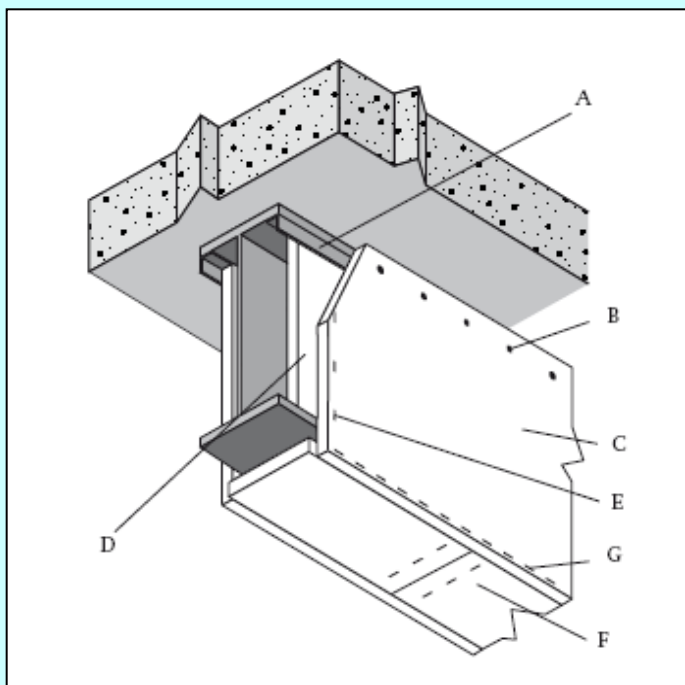




La qualificazione dei sistemi protettivi di strutture resistenti al fuoco

dott. ing. Mauro Caciolai
C.N.VV.F.
mauro.caciolai@vigilfuoco.it

Corso di aggiornamento in prevenzione incendi
Perugia, 3 ottobre 2014



QUALIFICAZIONE E RACCORDO CON GLI EUROCODICI EN 199x 1-2

EN 1992 1-2

4.7 Protective layers

- (1) Required fire resistance may also be obtained by the application of protective layers.
- (2) The properties and performance of the material for protective layers should be assessed using appropriate test procedure.

EN 1993 1-2

3.4.3 Fire protection materials

- (1) The properties and performance of fire protection materials used in design should have been assessed using the test procedures given in ENV 13381-1, ENV 13381-2 or ENV 13381-4 as appropriate.

NOTE: These standards include a requirement that the fire protection materials should remain coherent and cohesive to their supports throughout the relevant fire exposure.

EN 1994 1-2

3.3.4 Fire protection materials

- (1)P The properties and performance of fire protection materials shall be assessed using the test procedures given in ENV 13381-1, ENV 13381-2, ENV 13381-4, ENV 13381-5 and ENV 13381-6

La valutazione dei protettivi conduce a degli “**Assessment reports**” (o “Rapporti di valutazione”) a cura del produttore che vanno utilizzati in armonia con le pertinenti parti “fuoco” degli Eurocodici per il **successivo** calcolo di resistenza al fuoco.

È possibile stabilire **direttamente** la resistenza al fuoco di elementi protetti effettuando prove in forno caricate in base alle norme della serie **EN 1365**. In tale caso il produttore fornisce un “**Rapporto di classificazione**”.

EN 1995 1-2

la

Ricco di indicazioni sui protettivi nella sezione 3. Esso non cita norma CEN/TS 13381-1 che ne esclude la possibilità di carbonizzazione)

EN 1996 1-2

Non cita la norma CEN/TS 13381-1. Protettivi in opera

EN 1999 1-2

Come EN 1993 1-2 ma non elenca le norme

QUADRO NORMATIVO GENERALE

Norme della serie EN 13381

Parte 1: Membrane protettive orizzontali

Parte 2: Membrane protettive verticali

Parte 3: Protezione di elementi in cemento armato

Parte 4: Protezione di elementi in acciaio con rivestimenti passivi

Parte 5: Protezione di elementi misti acciaio/cls.

Parte 6: Protezione di colonne composte acciaio/cls

Parte 7: Protezione di elementi in legno

Parte 8: Protezione di elementi in acciaio con rivestimenti reattivi

ETAG 018

Parte 1: Aspetti generali

Parte 2: Rivestimenti reattivi per la protezione al fuoco di elementi in acciaio

Parte 3: Intonaci e rivestimenti a spruzzo per la protezione al fuoco di elementi costruttivi (acciaio, calcestruzzo, legno muratura, lastre)

Parte 4: Lastre, pannelli e tappetini anche in kit a protezione dall'incendio di elementi costruttivi.

SISTEMI PROTETTIVI PER ELEMENTI IN ACCIAIO

IL PANORAMA NORMATIVO

Norma di prova	Applicabile a prodotti reattivi	Applicabile a prodotti passivi	Condizione di accettabilità della certificazione di resistenza al fuoco
ENV 13381-4:2002	Sì	Sì	Se i rapporti di prova sono emessi prima del 30/11/2013
EN 13381-10:2010	Sì	NO	Se i rapporti di prova sono emessi prima del 30/11/2013
EN 13381-4:2013	NO	Sì	Se i rapporti di prova sono emessi dal 30/11/2013
EN 13381-8:2013	Sì	NO	Se i rapporti di prova sono emessi dal 30/11/2013

Definizione da ETAG 018

Rivestimenti reattivi: rivestimenti la cui composizione è formulata per garantire una reazione chimica a valle di un riscaldamento in maniera tale da determinare un cambiamento dello stato fisico del materiale che garantisca una protezione dal fuoco dell'elemento protetto ed effetti di raffreddamento.

Rivestimenti intumescenti: in condizioni di incendio si espandono formando un composto schiumoso a seguito di riscaldamento

Rivestimenti ablativi: possono espandersi leggermente a causa della formazione di uno strato carbonizzato se esposti al fuoco. Durante l'incendio l'energia trasferita è assorbita attraverso processi chimici e/o fisici finalizzati alla creazione dello spessore carbonizzato.

MARCATURA CE

I protettivi possono essere **marcati CE** in base alla ETAG 018 “Linea guida per il rilascio di Benestari Tecnici Europei: rivestimenti protettivi dall’incendio”.

Parte 1: Aspetti generali

Parte 2: Rivestimenti reattivi per la protezione al fuoco di elementi in **acciaio** (**EN 13381-8**)

Parte 3: Intonaci e rivestimenti a spruzzo per la protezione al fuoco di elementi costruttivi (**acciaio**, calcestruzzo, legno muratura, lastre)

Parte 4: Lastre, pannelli e tappetini anche in kit a protezione dall’incendio di elementi costruttivi.

PROTETTIVI ACCIAIO (ETAG 018 -1; -2 e -3)

DA ETAG 018-1

(d) Working life (durability) and serviceability

The provisions, test and assessment methods in this Guideline or referred to, have been written, based upon the assumed intended working life of the product for the intended use of 10 up to 25 years provided that the product is subject to appropriate use and maintenance cfr. Ch. 7.4. Further information is provided in the sub-parts of this ETA Guideline.

7.4 MAINTENANCE AND REPAIR

The assessment of the fitness for use is based on the assumption that minor damage, for example that caused by impact, is repaired. It is further assumed that replacement of components in Fire Protective Products/kits during maintenance will be undertaken using materials covered by the ETA.

Specific requirements are given in the relevant sub-parts of this ETA Guideline.

DA ETAG 018-2 (Contenuto dell'ETA)

9.2. Additional information

Additional information shall be given regarding:

Area of Application

(use for beams and/or columns, 3- and/or 4-sided exposure to fire, minimum thickness of the dried layer of the reactive coating system as well as the minimum and the maximum thickness of the primer and of the topcoat for each primer family and each approved topcoat, application (sprayed, brushed), environment conditions, use on galvanized steel etc)

Special provisions for the components of the reactive coating systems (primers and/or top coats, if any)

Special provisions for the production, storage and transport

Special provisions for maintenance and repair

IL METODO DELLA “*temperatura critica*”

Nell'ipotesi di **distribuzione uniforme della temperatura** la condizione di collasso si verifica quando l'effetto dei carichi (*eventualmente ridotti a seguito di ridistribuzione*) eguaglia la resistenza della membratura:

$$E_{fi,d} = R_{fi,d}(\theta_{cr}) \quad (1)$$

Nell'ipotesi che la resistenza a caldo si possa esprimere come aliquota di quella *ad inizio incendio* mediante il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento (e dunque **NON NEL CASO DI VERFICHE DI STABILITÀ**):

$$E_{fi,d} = k(\theta_{cr}) \cdot R_{fi,d,0} \quad (2)$$

Introdotta il coefficiente di utilizzazione ad inizio incendio $\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (3)$

μ_0 :

La condizione di collasso diviene:

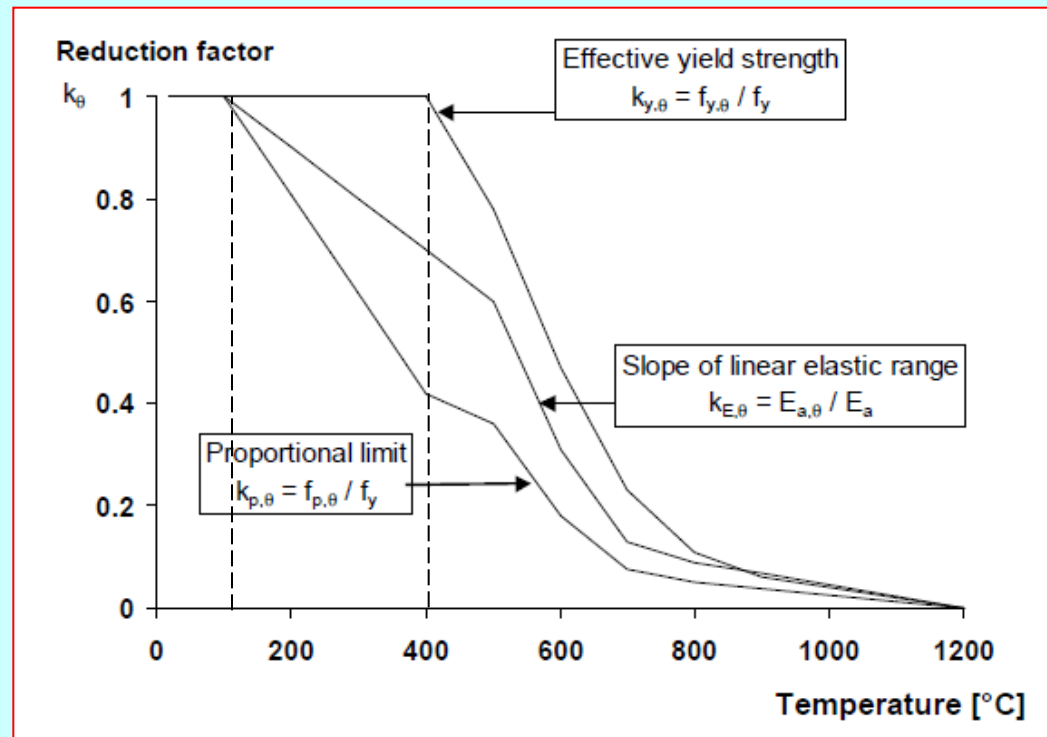
$$\mu_0 = k_{y,\theta_{cr}} \quad (4)$$

duce la θ_{cr}

Per le sezioni snelle in
acciaio $\theta_{cr,a} = \underline{350^\circ\text{C}}$

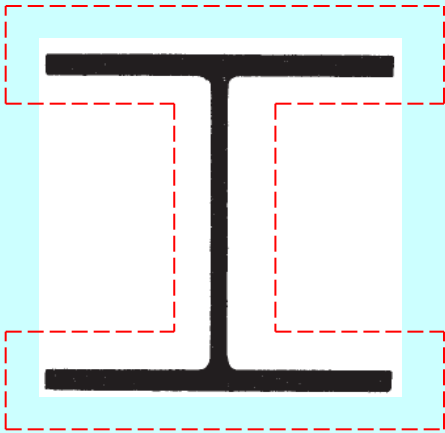
ESPRESSIONE DELLA TEMPERATURA CRITICA

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

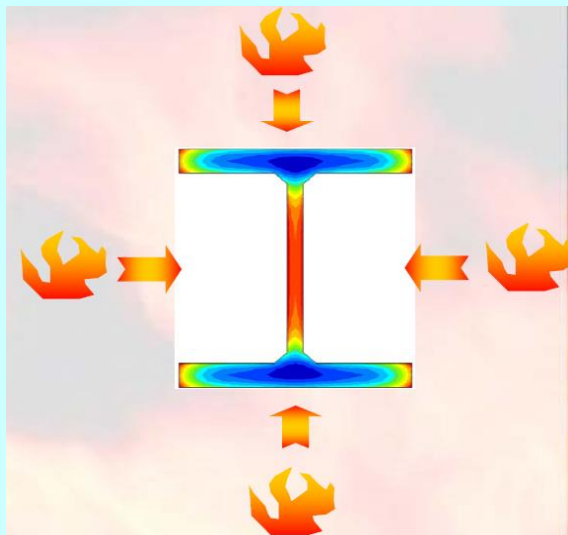


L'ANALISI TERMICA

Analisi semplificata



Analisi F.E.M.



... materiale non protetto ...

$$K \cdot (\theta_g - \theta) \cdot dt \cdot A = \delta Q = dU = \rho \cdot V \cdot c_a$$

$$\Delta\theta = \frac{K \cdot (\theta_g - \theta) \cdot A}{\rho_a \cdot C_a \cdot V} \Delta t$$

**Modellazione
dell'incendio**

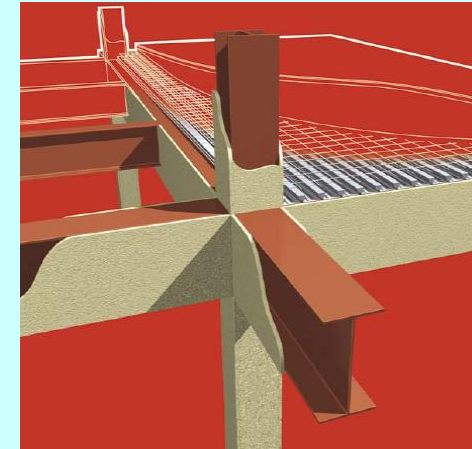
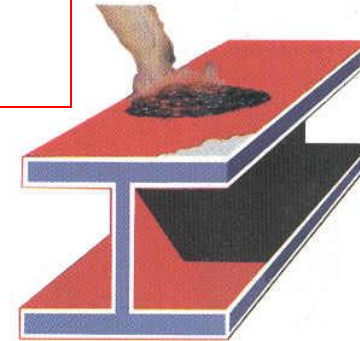
**Proprietà del
materiale**

**Fattore
di sezione**

L'ANALISI TERMICA

TRAVI

COLONNE



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

... materiale protetto ...

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

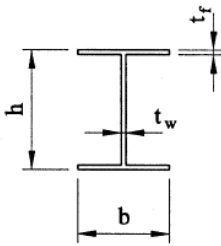
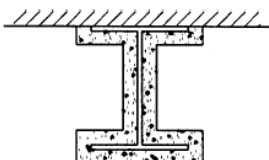
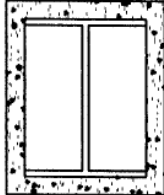
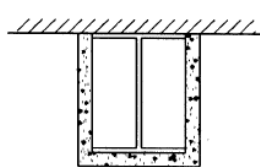
Proprietà del
materiale

Proprietà del
protettivo

Fattore
di sezione

Modellazione
dell'incendio

LE PROPRIETÀ DEI PROTETTIVI DELL'ACCIAIO

Steel section	Profile protection	Box protection
I and H sections  $h = h_{(average)} = (h_1 + h_2)/2$ $b = b_{(average)} = (b_1 + b_2)/2$ $t_f = t_{f(average)} = (t_{f1} + t_{f2} + t_{f3} + t_{f4})/4$ Cross sectional area $t_w (h - t_f) + 2 (b \times t_f)$	4 sides  Perimeter area $2b + 2h + 2(b - t_w)$ $= [4b + 2h - 2t_w]$ 3 sides  Perimeter area $b + 2h + 2(b - t_w)$ $= [3b + 2h - 2t_w]$	4 sides  Perimeter area $2b + 2h$ 3 sides  Perimeter area $b + 2h$
Section factor = Perimeter area/Cross sectional area		

Si valutano in base alle due norme europee:

EN 13381-4 reattivi e passivi

EN 13381-8 reattivi

È di fondamentale importanza la definizione del **fattore di sezione A/V**.

LE CURVE DI RISCALDAMENTO

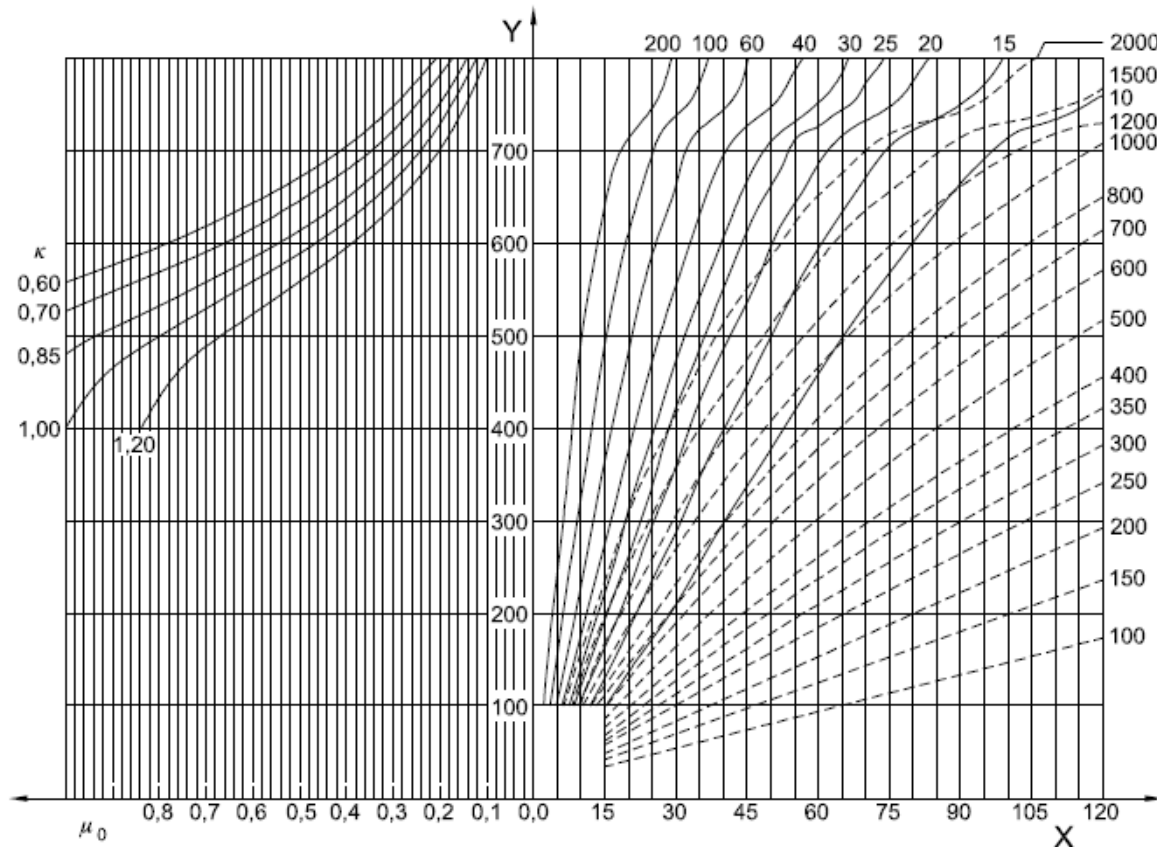
Legenda

--- Acciaio protetto $\frac{A_p}{V} \times \frac{\lambda_p}{d_p} \left[\frac{W}{m^3 \times K} \right]$

— Acciaio non protetto $A_m/V [m^{-1}]$

X Resistenza al fuoco [minuti]

Y Temperatura [°C]



$$c_p = 0 \Rightarrow \phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} = 0$$

Si trascura
l'assorbimento del
protettivo

Per gli elementi **protetti**, queste curve possono essere costruite solo se sono noti i valori dei parametri termofisici dei protettivi in base alle norme EN 13381-4 e EN 13381-8.

EN 13381-4 E EN 13381-8

LA VALUTAZIONE DEL PROTETTIVO

Fire Resistance Period – 30 Minutes								
Design Temperature °C	350	400	450	500	550	600	650	700
Section factor m ⁻¹	Thickness of Fire Protection Material to Maintain Steel Temperature Below Design Temperature							
40								
50								
60								
70								
80								
90								
100								
110								
120								
130								
140								
150								
160				t _{mm}				
170								
180								
190								
200								
210								
220								
230								
240								
250								
260								
270								
280								
290								
300								

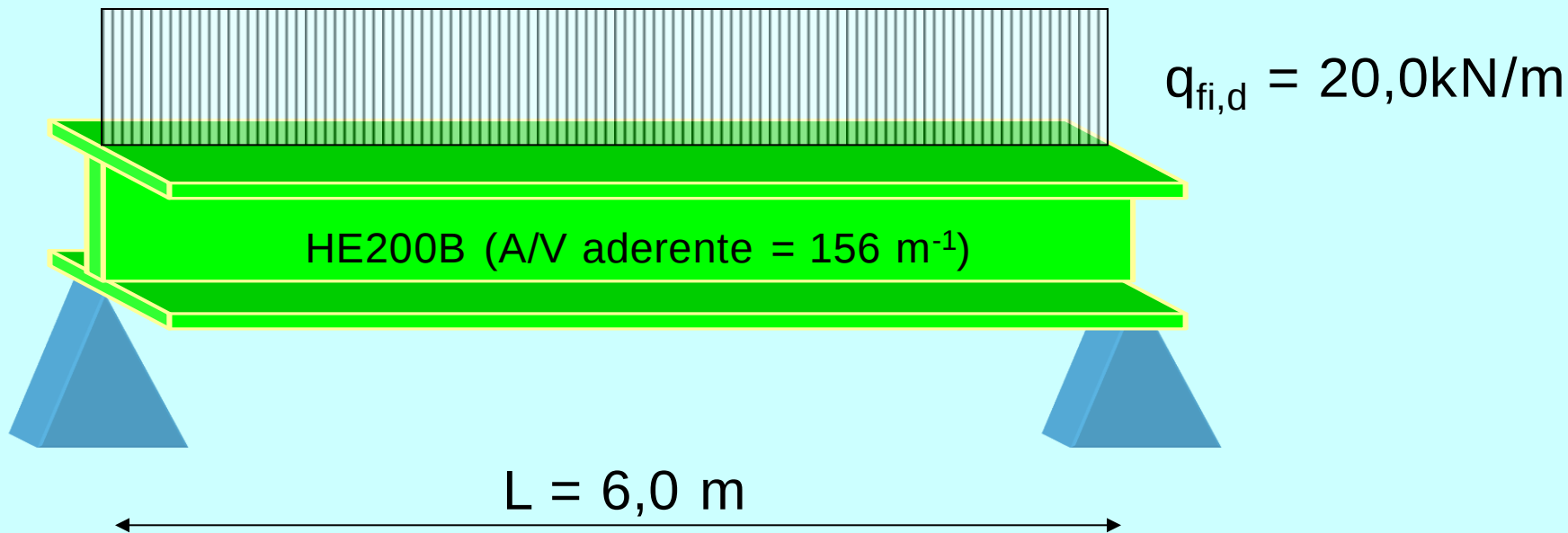
Il produttore deve fornire delle tabelle come quella indicata nell'esempio in cui, fissato il tempo di esposizione all'incendio standard, fornisce, per ciascun fattore di sezione, il quantitativo minimo da applicare (in termini di spessore) affinché la temperatura del materiale protetto si mantenga al di sotto di quella fissata.

Ad esempio, lo spessore da applicare all'elemento in acciaio avente fattore di sezione pari a 160m⁻¹, esposto all'incendio standard ISO 834 per 30 minuti, affinché la sua temperatura si mantenga al di sotto dei 500°C è pari a t_{mm}.

Il progettista deve ovviamente fornire la temperatura critica dell'elemento in acciaio.

UN ESEMPIO APPLICATIVO

PROGETTO DI UNA TRAVE INFLESSA R30



$$M_{fi,d} = q_{fi,d} \times L^2 / 8 = 90 \text{ kNm}$$

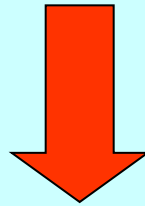
$$M_{r,d,0} = W_{pl,y} / \gamma_a = 642550 \times 235 / 1,0 = 151 \text{ kNm}$$

($\gamma_a = 1,0$ in base al N.A.D.)

$$\mu_0 = M_{fi,d} / M_{r,d,0} = 90 / 151 = 0,6$$

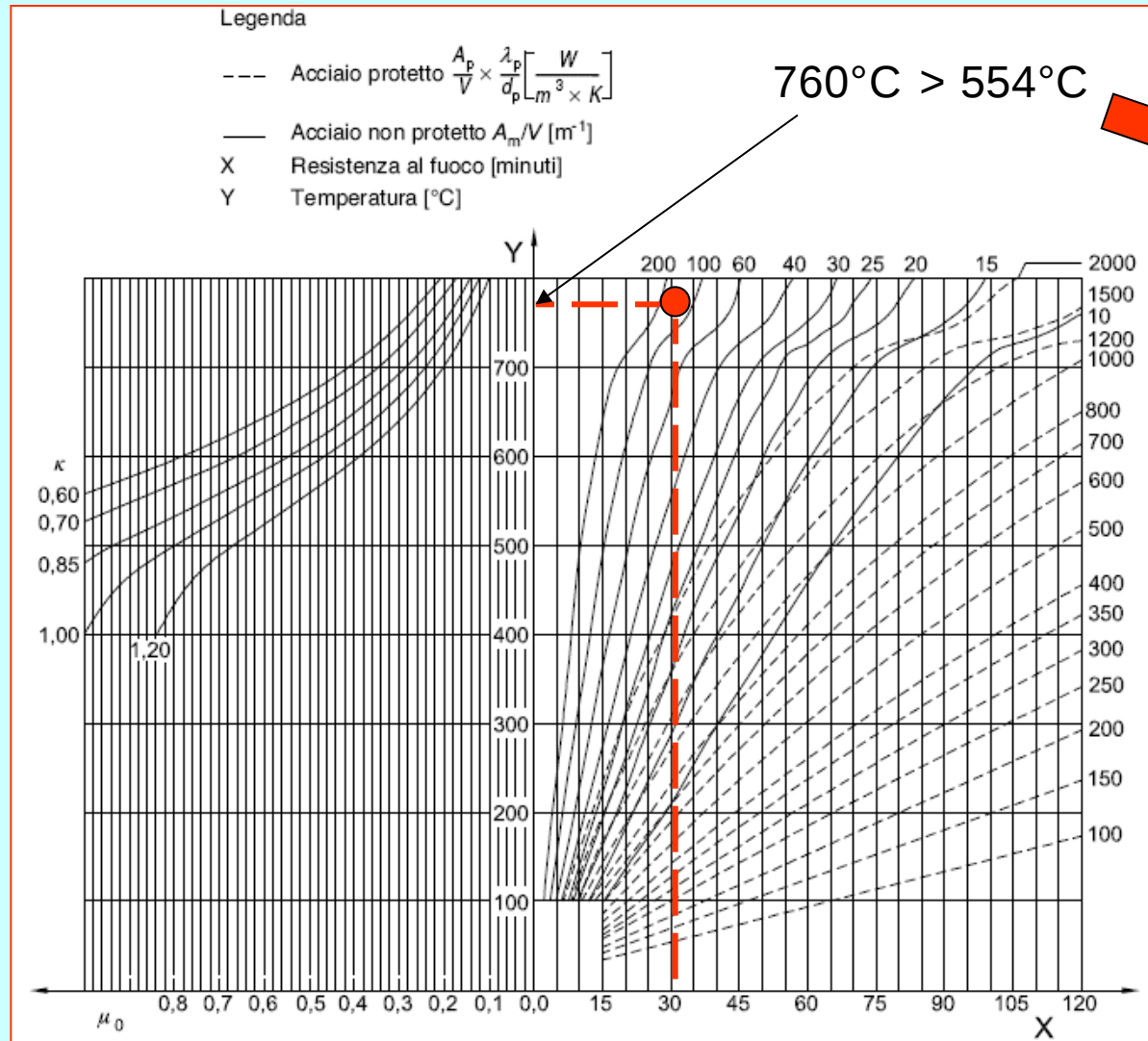
CALCOLO DELLA TEMPERATURA CRITICA

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



$$\theta_{a,cr} (0,6) = 554^{\circ}\text{C}$$

CALCOLO DELLA TEMPERATURA DELLA TRAVE NON PROTETTA DOPO 30 minuti

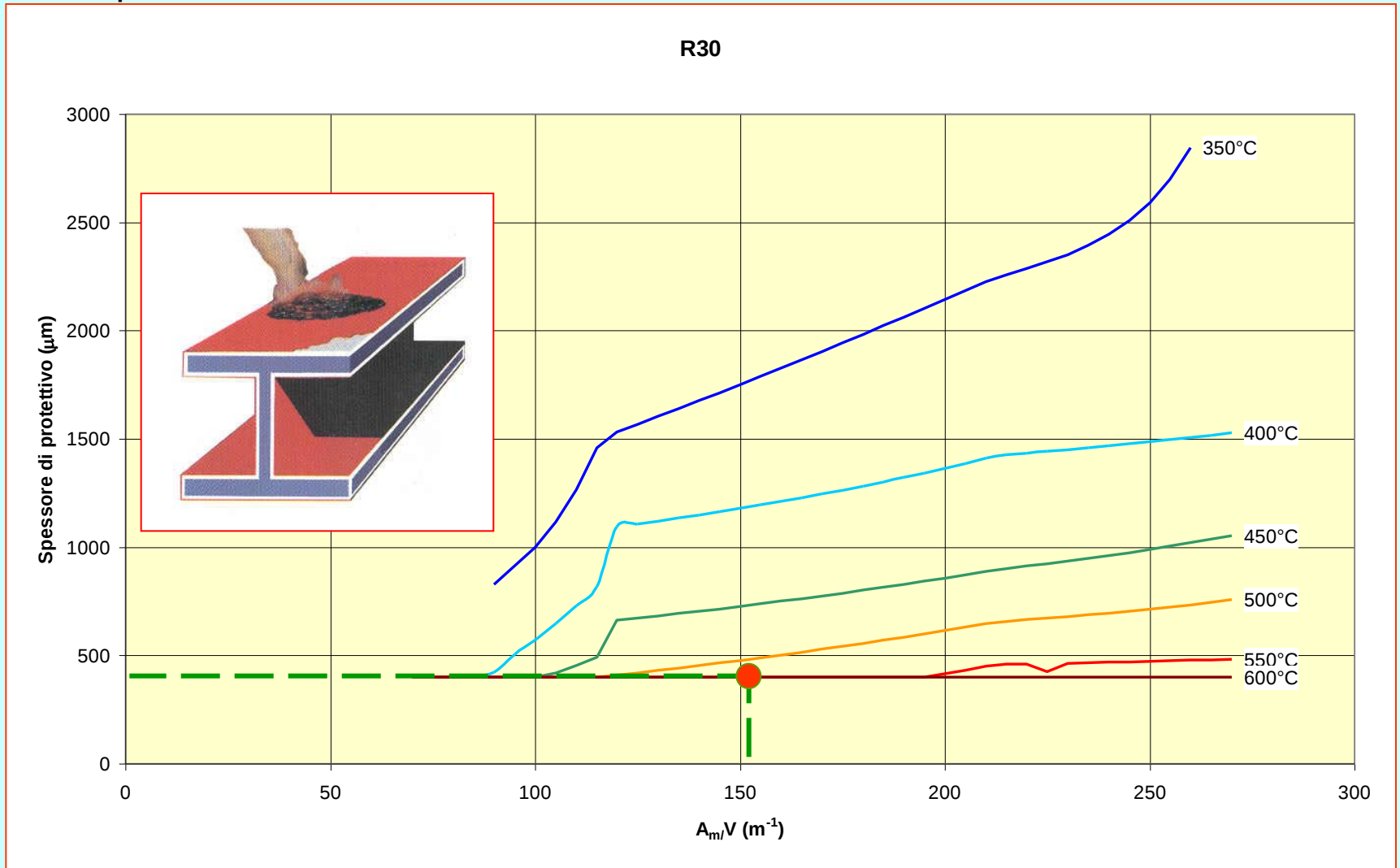


$$\frac{A}{V} = 156 \text{ m}^{-1}$$

LA TRAVE DEVE ESSERE PROTETTA

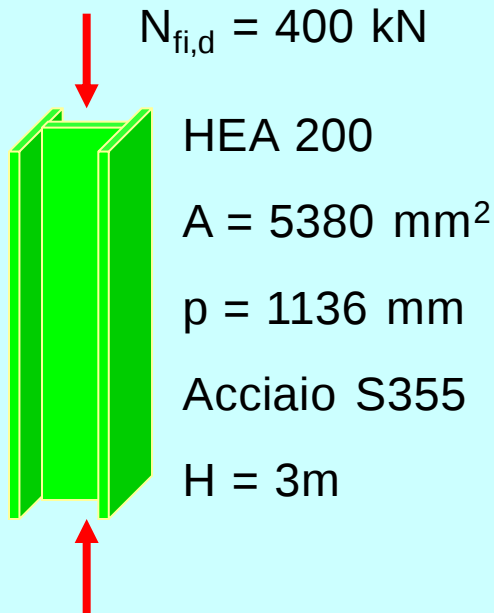
PROGETTO DEL PROTETTIVO

Si sceglie un protettivo di **tipo reattivo** applicato a pennello sulla trave testato in base alla EN 13381-4. Dal rapporto di valutazione emesso da un laboratorio abilitato si evince che servono 400 μm di protettivo per tenere il profilo al di sotto della temperatura critica



UN ESEMPIO APPLICATIVO

VERIFICA DI UNA COLONNA COMPRESSA



Esposizione: 15 minuti all'incendio ISO
834 sui quattro lati

La verifica è soddisfatta se:

$$N_{fi,d} < N_{b,fi,\theta,r,d}$$

$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}}$$

A yellow double-headed arrow points from the $\gamma_{m,fi}$ term in the denominator to the value $= 1,0$.

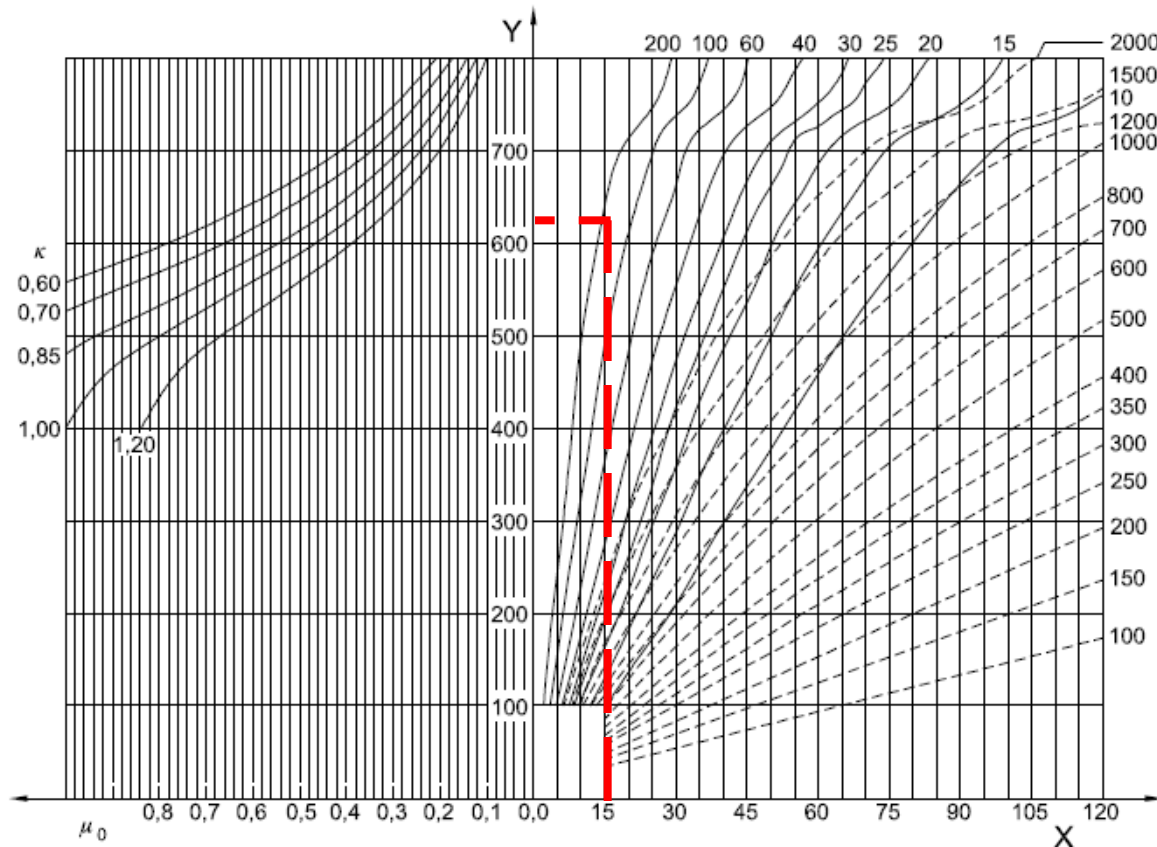
MEMO

Relazione valida solo per profilati di classe **1, 2 e 3**. Per i profilati di classe 4 la θ_{cr} è di **350 °C**.

1. DETERMINAZIONE DELLA TEMPERATURA DEL PROFILATO (θ_a)

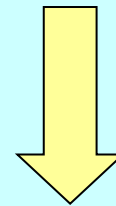
Legenda

- Acciaio protetto $\frac{A_p}{V} \times \frac{\lambda_p}{d_p} \left[\frac{W}{m^3 \times K} \right]$
 — Acciaio non protetto $A_m/V [m^{-1}]$
 X Resistenza al fuoco [minuti]
 Y Temperatura [°C]



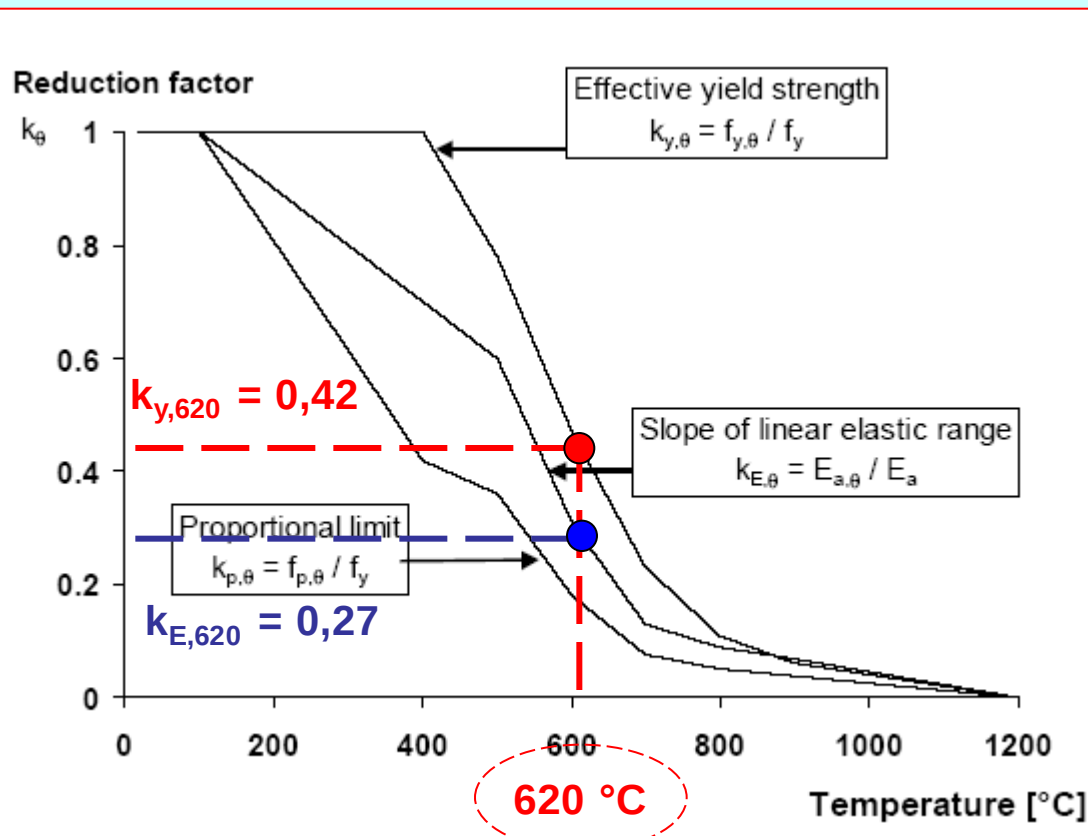
$$A_m/V = p/A = \frac{1136}{5380} = 0,211 \text{ mm}^{-1}$$

$$= 211 \text{ m}^{-1}$$

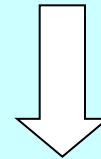


$$\theta_a \cong 620 \text{ °C}$$

2. CALCOLO DELLA TENSIONE DI SNERVAMENTO DI PROGETTO A CALDO ($f_{y,\theta,d}$)



$$\theta_a = 620^{\circ}\text{C}$$



$$\begin{aligned} f_{y,\theta,d} &= f_y \cdot k_{y,\theta} / \gamma_{m,fi} = \\ &= 355 \cdot 0,42 / 1,0 = \\ &= 150 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

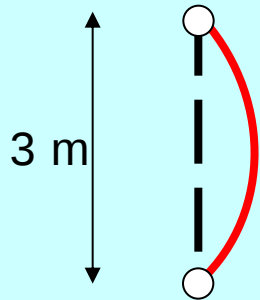
3. CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI RIDUZIONE DELLA RESISTENZA PLASTICA (χ_{fi})

Parametro di imperfezione

Parametri	Formulazione a freddo	Formulazione a caldo
$\chi; \chi_{fi}$	$\frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$	$\frac{1}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$
$\Phi; \Phi_{\theta}$	$0,5[1+\eta+\bar{\lambda}^2]$	$0,5[1+\eta_{\theta}+\bar{\lambda}_{\theta}^2]$
$\eta; \eta_{\theta}$	$\eta = \alpha (\bar{\lambda} - 0,2)$	$\eta_{\theta} = \alpha_{\theta} \cdot \bar{\lambda}_{\theta}$
$\alpha; \alpha_{\theta}$	Valore tabellato (0,13 ÷ 0,76)	$\alpha_{\theta} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
$\bar{\lambda}; \bar{\lambda}_{\theta}$	$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$	$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}} \cdot \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}}$

Snellezza adimensionalizzata

3. CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI RIDUZIONE DELLA RESISTENZA PLASTICA (γ_{fi})



$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 13360000}{3000^2} = 3077 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5380 \cdot 355}{3077000}} = 0,788$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}} \cdot \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,788 \sqrt{\frac{0,42}{0,27}} = 0,983$$

$$\alpha_{\theta} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529$$

$$\eta_{\theta} = \alpha_{\theta} \cdot \bar{\lambda}_{\theta} = 0,529 \cdot 0,983 = 0,520$$

$$\Phi_{\theta} = 0,5[1 + \eta_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2] = 0,5(1 + 0,520 + 0,983^2) = 1,243$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} = \frac{1}{1,243 + \sqrt{1,243^2 - 0,983^2}} = 0,50$$

4. VERIFICA A CALDO

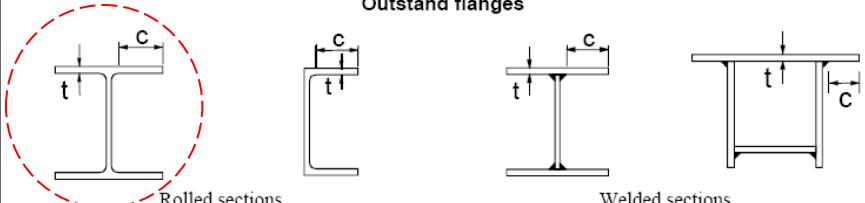
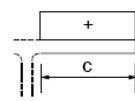
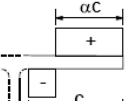
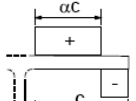
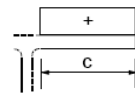
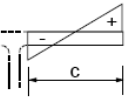
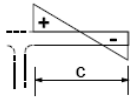
$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 0,50 \cdot 5380 \cdot \frac{0,42 \cdot 355}{1,0} = 400 \text{ KN}$$

La verifica è soddisfatta.

La temperatura di 620°C è la temperatura critica del profilato in quanto la resistenza eguaglia l'azione corrispondente.

5. CLASSIFICAZIONE DELLA SEZIONE A CALDO

ALI

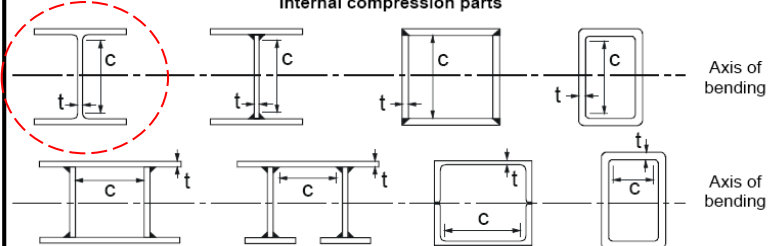
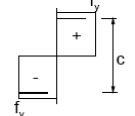
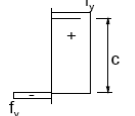
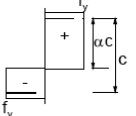
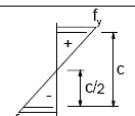
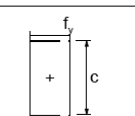
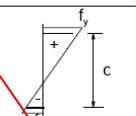
Outstand flanges			
			
Class	Part subject to compression	Part subject to bending and compression	
		Tip in compression	Tip in tension
Stress distribution in parts (compression positive)			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ For k_σ see EN 1993-1-5	

$$\frac{c}{t_f} = \frac{82}{10} = 8,2$$

A caldo:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,692$$

ANIMA

Internal compression parts			
			
Class	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and compression
Stress distribution in parts (compression positive)			
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	when $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ when $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ when $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{134}{6,5} = 20,6$$

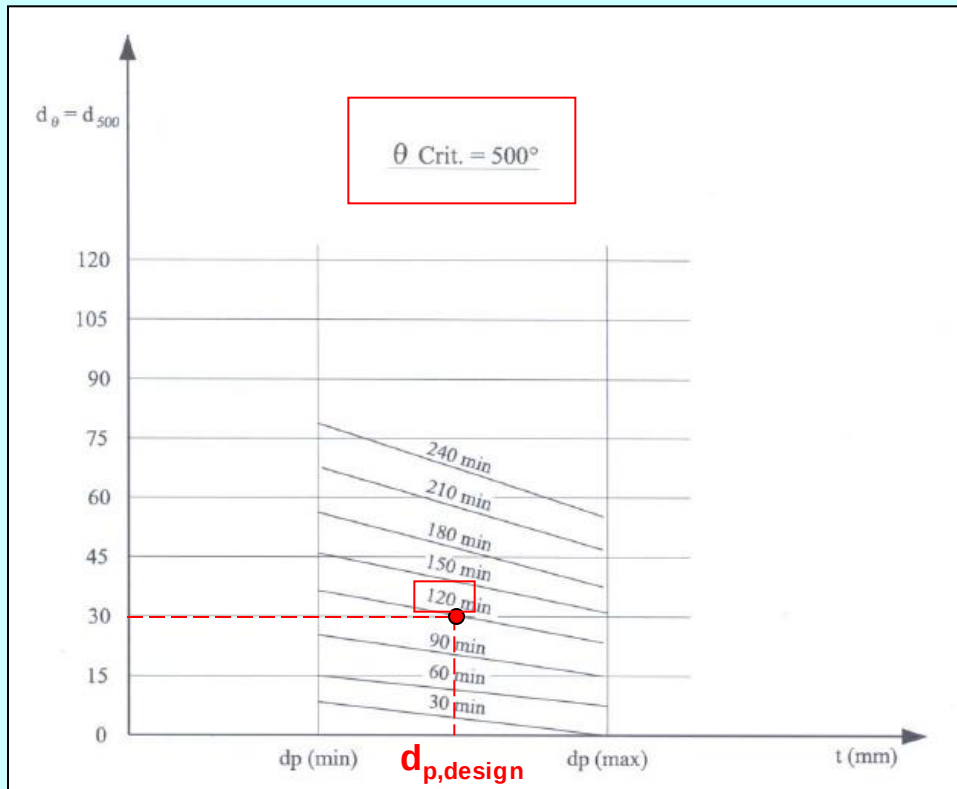
LA SEZIONE È DI CLASSE 3

SISTEMI PROTETTIVI PER ELEMENTI IN CEMENTO ARMATO

IL PANORAMA NORMATIVO

È COSTITUITO ESSENZIALMENTE DALLA NORMA ENV 13381-3:2002 E DALL'ETAG 018 PARTI 1 E 3.

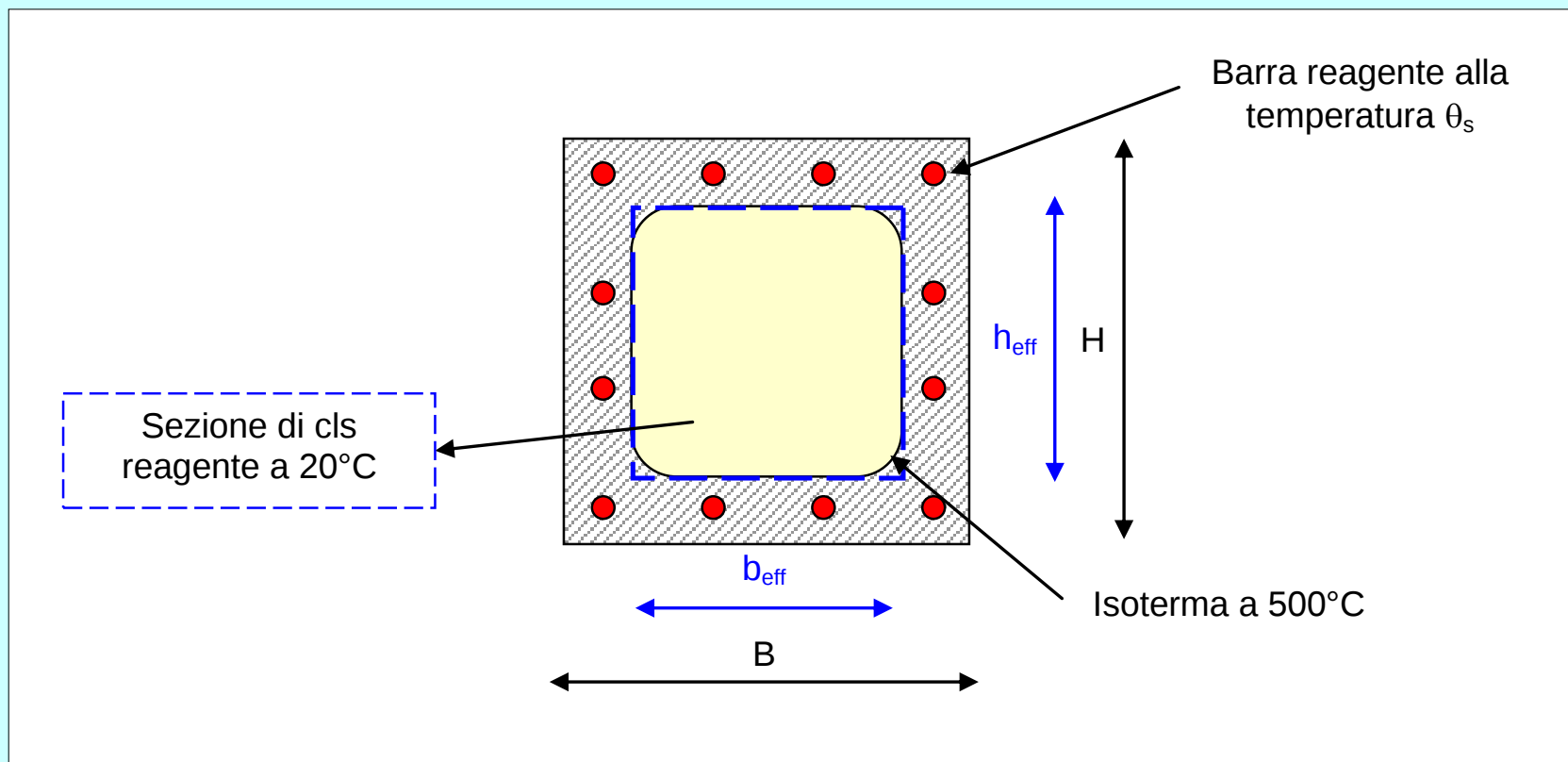
LA VALUTAZIONE DE PROTETTIVO IN BASE ALLA NORMA EVN 13381-2 È IN GENERE FORNITA IN FORMA TABELLARE O GRAFICA EQUIVALENTE SOTTO FORMA DI **SPESSORE EQUIVALENTE**.



Il grafico dell'esempio riporta in ordinata lo spessore di calcestruzzo a cui è equivalente un dato spessore di materiale protettivo (in ascissa) quando l'elemento protetto è esposto alla curva standard ISO 834 per un certo lasso di tempo affinché la temperatura si mantenga al di sotto di quella prefissata.

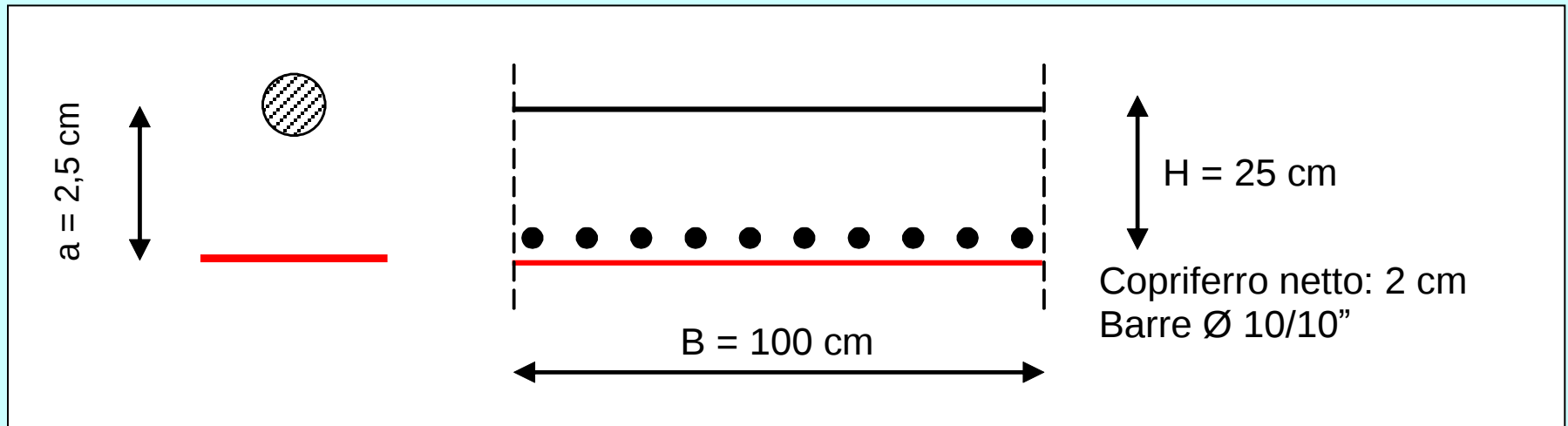
Ad esempio: lo spessore di protettivo equivalente a 30 mm di calcestruzzo tali da garantire una temperatura inferiore ai 500°C per un'esposizione all'incendio standard ISO 834 di 120 minuti è pari a $d_{p,design}$.

IL METODO DELL'ISOTERMA A 500°C (EC2 1-2)



ESEMPIO

CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE DI UNA SOLETTA IN C.A. DOPO UN'ESPOSIZIONE ALL'INCENDIO STANDARD DI 60 minuti SECONDO EC2 1-2



Calcestruzzo: $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_{c,fi} = 25/1,0 = 25,0 \text{ N/mm}^2$

Acciaio: $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{s,fi} = 440/1,0 = 440,0 \text{ N/mm}^2$

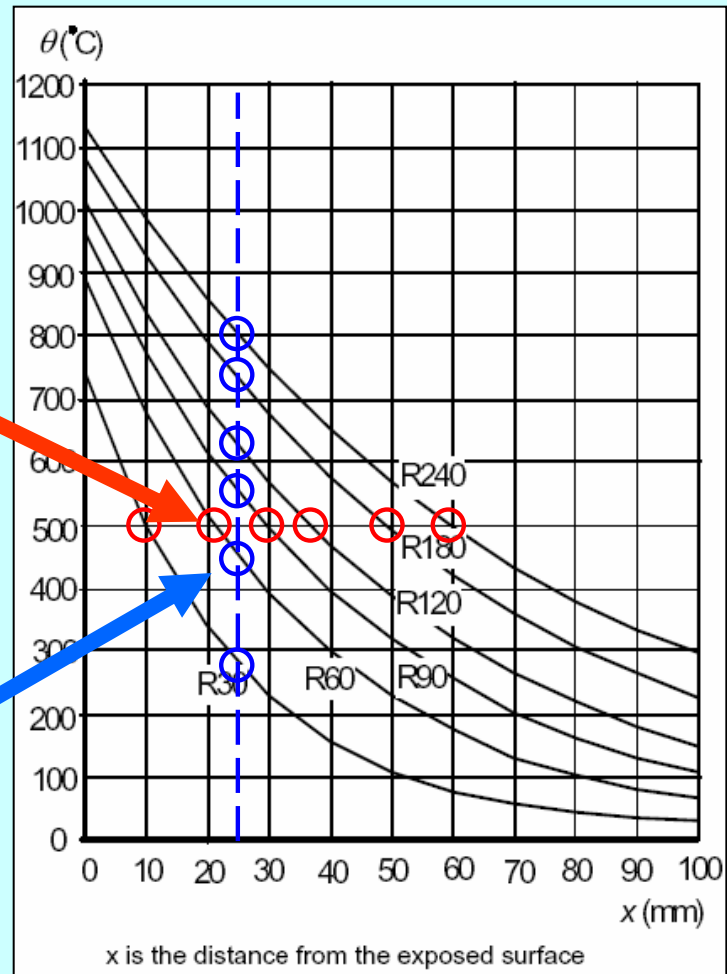
$$\varepsilon_{sy} = f_{yd}/E_s = 440/(1,0 \times 200000) = 0,22\%$$

I COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA SONO RIPORTATI NEI N.A.D.

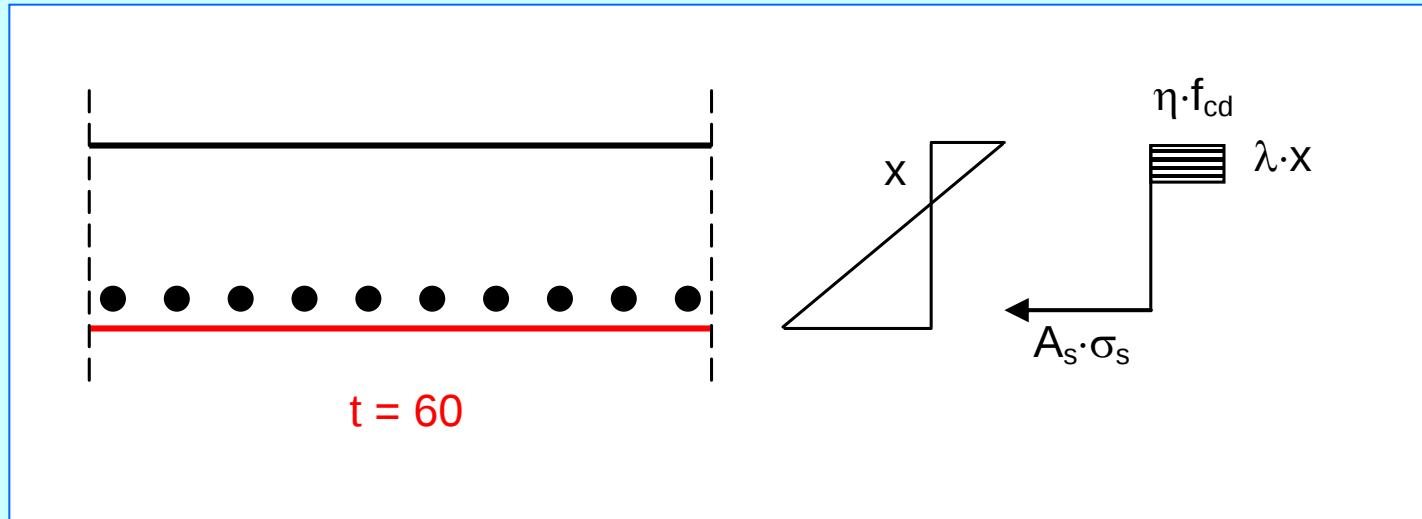
MAPPATURA TERMICA

$\delta_{>500^{\circ}\text{C}} = 2 \text{ cm}$

$\theta_s = 450^{\circ}\text{C}$



CALCOLO DEL MOMENTO RESISTENTE



$$T_{60} = 0,8 \cdot A_s \cdot f_{yd} = 0,8 \cdot 10 \cdot \pi \cdot 10^2 / 4 \cdot 440 / 1,00 = 276,5 \text{ kN}$$

$$C_{60} = h \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot B$$

$$x = \frac{T_{60}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot B} = \frac{276500}{1,0 \cdot \frac{25}{1,0} \cdot 0,8 \cdot 1000} = 13,8 \text{ mm} < 25 - 2 = 23 \text{ cm}$$

$$\varepsilon_s = (H - a - x) \frac{\varepsilon_{cu3}}{x} = (250 - 25 - 13,8) \frac{3,5}{13,8} = 5,35\% > \varepsilon_{sy} = 0,22\%$$

$$M_{u,d,60} = C_{60} \times (H - a - \lambda \cdot x / 2) = 276,4 (250 - 25 - 0,8 \cdot 13,8 / 2) = 60,7 \text{ kNm}$$

PROGETTO DEL PROTETTIVO

Nell'ipotesi che il momento di progetto della soletta sia superiore a quello resistente calcolato per l'esposizione all'incendio di 60 minuti (75kNm), si progetta lo spessore di protettivo da applicare per garantire la resistenza richiesta dopo il prefissato tempo di esposizione all'incendio.

Si adottano i risultati di test condotti in base alla norma ENV 13381-3.

$$M_d = 75 \text{ kNm}$$

$$M_{r,d,60} = 60,7 \text{ kNm}$$

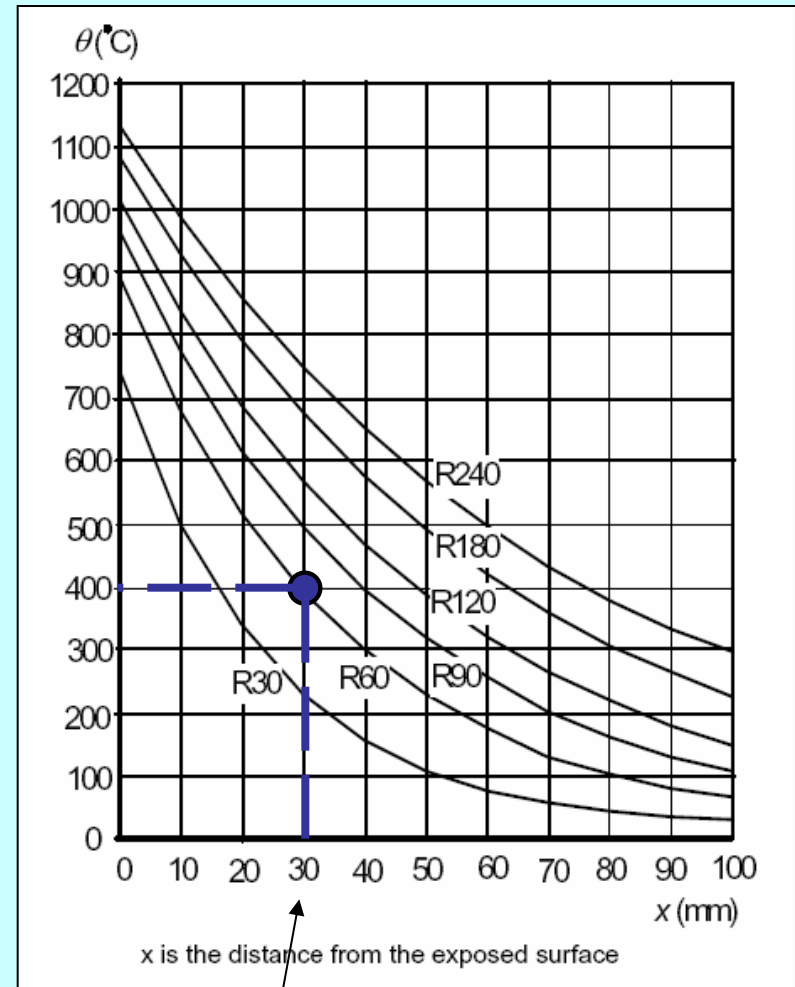
Affinchè il momento resistente di progetto sia pari a 75 kNm, è necessario che aumenti lo sforzo di trazione delle barre di armatura, penalizzato dalla temperatura raggiunta ($450^{\circ}\text{C} \Rightarrow k = 0,8$). L'applicazione del protettivo "raffredda" la sezione e ne incrementa la capacità portante.

Procedendo per tentativi, si calcola lo sforzo di trazione delle barre affinché si raggiunga la richiesta resistenza. Tale sforzo è di 345 kN, ottenibile con una tensione di snervamento non ridotta per effetti termici. In sostanza, l'acciaio deve essere mantenuto ad una temperatura non superiore a 400°C .

CALCOLO DEL COPRIFERRO DI PROGETTO DELLE BARRE DI ACCIAIO

Table 3.2a: Class N values for the parameters of the stress-strain relationship of hot rolled and cold worked reinforcing steel at elevated temperatures

Steel Temperature θ [°C]	$f_{sy,b} / f_{yk}$		$f_{sp,b} / f_{yk}$		$E_{s,b} / E_s$	
	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



30 mm

CALCOLO DELLO SPESSORE DI PROTETTIVO DI PROGETTO

Per garantire i 3 cm di copriferro, è necessario applicare uno spessore di protettivo all'intradosso della soletta tale da risultare equivalente ai 5 mm di calcestruzzo mancanti per i 60 minuti di esposizione all'incendio standard.

La norme ENV 13381-3 introduce il concetto di spessore equivalente.

Se ne riporta un esempio:

	d_p (mm)	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
$\varepsilon_{d,pmin}$ (mm)	2,0	3,9	7,8	9,9	10,1	-	-
$\varepsilon_{p,dmax}$ (mm)	4,0	5,3	11,0	14,9	16,5	16,6	15,9

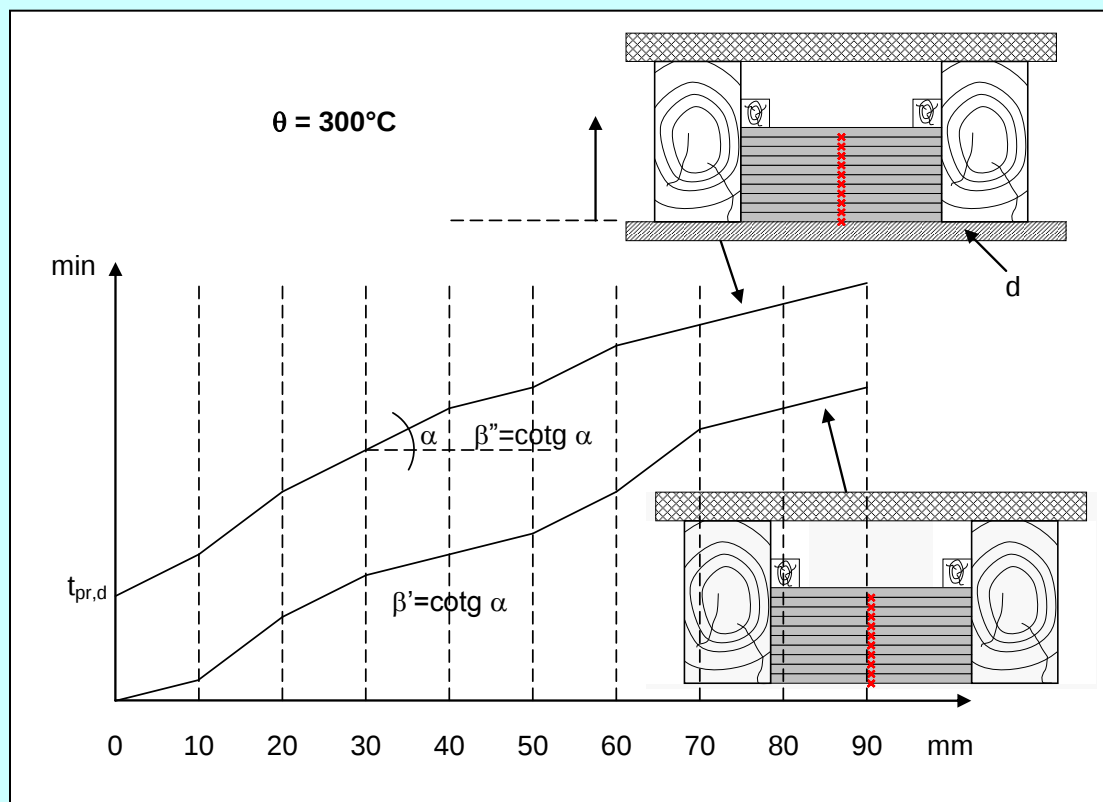
La norma ammette l'interpolazione lineare. Dall'esempio si vede che uno spessore di 2 mm di protettivo è sufficiente.

SISTEMI PROTETTIVI PER ELEMENTI IN LEGNO

IL PANORAMA NORMATIVO

È COSTITUITO ESSENZIALMENTE DALLA NORMA ENV 13381-7:2002 E DALL'ETAG 018 PARTI 1 E 3.

LA VALUTAZIONE DE PROTETTIVO IN BASE ALLA NORMA ENV 13381-7 È FORNITA IN TERMINI DI VELOCITÀ DI CARBONIZZAZIONE. LA NORMA NON È AL MOMENTO BEN COORDINATA CON L'EUROCODICE EN 1995 1-2.

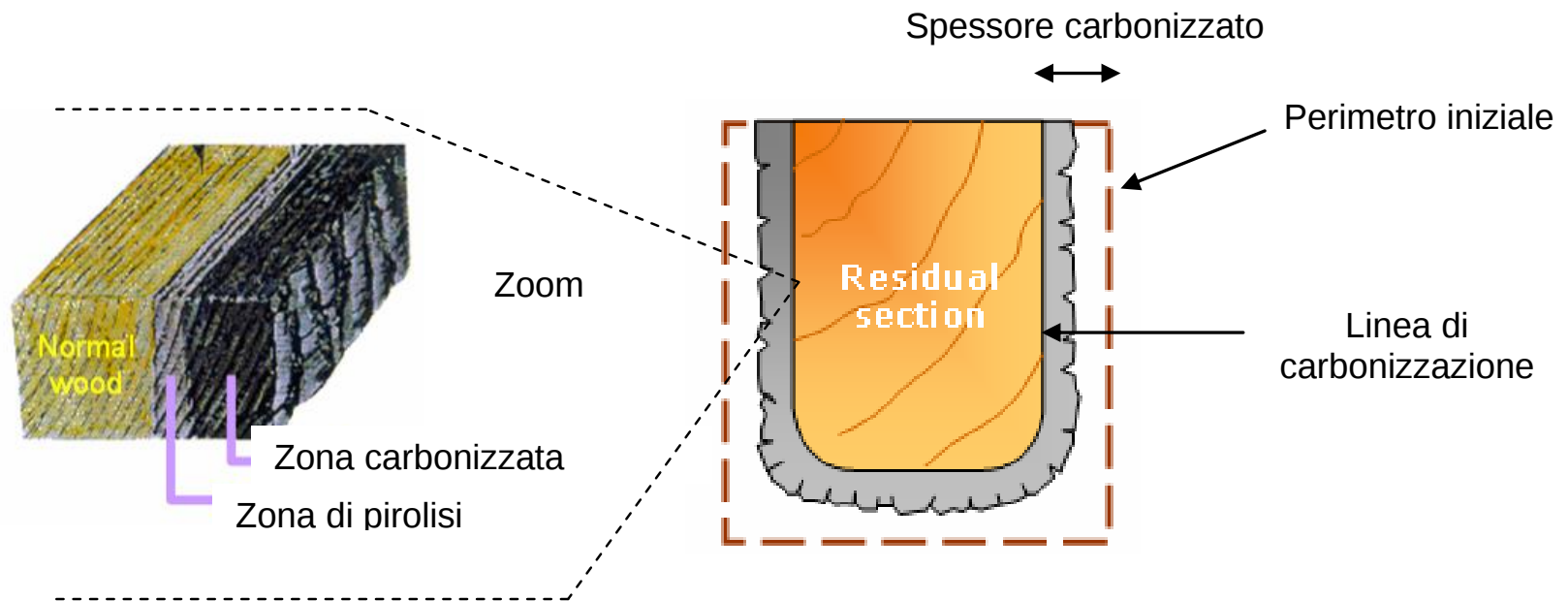


elem. protetto elem. non protetto inizio carbonizz.

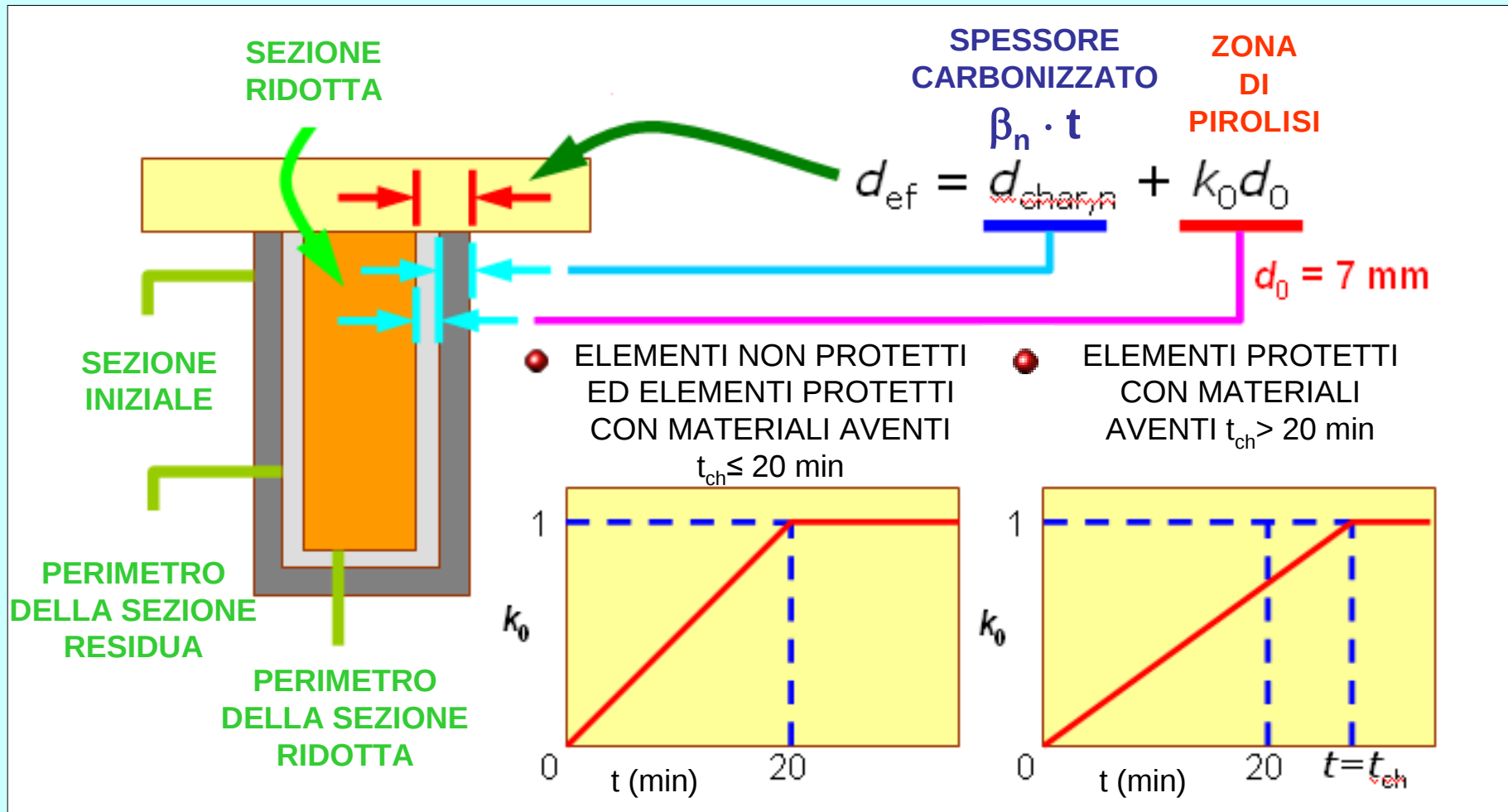
$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot (\beta''/\beta') \cdot (t - t_{pr})$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot (\beta''/\beta') \cdot (t - t_{pr})$$

LA CARBONIZZAZIONE



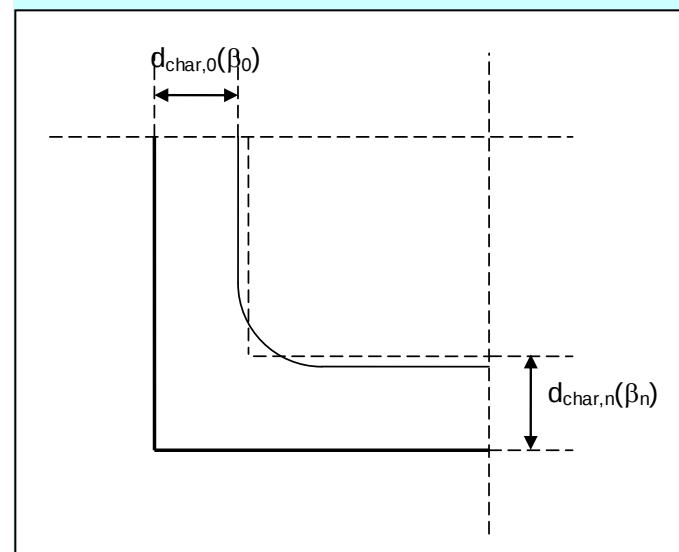
IL METODO DELLA SEZIONE RESIDUA (EC5 1-2)



LA VELOCITÀ DI CARBONIZZAZIONE

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Hardwood Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels Wood panelling Plywood Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	— — —

^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.



ESEMPIO

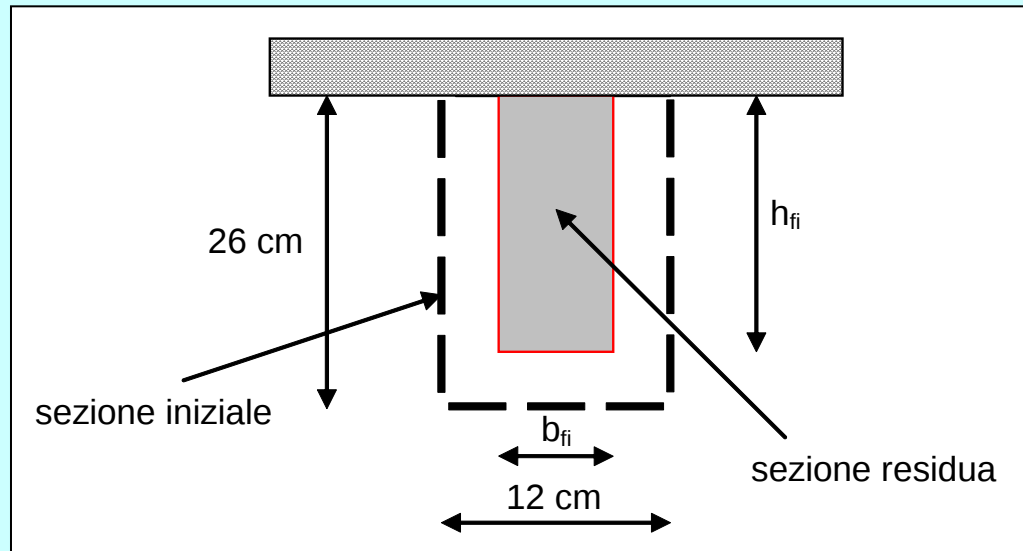
METODO DELLA SEZIONE RESIDUA

$$M_{fi,d} = 7 \text{ kNm}$$

Legno C24

$$\beta_n = 0,8 \text{ mm/min}$$

Verifica R30



Il frattile al 20% della resistenza è pari a $k_{fi} \cdot f_k = 1,25 \cdot 24,0 = 30 \text{ N/mm}^2$

Il coefficiente k_{mod} è posto pari a 1,0.

La resistenza di progetto del legname è pari a: $f_{d,fi} = k_{mod} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot \frac{1,25 \cdot 24,0}{1,0} = 30,0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Dopo 30 minuti di esposizione all'incendio, lo spessore carbonizzato è pari a:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 = 0,8 \cdot 30 + 1,0 \cdot 7 = 31,0 \text{ mm}$$

La sezione residua avrà le seguenti dimensioni:

$$b_{fi} = 12 - 2 \cdot 3,1 = 5,8 \text{ cm}$$

$$h_{fi} = 26 - 3,1 = 22,9 \text{ cm}$$

$$\text{Il modulo di resistenza ridotto della trave vale: } W_{fi} = \frac{b_{fi} \cdot h_{fi}^2}{6} = \frac{5,8 \cdot 22,9^2}{6} = 506,9 \text{ cm}^3$$

$$\text{La massima tensione normale nel legno vale pertanto: } \sigma_{fi} = \frac{M_{fi}}{W_{fi}} = \frac{7000000}{506900} = 13,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} < f_{d,fi}$$

QUALIFICAZIONE DEI PROTETTIVI NEL SETTORE PETROLCHIMICO (L.C. 9709 del 5/7/2013)

OGGETTO: Qualificazione di resistenza al fuoco di prodotti e sistemi protettivi da impiegare nel settore petrolchimico.

Pervengono alla Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica alcuni quesiti inerenti la qualificazione di resistenza al fuoco di prodotti e sistemi protettivi nel settore degli impianti chimici e petrolchimici.

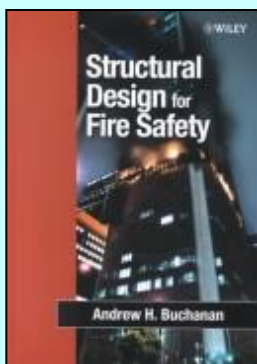
Giova ricordare che le procedure di classificazione e qualificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione sono riportate nel decreto del Ministro dell'Interno 16 febbraio 2007. Il decreto stesso definisce “opere da costruzione” gli edifici e le opere di ingegneria civile.

In base al citato decreto, è consentito determinare la prestazione di prodotti e sistemi protettivi attraverso prove di resistenza al fuoco con riferimento a curve di incendio nominali così come previsto dalla UNI EN 13501-2 e dalla norma UNI EN 1363-2, in particolare, per la curva di incendio da idrocarburi.

Nel caso del settore chimico e petrolchimico è però frequente l'impiego di prodotti o sistemi protettivi specifici pensati per garantire prestazioni di resistenza al fuoco con riferimento a scenari tipici quali, ad esempio, *pool fires*, *jet fires*, *hose stream*, etc. non descritti nelle citate norme europee e pertanto non specificatamente trattati nel decreto di cui in premessa.

A tale riguardo, la circolare prot. DCPREV n. 14229 del 19/11/2012, che fornisce alcune indicazioni in merito all'idoneità all'impiego di “prodotti innovativi”, cioè attualmente non coperti da specificazioni tecniche elaborate da Organismi europei di normazione, può rappresentare un valido riferimento. In essa è stabilito che l'uso dei prodotti innovativi possa essere accettato se supportato dalla pertinente valutazione del rischio che ne giustifichi l'impiego e se la prestazione degli stessi sia determinata con riferimento a norme o specifiche di prova nazionali, internazionali o, in assenza di queste, a specifiche di prova adottate da laboratori a tal fine autorizzati.

Analogamente, si ritiene che l'impiego di specifici prodotti e sistemi protettivi qualificati per la resistenza al fuoco nel settore chimico e petrolchimico, possa essere consentito solo a valle di valutazione del rischio ed in presenza di pertinenti rapporti di prova rilasciati da Organismi nazionali o internazionali riconosciuti nel settore.



Structural Design for Fire Safety
di Andrew Hamilton Buchanan
Pubblicato da Wiley & Sons
(2001)



Traduzione
P. Gambarova e R. Felicetti (2009)
HOEPLI



Resistenza al fuoco delle strutture
di Roberto Lenzi
E.P.C. (2004)



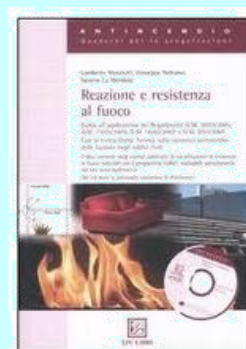
Fire Safety Engineering Design of Structures
di J. A. Purkiss
Pubblicato da Butterworth & Heinemann (2007)



Resistenza al fuoco delle costruzioni
di Luca Ponticelli e Mauro Caciolai
a cura di Claudio De Angelis
Pubblicato da UTET per il CNVVF (2008)



Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio
di E. Nigro, S. Pustorino, G. Cefarelli, P. Princi
Pubblicato da Hoepli (2010)



Reazione e resistenza al fuoco
di Lamberto Mazziotti, Giuseppe Paduano e Saverio La Mendola
Pubblicato da EPC (2010)



Guida agli Eurocodice 1, 2, 3 e 4
Resistenza al fuoco delle strutture: EN 1991-1.2, EN 1992-1.2, EN 1993-1.2 E EN 1994-1.2
di T. Lennon, D.B. Moore, Y.C. Wang e C.G. Bailey
Traduzione di S. Tedeschi e G. De Domenico