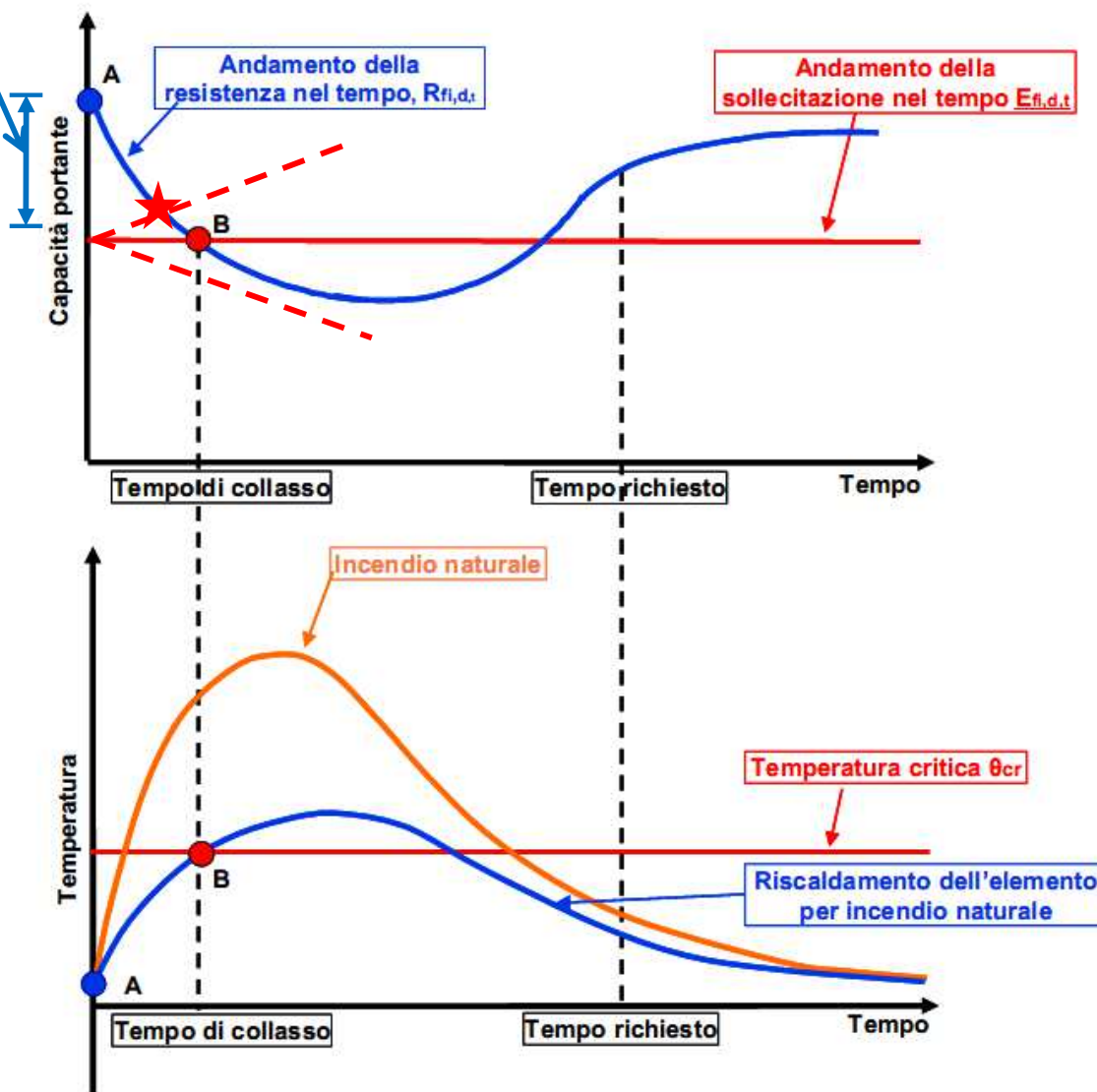
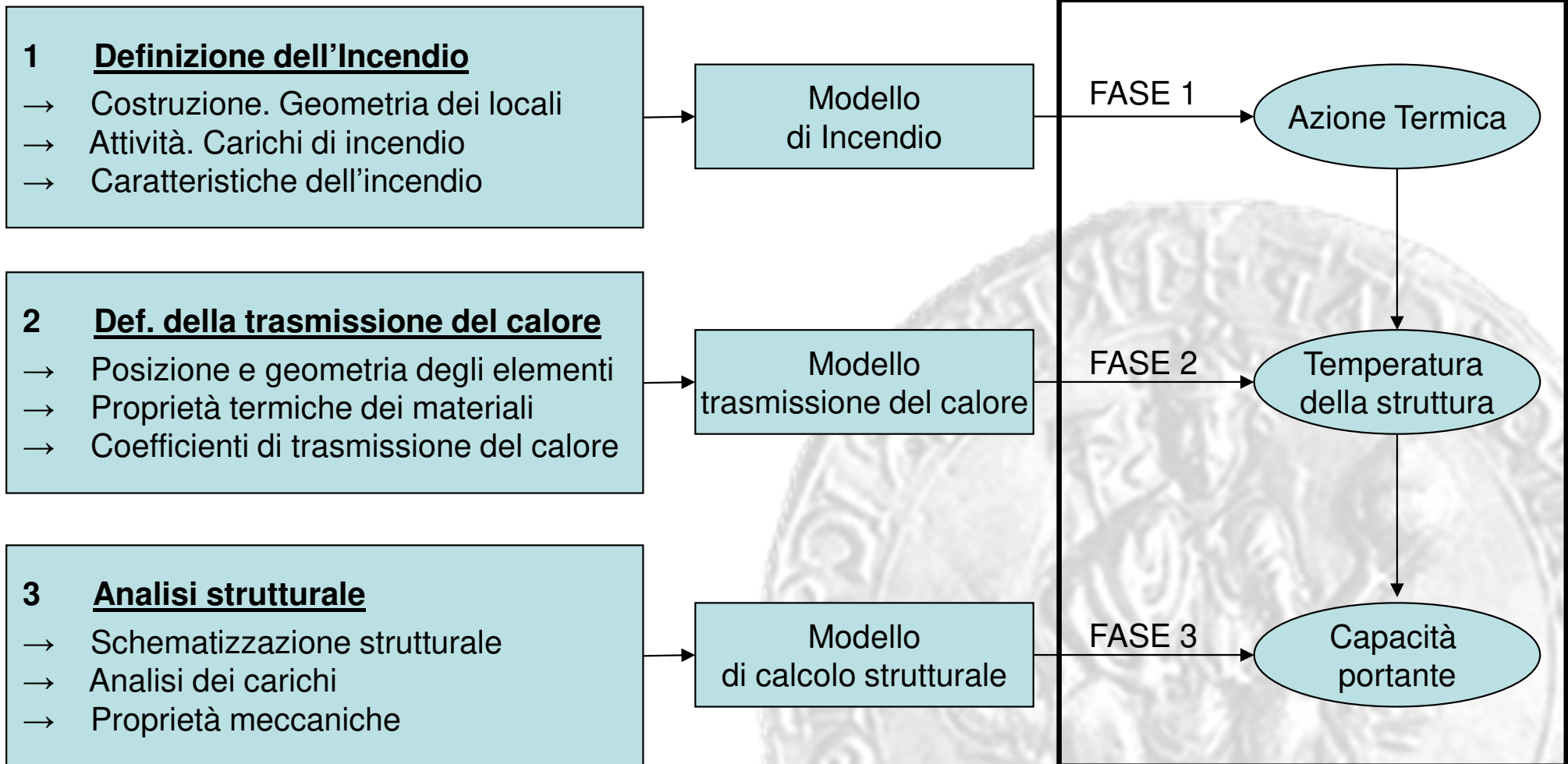


Figura 5.7 Verifica di sicurezza nel caso di incendio naturale.

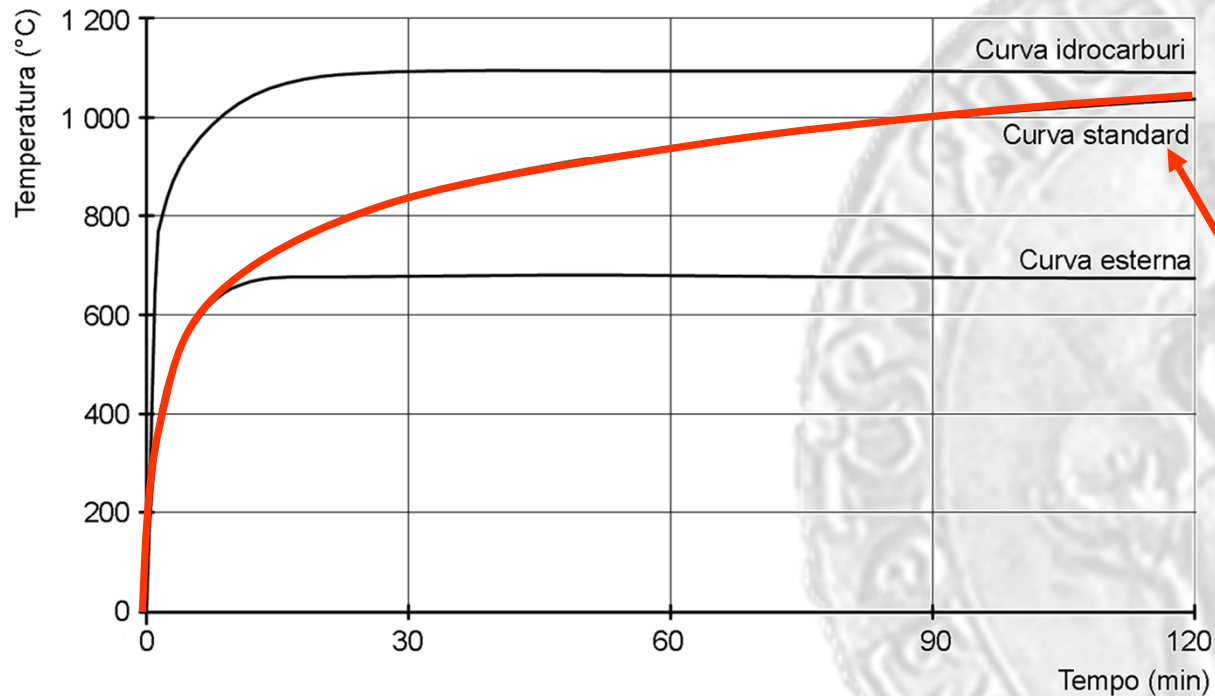
ANALISI STRUTTURALE IN CONDIZIONI DI INCENDIO



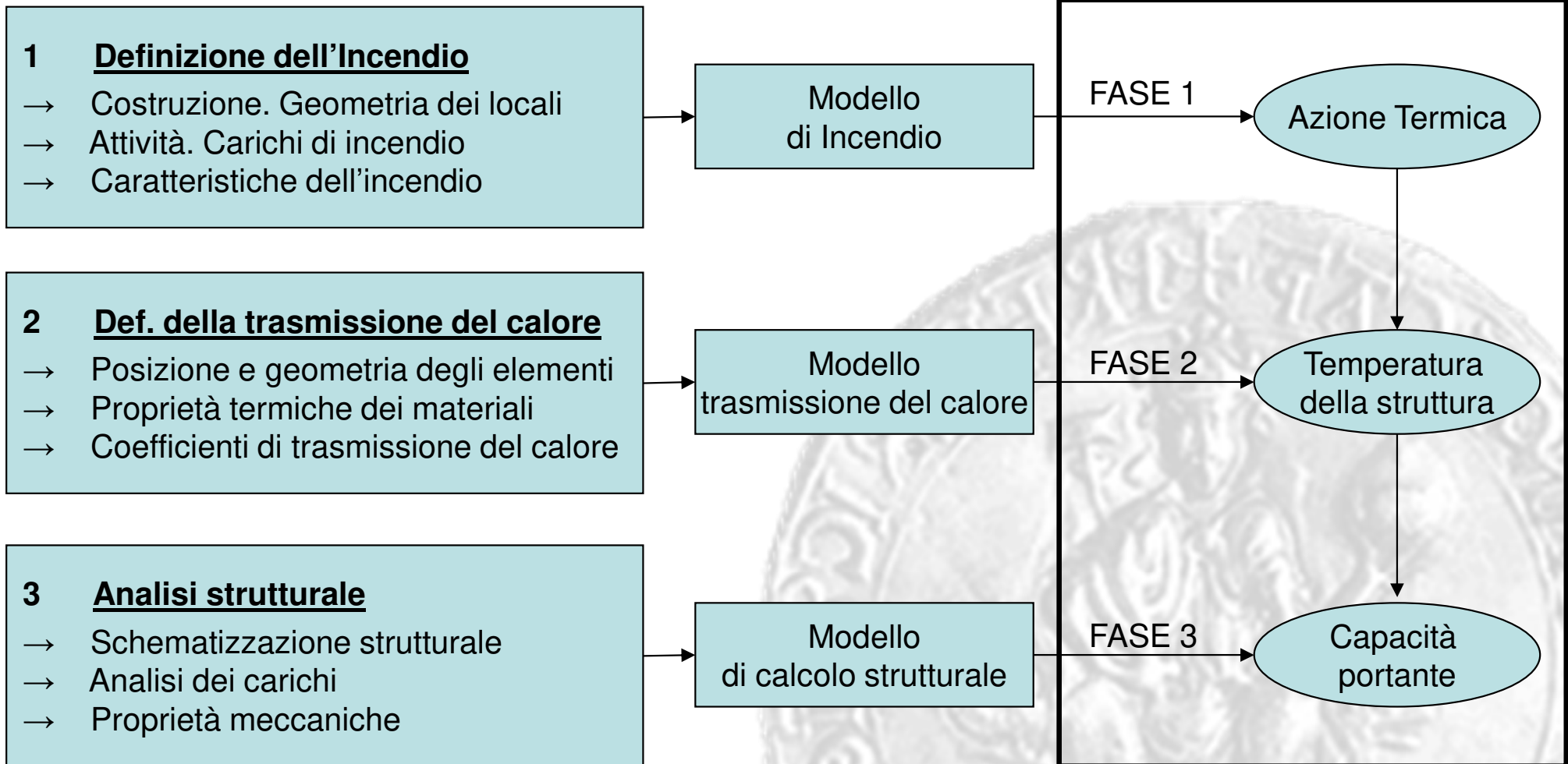
SOLUZIONI CONFORMI - TIPOLOGIE DI INCENDIO

Curve di Incendio Nominali

- Curva di incendio standard (ISO834);
- Curva di incendio degli idrocarburi;
- Curva di incendio esterno.



ANALISI STRUTTURALE IN CONDIZIONI DI INCENDIO



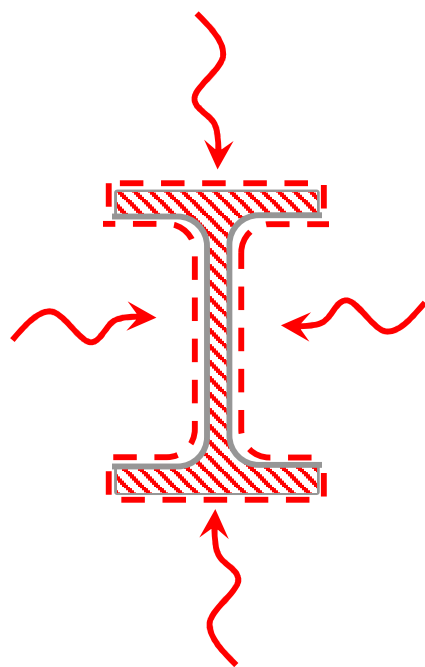
CALCOLO TEMPERATURE NELLE SEZIONI DI ACCIAIO

Metodo semplificato EN1993-1-2

Gli elementi metallici sono caratterizzati da spessori contenuti, in virtù **dell'elevato rapporto resistenza/peso** del materiale, e dalla **grande conducibilità termica** dell'acciaio.

Di conseguenza negli usuali profili metallici, o almeno nelle loro parti a spessore costante e con condizioni di scambio termico omogeneo con l'ambiente esterno, si stabiliscono **distribuzioni di temperatura pressoché uniforme**.

L'incremento di temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ di ciascuna delle varie parti del profilo non protetto (per es. flangia inferiore, anima e flangia superiore), durante un intervallo finito di tempo Δt , può essere determinato ipotizzando che il calore entrante attraverso la superficie esposta nell'intervallo di tempo Δt sia uguale al calore necessario per aumentare la temperatura dell'acciaio di $\Delta\theta_{a,t}$



Flusso di
calore
netto

Superficie esposta

Volume della parte

$$\dot{h}_{\text{net}} A_{m,i} \Delta t = \rho_a c_a V_i \Delta\theta_{a,t}$$

densità

Calore specifico

CALCOLO DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI IN ACCIAIO

METODO SEMPLIFICATO EN1993-1-2

Elementi non protetti

Distribuzione uniforme di temperatura

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \cdot \frac{A_m / V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t$$

K_{sh} coefficiente che tiene conto delle “effetto ombra”

A_m / V fattore di sezione per una sezione di acciaio non protetta

A_m superficie esposta dell'elemento per unità di lunghezza

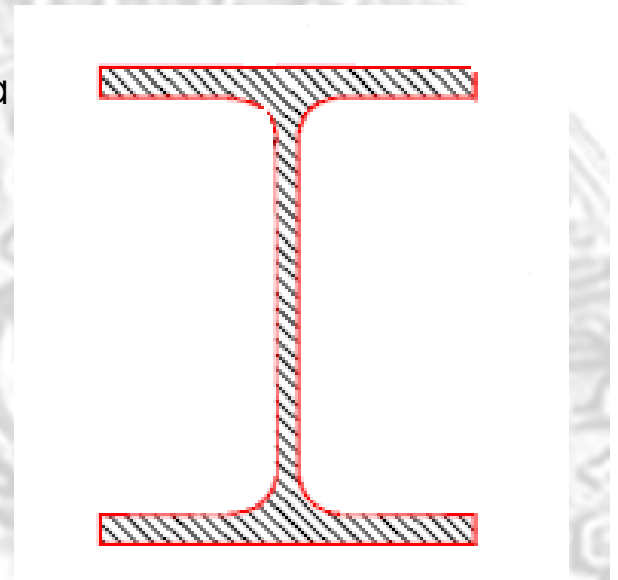
V volume dell'elemento per unità di lunghezza

c_a calore specifico dell'acciaio

$\dot{h}_{net}$ flusso di calore netto

Δt intervallo di tempo

ρ_a densità



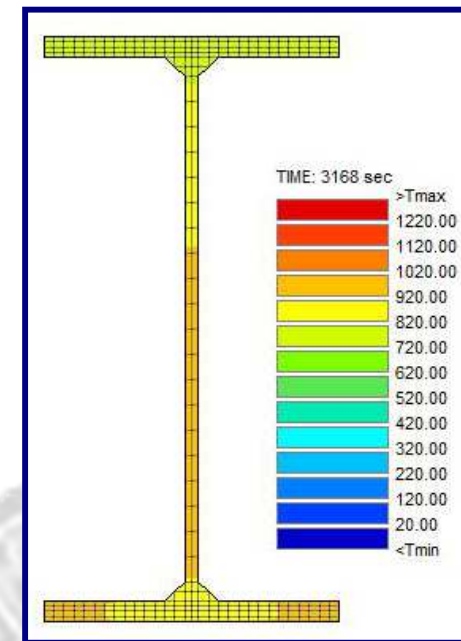
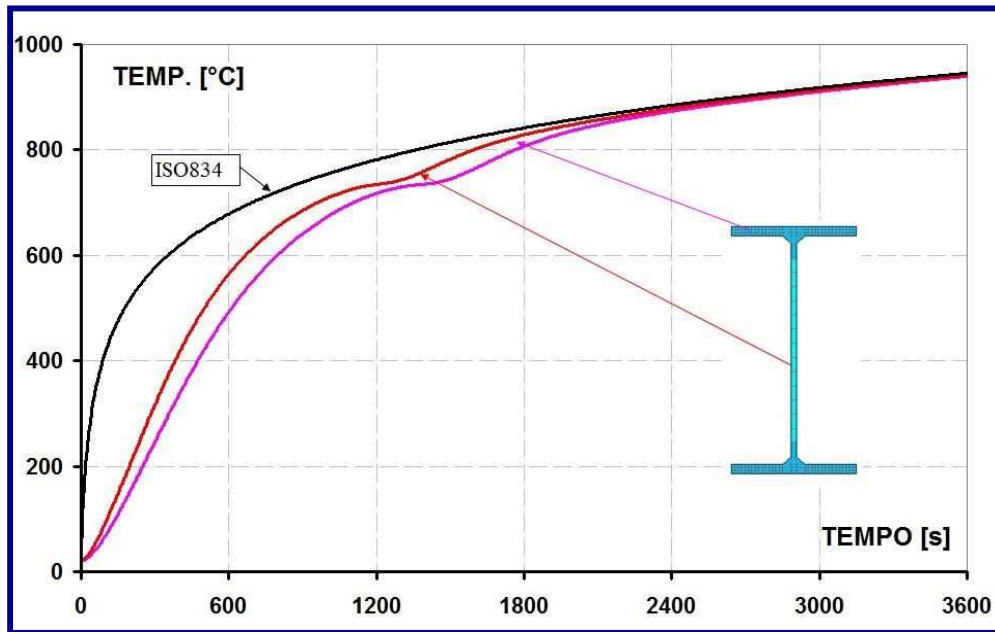
Fattore di sezione $A_m/V =$

Superficie esposta al fuoco

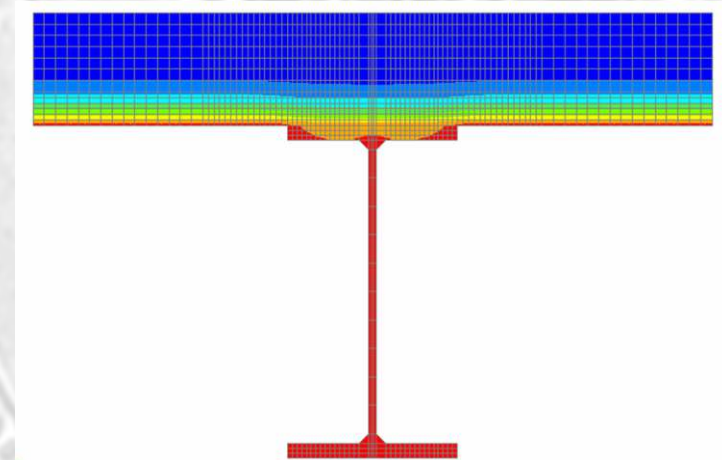
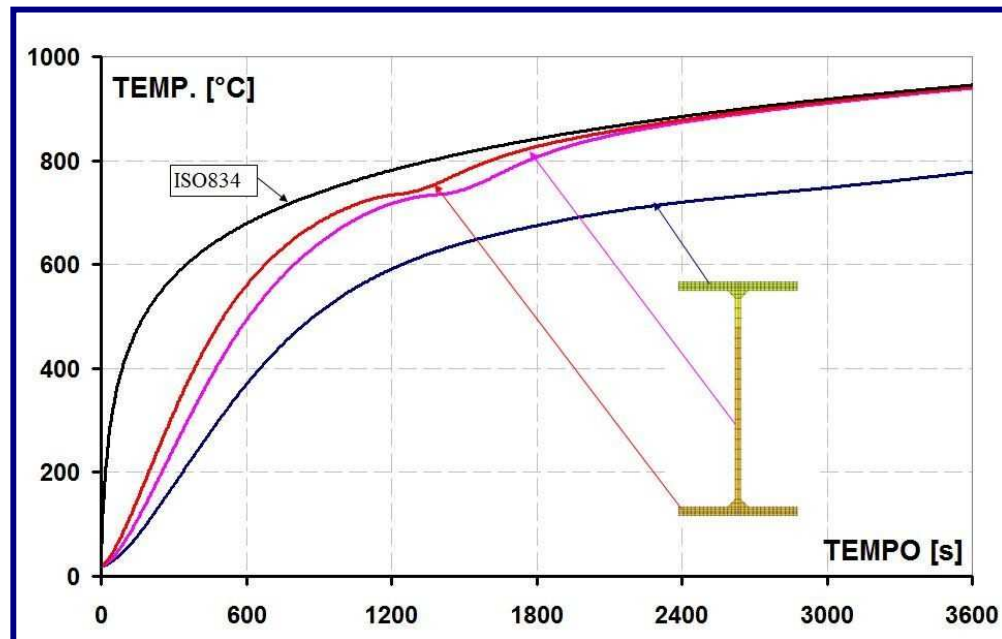
Volume dell'elemento

DISTRIBUZIONE DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI

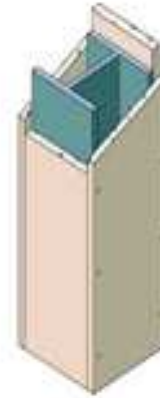
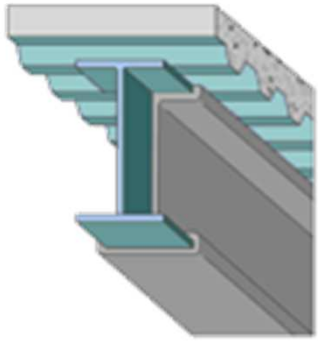
COLONNA RISCALDATA SU TUTTI I LATI



TRAVE RISCALDATA DAL BASSO (SU TRE LATI)



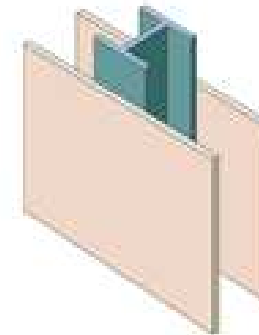
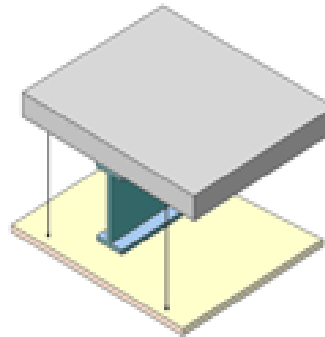
MEMBRATURE DI ACCIAIO (CON PROTEZIONI)



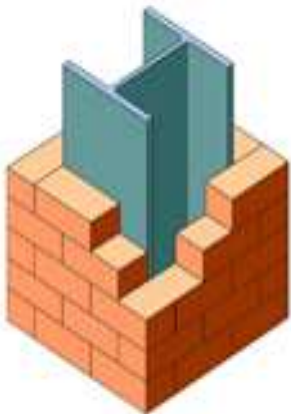
Pannelli prefabbricati



Le vernici intumescenti



La protezione mediante schermi



Colonne rivestite



Blocchi tra le ali delle colonne

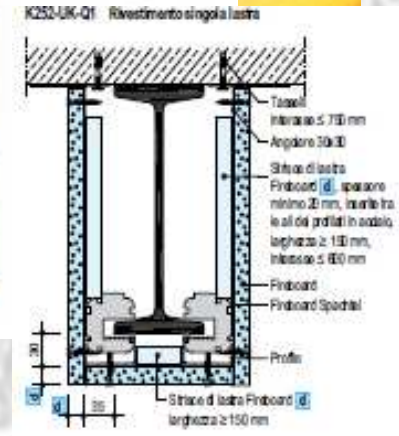
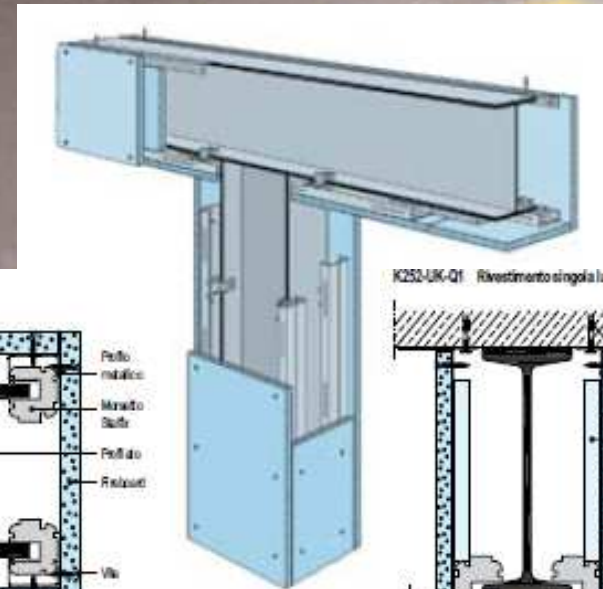
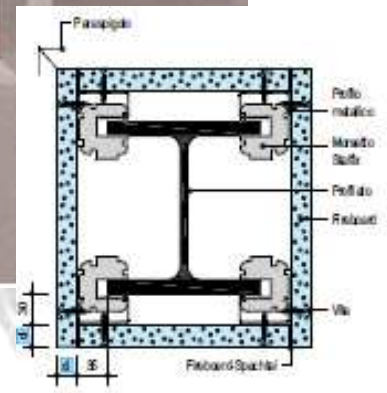
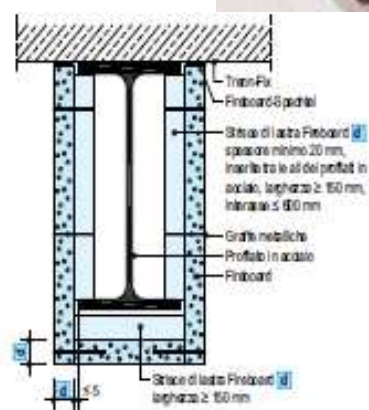
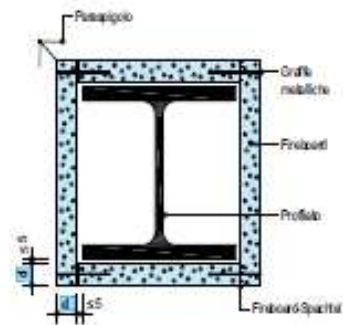
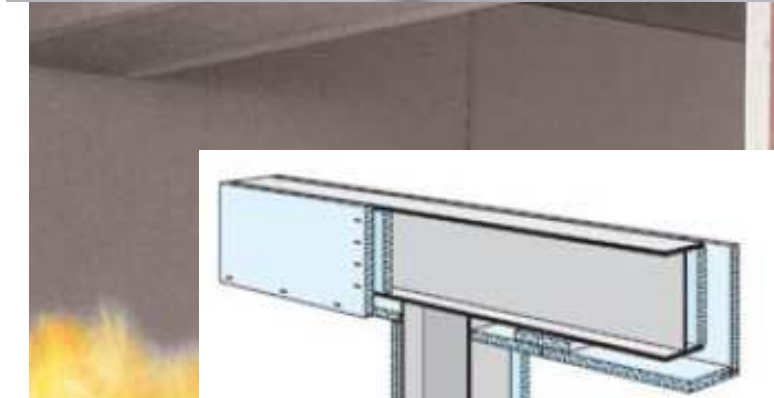
Sistemi di Protezione per strutture di acciaio

Intonaci Antincendio



Sistemi di Protezione per strutture di acciaio

Rivestimenti in lastra



Sistemi di Protezione per strutture di acciaio

Pitture Intumescenti – Protettivi di tipo reattivo



EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA NEGLI ELEMENTI

➤ Elementi protetti

- Distribuzione uniforme di temperatura

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p \cdot A_p / V}{d_p \cdot c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t}$$

$$\phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot A_p / V$$

A_p / V fattore di sezione per una sezione di acciaio protetta

A_p superficie del materiale protettivo per unità di lunghezza

V volume dell'elemento per unità di lunghezza

c_a calore specifico dell'acciaio in funzione della temperatura

c_p calore specifico del materiale protettivo indipendente della temperatura

d_p spessore del materiale protettivo

$\theta_{a,t}$ temperatura dell'acciaio al tempo t

$\theta_{g,t}$ temperatura del gas dell'ambiente al tempo t

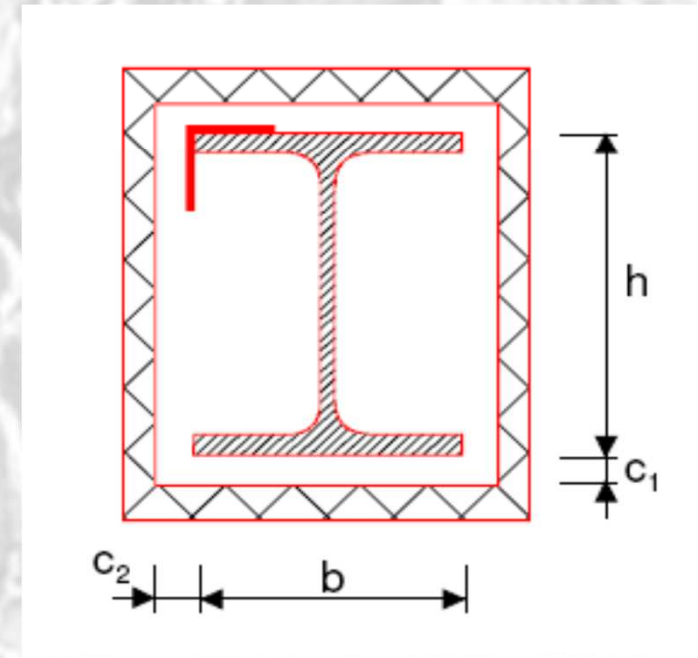
$\Delta\theta_{g,t}$ incremento temperatura dell'ambiente al tempo t

λ_p conducibilità termica del materiale protettivo

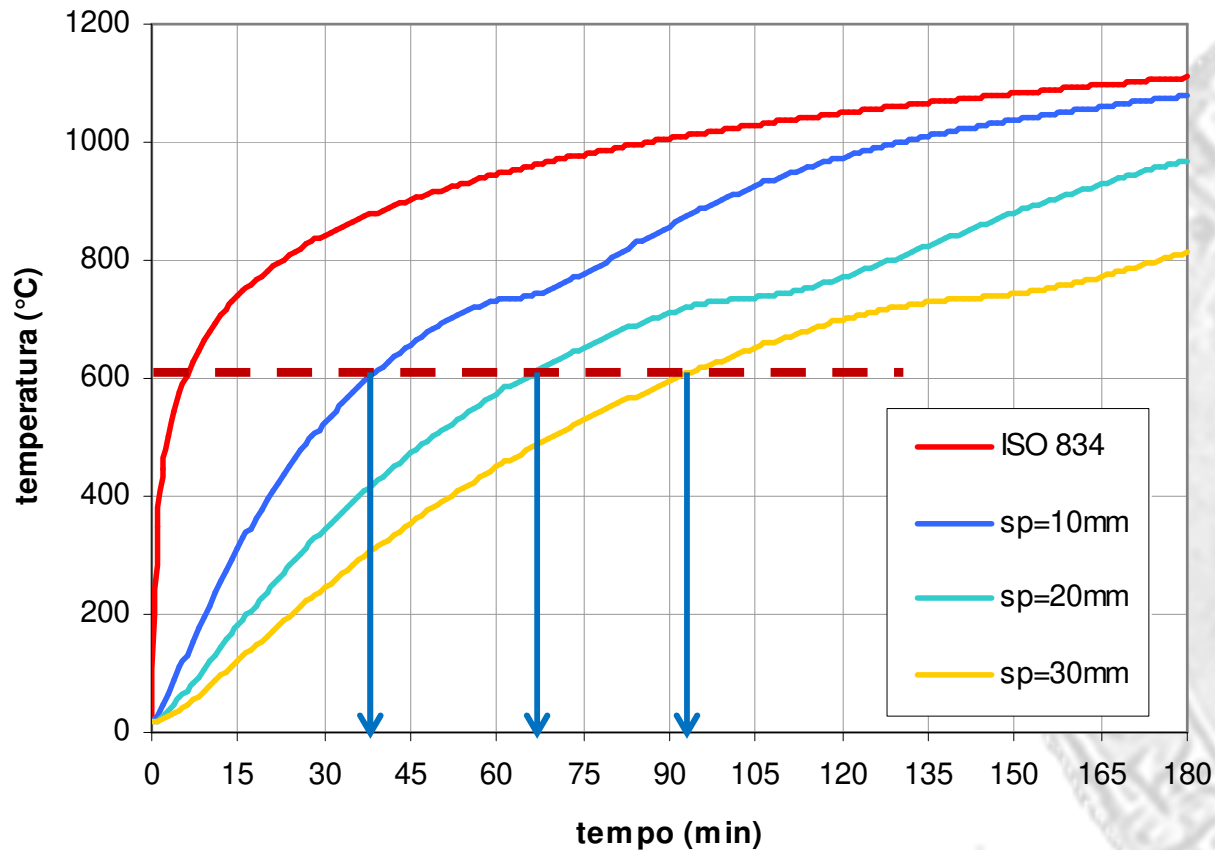
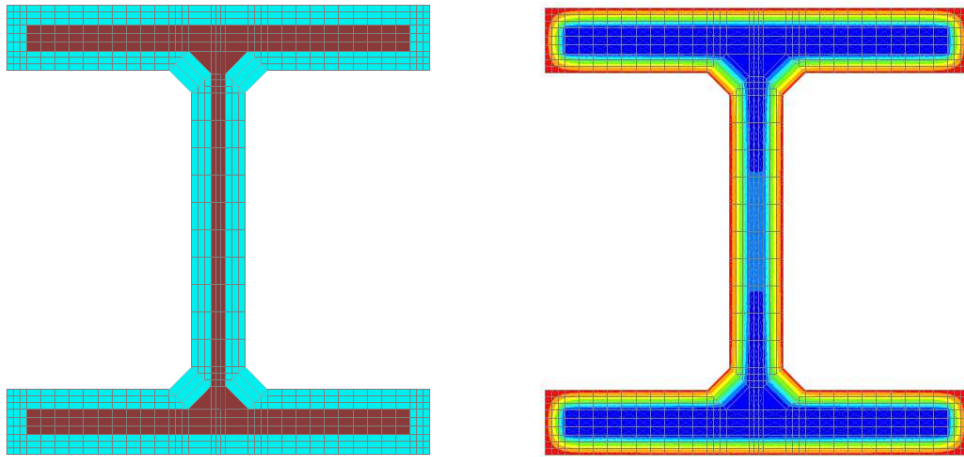
Δt intervallo di tempo

ρ_a densità dell'acciaio

ρ_p densità del materiale protettivo



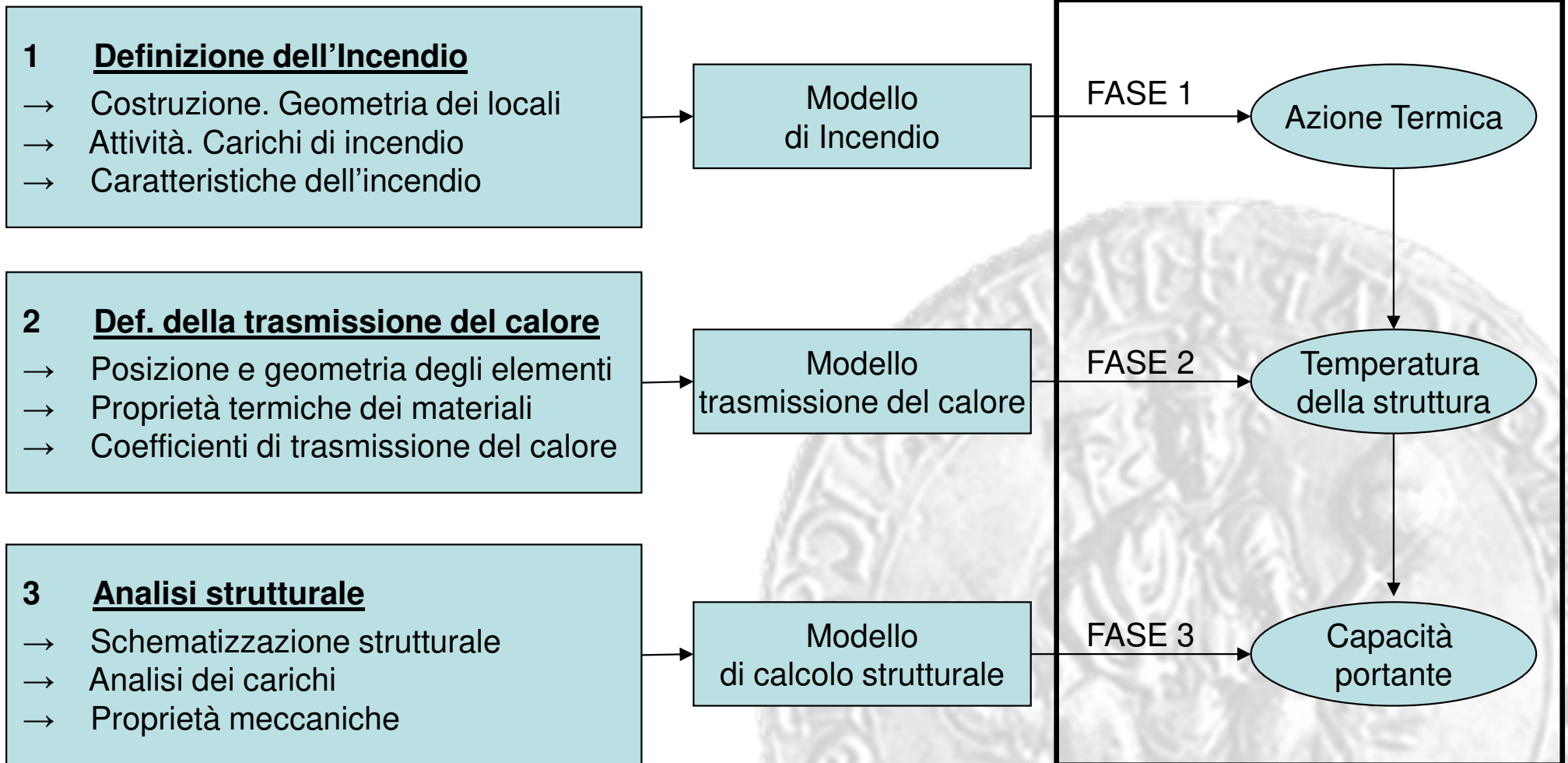
SEZIONI DI ACCIAIO CON RIVESTIMENTO PROTETTIVO



Andamento della temperatura nel tempo di un elemento di acciaio (IPE 300) dotato di protettivo di spessore pari a 10, 20 e 30 mm

$[\lambda_p = 0,15 \text{ W/(mK)}, c_p = 1000 \text{ J/(kg K)}, \rho_p = 250 \text{ kg/m}^3]$

ANALISI STRUTTURALE IN CONDIZIONI DI INCENDIO



VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO

- **Dati tabellati (strutture composte) – Nomogramma (acciaio)**
- **Modelli di calcolo semplificati**
- **Modelli di calcolo “avanzati”.**

Valutazione analitica della resistenza al fuoco

- Per le resistenze dei materiali a temperature maggiori di quella ordinaria si assumono generalmente i valori caratteristici (coefficienti $\gamma_m = 1.0$).
- Si calcolano le resistenze ultime delle sezioni ($R_{fi,d}$) da confrontare con le sollecitazioni di progetto in caso di incendio ($S_{fi,d}$):

Verifica nel dominio delle resistenze:

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

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

(resistenza in condizioni di incendio al tempo $t \geq$ Sollecitazione in condizioni di incendio al tempo t)

LA SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO

VERIFICA DI RESISTENZA AL FUOCO:

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

$$\gamma_{M,fi} = 1.0$$

(resistenza in condizioni di incendio al tempo t $\geq$ sollecitazione in condizioni di incendio al tempo t)

Combinazione di carico eccezionale in presenza di incendio:

$$G_{k,1} + G_{k,2} + P_k(t) + \sum_{i=1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + A_d(t)$$

NTC 2018

Combinazione di carico
quasi permanente

Azione dell'incendio
di progetto

$$E_{fi,d,t}$$

CURVE DI RIDUZIONE DELLA RESISTENZA ($k_{y,\theta}$) E DELLA RIGIDEZZA ($k_{E,\theta}$) DELL'ACCIAIO

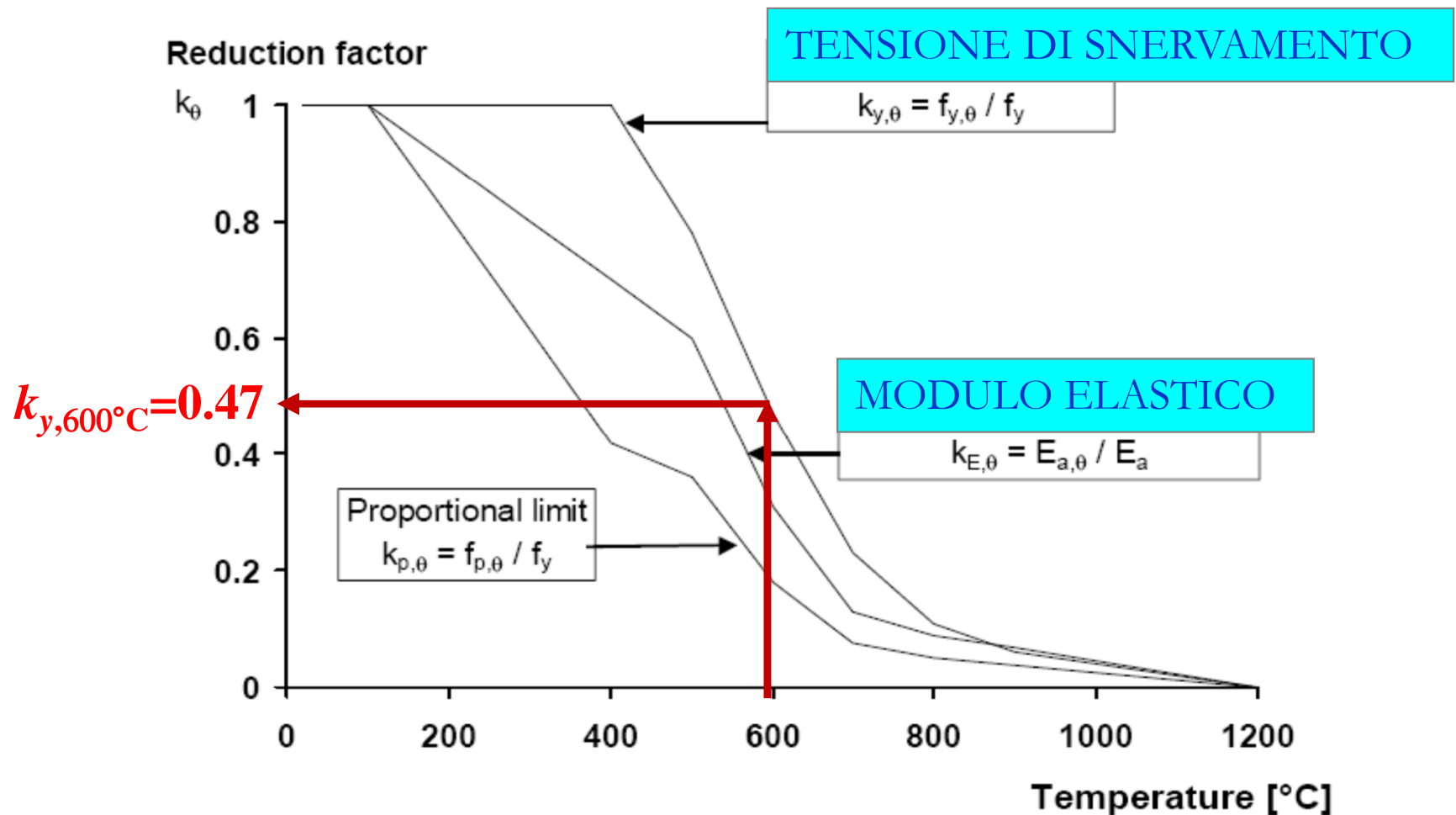


Figure 3.2: Reduction factors for the stress-strain relationship of carbon steel at elevated temperatures

Metodo analitico - Eurocodici – EN 1993-1-2

Elementi Tesi

Distribuzione uniforme di temperatura

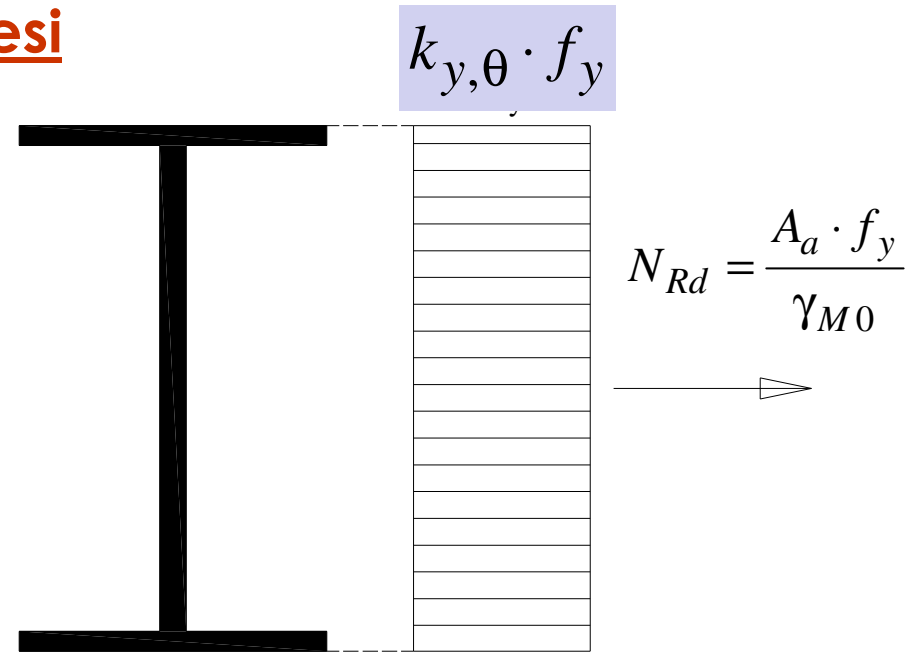
$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot N_{Rd} \cdot (\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi})$$

$k_{y,\theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento dell'acciaio alla temperatura θ

N_{Rd} resistenza a “freddo”

$\gamma_{M,0}$ coefficiente parziale di sicurezza a “freddo”

$\gamma_{M,fi} = 1.0$ (coefficiente di sicurezza a “caldo”)



$$N_{fi,\theta,Rd} = \frac{A_a \cdot (k_{y,\theta} \cdot f_y)}{\gamma_{M,fi}} \equiv k_{y,\theta} \cdot \frac{A_a \cdot f_y}{\gamma_{M,0}} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}}$$

N_{Rd}

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI – ELEMENTI INFLESSI

➤ Elementi di classe 1 o 2

• Distribuzione uniforme di temperatura

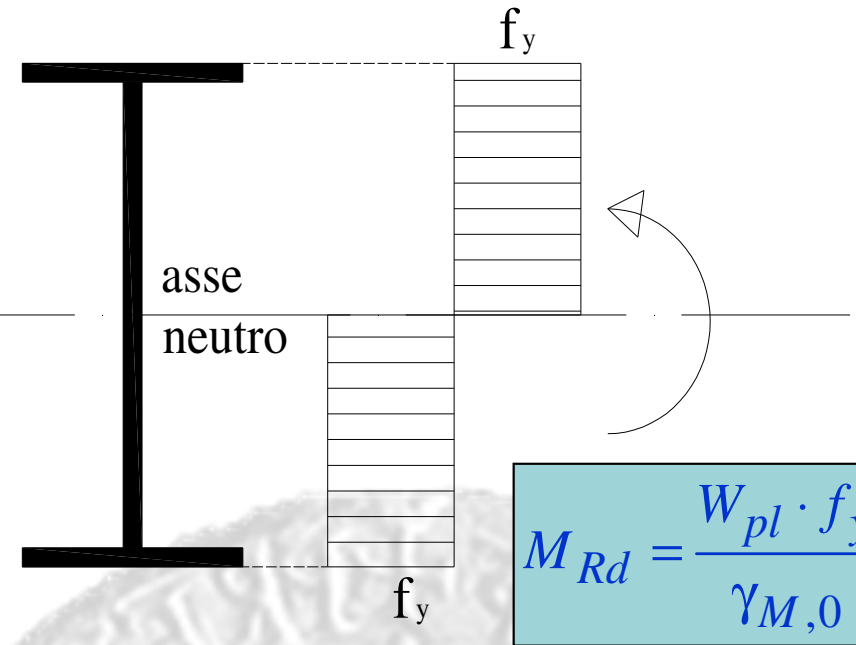
$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \cdot M_{Rd} \cdot (\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi})$$

$k_{y,\theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento dell'acciaio alla temperatura θ

M_{Rd} è il **momento plastico** resistente a “freddo”

$\gamma_{M,0}$ coefficiente parziale di sicurezza a “freddo”

$\gamma_{M,fi}$ coefficiente parziale di sicurezza a “caldo”



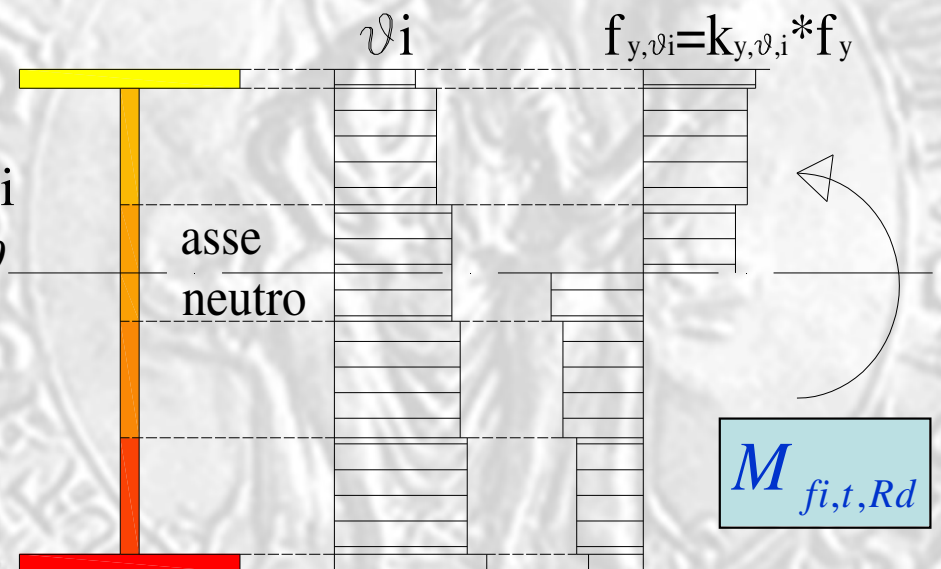
• Distribuzione non uniforme di temperatura

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot z_i \cdot k_{y,\theta,i} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

$k_{y,\theta,i}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento dell'acciaio alla temperatura θ dell'elementino i.

z_i distanza baricentro area A_i dall'asse neutro plastico

f_y tensione di snervamento dell'acciaio



METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

METODO DELLA TEMPERATURA CRITICA

- Per un dato livello di carico, la **temperatura critica** è la temperatura per la quale si verifica il collasso di un elemento strutturale con uniforme distribuzione di temperatura

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

Il metodo è valido per verificare la perdita della capacità portante di elementi (tesi, inflessi e compressi) non sensibili a fenomeni di instabilità.

Fattore di utilizzazione

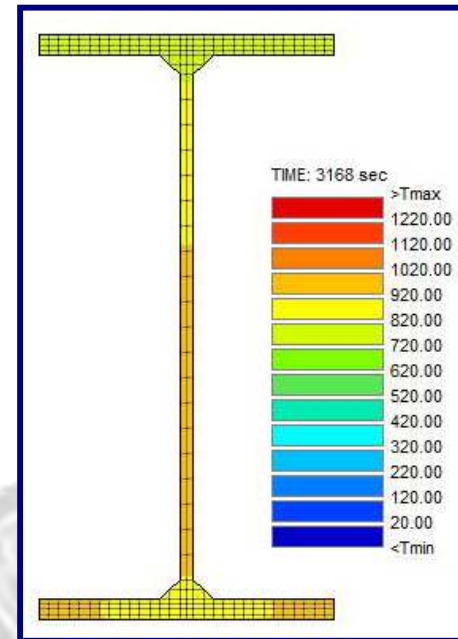
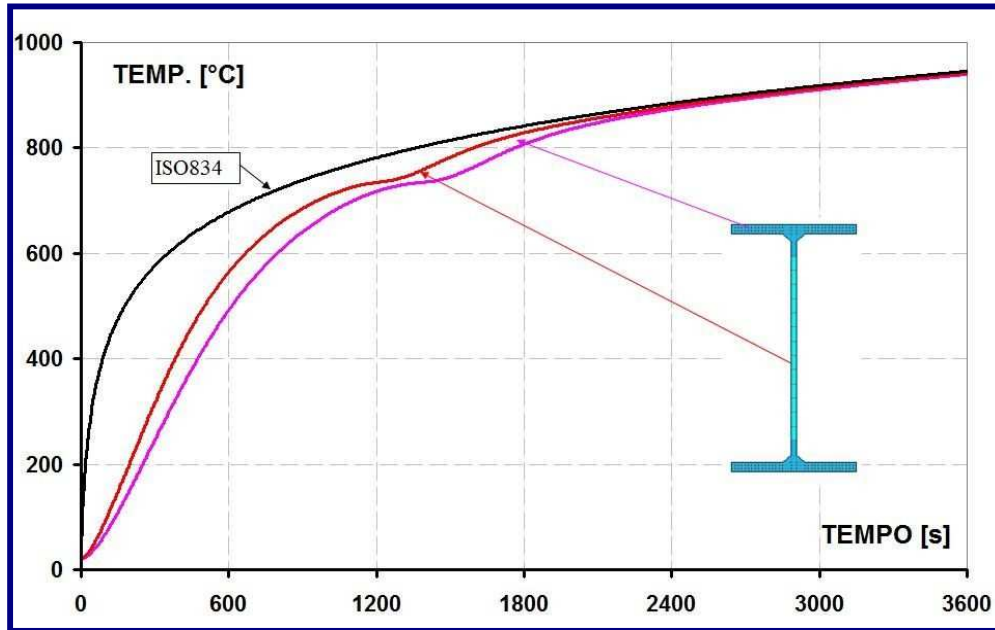
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Table 4.1: Critical temperature $\theta_{a,cr}$ for values of the utilisation factor μ_0

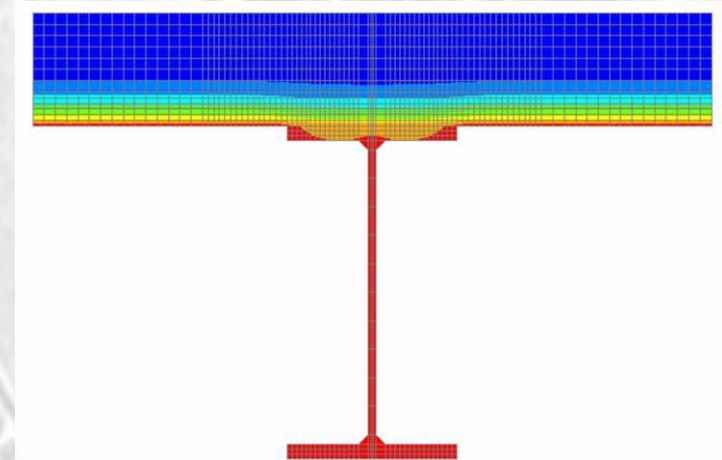
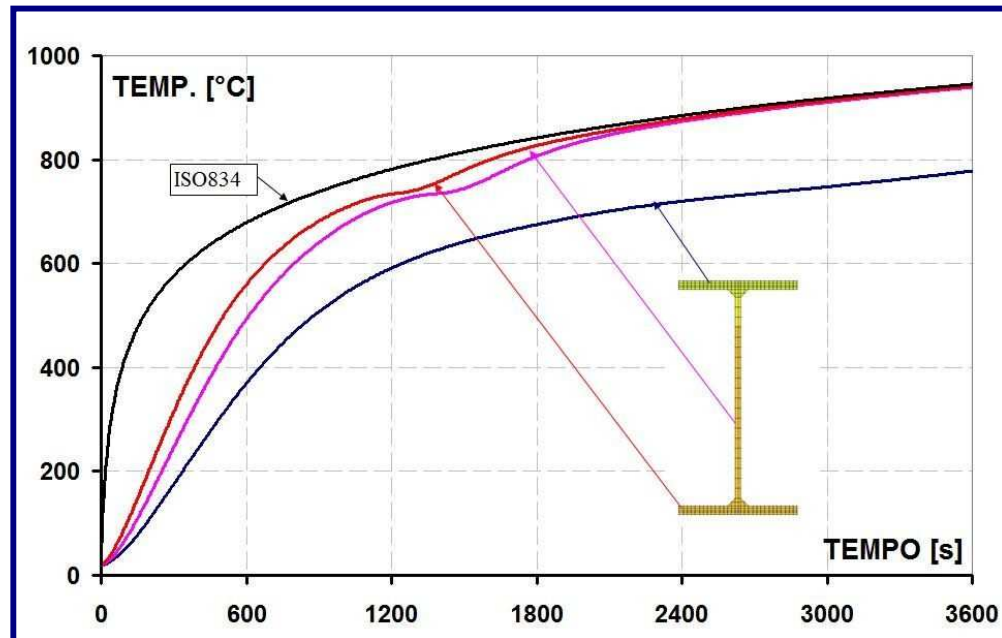
μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

DISTRIBUZIONE DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI

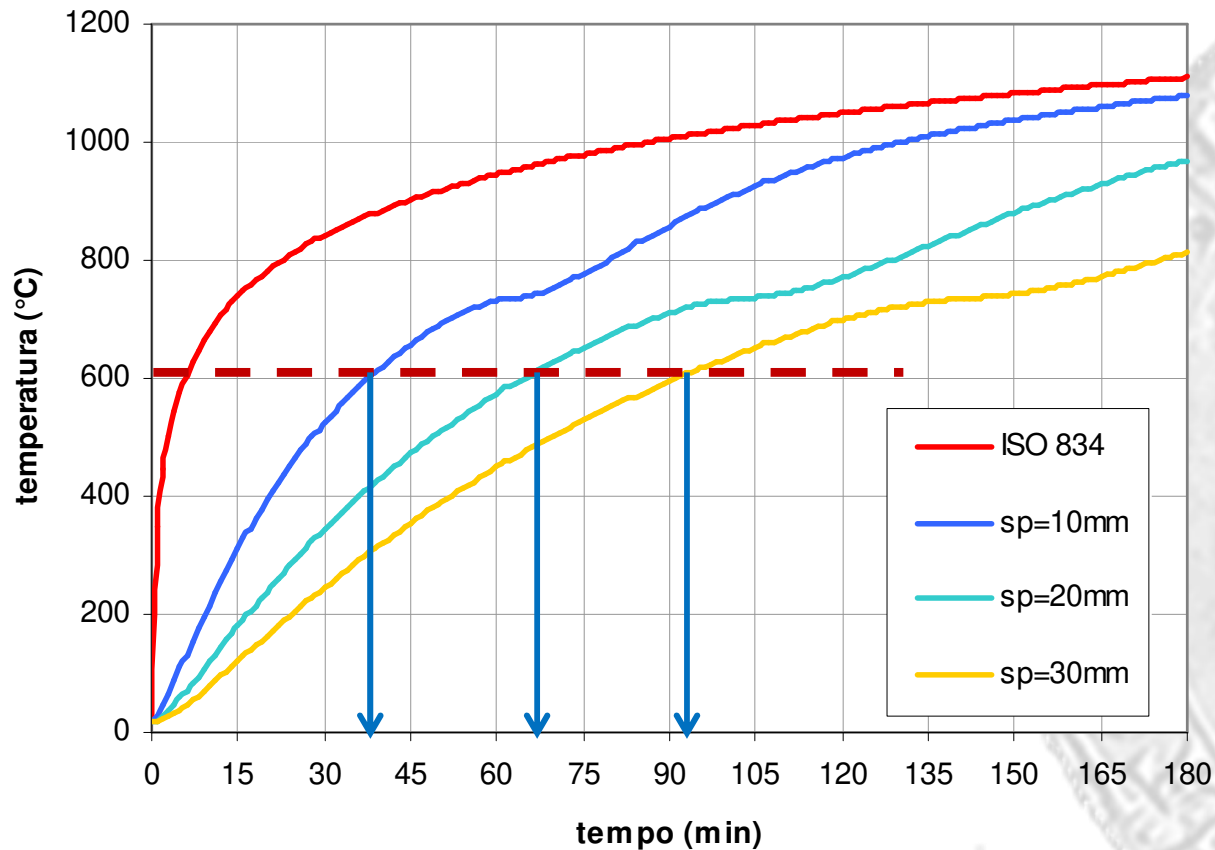
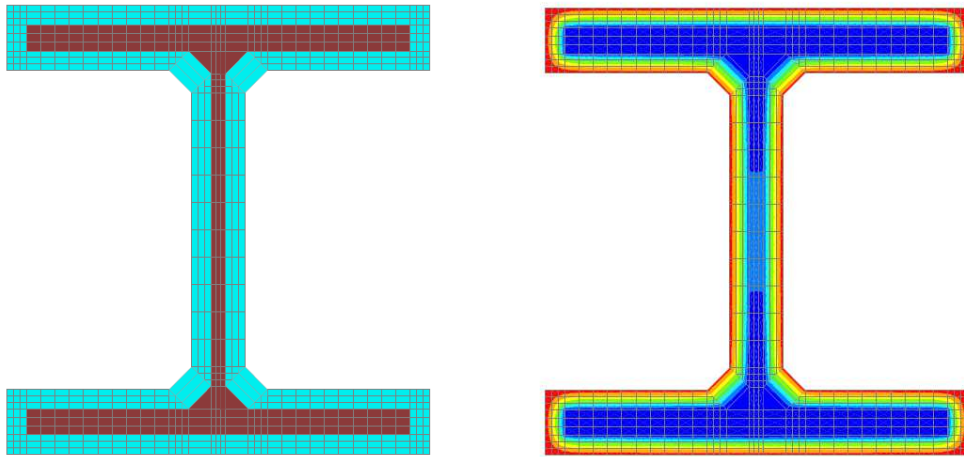
COLONNA RISCALDATA SU TUTTI I LATI



TRAVE RISCALDATA DAL BASSO (SU TRE LATI)



SEZIONI DI ACCIAIO CON RIVESTIMENTO PROTETTIVO



Andamento della temperatura nel tempo di un elemento di acciaio (IPE 300) dotato di protettivo di spessore pari a 10, 20 e 30 mm

$[\lambda_p = 0,15 \text{ W/(mK)}, c_p = 1000 \text{ J/(kg K)}, \rho_p = 250 \text{ kg/m}^3]$

"Nomogramma" – Resistenza al fuoco

Nomogramma

Metodo grafico di valutazione della resistenza al fuoco di strutture in acciaio (basato su EN 1993-1-2 Luglio 2005)



Premessa

Il 20 gennaio 2006, su iniziativa di Fondazione Promozione Acciaio e con la partecipazione del Ministero dell'Interno, è stata costituita la **Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso di Incendio**.

La Commissione Tecnica, che è composta da rappresentanti nazionali nel campo della ricerca europea, da esponenti del Ministero dell'Interno coinvolti nella definizione del quadro normativo nazionale, da docenti universitari e da liberi professionisti, si propone come un vero e proprio punto di riferimento a livello nazionale per professionisti e operatori di settore italiani sul tema del fuoco.

Il "Nomogramma", primo fra i diversi strumenti tecnici che la **Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso di Incendio** intende divulgare, è un semplice supporto operativo, basato sull'Eurocodice EN1993-1-2, a disposizione del professionista per la stima della resistenza al fuoco delle strutture di acciaio. È sempre possibile un aggiornamento sui lavori della Commissione consultando il sito: www.promozioneacciaio.it

1- INTRODUZIONE

Le richieste di resistenza al fuoco per le strutture (classi di resistenza R30/R60/R90...) sono stabilite dai regolamenti vigenti. Tali requisiti sono fissati in generale sulla base della destinazione d'uso degli edifici, dell'altezza e della superficie in pianta dell'edificio, del cono di incendio, del numero di persone presenti e dell'effetto delle misure di protezione adottate quali, ad esempio gli sprinkler, la rete di idranti, gli evacuatori di fumo e calore, i sistemi di rivelazione, la facilità di accesso degli operatori VVF, etc.

Il presente report descrive il metodo analitico per il calcolo per elementi di acciaio basato sul procedimento semplificato tratto dal documento europeo: **EN 1993-1-2 - Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio** (Luglio 2005).

I metodi analitici sono i procedimenti di riferimento per il calcolo di strutture ed elementi strutturali. Essi possono essere attuati in forme avanzate o semplificate, come nel presente report, attraverso il ricorso a grafici o tabelle. I metodi analitici, alternativi in generale alle prove di laboratorio, possono essere da esse integrati, come nel caso della determinazione del contributo offerto dai sistemi protettivi.

2 - PRINCIPI DI CALCOLO

2.1 - Ipotesi generali

Il procedimento di calcolo è applicato ad elementi sottoposti a trazione pura, flessione pura o compressione pura. Il metodo non è applicabile ad elementi soggetti a sollecitazioni composte e a fenomeni di svolgimento. Non sono inclusi metodi di calcolo per elementi con sezione acciaio-cemento. La sezione risulta verificata fino a che la resistenza di progetto è superiore alle sollecitazioni di progetto:

$$E_{s,d} \leq R_{s,d} \quad [2.1]$$

dove

$E_{s,d}$ sollecitazione di progetto dell'elemento in caso di incendio, ottenuta attraverso la combinazione dei carichi definita nel Testo Unico "Norme Tecniche per le Costruzioni".

$R_{s,d}$ resistenza di progetto della sezione durante l'incendio, al tempo t , calcolata in accordo a EN 1993-1-2 ($\gamma_{M,fi} = 1.0$).

Le ipotesi principali sono quelle valide nell'ambito del metodo di calcolo semplificato per singoli elementi:

- la curva di incendio impiegata nel calcolo è la curva temperatura-tempo nominale standard (ISO834);
- la temperatura è uniforme sull'elemento strutturale ad ogni istante;
- si trascurano gli effetti delle dilatazioni termiche;
- per le sezioni di classe di duttilità 4 la temperatura critica è 350°C;
- il procedimento è valido per tutti i tipi di acciaio indicati in EN 10025.

2.2 - Caratteristiche meccaniche dell'acciaio alle alte temperature

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio cambiano al variare della temperatura (Fig. 1). Per un elemento con distribuzione di temperatura uniforme la temperatura critica è definita come la temperatura per la quale la resistenza diventa uguale alla sollecitazione dovuta ai carichi applicati.

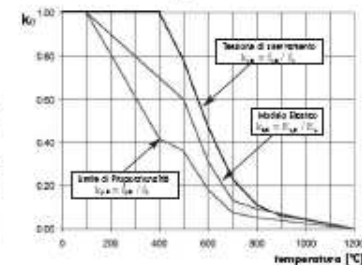


Fig. 1: Curve di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio

☐ progettisti :

valutazione preliminare della resistenza al fuoco di strutture di acciaio

☐ operatori di controllo (VVF)

progetti soggetti al controllo dell'autorità competente

EN 1993-1-2



IL NOMOGRAMMA

Metodo grafico per il dimensionamento delle strutture di acciaio

Limiti di applicabilità

Applicabile a:

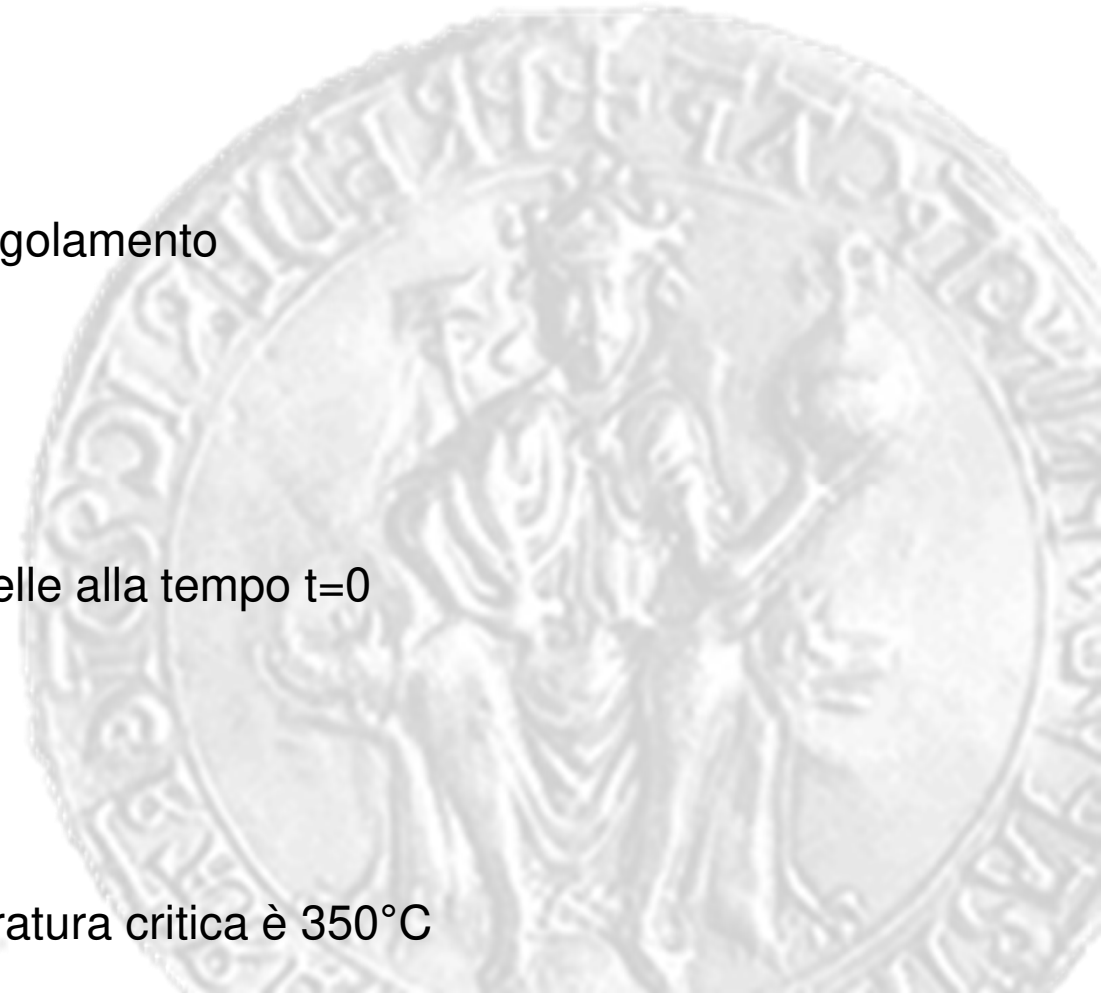
- ✓ elementi tesi
- ✓ elementi inflessi
- ✓ elementi compressi

Non applicabile a:

- ✓ elementi con sollecitazioni composte
- ✓ elementi inflessi soggetti a fenomeni di svergolamento

Ipotesi generali

- ✓ Metodo di calcolo semplificato
- ✓ Analisi per singoli elementi
- ✓ Sollecitazioni di progetto corrispondenti a quelle alla tempo $t=0$
- ✓ Curva di incendio standard ISO834
- ✓ Temperatura uniforme nell'elemento
- ✓ Effetti della dilatazione termiche trascurati
- ✓ Per le sezioni di classe di duttilità 4 la temperatura critica è 350°C



IL NOMOGRAMMA

Metodo grafico per il dimensionamento delle strutture di acciaio

Fattori correttivi κ

I fattori correttivi κ consentono di tenere conto degli effetti della distribuzione non uniforme della temperatura.

Il fattore correttivo κ_1 per una distribuzione non uniforme di temperatura nella sezione trasversale assume i seguenti valori:

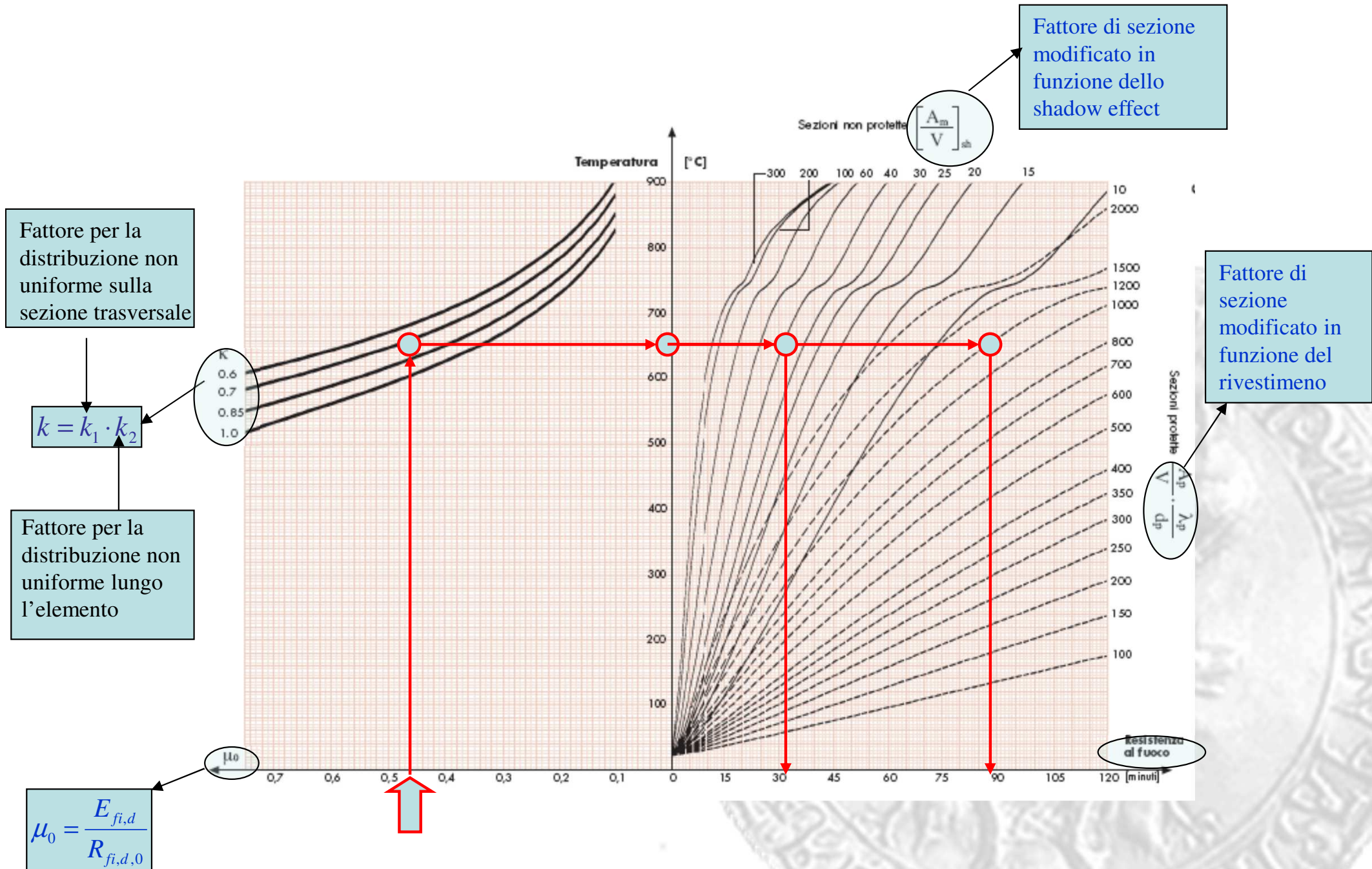
- per una trave esposta su quattro lati $\kappa_1 = 1,00$
- per una trave non protetta esposta su tre lati con una soletta di calcestruzzo sul quarto $\kappa_1 = 0,70$
- per una trave protetta esposta su tre lati con una soletta di calcestruzzo sul quarto $\kappa_1 = 0,85$

Il fattore correttivo κ_2 per una distribuzione non uniforme di temperatura lungo la trave assume i seguenti valori:

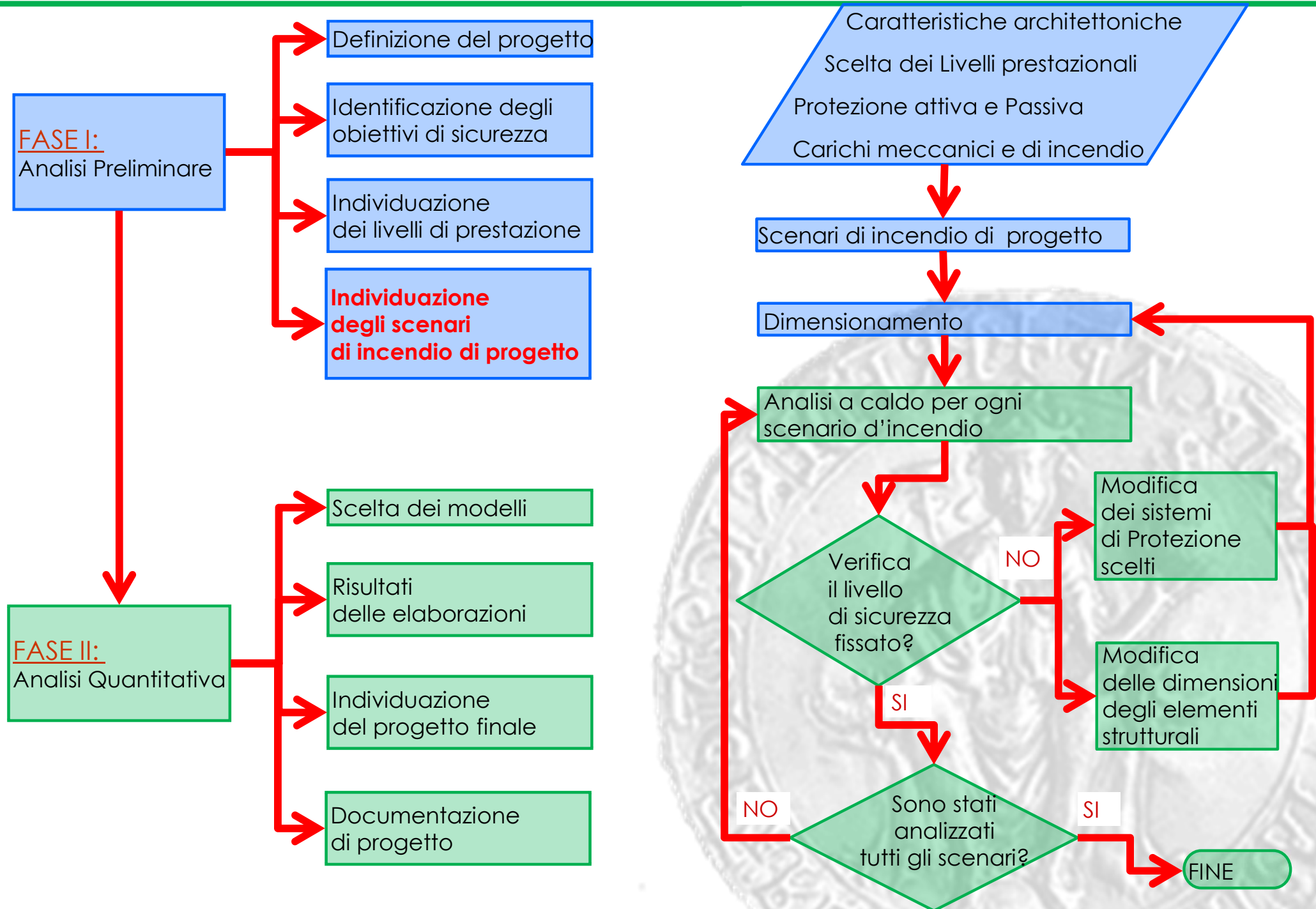
- per una trave iperstatica $\kappa_2 = 0,85$
- per una trave isostatica $\kappa_2 = 1,00$

IL NOMOGRAMMA

Metodo grafico per il dimensionamento delle strutture di acciaio



SOLUZIONI ALTERNATIVE – APPROCCIO INGEGNERISTICO

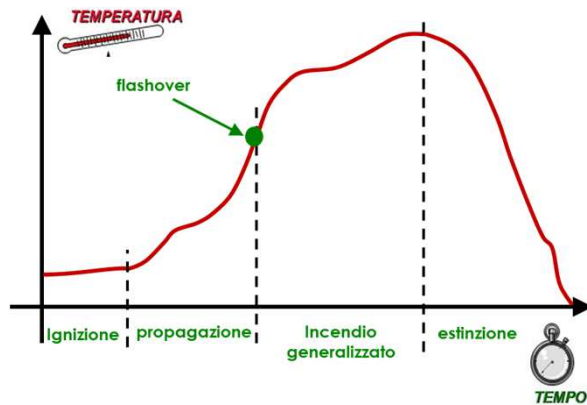


SOLUZIONI ALTERNATIVE – APPROCCIO INGEGNERISTICO

L'analisi del comportamento termo-meccanico delle strutture con approccio **prestazionale** si articola nelle seguenti fasi:

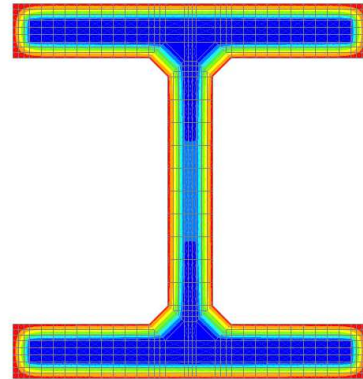
1

Definizione delle curve di incendio naturali



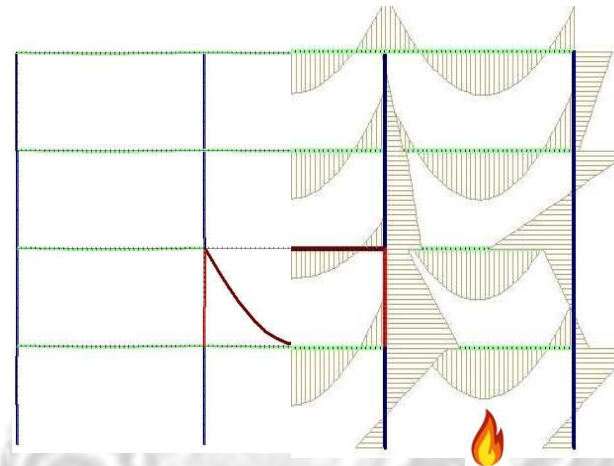
2

Analisi termica



3

Analisi termo-meccanica



4

Verifiche di sicurezza

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

1) MODELLAZIONE DELL'AZIONE DELL'INCENDIO

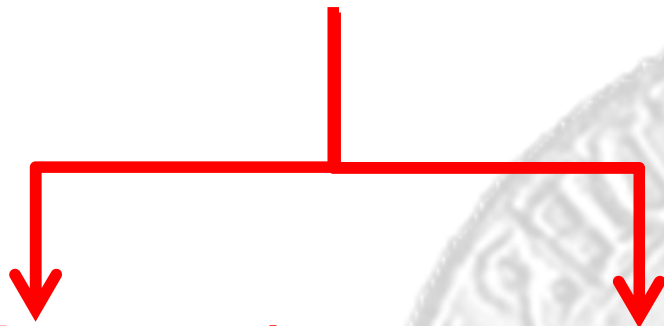
2) MAPPE TERMICHE NEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

3) ANALISI TERMOSTRUTTURALE AVANZATA CON AZIONI STATICHE E DISTORSIONI TERMICHE

4) VERIFICHE DI SICUREZZA DELLA STRUTTURA SOGGETTA AD INCENDIO

Criteri di scelta degli scenari

Lo “Scenario di incendio” è la descrizione qualitativa dell’evoluzione di un incendio che individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e che lo differenziano dagli altri incendi. Chiaramente gli scenari possibili in un edificio sono innumerevoli. Tra questi scenari sarà effettuata la scelta di quelli che vengono definiti scenari di incendio di progetto



Fire Risk Assessment

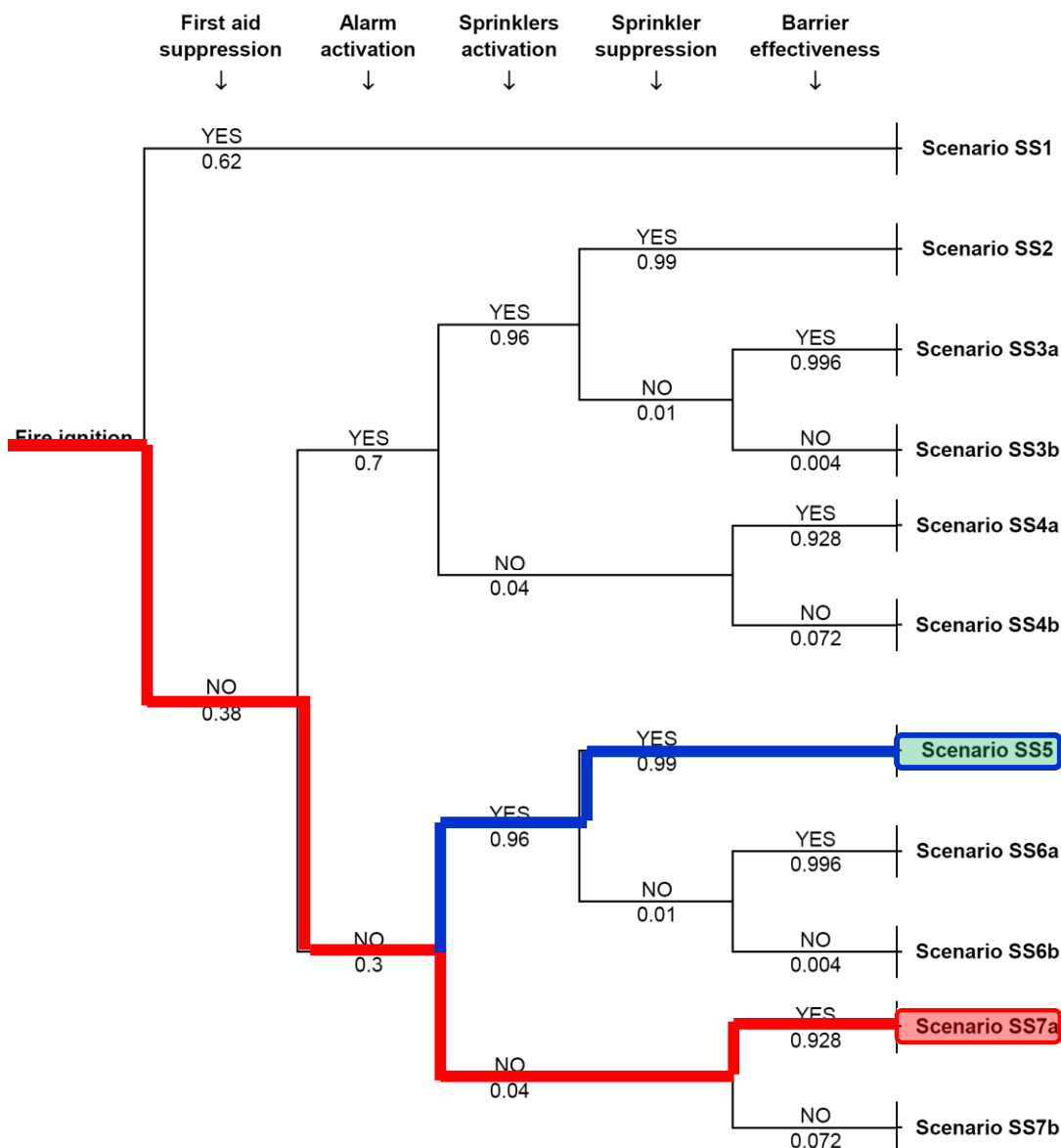
$$R = P \times C$$

La valutazione del Rischio R connesso a ciascuno scenario di incendio, ottenuto dal prodotto della Probabilità P di accadimento dello scenario per i Danni C (conseguenze) che lo stesso scenario può provocare (ISO/DS 16733).

Approccio EN1991-1-2 (Annex E)

I fenomeni capaci di modificare lo sviluppo dell’incendio sono considerati attraverso coefficienti riduttivi del carico di incendio.

Scenari di incendio e Protezione Attiva - Livelli di prestazione



Fire Risk Assessment e livelli di prestazione

Risk Ranking

Scenario	Probabilità	Conseguenze	Rischio	Risk Ranking
SS1	0.6200	0.00	0.0000	11
SS2	0.2528	0.06	0.0202	5
SS3a	0.0025	0.30	0.0008	8
SS3b	0.0000	0.30	0.0000	10
SS4a	0.0099	2.50	0.0247	4
SS4b	0.0008	5.00	0.0038	6
SS5	0.1083	0.30	0.0325	3
SS6a	0.0011	2.50	0.0027	7
SS6b	0.0000	5.00	0.0000	9
SS7a	0.0042	50.00	0.2116	1
SS7b	0.0003	100.00	0.0328	2

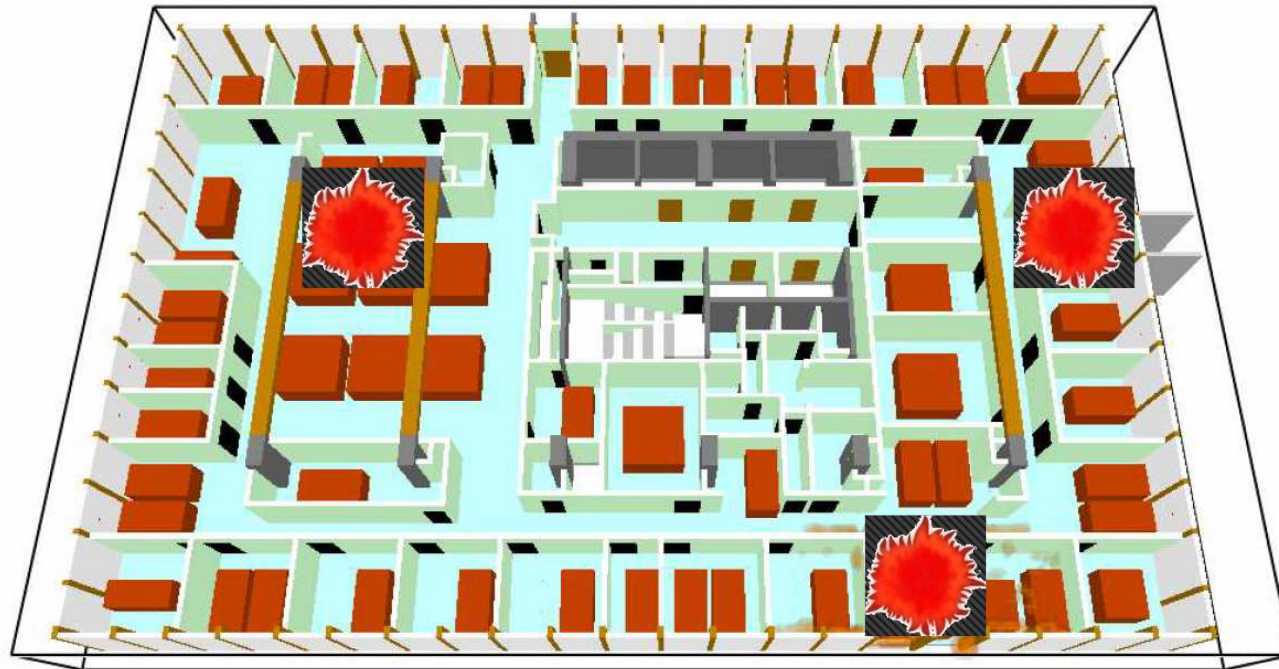
$$\underline{P \times C = R}$$

Livello di prestazione IV : danno limitato

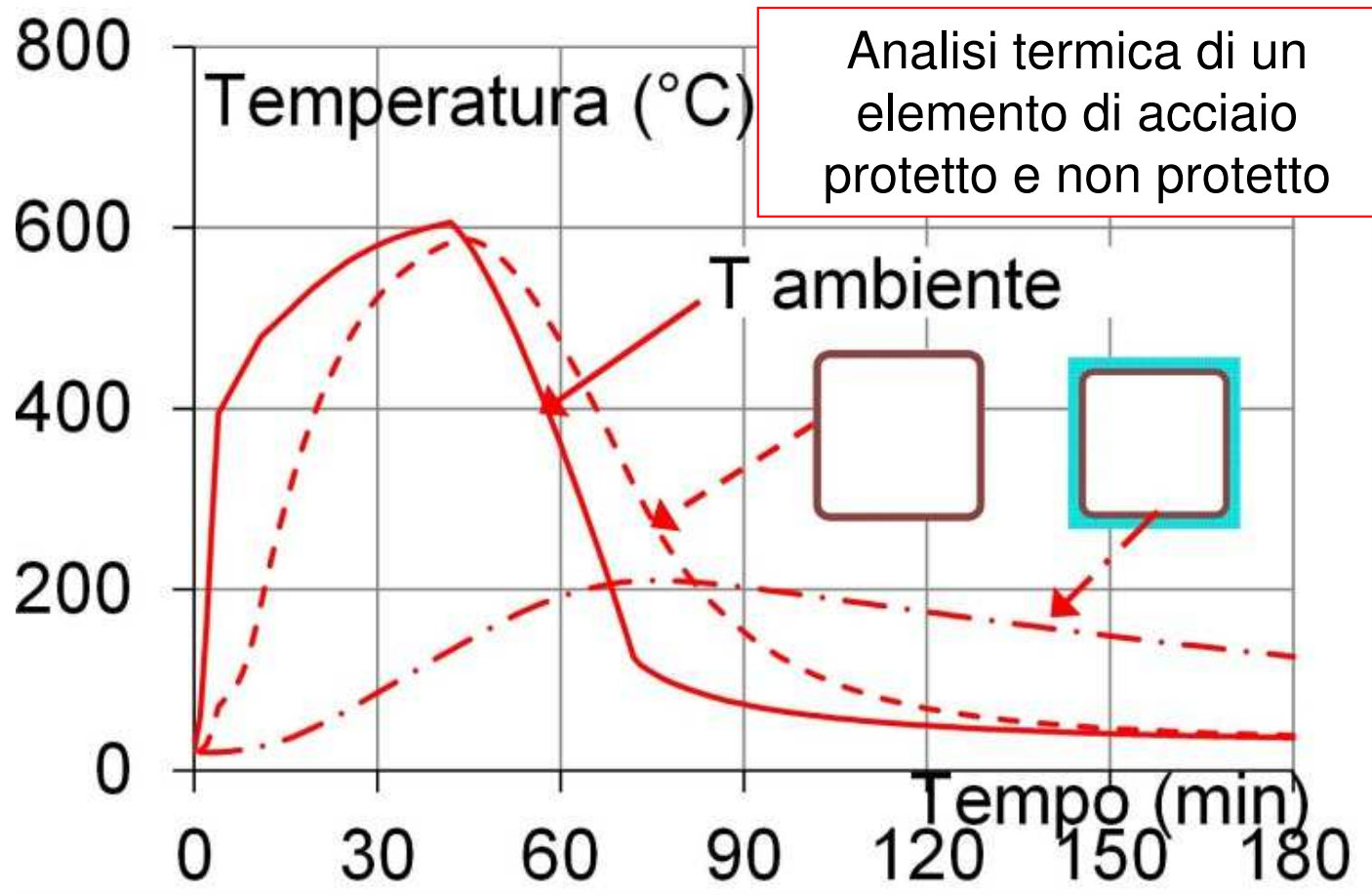
Livello di prestazione III : resistenza strutturale per tutto il tempo di esposizione

Scenari di incendio

Localizzazione dell'innesco



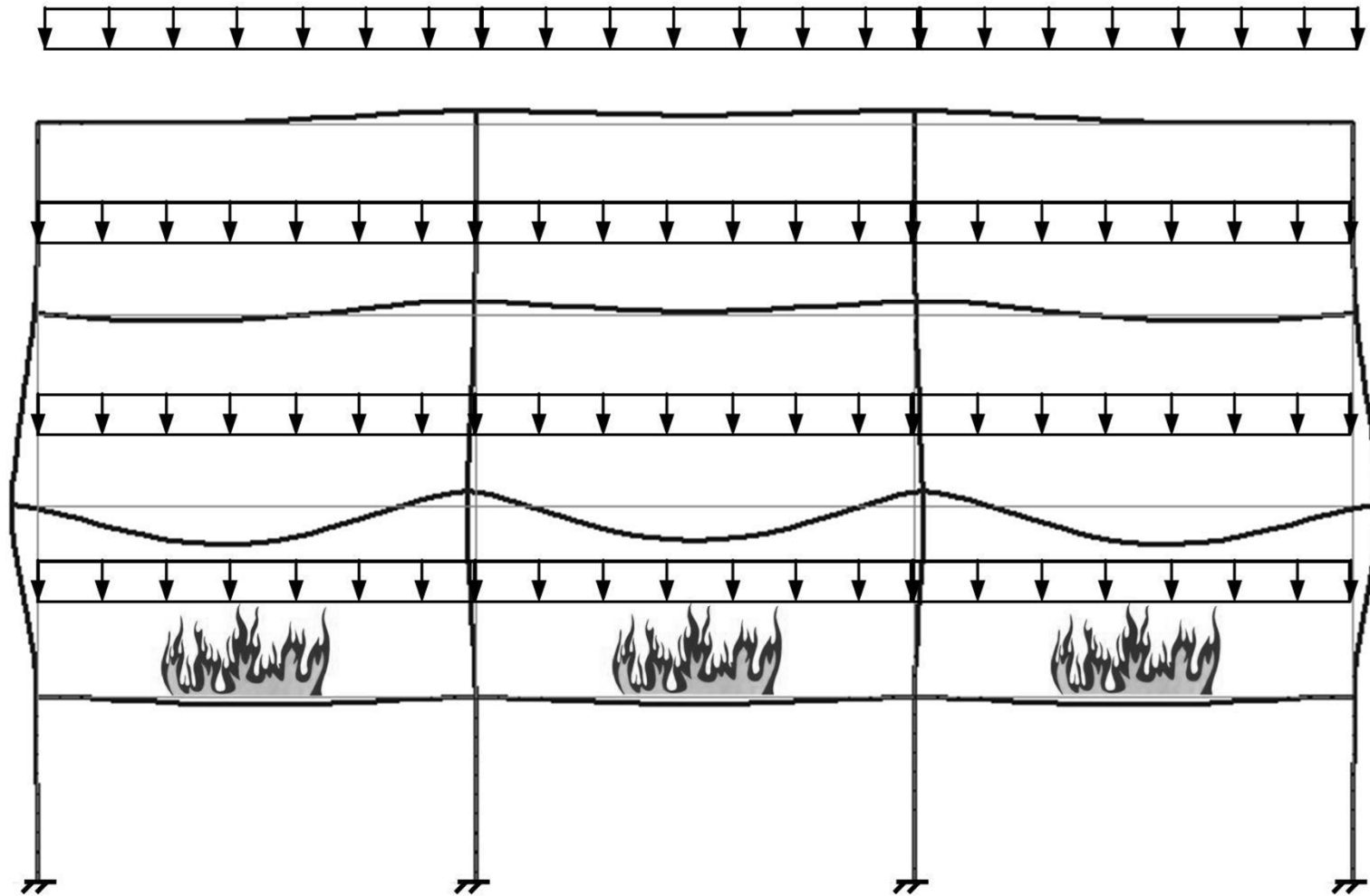
DISTRIBUZIONE DELLE TEMPERATURE NELLE SEZIONI



- ✓ Curva di incendio (modello a 1 zona)
- ✓ Analisi termica colonna

ANALISI INTERA STRUTTURA O SOTTOSTRUTTURE

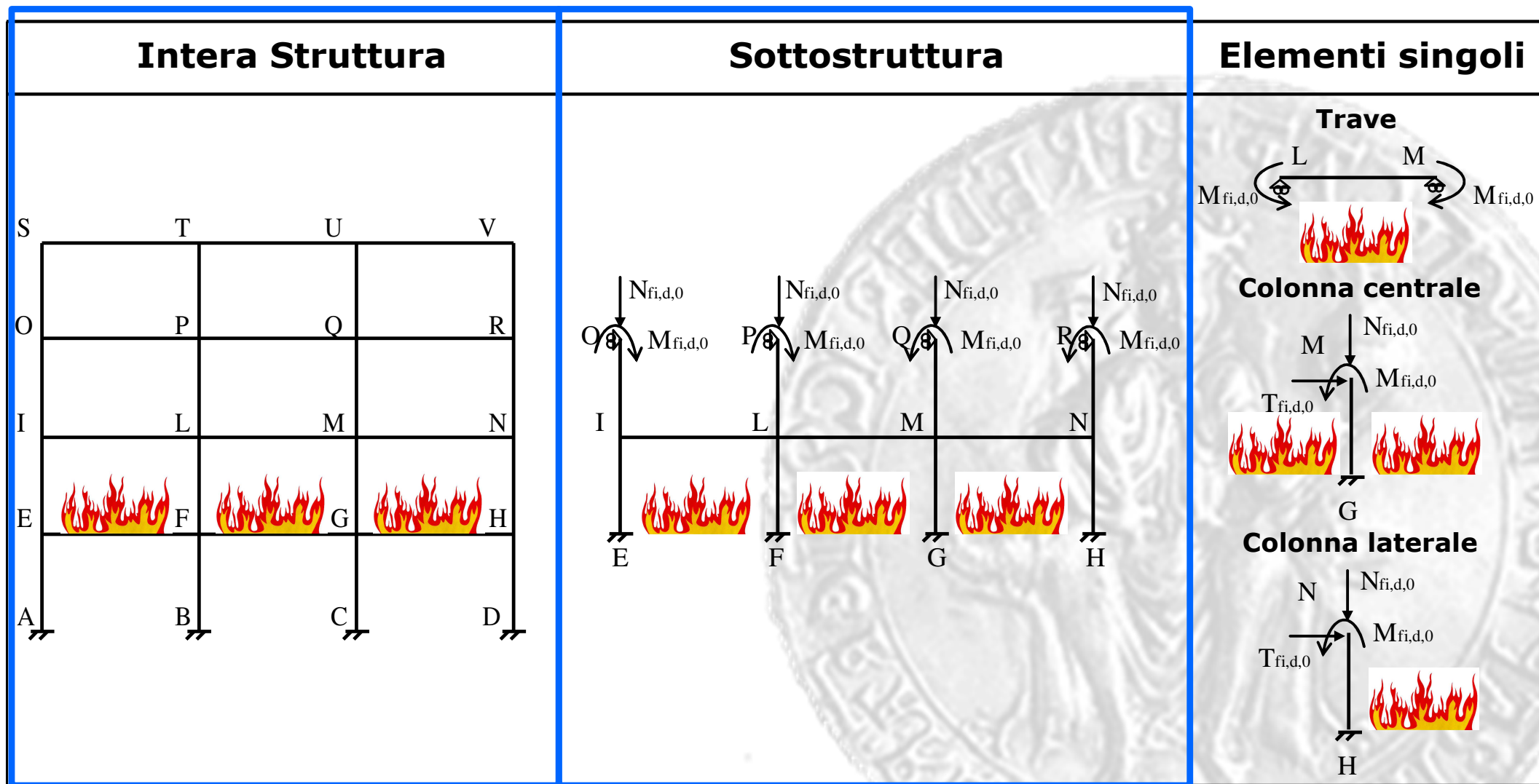
Schema delle deformazioni della struttura di un edificio multipiano conseguenti al caso di incendio che si verifica al primo piano dell'edificio.



Richiede la discretizzazione della struttura (generalmente FEM) e la modellazione della non linearità meccanica e geometrica, tenendo conto del degrado termomeccanico dei materiali e delle azioni indirette

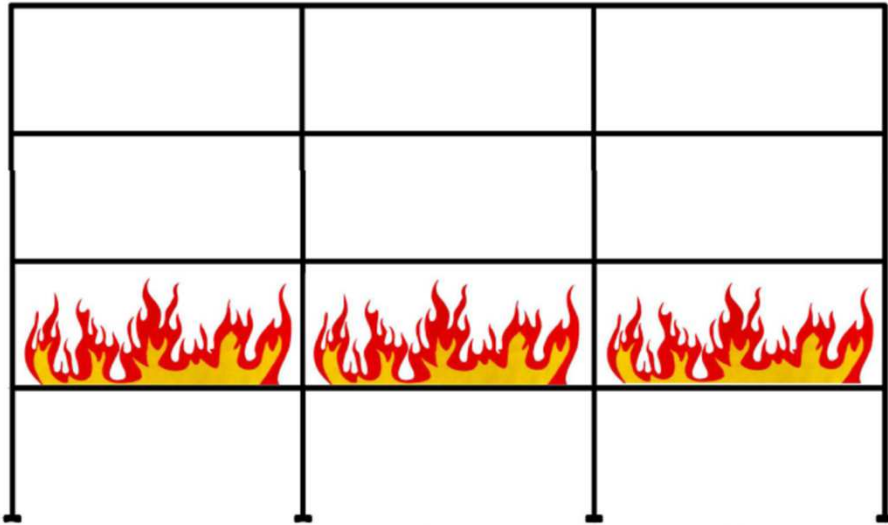
MODELLAZIONE STRUTTURALE – NTC 2018

- Si deve tener conto, ove necessario, degli **effetti delle sollecitazioni iperstatiche indirette** dovute alle dilatazioni termiche contrastate a meno che non sia riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli o siano implicitamente tenute in conto nei modelli semplificati e conservativi di comportamento strutturale in caso di incendio.
- Le sollecitazioni indirette, dovute agli elementi strutturali adiacenti a quello preso in esame, possono essere trascurate quando i requisiti di sicurezza all'incendio sono valutati in riferimento alla curva nominale d'incendio e alle classi di resistenza al fuoco.



Analisi termo-meccanica avanzata

TELAIO COMPOSTO MULTIPIANO
Incendio ad un piano



Deformata struttura durante l'incendio

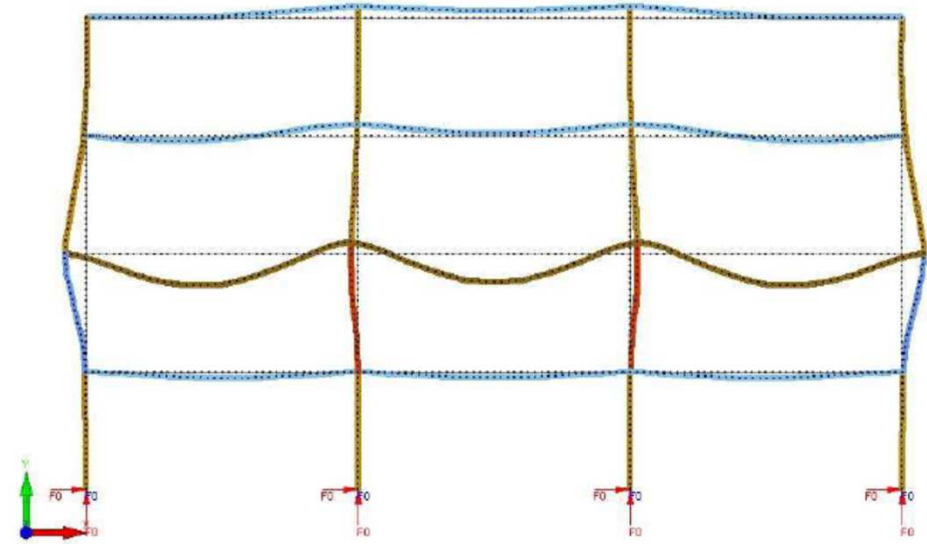


Diagramma dei momenti a $t=0$
(inizio transitorio termico)

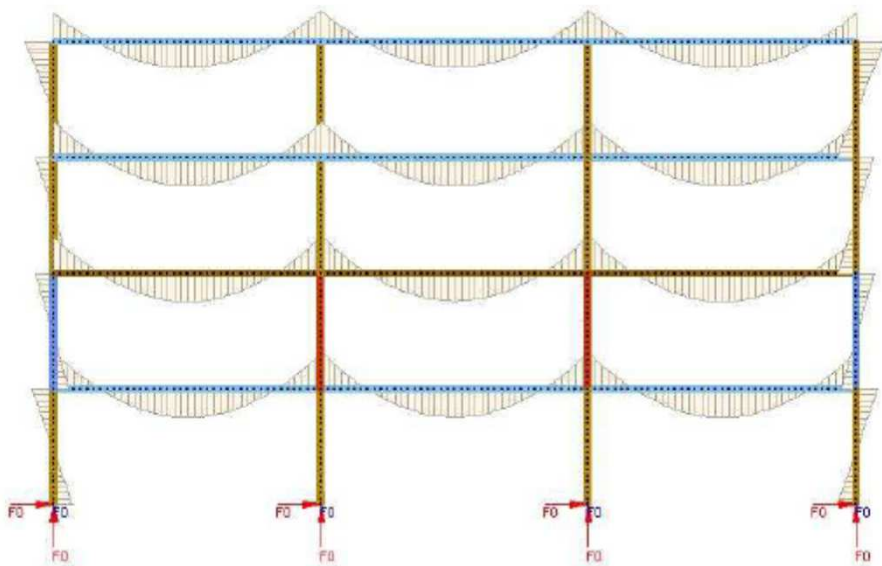
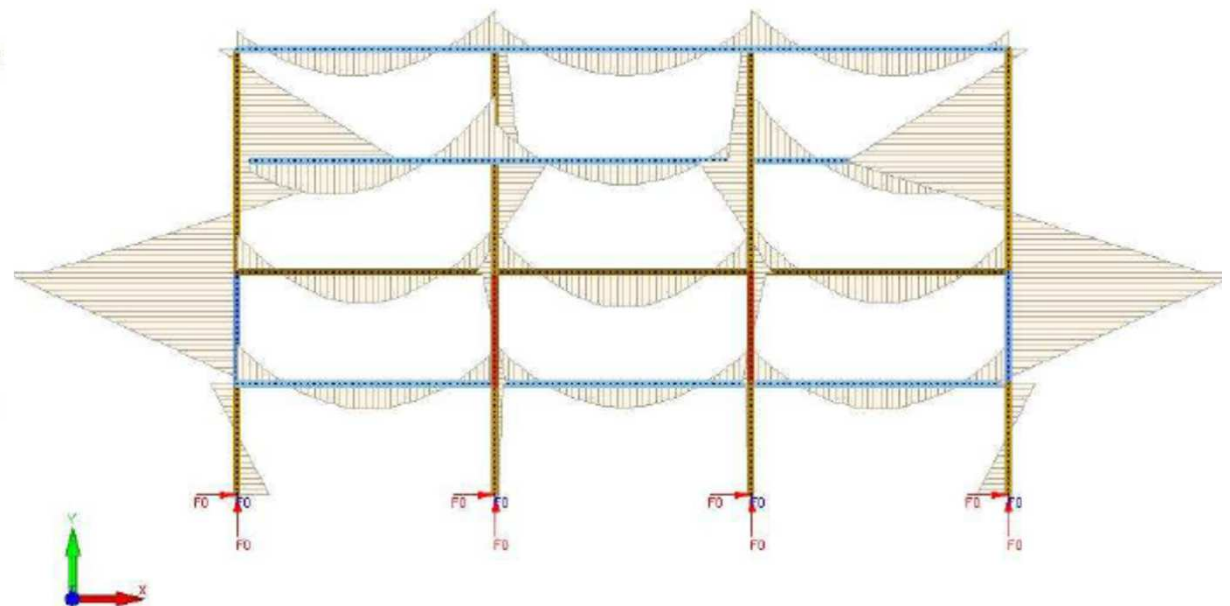
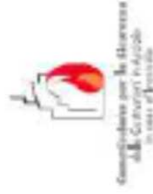


Diagramma dei momenti durante l'incendio
(azioni indirette)



CONCLUSIONI

- **Coerentemente con le Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018), la verifica della prestazione di resistenza al fuoco delle strutture, richiesta anche dalle Norme tecniche di prevenzione incendi (Codice P.I.), deve essere inclusa fin dal principio nel processo generale della progettazione, esecuzione e collaudo delle strutture stesse.**
- **In sostanza, il progetto delle strutture deve contenere anche la verifica di resistenza al fuoco, ovvero la verifica di sicurezza nei confronti della combinazione eccezionale in condizioni di incendio (combinazione di carico definita nelle NTC al pari delle altre di SLU e SLE), come espressamente richiesto dalle Norme Tecniche delle Costruzioni nelle sue varie parti, a cominciare dai principi generali enunciati nel capitolo 2. Di conseguenza anche le fasi di esecuzione e di collaudo delle strutture devono comprendere le attività relative alla prestazione di resistenza al fuoco richiesta alle strutture.**
- **Qualunque differente impostazione ed iter procedurale risulterebbero contrari alle norme vigenti !**
- **In tal senso, la prassi spesso seguita in passato in cui la verifica di resistenza al fuoco si eseguiva esclusivamente, laddove necessario, individuando al di fuori delle fasi di progetto strutturale e di esecuzione della struttura un rivestimento protettivo della struttura di acciaio oggi sarebbe un percorso, oltre che non coerente con le normative vigenti, poco razionale e tecnicamente impraticabile sia per il dimensionamento del sistema protettivo, sia per quello della struttura portante di acciaio e/o composta acciaio-calcestruzzo.**
- **D'altro canto, le strutture, se progettate adeguatamente fin dal principio anche nei confronti degli effetti dell'incendio, potrebbero soddisfare i requisiti di resistenza al fuoco (sia nell'ambito dell'approccio prescrittivo che di quello ingegneristico) tramite opportune scelte di ottimizzazione degli schemi statici e degli elementi strutturali, tenendo conto anche delle peculiarità di ciascuna tipologia strutturale.**



Sicurezza in caso di incendio
LE STRUTTURE DI ACCIAIO



**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE**

**ISTRUZIONI
TECNICHE**

www.promozioneacciaio.it

Biblioteca Tecnica Hoepli

EMIDIO NIGRO
GIUSEPPE CEFARELLI

SANDRO PUSTORINO
PAOLA PRINCI

Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio

secondo gli Eurocodici
e le Norme Tecniche per le costruzioni



HOEPLI

www.hoepli.it