

Nomogramma

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



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

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 carico 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 svergolamento.

Non sono inclusi metodi di calcolo per elementi con sezione composta acciaio-clc. La sezione risulta verificata fino a che la resistenza di progetto è superiore alle sollecitazioni di progetto:

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

dove

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

$R_{fi,d,t}$ 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.

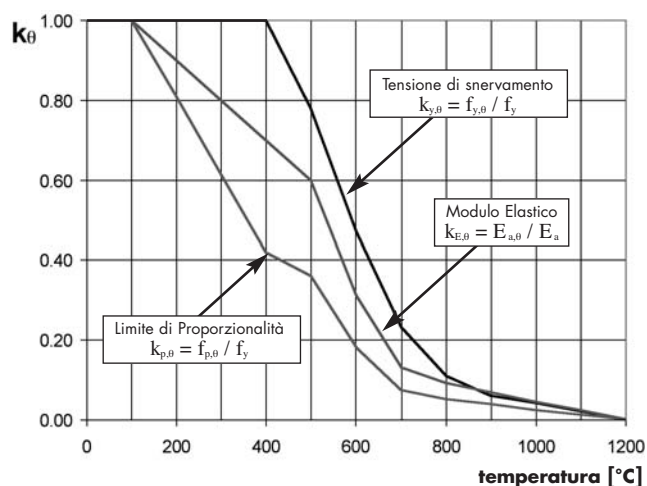


Fig. 1: Curve di riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio

2.3 - Classe di duttilità delle sezioni

La classe di duttilità indica la capacità di rotazione plastica della sezione. Nelle tab. 1, 2 e 3 sono riportati i rapporti dimensionali limite per le parti delle sezioni sottoposte a compressione e flessione, stabiliti da EN 1993-1-1. La classe della sezione corrisponde alla massima classe delle parti che la compongono. Un elemento che non soddisfa i limiti per la classe 3 è ritenuto di classe 4. Per la classificazione in caso di incendio è necessario adottare il valore di ε :

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ [N/mm}^2]) \quad [2.2]$$

In tab. 4 sono riportati i valori di ε e ε^2 per i vari tipi di acciaio.

2.4 - Temperatura dell'acciaio

L'incremento di temperatura negli elementi in acciaio è legato a:

- Fattore di sezione: corrisponde al rapporto tra la superficie esposta al flusso di calore e il volume dell'elemento per unità di lunghezza (per i profili a sezione costante il fattore di sezione corrisponde al rapporto tra il perimetro della sezione trasversale esposto e l'area della stessa). Nei paragrafi 4.1 e 4.2 sono riportati i metodi per il calcolo e i valori del fattore di sezione per i principali tipi di sezioni in acciaio;

- Proprietà termiche del materiale di protezione:

λ_p conducibilità termica	[W/(m·K)]
c_p calore specifico	[J/(kg·K)]
ρ_p densità	[kg/m ³]

Nell'ambito degli obiettivi del presente strumento, al fine di permettere valutazioni della resistenza al fuoco di strutture protette, vengono forniti alcuni valori di riferimento delle proprietà termiche dei materiali protettivi tratte da riferimenti bibliografici (UNI 9503). Va ricordato che la definizione di tali proprietà è oggetto di specifiche normative per la qualificazione dei prodotti di protezione al fuoco anche al fine dell'ottenimento della marcatura CE. Pertanto le proprietà termiche dei materiali protettivi devono essere determinate soltanto nell'ambito di tali procedure, che per il caso specifico, riferiscono alle norme ENV 13381-4 e ENV 13381-8.

2.5 - Distribuzione di temperatura

I fattori K_1 e K_2 sono utilizzati allo scopo di tenere in conto gli effetti della distribuzione non uniforme di temperatura sulla sezione trasversale e lungo l'asse del profilo nel caso di elementi staticamente indeterminati. Il valore dei fattori deve essere scelto in analogia a quanto specificato di seguito:

K_1 : fattore per la distribuzione non uniforme sulla sezione trasversale

$K_1 = 1$ per esposizione al fuoco su 4 lati
 $K_1 = 0,7$ per sezioni non protette con esposizione al fuoco su 3 lati
 $K_1 = 0,85$ per sezioni protette con esposizione al fuoco su 3 lati

K_2 : fattore per la distribuzione non uniforme lungo l'elemento

$K_2 = 0,85$ in corrispondenza dei vincoli per travi iperstatiche
 $K_2 = 1$ in tutti gli altri casi

Nel calcolo è necessario determinare $K = K_1 \cdot K_2$

Tab. 1: Classe di duttilità

Classe	Parti soggette a flessione	
	Asse di flessione	Asse di flessione
Distribuzione delle tensioni (positivo se di compressione)		
1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 33 \varepsilon$
2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$
Distribuzione delle tensioni (positivo se di compressione)		
3	$c/t \leq 124 \varepsilon$	$c/t \leq 42 \varepsilon$

Tab. 2: Classe di duttilità

Classe	Parti soggette a compressione	
	Sezioni laminare	Sezioni saldate
Distribuzione delle tensioni (positivo se di compressione)		
1	$c/t \leq 9 \varepsilon$	
2	$c/t \leq 10 \varepsilon$	
3	$c/t \leq 14 \varepsilon$	

Tab. 3: Classe di duttilità

Classe	Parti soggette a compressione	
	Sezione in flessione e compressione	
Distribuzione delle tensioni (positivo se di compressione)		
3	$h/t \leq 15 \varepsilon$; $(b+h)/(2t) \leq 11,5 \varepsilon$	
Distribuzione delle tensioni (positivo se di compressione)		
1	$d/t \leq 50 \varepsilon^2$	
2	$d/t \leq 70 \varepsilon^2$	
3	$d/t \leq 90 \varepsilon^2$	
Nota: per $d/t > 90 \varepsilon^2$ vedi EN 1993-1-6		

Tab. 4: Valore di ε e ε^2 in caso di incendio

f_y	S235	S275	S355	S460
ε	0,85	0,79	0,69	0,61
ε^2	0,72	0,62	0,48	0,37

3 - PROCEDIMENTO DI CALCOLO DELLA TEMPERATURA CRITICA DELL'ELEMENTO

3.1 - Elementi tesi e inflessi

- Calcolo del fattore di utilizzazione μ_0

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad [3.1]$$

- Determinazione del coefficiente κ per la distribuzione di temperatura (vedi 2.5).

- Determinazione della temperatura critica dal grafico (Fig. 4).

3.2 - Elementi compressi

3.2.1 - Introduzione al metodo semplificato

La resistenza all'instabilità di progetto $N_{b,fi,Rd}$ di elementi di classe 1, 2 o 3 con temperatura uniforme θ , può essere definita come segue:

$$N_{b,fi,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y = f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot A \quad [3.2]$$

dove

A area della sezione

$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}}$ tensione critica di compressione alla temperatura θ e per snellezza adimensionale $\bar{\lambda}$.

3.2.2 - Procedimento di calcolo

- Determinazione della snellezza adimensionale dell'elemento:

$$\bar{\lambda}_{(20^\circ C)} = \frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{l_{fi}}{i \cdot \lambda_1} \quad [3.3]$$

dove:

l_{fi} lunghezza di libera inflessione

i raggio di inerzia della sezione

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad f_y \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad [3.4]$$

In caso di edifici controventati in cui ogni piano costituisce un compartimento separato, nei piani intermedi la lunghezza di libera inflessione l_{fi} di una colonna continua può essere assunta pari a $l_{fi}=0,5L$ (con L si intende l'altezza di interpiano), mentre all'ultimo piano può essere assunta $l_{fi}=0,7L$.

- Calcolo della tensione critica di compressione, per la quale la resistenza diventa uguale al carico applicato:

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \frac{N_{fi,Ed}}{A} \quad [3.5]$$

dove

$N_{fi,Ed}$ sollecitazione di progetto in caso di incendio

A area della sezione

- Determinazione della temperatura critica in accordo alla tabella Tab. 5 per S235, Tab. 6 per S275, Tab. 7 per S355 e Tab. 8 per S460.

Tab. 5, 6, 7, 8: Temperatura critica - elementi compressi

Temperatura critica θ_a - S235						
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
$\bar{\lambda}_{(20^\circ C)}$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot [N/mm^2]$					
0,0	235	183	110	54	26	14
0,1	218	171	102	50	24	13
0,2	202	159	94	46	22	13
0,3	187	147	87	42	21	12
0,4	171	136	80	38	19	11
0,5	156	124	72	34	18	10
0,6	140	113	65	30	16	10
0,7	126	102	58	26	15	9
0,8	112	91	51	23	13	8
0,9	99	81	45	20	12	7
1,0	88	73	40	18	11	7
1,1	78	65	35	16	9	6
1,2	70	58	31	14	8	6
1,3	62	52	28	12	8	5
1,4	56	47	25	11	7	5
1,5	50	42	22	10	6	4
1,6	45	38	20	9	6	4
1,7	41	35	18	8	5	4
1,8	37	31	17	7	5	3
1,9	34	29	15	7	4	3
2,0	31	26	14	6	4	3

Temperatura critica θ_a - S275						
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
$\bar{\lambda}_{(20^\circ C)}$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot [N/mm^2]$					
0,0	275	215	129	63	30	17
0,1	256	201	120	58	28	16
0,2	239	188	112	54	27	15
0,3	222	175	103	50	25	14
0,4	204	162	95	45	23	13
0,5	187	149	86	41	21	12
0,6	169	135	78	36	19	11
0,7	151	122	69	32	18	11
0,8	135	110	62	28	16	10
0,9	120	98	54	24	14	9
1,0	106	87	48	21	13	8
1,1	94	78	42	19	11	7
1,2	83	69	38	16	10	7
1,3	74	62	33	15	9	6
1,4	67	56	30	13	8	6
1,5	60	50	27	12	7	5
1,6	54	45	24	10	7	5
1,7	49	41	22	9	6	4
1,8	45	38	20	9	6	4
1,9	41	34	18	8	5	4
2,0	37	32	17	7	5	3

Temperatura critica θ_a - S355						
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
$\bar{\lambda}_{(20^\circ C)}$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot [N/mm^2]$					
0,0	355	277	167	82	39	21
0,1	334	261	157	76	37	20
0,2	313	246	147	71	35	19
0,3	293	231	137	66	33	18
0,4	272	215	126	60	31	17
0,5	250	199	116	54	28	16
0,6	227	182	105	49	26	15
0,7	204	165	94	43	24	14
0,8	182	148	83	38	21	13
0,9	161	132	73	33	19	12
1,0	143	118	65	29	17	11
1,1	126	105	57	25	15	10
1,2	112	93	51	22	14	9
1,3	100	83	45	19	12	8
1,4	89	75	40	17	11	8
1,5	80	67	36	15	10	7
1,6	72	61	32	14	9	6
1,7	65	55	29	13	8	6
1,8	59	50	26	11	7	5
1,9	54	46	24	10	7	5
2,0	49	42	22	9	6	4

Temperatura critica θ_a - S460						
	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C	900°C
$\bar{\lambda}_{(20^\circ C)}$	$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} \cdot [N/mm^2]$					
0,0	460	359	216	106	51	28
0,1	435	341	204	100	48	26
0,2	412	323	193	93	46	25
0,3	388	305	181	87	43	24
0,4	362	286	169	80	41	23
0,5	335	266	155	73	38	22
0,6	305	245	141	66	35	21
0,7	276	222	127	58	32	19
0,8	246	200	112	51	29	18
0,9	218	179	99	44	26	16
1,0	193	159	87	39	23	15
1,1	170	142	77	34	21	14
1,2	151	126	68	30	19	12
1,3	134	112	60	26	17	11
1,4	119	100	54	23	15	10
1,5	107	90	48	21	13	9
1,6	96	81	43	18	12	8
1,7	87	73	39	17	11	8
1,8	79	67	35	15	10	7
1,9	72	61	32	14	9	6
2,0	66	56	29	12	8	6

4 - PROCEDIMENTO DI CALCOLO DELLA RESISTENZA AL FUOCO DELL'ELEMENTO.

4.1 - Elementi non protetti

Fattore di sezione

Per le sezioni non protette è possibile utilizzare il fattore di sezione modificato per tenere conto dello "shadow effect":

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = 0,9 \cdot \left[\frac{A_m}{V} \right]_b \quad \text{per sezioni a doppio T (m}^{-1}\text{)} \quad [4.1]$$

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = \left[\frac{A_m}{V} \right]_b \quad \text{per altri tipi di sezione (m}^{-1}\text{)} \quad [4.2]$$

in cui

A_m superficie esposta al fuoco per unità di lunghezza

V volume di acciaio per unità di lunghezza

$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh}$ fattore di sezione modificato

$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b$ fattore di sezione per protezioni scatolari (vedi tab. 12)

In tabella 10 sono riportati i metodi per il calcolo del fattore di sezione approssimato per differenti tipi di sezioni in acciaio:

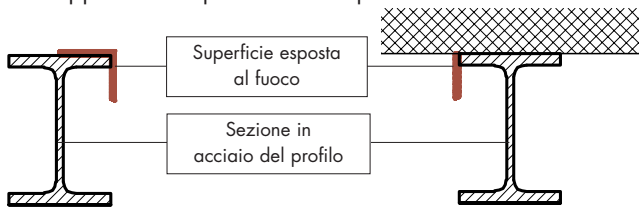


Fig. 2: Fattore di sezione elementi non protetti - sezioni doppio T

4.2 - Elementi protetti

Fattore di sezione

$\frac{A_p}{V}$ = perimetro interno del rivestimento / area sezione in acciaio

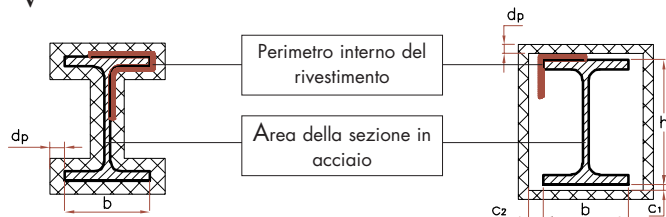


Fig. 3: Calcolo del fattore di sezione per elementi protetti - sezioni doppio T

Proprietà dei materiali di protezione dal fuoco

In maniera semplificata e a favore di sicurezza si modifica il fattore di sezione nel modo seguente, per tenere conto delle proprietà dei materiali di protezione al fuoco:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \quad [W/(m^2K)] \quad [4.3]$$

in cui:

λ_p conducibilità termica del materiale di protezione

d_p spessore del materiale di protezione

$\frac{A_p}{V}$ fattore di sezione (vedi tab. 12)

In tabella 9 sono indicate le caratteristiche termiche di alcuni tipi di materiali di protezione.

Tab. 9: Caratteristiche termiche dei materiali di protezione (UNI9503: 1989)

Materiale	Massa volumica ρ_p [kg/m ³]	Conducibilità termica λ_p [W/m°C]	Calore specifico C_p [J/kg°C]
Fibre minerali a spruzzo	250-300	0,10	1100
Lastre di perlite o vermiculite	300-800	0,15	1100
Lastre di silicati	450-900	0,15	1100
Lastre di gesso	800	0,20	1700
Lastre di lana minerale	120-150	0,25	1100
Calcestruzzo cellulare	600-1300	0,30-0,65	1200
Calcestruzzo leggero	1600	0,80	1200
Laterizi	2000	1,00	1200
Calcestruzzo siliceo	2400	1,70	1200
Calcestruzzo calcareo	2200	1,30	1200

Tab. 10: Fattore di sezione approssimato

Descrizione	$[A_m/V]_{sh}$
Piastre 	Esposte su tutto il contorno: $\approx 2/t$ Esposte su un lato: $\approx 1/t$
Sezioni aperte con spessore uniforme 	Esposte su tutto il contorno: $\approx 2/t$
Sezioni tubolari con spessore uniforme 	Esposte sulla superficie esterna: $\approx 1/t$ (per lunghezza $\gg t$ e con l'ipotesi che non ci sia irraggiamento tra le superfici interne)
Sezioni solide 	Esposte su tutto il contorno: $\approx 4/d$

Tab. 11: Fattore di sezione elementi protetti

Descrizione	A_p/V
Protezione aderente a spessore costante 	$\frac{\text{Perimetro sezione in acciaio}}{\text{Area sezione in acciaio}}$
Protezione scatolare ¹ a spessore costante 	$\frac{\text{Protezione scatolare}^1: 2(b+h)}{\text{Area sezione in acciaio}}$
Protezione aderente a spessore costante, esposizione su tre lati 	$\frac{\text{Protezione aderente: Perimetro sezione in acciaio} - b}{\text{Area sezione in acciaio}}$
Protezione scatolare ¹ a spessore costante, esposizione su tre lati 	$\frac{\text{Protezione scatolare}^1: (2h+b)}{\text{Area sezione in acciaio}}$

¹⁾ c_1 e $c_2 < h/4$

protezione al fuoco (spessore d_p)

sezione di acciaio

contorno interno A_p

5 - ESEMPI DI APPLICAZIONE

Esempio A1

Dati: Sollecitazione in caso di incendio, spessore e tipo di protezione, fattore di sezione

Risultati: Resistenza al fuoco

Colonna HEA300 (S235), protetta con lastre di silicati ($d_p = 25$ mm, $\lambda_p = 0,15$ W/(m·K)).
Lunghezza di libera inflessione $l_{fi} = 4$ m.

$N_{fi,Ed} = 1065$ kN Sforzo normale in caso di incendio

Procedimento di calcolo:

- Determinazione della snellezza adimensionale:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9$$

$$\bar{\lambda}_{(20^\circ\text{C})} = \frac{l_{fi}}{i \cdot \lambda_1} = \frac{4}{0,0749 \cdot 93,9} = 0,57$$

- Determinazione della tensione critica di compressione:

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \frac{N_{fi,Ed}}{A} = \frac{1065000}{11250} = 95 \text{ N/mm}^2$$

- Dalla tabella 5 si ottiene la temperatura critica: $T_{cr} = 544$ °C

- Fattore di sezione modificato per elementi protetti:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 105 \cdot \frac{0,15}{0,025} = 630 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$$

- Dal grafico Fig. 4 la temperatura critica è raggiunta con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 106$ min, per cui la resistenza al fuoco è classificata R90.

Esempio A2

Solite condizioni dell'esempio A1, ma con sforzo normale di progetto maggiore:

$N_{fi,Ed} = 1596$ kN sforzo normale in caso di incendio

- Dalla tabella 5 si ottiene la temperatura critica: $T_{cr} = 411$ °C.

- Dal grafico Fig. 4 si ottiene la resistenza: $t_{es} = 71$ min (classe R60)

Esempio B

Dati: Resistenza al fuoco, sollecitazioni in caso di incendio.

Risultati: Spessore di protezione.

Trave soggetta a flessione IPE300 (S275). Sono esclusi fenomeni di svergolamento perché la trave è connessa ad una soletta in c.a. Resistenza richiesta R90.

$M_{fi,Ed} = 79$ kN·m momento flettente in caso di incendio

Procedimento di calcolo:

- Si determina il fattore di utilizzazione: la sezione è di classe 1 in caso di flessione pura (è possibile usare il modulo di resistenza plastico W_{pl})

$$\mu_0 = \frac{M_{fi,Ed}}{W_{pl} \cdot f_y} = \frac{7900000}{628,4 \cdot 27500} = 0,457$$

- Si determina: $K = K_1 \cdot K_2 = 0,7$ (non protette esposte su tre lati)

- Dal grafico Fig. 4 si ottiene la temperatura critica: $T_{cr} = 662$ °C

- Fattore di sezione: 125 m⁻¹

- Dal grafico Fig. 4 la temperatura critica è raggiunta con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 17$ min.

La sezione non risulta verificata sarà, perciò, applicata una protezione costituita da intonaco a base di vermiculite ($\lambda_p = 0,15$ W/(m·K))

- Si determina: $K = K_1 \cdot K_2 = 0,85$ (protette esposte su tre lati)

- Dal grafico Fig. 4 si ottiene la temperatura critica: $T_{cr} = 633$ °C

- Dal grafico Fig. 4 per garantire una temperatura inferiore alla temperatura critica per un tempo di esposizione di 90 min occorre adottare un fattore di sezione modificato

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 1070$$

- Da cui:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 188 \cdot \frac{0,15}{d_p} = 1070 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$$

$$d_p = 0,02636 \text{ m} \cong 26,4 \text{ mm spessore di protettivo necessario}$$

Esempio C

Dati: Temperatura critica, resistenza al fuoco, fattore di sezione

Risultati: Spessore protezione

Sezione di classe 4 ($T_{cr} = 350$ °C). Fattore di sezione 200 m⁻¹. Resistenza richiesta R60. Tipo di protezione: fibre minerali a spruzzo ($\lambda_p = 0,1$ W/(m·K)).

Procedimento di calcolo:

- Dal grafico Fig. 4 per garantire una temperatura dell'elemento inferiore alla temperatura critica per un tempo di esposizione di 60 min occorre adottare un fattore di sezione modificato $S/V_{mod} = 610$

- Da cui:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 200 \cdot \frac{0,1}{d_p} = 610 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$$

$$d_p = 0,03279 \text{ m} \cong 32,8 \text{ mm spessore di protettivo necessario.}$$

Esempio D

Dati: Sollecitazione in caso di incendio, lunghezza della colonna, fattore di sezione

Risultati: Resistenza al fuoco

Colonna tubolare: diametro 250 mm, spessore 10 mm (S355). Lunghezza di libera inflessione $l_{fi} = 3,25$ m

$N_{fi,Ed} = 500$ kN sforzo normale in caso di incendio

Procedimento di calcolo:

- Determinazione del fattore di sezione:

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_{sh} = \frac{1}{sp} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ m}^{-1}$$

- Determinazione della snellezza adimensionale:

$$\lambda_1 = 93,9 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda}_{(20^\circ\text{C})} = \frac{l_{fi}}{i \cdot \lambda_1} = \frac{3,25}{0,085 \cdot 76,4} = 0,50$$

- Determinazione della tensione critica di compressione:

$$f'_{y,\theta,\bar{\lambda}} = \frac{N_{fi,Ed}}{A} = \frac{500000}{7539,8} = 66,3 \text{ N/mm}^2$$

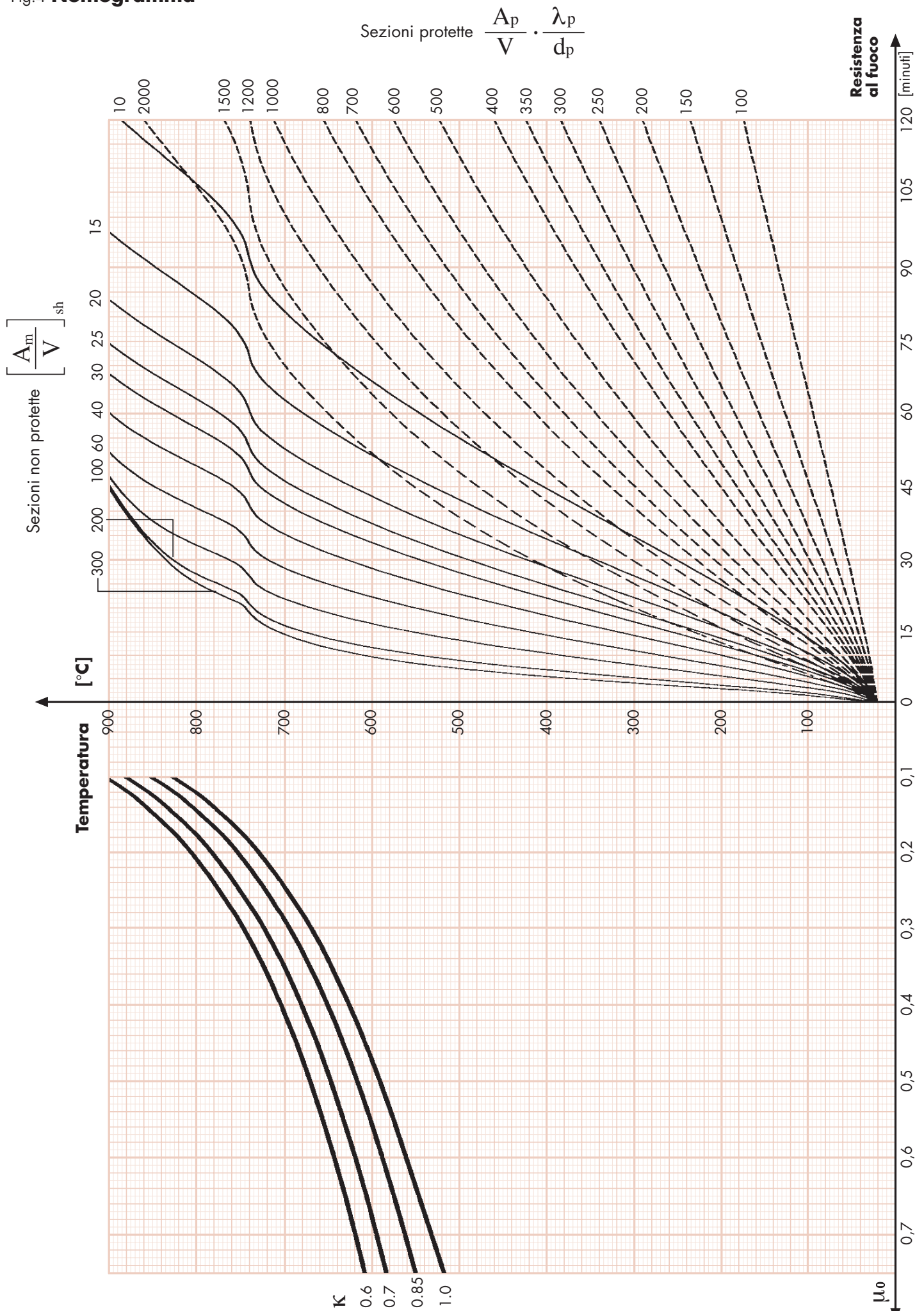
- Dalla tab. 7 si ottiene la temperatura critica: $T_{cr} = 680$ °C.

- Dal grafico Fig. 4 la temperatura critica è raggiunta con un tempo di esposizione pari a $t_{es} = 20$ min, per cui la resistenza al fuoco è classificata R15.

Tab.12: Valori dei fattori di sezione di profili laminati (m⁻¹)

IPE					HD					HE					UC				
Protette Protette Protette Protette 					Protette Protette Protette Protette 					Protette Protette Protette Protette 					Protette Protette Protette Protette 				
IPE 80 A	437	509	317	389	HD 260x54,1	176	214	108	146	HE 100 AA	290	355	181	245	HE 700x352	51	58	39	46
IPE 80	369	429	270	330	HD 260x68,2	141	171	88	117	HE 100 A	217	264	138	185	HE 700x418	44	50	34	40
IPE A 100	389	452	286	349	HD 260x93,0	105	127	66	88	HE 100 B	180	218	115	154	HE 800 AA	108	122	84	98
IPE 100	334	387	247	300	HD 260x114	86	104	55	73	HE 100 M	96	116	65	85	HE 800 A	84	94	66	76
IPE A 120	370	428	271	329	HD 260x142	71	86	46	60	HE 120 AA	296	361	182	247	HE 800 B	72	81	57	66
IPE 120	311	360	230	279	HD 260x172	59	72	39	51	HE 120 A	220	267	137	185	HE 800 M	60	68	48	55
IPE A 140	354	409	260	314	HD 320x74,2	152	184	95	127	HE 120 B	167	202	106	141	HE 800x373	52	59	41	48
IPE 140	291	335	215	259	HD 320x97,6	117	141	74	98	HE 120 M	92	111	61	80	HE 800x444	44	50	35	41
IPE A 160	392	382	245	295	HD 320x127	91	110	58	77	HE 140 AA	281	342	172	233	HE 900 AA	101	113	81	93
IPE 160	269	310	200	241	HD 320x158	74	89	48	63	HE 140 A	208	253	129	174	HE 900 A	81	90	65	74
IPE A 180	308	354	227	274	HD 320x198	60	72	39	51	HE 140 B	155	187	98	130	HE 900 B	70	78	57	65
IPE 180	253	291	188	226	HD 320x245	50	60	33	43	HE 140 M	88	106	58	76	HE 900 M	62	69	50	57
IPE O 180	226	260	168	202	HD 320x300	42	50	28	36	HE 160 AA	244	297	150	203	HE 900x391	54	60	43	49
IPE A 200	283	326	210	253	HD 360x134	104	125	63	85	HE 160 A	180	222	115	155	HE 900x466	45	51	37	42
IPE 200	235	270	176	211	HD 360x147	95	114	58	78	HE 160 M	83	100	54	71	HE 1000 AA	98	108	79	90
IPE O 200	212	244	158	190	HD 360x162	87	105	53	71	HE 180 AA	229	279	141	190	HE 1000x249	88	97	71	81
IPE A 220	260	298	193	231	HD 360x179	79	95	49	65	HE 180 A	187	226	115	155	HE 1000 A	81	89	66	74
IPE 220	221	254	165	198	HD 360x196	72	87	45	60	HE 180 B	131	159	83	110	HE 1000 B	70	78	57	65
IPE O 220	200	230	149	179	HD 400x187	78	94	47	64	HE 180 M	80	96	52	68	HE 1000 M	64	70	52	59
IPE A 240	240	276	178	214	HD 400x216	68	82	42	56	HE 200 AA	211	256	130	175	HE 1000x393	57	63	47	53
IPE 240	205	236	153	184	HD 400x237	63	76	38	52	HE 200 A	174	211	108	145	HE 1000x415	54	60	44	50
IPE O 240	185	213	139	167	HD 400x262	57	69	35	47	HE 200 B	122	147	77	102	HE 1000x438	51	57	42	48
IPE A 270	230	265	171	205	HD 400x287	52	63	32	43	HE 200 M	76	92	49	65	HE 1000x494	46	51	38	43
IPE 270	197	227	147	176	HD 400x314	48	58	30	40	HE 220 AA	200	242	122	165	HE 1000x584	39	44	33	37
IPE O 270	170	195	127	152	HD 400x347	44	53	28	37	HE 220 A	161	195	99	134	HL 920x345	69	79	52	62
IPE A 300	216	248	160	192	HD 400x382	40	49	25	34	HE 220 B	115	140	72	97	HL 920x368	65	74	49	58
IPE 300	188	216	139	167	HD 400x421	37	45	23	31	HE 220 M	73	88	47	62	HL 920x390	62	70	46	55
IPE O 300	163	187	121	145	HD 400x463	34	41	22	29	HE 240 AA	185	225	114	154	HL 920x420	58	66	43	51
IPE A 330	199	228	149	178	HD 400x509	31	38	20	27	HE 240 A	147	178	91	122	HL 920x449	54	61	41	48
IPE 330	175	200	131	157	HD 400x551	29	35	19	25	HE 240 B	108	131	68	91	HL 920x491	50	56	37	44
IPE O 330	152	175	114	137	HD 400x592	28	33	18	23	HE 240 M	61	73	39	52	HL 920x537	46	52	35	41
IPE A 360	185	211	138	165	HD 400x634	26	31	17	22	HE 260 AA	176	214	108	146	HL 920x588	42	48	32	37
IPE 360	163	186	122	146	HD 400x677	25	30	16	21	HE 260 A	141	171	88	117	HL 920x656	38	43	29	34
IPE O 360	142	162	107	127	HD 400x744	23	27	15	20	HE 260 B	105	127	66	88	HL 920x725	35	39	26	31
IPE A 400	176	200	133	158	HD 400x818	21	25	14	18	HE 260 M	59	72	39	51	HL 920x787	32	37	25	29
IPE 400	152	174	116	137	HD 400x900	19	23	13	17	HE 280 AA	168	204	104	139	HL 920x970	27	30	20	24
IPE O 400	135	154	103	122	HD 400x990	18	22	12	16	HE 280 A	136	165	84	113	HL 1000 AA	82	92	63	73
IPE A 450	165	187	127	149	HD 400x1086	17	20	11	15	HE 280 B	102	123	64	85	HL 1000 A	76	85	58	68
IPE 450	143	162	110	130	Non protette 					HE 280 M	59	71	38	50	HL 1000 B	66	74	51	59
IPE O 450	122	138	94	110						HE 300 AA	158	192	97	131	HL 1000 M	60	67	46	54
IPE A 500	152	172	118	138						HE 300 A	126	153	78	105	HL 1000x443	55	63	43	50
IPE 500	134	151	104	121						HE 300 B	96	116	60	80	HL 1000x483	51	58	40	46
IPE O 500	114	129	89	104						HE 300 M	50	60	33	43	HL 1000x539	46	52	36	42
IPE A 550	142	160	111	129						HE 320 AA	152	184	95	127	HL 1000x554	45	51	35	41
IPE 550	124	140	97	113						HE 320 A	117	141	74	98	HL 1000x591	42	48	33	39
IPE O 550	108	121	85	98						HE 320 B	91	110	58	77	HL 1000x642	39	44	31	36
IPE A 600	131	147	103	119						HE 320 M	50	60	33	43	HL 1000x748	34	38	27	31
IPE 600	115	129	91	105						HE 340 AA	147	177	94	123	HL 1000x883	29	33	23	27
IPE O 600	93	104	73	85						HE 340 A	112	134	72	94	HL 1100 AA	76	85	59	68
750 x 137	128	144	101	116						HE 340 B	88	106	57	75	HL 1100 A	67	75	52	60
750 x 147	120	134	94	109						HE 340 M	50	60	34	43	HL 1100 B	61	68	47	55
750 x 173	102	114	81	93						HE 360 AA	142	170	92	120	HL 1100 M	53	59	42	48
750 x 196	91	102	72	83						HE 360 A	107	128	70	91	UC UC 152x152x23	252	304	156	208
HP HP 200x43	181	219	112	150	UPN UPN 80	250	291	186	227	HE 360 B	86	102	56	73	UC 152x152x30	195	235	122	162
HP 200x53	145	176	90	121	UPN 100	278	322	204	248	HE 360 M	51	61	34	44	UC 152x152x37	161	194	101	134
HP 220x57	143	174	88	119	UPN 120	259	298	195	233	HE 400 AA	135	161	90	115	UC 203x203x46	168	202	104	139
HP 260x75	129	156	80	108	UPN 140	247	282	187	223	HE 400 A	101	120	68	87	UC 203x203x52	150	180	93	124
HP 260x87	111	135	70	94	UPN 160	235	267	180	212	HE 400 B	82	97	56	71	UC 203x203x60	131	158	82	109
HP 305x79	147	178	91	121	UPN 180	225	254	173	203	HE 400 M	52	62	36	45	UC 203x203x71	112	135	71	93
HP 305x88	132	159	81	109	UPN 200	213	240	165	193	HE 450 AA	133	156	91	114	UC 203x203x86	94	113	60	79
HP 305x95	122	148	76	101	UPN 220	198	223	155	180	HE 450 A	96	113	66	83	UC 254x254x73	132	160	82	109
HP 305x110	106	129	66	88	UPN 240	188	211	148	171	HE 450 B	79	93	55	69	UC 254x254x89	110	133	69	91
HP 305x126	94	113	58	78	UPN 270	178	199	142	163	HE 450 M	53	62	38	47	UC 254x254x107	93	112	58	77
HP 305x149	80	97	50	67	UPN 300	153	171	124	141	HE 500 AA	130	152	91	113	UC 254x254x132	76	92	48	64
HP 305x180	67	81	42	56	UPN 330	138	153	113	128	HE 500 A	92								

Fig.4 **Nomogramma**



Simboli e unità di misura

A	area della sezione trasversale dell'elemento	[m ²]
A _m	superficie esposta al fuoco per unità di lunghezza dell'elemento	[m ²]
A _p	superficie interna della protezione al fuoco per unità di lunghezza dell'elemento	[m ²]
V	volume di acciaio dell'elemento per unità di lunghezza	[m ³]
E _a	modulo elastico dell'acciaio alla temperatura di 20°C	[N/mm ²]
E _{a,θ}	modulo elastico dell'acciaio alla temperatura θ	[N/mm ²]
c _p	calore specifico del materiale di protezione dal fuoco	[J/(kg·K)]
d _p	spessore del materiale di protezione dal fuoco	[m]
f _y	tensione di snervamento dell'acciaio alla temperatura di 20°C	[N/mm ²]
f _{y,θ}	tensione di snervamento dell'acciaio alla temperatura θ	[N/mm ²]
f _{p,θ}	tensione di proporzionalità dell'acciaio alla temperatura θ	[N/mm ²]
i	raggio di inerzia della sezione	[m]
k _{y,θ}	fattore di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura θ	(k _{y,θ} =f _{y,θ} /f _y)
k _{E,θ}	fattore di riduzione del modulo elastico alla temperatura θ	(k _{E,θ} =E _{a,θ} /E _a)
k _{p,θ}	fattore di riduzione del limite di proporzionalità alla temperatura θ	(k _{p,θ} =f _{p,θ} /f _y)
L	lunghezza dell'elemento	[m]
l _{fi}	lunghezza di libera inflessione in caso di incendio	[m]
γ _{M,fi}	coefficiente parziale per l'acciaio in caso di incendio	
θ	temperatura della sezione in acciaio	[°C]
θ _{cr}	temperatura critica della sezione in acciaio	[°C]
K ₁	fattore di adattamento per la distribuzione non uniforme sulla sezione trasversale	
K ₂	fattore di adattamento per la distribuzione non uniforme lungo l'elemento	
K	fattore di adattamento (K= K ₁ · K ₂)	
$\bar{\lambda}_{(20^{\circ}\text{C})}$	snellezza adimensionale dell'elemento alla temperature di 20°C	
λ _p	conduttività termica del materiale di protezione dal fuoco	[W/(m·K)]
μ ₀	fattore di utilizzazione dell'elemento	
ρ _p	densità del materiale di protezione dal fuoco	[kg/m ³]
E _{fi,d}	sollecitazione di progetto dell'elemento in caso di incendio	
R _{fi,d,t}	resistenza di progetto della sezione durante l'incendio, al tempo t	
ε	parametro per la classificazione delle sezioni in base alla duttilità	

Bibliografia

- [1] EN 1993-1-2 – Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1.2 – Regole generali. Progettazione strutturale contro il fuoco (Luglio 2005).
- [2] "ECCS n°89 - Fire Resistance of Steel Structures" ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures
- [3] "Fire Resistance of Steel Structures" – M. HALLER, L. G. CAJOT, Arcelor LCS Research Centre (Gennaio 2006)
- [4] EN 1993-1-1 – Progettazione delle strutture di acciaio. Parte 1.1 – Regole generali e regole per gli edifici (Agosto 2005).
- [5] EN 1991-1-2 – Azioni sulle strutture. Parte 1.2 – Azioni in generale. Azioni sulle strutture esposte al fuoco (Ottobre 2004).
- [6] Testo Unitario "Norme Tecniche per le Costruzioni" – G.U. 23 settembre 2005, n. 222.
- [7] EN 1990 – Criteri generali di progettazione strutturale (Maggio 2004).
- [8] UNI 9503 – Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio (Febbraio 2003).
- [9] EN 13381 part 1 to 8 - " Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members "
- [10] EN 10025 parts 1 to 6: Hot rolled products of structural steels
- [11] ECSC project "Buckling curves of hot rolled H sections submitted to fire"; CN° 7210-SA/316/515/618/931.



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

Supportata da
Fondazione
Promozione Acciaio



Ministero dell'Interno
Dipartimento dei Vigili del Fuoco
del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile

Il presente documento è stato redatto dalla **Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in Acciaio in caso di Incendio**. Gruppo di lavoro: Sandro Pustorino, Paola Princi, Mauro Caciolai.

Si ringrazia ARCELOR PROFIL LUXEMBOURG Research Centre per il contributo "Fire Resistance of Steel Structures" M. Haller, L.G. Cajot (Gennaio 2006).