

ORDINE DEGLI INGEGNERI DI PRATO

Eurocodice EN 1991-1-2 / Eurocodice EN 1992-1-2:
primi concetti e valutazioni applicative

RESISTENZA AL FUOCO DELLE STRUTTURE
IN CEMENTO ARMATO

Prato, 22 Maggio 2013

Prof. Ing. Enrico Mangoni

Docente di “**Progetto e Riabilitazione delle Strutture**”

presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze

Email: emangoni@dicea.unifi.it, ing.enrico@studiomangoni.it

Inquadramento normativo per le verifiche di resistenza di elementi in c.a. sottoposti all'azione del fuoco

-NTC 2008-(Norme tecniche sulle costruzioni)

-D.M.16/02/2007 (Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione)

-D.M. 09/03/2007 (Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco)

-Eurocodici

EN-1991 1-2 (Azioni sulle costruzioni)

EN-1992 1-2 (Strutture in calcestruzzo)

NTC 2008(corpo del testo)

• Azioni sulle costruzioni: l'azione del fuoco (incendio)

2.5.1 CLASSIFICAZIONE DELLE AZIONI

Si definisce azione ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura.

c) *eccezionali* (A): azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura;

- incendi;
- esplosioni;
- urti ed impatti;

2.5.1.3 Classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo

• Combinazione delle azioni eccezionali

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

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

Tabella del coefficiente di combinazione $\psi_{2,j}$

Categoria/Azione variabile	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,3
Categoria B Uffici	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,3
Categoria H Coperture	0,0
Vento	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,2
Variazioni termiche	0,0

3.6 AZIONI ECCEZIONALI

Le azioni eccezionali sono quelle che si presentano in occasione di eventi quali incendi, esplosioni ed urti.

Quando è necessario tenerne conto esplicito, si considererà la combinazione eccezionale di azioni di cui al § 2.5.3.

Quando non si effettuano verifiche specifiche nei confronti delle azioni eccezionali, quali esplosioni, urti, ecc., la concezione strutturale, i dettagli costruttivi ed i materiali usati dovranno essere tali da evitare che la struttura possa essere danneggiata in misura sproporzionata rispetto alla causa.

• L'incendio

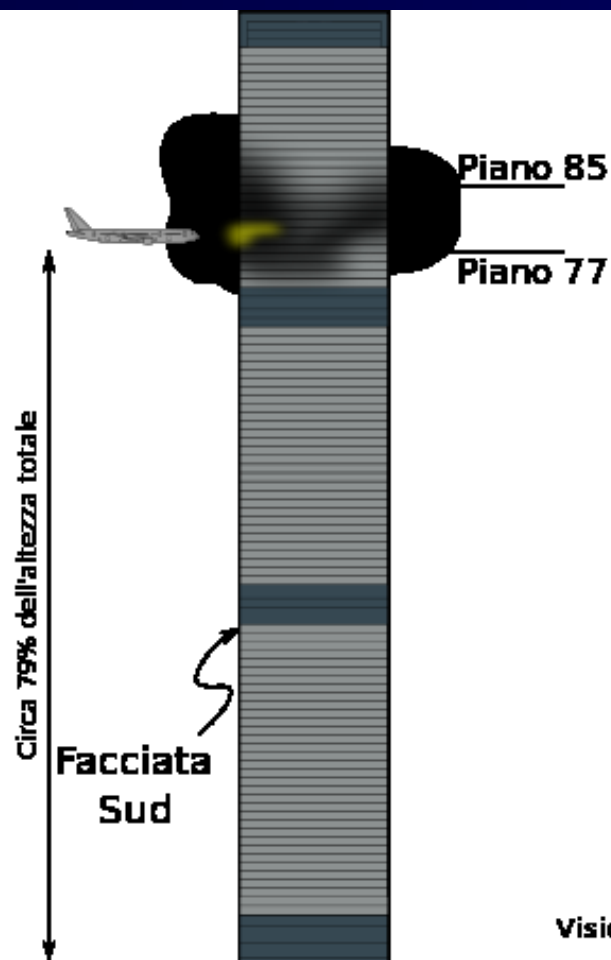
3.6.1.1 Definizioni

Per incendio, si intende la combustione autoalimentata ed incontrollata di materiali combustibili presenti in un compartimento.

Ai fini della presente norma si fa riferimento ad un *incendio convenzionale di progetto* definito attraverso una *curva di incendio* che rappresenta l'andamento, in funzione del tempo, della temperatura dei gas di combustione nell'intorno della superficie degli elementi strutturali.

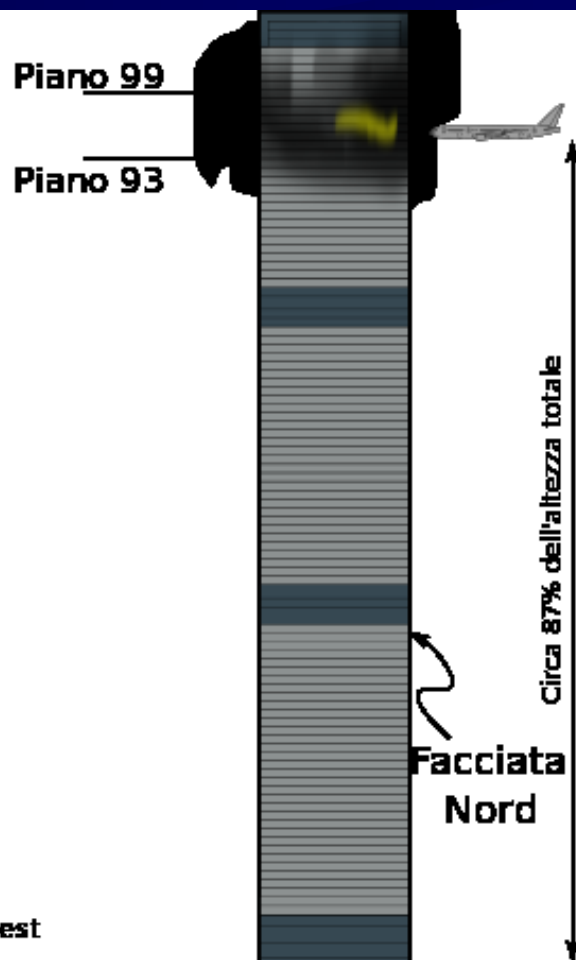
La curva di incendio di progetto può essere:

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



WTC 2: Colpito alle 9:02:59
Crollato dopo 56 minuti

Visione da est



WTC 1: Colpito alle 8:46:30
Crollato dopo 102 minuti





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.

Per compartimento antincendio si intende una parte della costruzione delimitata da elementi costruttivi resistenti al fuoco.

Per carico d'incendio specifico si intende il potenziale termico netto che può essere prodotto nel corso della combustione completa di tutti i materiali combustibili contenuti in un *compartimento*, riferito all'unità di superficie.

- Livelli di prestazione in caso di incendio

3.6.1.2 Richieste di prestazione

Al fine di limitare i rischi derivanti dagli incendi, le costruzioni devono essere progettate e costruite in modo tale da garantire la resistenza e la stabilità degli elementi portanti e limitare la propagazione del fuoco e dei fumi secondo quanto previsto dalle normative antincendio.

Gli obiettivi suddetti, sono raggiunti attraverso l'adozione di misure e sistemi di protezione attiva e passiva. Tutti i sistemi di protezione dovranno essere adeguatamente mantenuti.

Le prestazioni richieste alle strutture di una costruzione, in funzione degli obiettivi sopra definiti, sono individuate in termini di livello nella tabella 3.5.IV.

Tabella 3.5.IV – Livelli di prestazione in caso di incendi

Livello I	Nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del collasso delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile;
Livello II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione;
Livello III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza;
Livello IV	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse;
Livello V	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

I livelli di prestazione comportano classi di resistenza al fuoco, stabilite per i diversi tipi di costruzioni. In particolare, per le costruzioni nelle quali si svolgono attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, ovvero disciplinate da specifiche regole tecniche di prevenzione incendi, i livelli di prestazione e le connesse classi di resistenza al fuoco sono stabiliti dalle disposizioni emanate dal Ministero dell'Interno ai sensi del decreto del Presidente della Repubblica del 29 luglio 1982, n. 577 e successive modificazioni e integrazioni.

3.6.1.3 Classi di resistenza al fuoco

Le *classi* di resistenza al fuoco sono: 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 e 360 ed esprimono il tempo, in minuti primi, durante il quale la resistenza al fuoco deve essere garantita.

Le classi di resistenza al fuoco sono riferite all'incendio convenzionale rappresentato dalle curve di incendio nominali.

3.6.1.4 Criteri di Progettazione

La progettazione delle strutture in condizioni di incendio deve garantire il raggiungimento delle prestazioni indicate al § 3.6.1.2.

La sicurezza del sistema strutturale in caso di incendio si determina sulla base della resistenza al fuoco dei singoli elementi strutturali, di porzioni di struttura o dell'intero sistema costruttivo.

- Fasi fondamentali per la valutazione della resistenza al fuoco di elementi strutturali

1)

Individuazione dell'incendio di progetto appropriato alla costruzione in esame



2)

Analisi della evoluzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali



3)

Analisi del comportamento meccanico delle strutture esposte al fuoco



4)

Verifiche di sicurezza

Cosa si intende per resistenza al fuoco di un elemento?

Il concetto di resistenza al fuoco viene definito, nell'ambito della normativa nazionale, come l'attitudine di un elemento da costruzioni, componente o struttura, a conservare, secondo un programma termico prestabilito e per un tempo determinato, in tutto o in parte, i seguenti requisiti:

- La stabilità o capacità portante :R

l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco (D.M. Int. 30/11/1983)

capacità della struttura o di una sua membratura di sopportare le azioni specifiche durante la pertinente esposizione al fuoco (Eurocodici)

- La tenuta o integrità: E

attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre, se sottoposto all'azione del fuoco su un lato, fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto (D.M.Int. 30/11/1983)

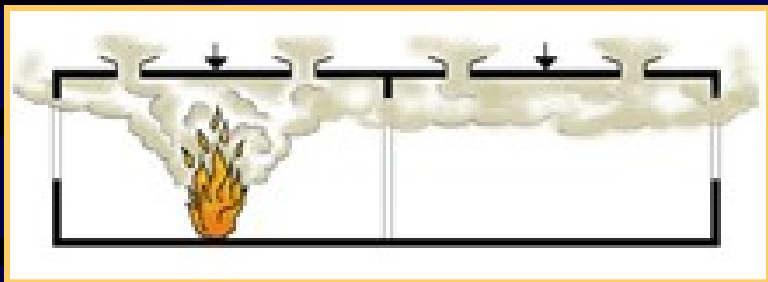
capacità delle membrature di separazione a prevenire il passaggio di gas caldi o l'ignizione al di là della superficie esposta, durante la pertinente esposizione al fuoco (Eurocodici)

- L'isolamento termico: I

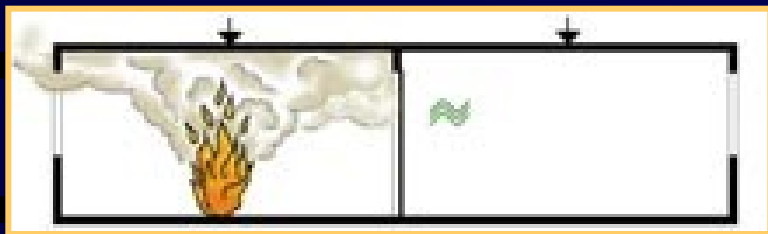
l'attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore (D.M.Int. 30/11/1983)

capacità di una membratura di separazione di prevenire un'eccessiva trasmissione di calore (Eurocodici)

In definitiva:



Con il simbolo **R** si identifica un elemento costruttivo che, in caso di incendio, deve conservare la sola stabilità (ad esempio una trave o un pilastro isolati)



Con il simbolo **RE** si identifica un elemento costruttivo che deve conservare sia la stabilità sia la tenuta (ad esempio un muro o un solaio che hanno funzione di separazione e per i quali non è necessario limitare l'incremento di temperatura sulla faccia dell'elemento non esposta all'incendio)

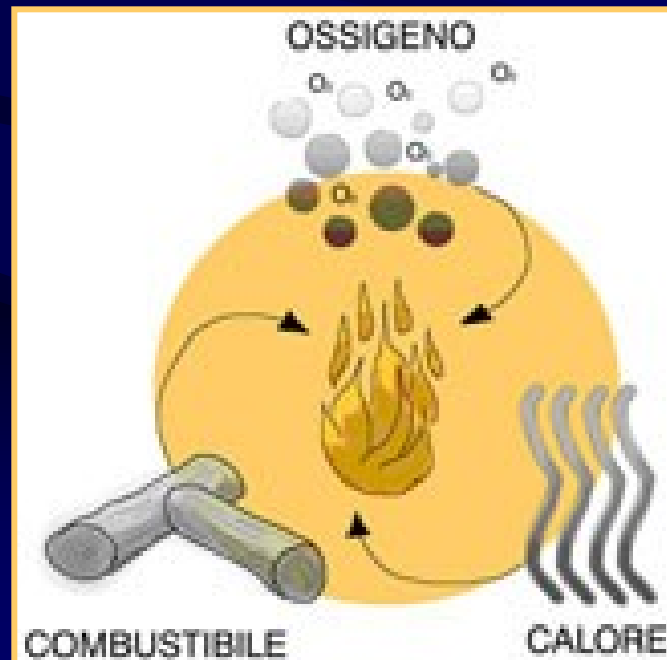


Con il simbolo **REI** si identifica un elemento costruttivo che deve conservare la stabilità, la tenuta e l'isolamento (come l'esempio precedente quando si vuole anche limitare l'incremento di temperatura sulla faccia dell'elemento non esposta all'incendio).

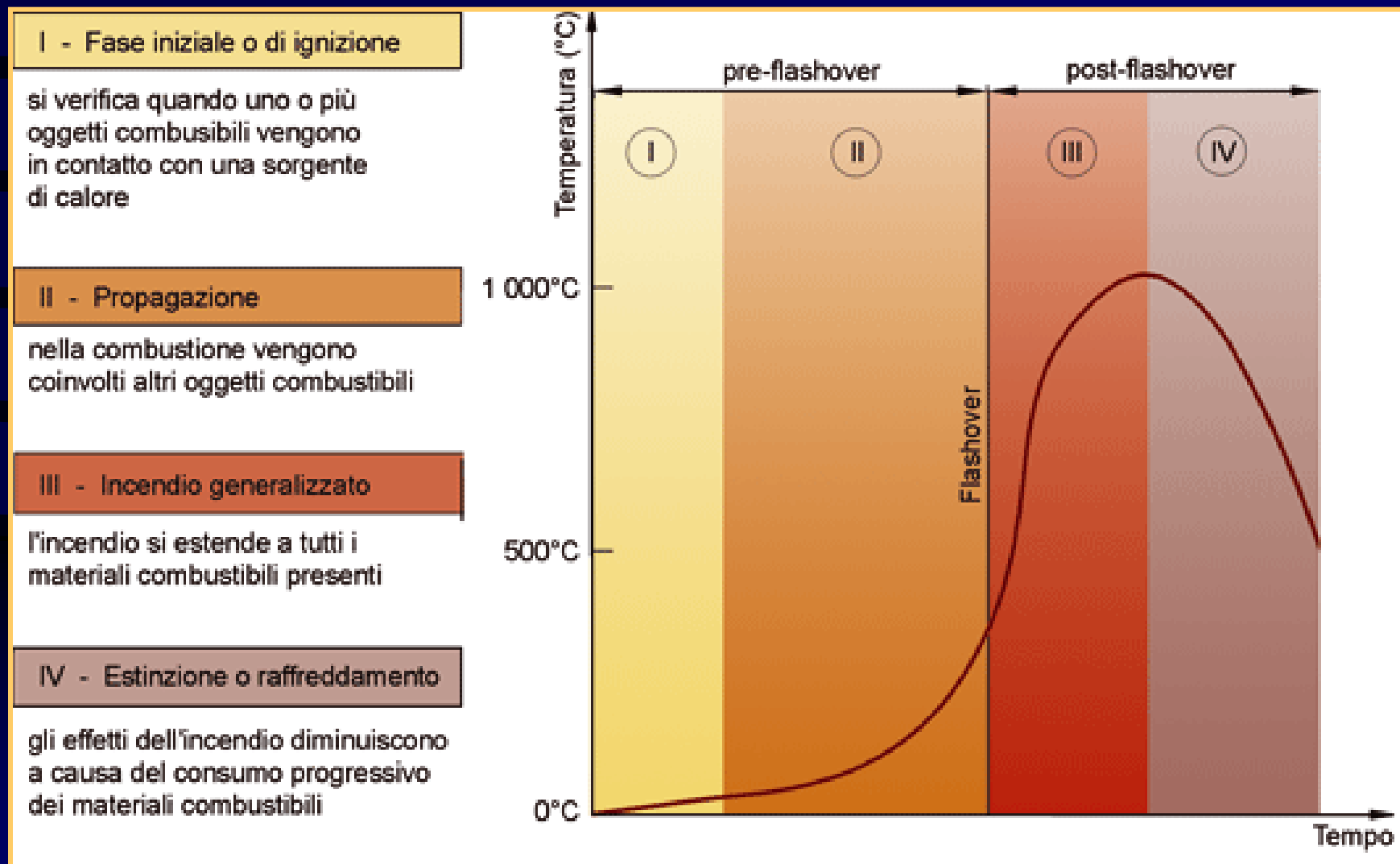
1) Individuazione dell'incendio di progetto per la costruzione che si esamina

L'incendio è definito all'interno delle Norme Tecniche, ovvero degli Eurocodici, come “azione eccezionale” che agisce nella struttura in condizioni eccezionali corrispondenti ad uno stato limite ultimo (collasso per instabilità, per eccessive deformazioni, etc.).

L'incendio ha origine quando si ha la presenza di un combustibile, di un comburente (ossigeno) e di una sorgente iniziale di calore.



E' abitudine schematizzare l'incendio nell'ambiente dove si sviluppa attraverso una curva che riporta l'andamento delle temperature in funzione del tempo.



Nella fase iniziale, sull'andamento successivo dell'incendio hanno grande importanza le misure di **PROTEZIONE ATTIVA** (presenza di estintori, sorveglianza, impianto di rilevazione fumi, etc.).

Da tenere presente che se la ventilazione è insufficiente, l'ossigeno si riduce e si rallenta la combustione. Spesso in ambienti vetrati la rottura dei vetri che avviene attorno ai 100° C aumenta la quantità di ossigeno e quindi la combustione.

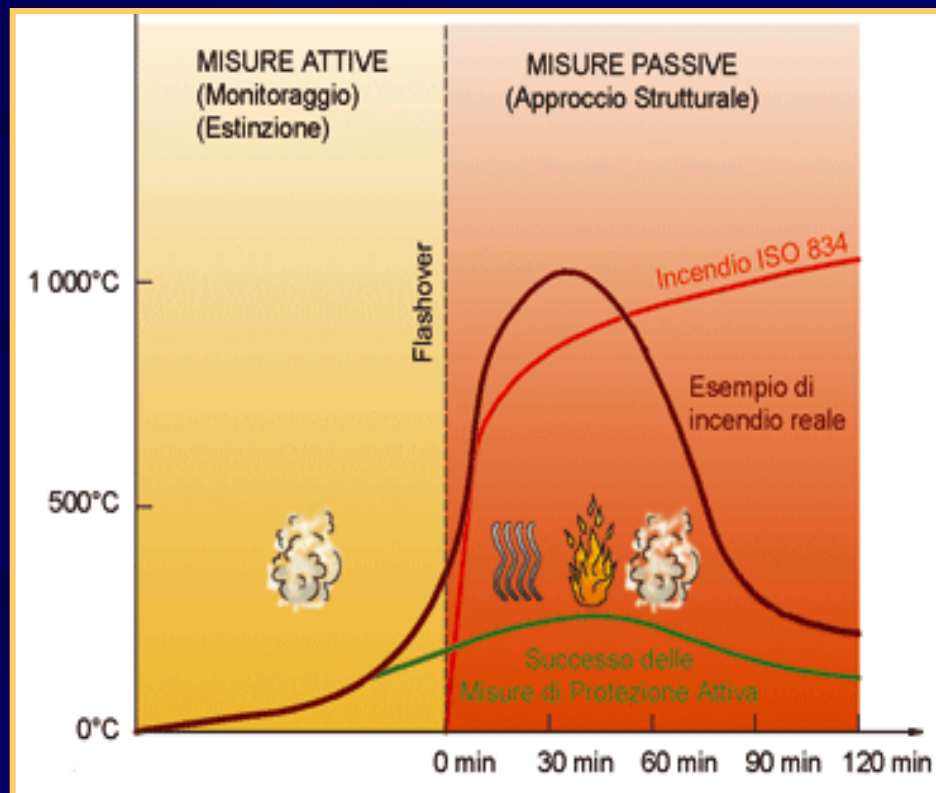
Se l'incendio non si riduce si arriva al cosiddetto "**FLASH OVER**" ovvero una fase in cui l'incendio da fenomeno locale coinvolge rapidamente tutto l'ambiente circostante e le fiamme si estendono a tutti i materiali combustibili.

In questa fase la temperatura al soffitto è dell'ordine di 500 – 600 °C (Drysdale)

Nella fase post flash over tutti i materiali combustibili sono sottoposti ad incendio, sono importanti le misure di **PROTEZIONE PASSIVA**

(compartimentazione, protezione degli elementi strutturali, etc.). Gli effetti dell'incendio cominciano a diminuire, consumandosi progressivamente i combustibili. L'incendio tende a spegnersi. Questa fase inizia in genere quando il 70 – 75 % del combustibile è stato consumato.

Notare che per gli strutturisti l'incendio è dato dalla curva ISO.



• L'incendio di progetto

Le NTC 2008, nonché gli Eurocodici, fanno riferimento ad incendi nominali, ed incendi naturali:

incendio standard ISO 834

$$\theta = \theta_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

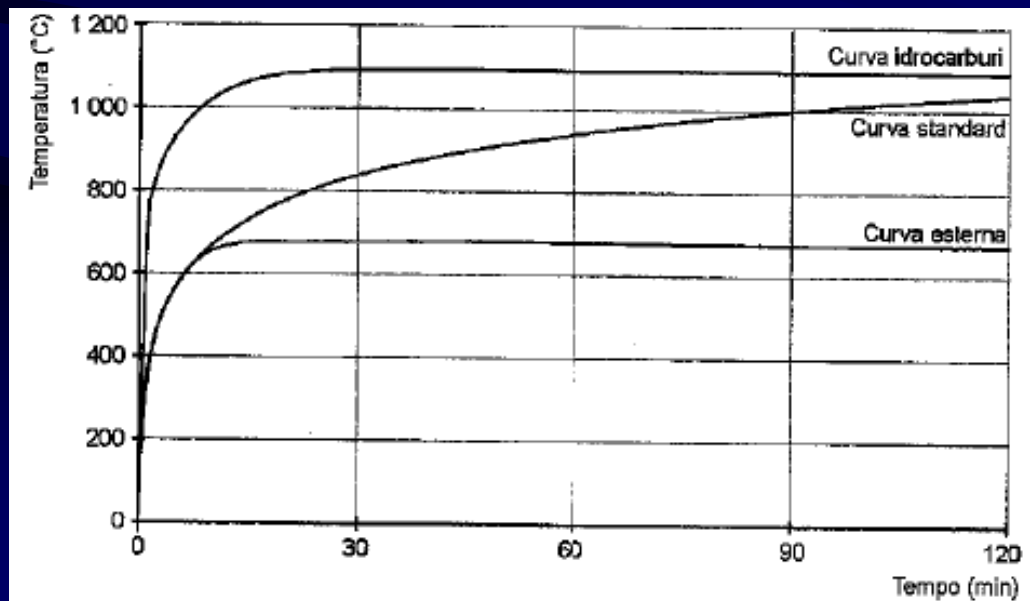
incendio da idrocarburi

$$\theta = 1080 \cdot (1 - 0.325 \cdot e^{-0.167t} - 0.675 \cdot e^{-2.5t}) + \theta_0$$

incendio esterno

$$\theta = 660 \cdot (1 - 0.687 \cdot e^{-0.32t} - 0.313 \cdot e^{-3.8t}) + \theta_0$$

(temperature θ espresse in °C, tempi t in minuti)



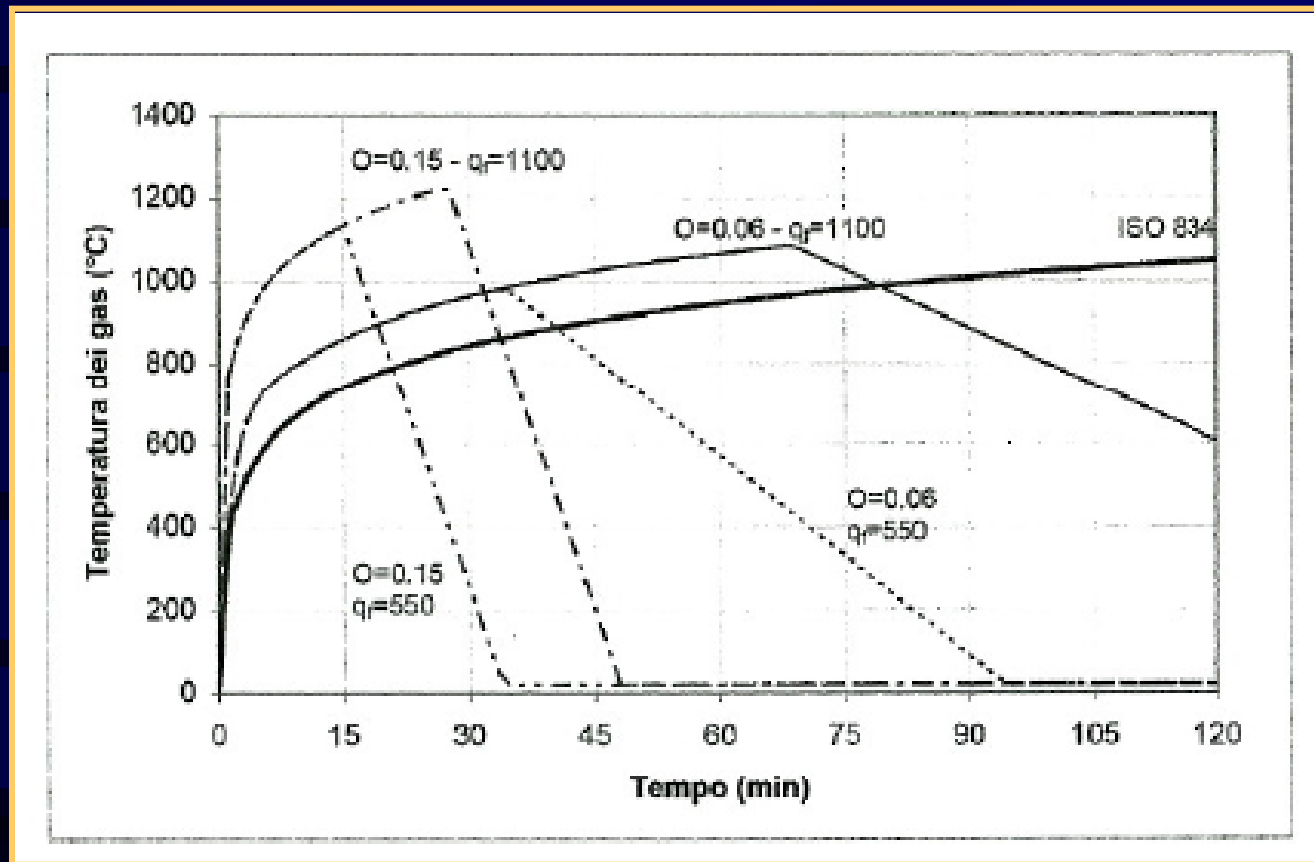
Per gli incendi naturali invece si può fare riferimento a diversi modelli:

- *incendi parametrici (per fase post – flash over);*
- *incendio localizzato (per fase pre – flash over);*
- *incendio per elementi esterni (per tener conto delle fiamme che fuoriescono dalle aperture del compartimento stesso);*
- *modelli a zona;*
- *modelli di campo.*

In ciascuno di questi modelli si tiene conto di fattori importanti per l'andamento dell'incendio, ovvero:

- *destinazione degli ambienti;*
- *ventilazione;*
- *caratteristiche delle pareti del compartimento;*
- *presenza di impianti e protezioni attive*
- *etc.*

Curve temperatura – tempo parametriche per incendio controllato dalla ventilazione



Notare le differenze fondamentali fra gli andamenti degli incendi nominali, ed incendi naturali !!!

Notare quali incendi sono più appropriati in progetti ex-novo, ovvero nella ricostruzione del danno da incendio!!!!.

- Caratteristiche di fiamme e fuoco

B.4

Caratteristiche di fiamme e fuoco

B.4.1

Condizioni di ventilazione naturale

- (1) La velocità di combustione o di rilascio di calore è fornita dall'espressione:

$$Q = \min \left((A_f \cdot q_{f,d}) / \tau_F; 3,15(1 - e^{-0,036/Q}) A_v \left(\frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{1/2} \right) \quad [\text{MW}] \quad (\text{B.4})$$

- (2) La temperatura del compartimento d'incendio è data da:

$$T_f = 6\,000 (1 - e^{-0,1/Q}) Q^{1/2} (1 - e^{-0,00286 \Omega}) + T_0 \quad (\text{B.5})$$

- (3) L'altezza delle fiamme (vedere figura B.2) è data da:

$$L_L = \max \left(0; h_{eq} \left(2,37 \left(\frac{Q}{A_v \rho_g (h_{eq} g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right) \right) \quad (\text{B.6})$$

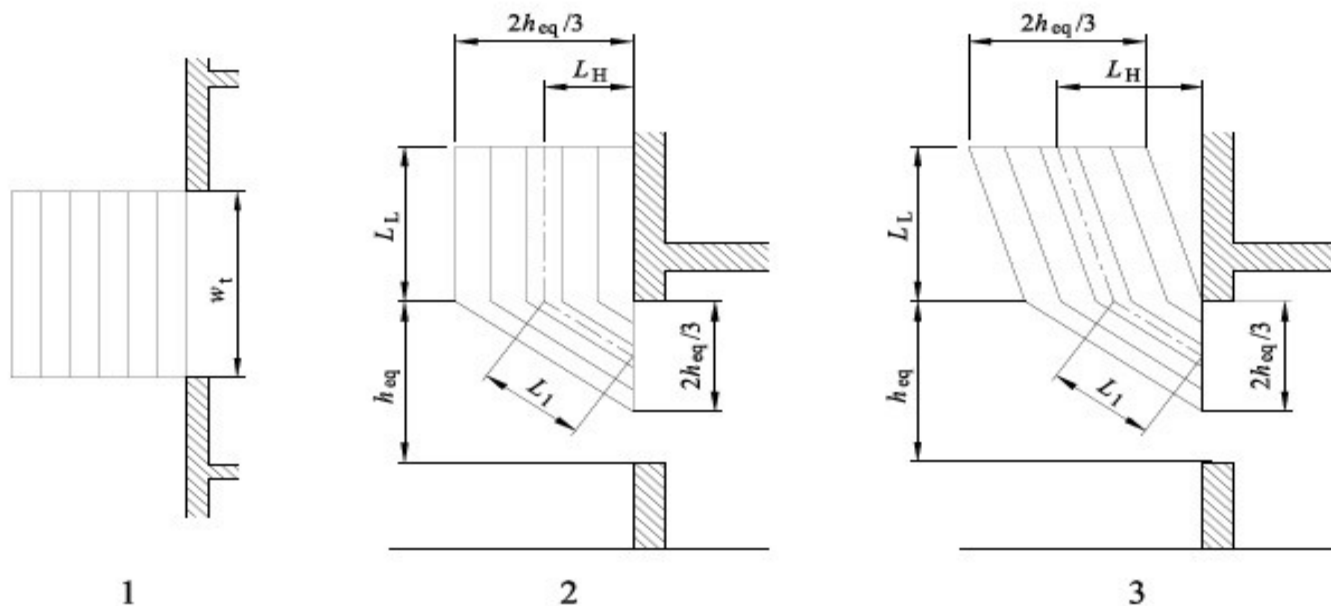
Nota Assumendo $\rho_g = 0,45 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, l'equazione si semplifica nella seguente:

$$L_L = 1,9 \left(\frac{Q}{W_f} \right)^{2/3} - h_{eq} \quad (\text{B.7})$$

figura B.2 Dimensioni delle fiamme in condizioni di ventilazione naturale

Legenda

- 1 Sezione trasversale orizzontale
- 2 Sezione trasversale verticale
- 3 Sezione trasversale verticale



$L_L = \frac{h_{eq}}{3} \Rightarrow$	$L_1 = \sqrt{L_H^2 + \frac{h_{eq}^2}{9}} \equiv \frac{h_{eq}}{2}$	$L_1 \equiv \frac{h_{eq}}{2}$
	$L_t = L_L + L_1$	$L_t = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3}\right)^2} + L_1$
$h_{eq} < 1,25 \text{ m}$	parete al di sopra	assenza di parete al di sopra oppure $h_{eq} > 1,25 \text{ m}$

- (4) La larghezza della fiamma è pari alla larghezza della finestra (vedere figura B.2).
- (5) La profondità della fiamma è pari a $\frac{2}{3}$ dell'altezza della finestra: $\frac{2}{3} h_{eq}$ (vedere figura B.2).
- (6) La proiezione orizzontale della fiamma:

- nel caso che sopra la finestra sia presente una parete è data da:

$$L_H = h_{eq} / 3 \quad \text{se } h_{eq} \leq 1,25 w_f \quad (B.8)$$

$$L_H = 0,3 h_{eq} (h_{eq} / w_f)^{0,54} \quad \text{se } h_{eq} > 1,25 w_f \text{ e la distanza da qualsiasi altra finestra è maggiore di } 4 w_f \quad (B.9)$$

$$L_H = 0,454 h_{eq} (h_{eq} / 2 w_f)^{0,54} \quad \text{negli altri casi} \quad (B.10)$$

- Nel caso la finestra non sia sovrastata da una parete, è data da:

$$L_H = 0,6 h_{eq} (L_L / h_{eq})^{1/3} \quad (B.11)$$

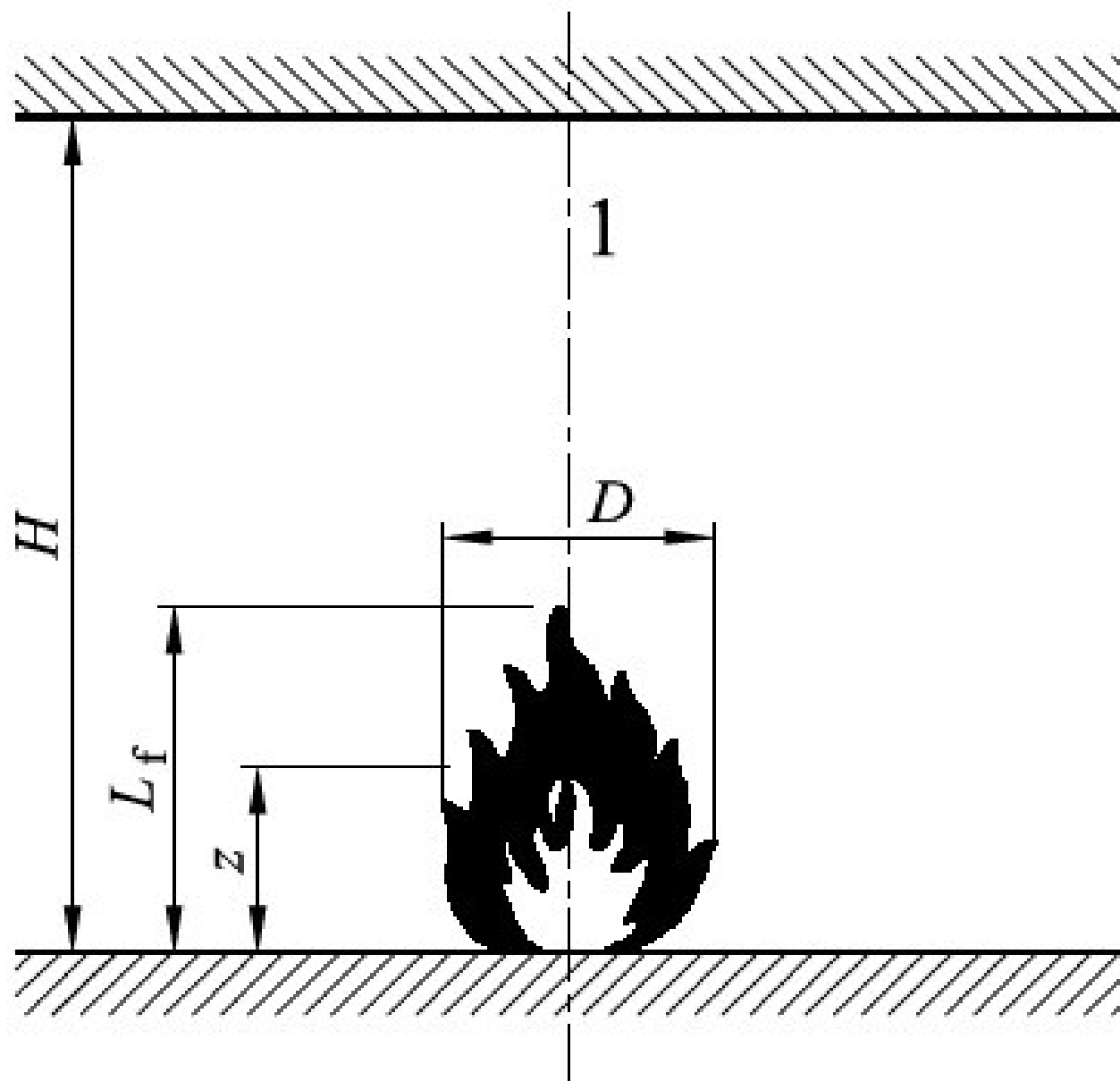
- (7) La lunghezza della fiamma lungo l'asse, è data da:

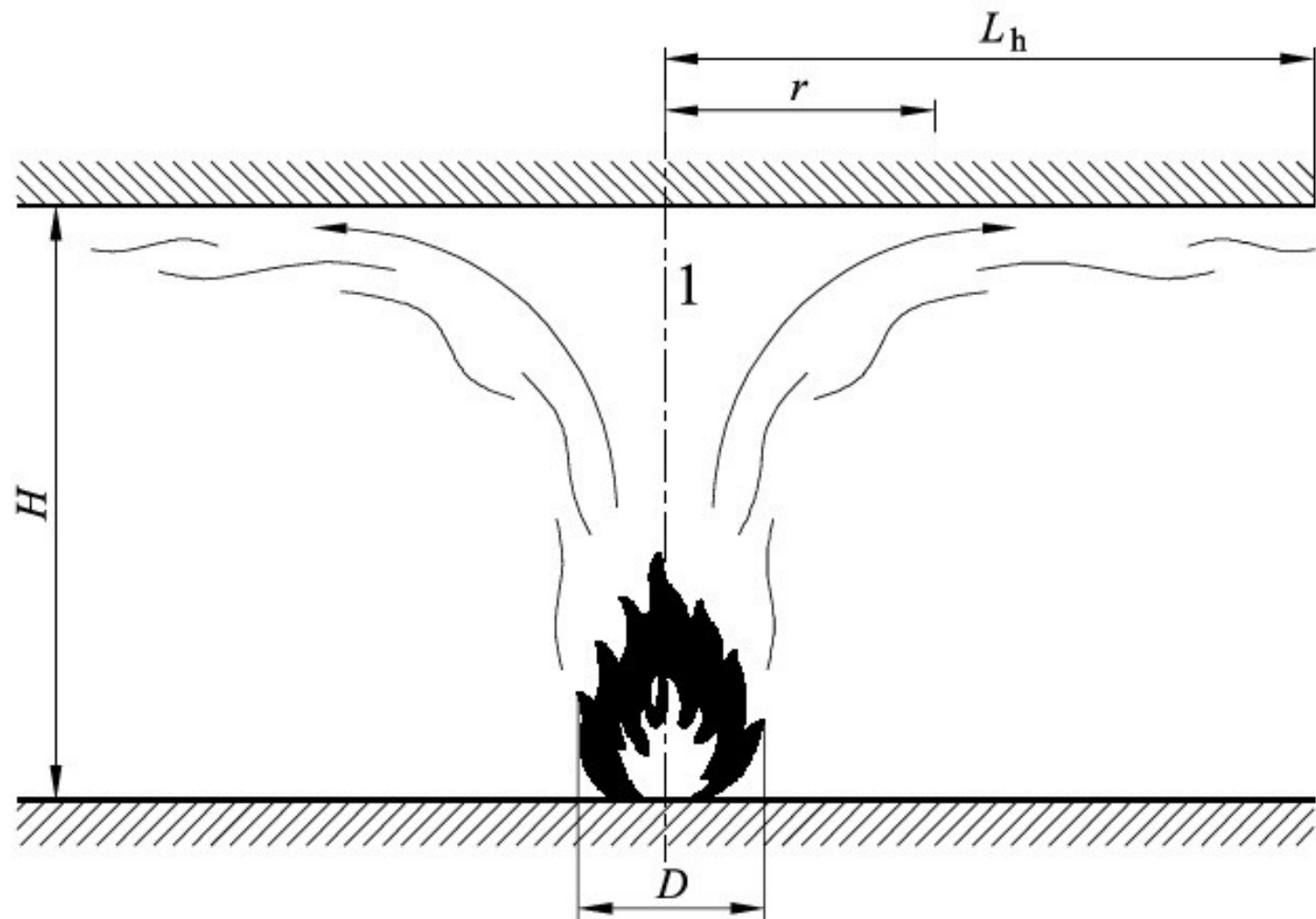
quando $L_L > 0$,

$$L_f = L_L + h_{eq} / 2 \quad \text{se esiste una parete sopra la finestra o se } h_{eq} \leq 1,25 w_f \quad (B.12)$$

$$L_f = (L_L^2 + (L_H - h_{eq} / 3)^2)^{1/2} + h_{eq} / 2 \quad \text{se non esiste una parete sopra la finestra o se } h_{eq} > 1,25 w_f \quad (B.13)$$

quando $L_L = 0$ allora anche $L_f = 0$.





2) Analisi dell'evoluzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali

La determinazione della distribuzione della temperatura all'interno di un elemento strutturale richiede la soluzione di un problema non lineare di trasmissione del calore.

La trasmissione del calore avviene attraverso tre meccanismi fondamentali: conduzione, convezione e irraggiamento.

CONDUZIONE: è il meccanismo che si genera tra due corpi posti a contatto a diversa temperatura.

CONVEZIONE: è il meccanismo che si genera tra due fluidi o tra un fluido e un corpo

IRRAGGIAMENTO: è il meccanismo che si genera tra due corpi non a contatto ma in mutua esposizione

Analisi del transitorio termico

Trasmissione del calore

conduzione

$$q = -\lambda A \frac{dT(t)}{dx}$$

convezione

$$q = hA[T(t) - T_{\infty}]$$

irraggiamento

$$q = \varepsilon \sigma [T(t)^4 - T^4]$$

Conduzione in un continuo

conservazione dell'energia

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho \cdot cp \frac{\partial T}{\partial t}$$

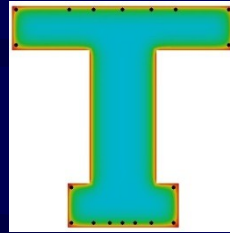
Condizioni al contorno

coefficienti di scambio convettivo

emissività / assorbività

curva d'incendio

Per l'analisi termica degli elementi strutturali si possono impiegare modelli di tipo avanzato, con l'impiego di elementi finiti, ovvero metodi semplificati che si basano su soluzioni approssimate in forma chiusa.



In ogni caso l'equazione risolutiva del problema di trasmissione è sempre del tipo

$$-div(-\lambda \cdot grad\theta) = \frac{\partial(\rho \cdot c \cdot \theta)}{\partial t}$$

EQ.NE DI FOURIER

λ = conducibilità termica del materiale

c = calore specifico

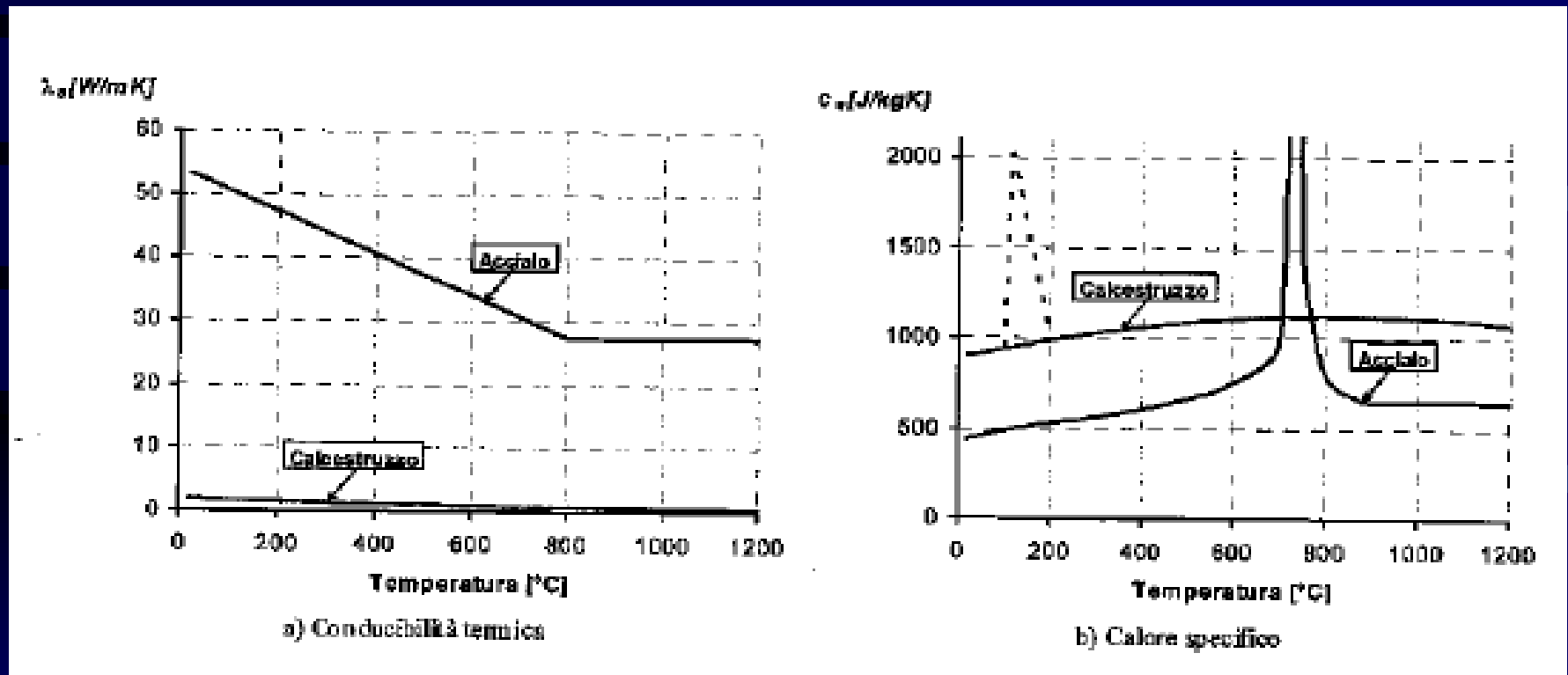
t = tempo

$\theta = \theta(t, x, y, z)$ = temperatura

Le grandezze dell'elemento strutturale che occorre conoscere per determinare la sua temperatura, nota quella del gas esterno, sono:

- densità (kg/m^3);
- calore specifico ($\text{J}/(\text{kg K})$)
- conducibilità termica ($\text{W}/(\text{m K})$)

Entrambe queste ultime grandezze sono funzione della temperatura!

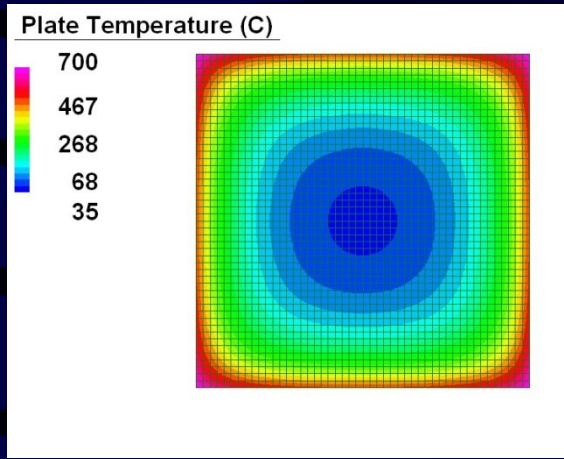


Curve di variazione della conducibilità termica e del calore specifico in funzione della temperatura per l'acciaio e per il calcestruzzo

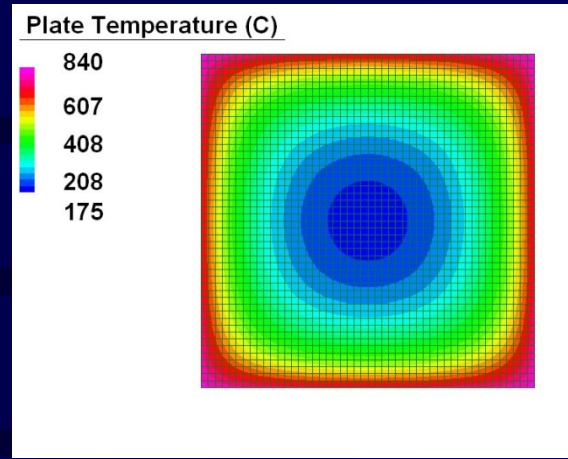
Valori di α_c proposti nell'ENI 1991-1-2 (2002)

Modello di incendio	α_c [W/m ² K]
Incendio standard	25
Incendio esterno	25
Incendio degli idrocarburi	50
Incendio parametrico	35
Modelli avanzati	35
Condizioni di esposizione: superficie non esposta di elementi di separazione	α_c [W/m ² K]
Senza effetti di trasferimento di calore per irraggiamento	4
Compresi gli effetti del trasferimento di calore per irraggiamento	9

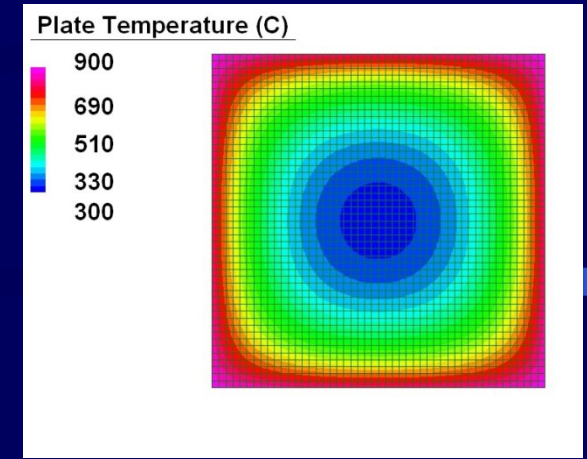
Time 15 min



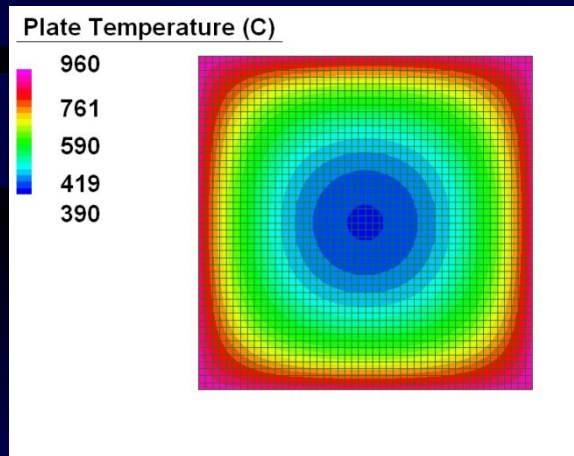
Time 30 min



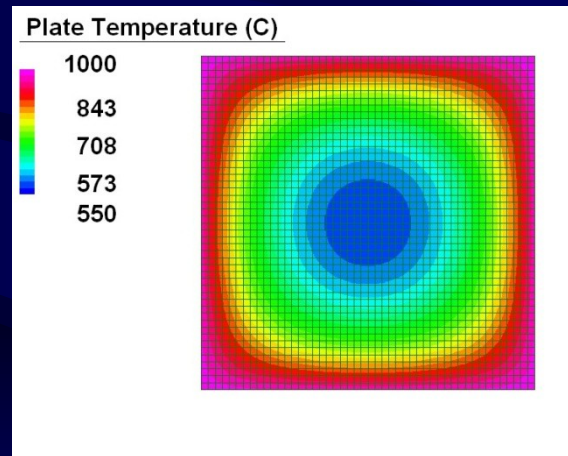
Time 45 min



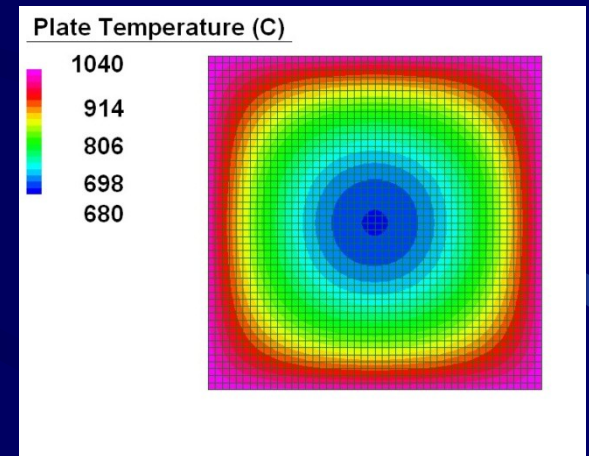
Time 60 min



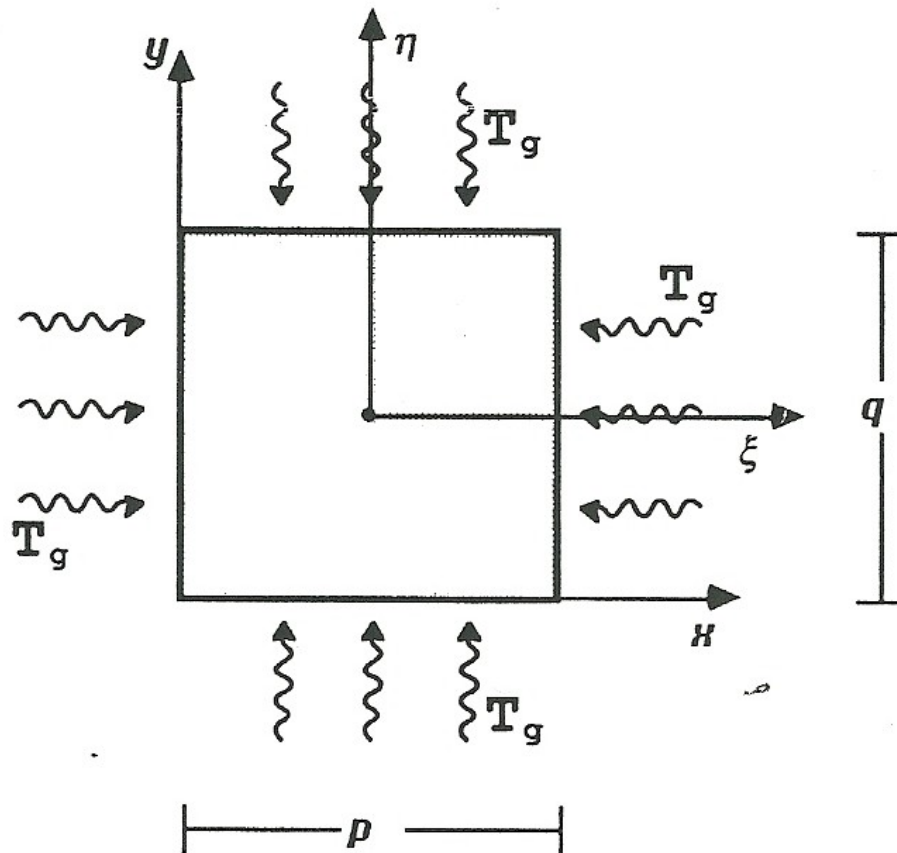
Time 90 min



Time 120 min

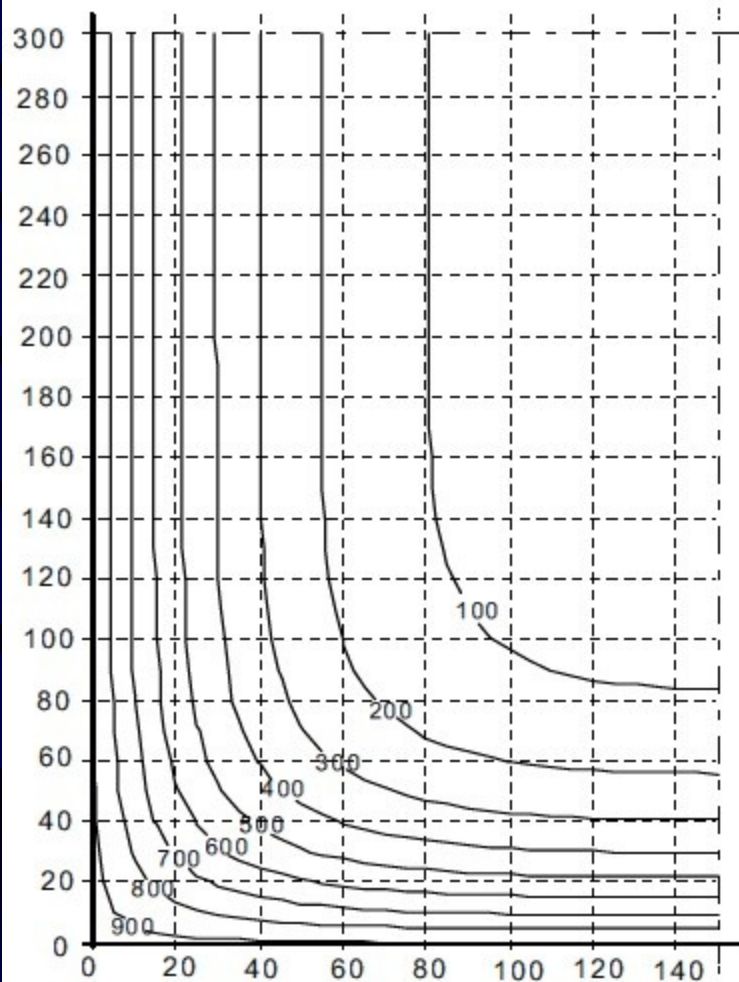


(Da Benedetti ed altri-Giornale del Genio civile 1989)

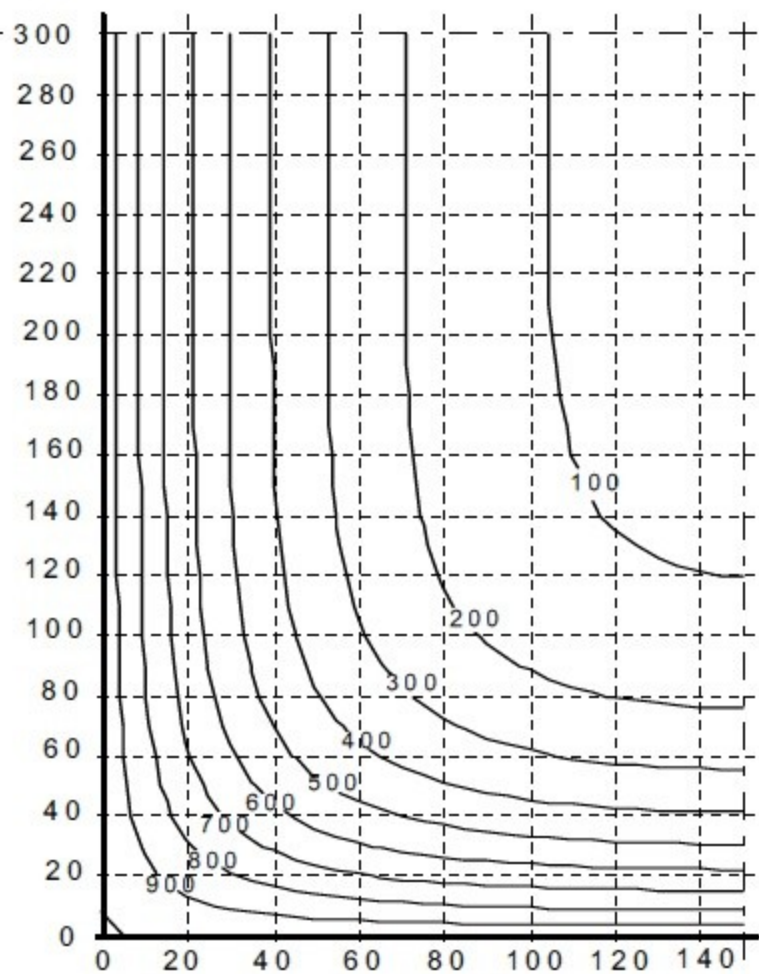


$$T(x, y, t) = \Gamma(t) \cdot \left[1 - \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^2 m n} \cdot e^{-k^2 \pi^2 \left(\frac{m^2}{p^2} + \frac{n^2}{q^2} \right) t} \sin \frac{m \pi x}{p} \cdot \sin \frac{n \pi y}{q} \right],$$

(n, m dispari).



a) R60



b) R90

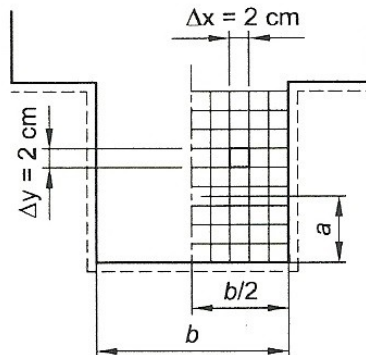
Temperature profiles ($^{\circ}\text{C}$) for a beam $h \times b = 600 \times 300$

Da UNI 9582/2001

N.B. La norma non è più utilizzabile, ma le tabelle si!

La soluzione di un'equazione differenziale non dipende dalla norma!

prospetto 2 2 Mappatura termica su sezione a T



Il prospetto 2 riporta la temperatura (°C) al centro dei quadrati di 2 cm di lato e sono state interrotte ad un valore "d" dal fondo trave oltre il quale le temperature si mantengono costanti (il tratteggio indica la superficie esposta al fuoco)

b	12			20					28								36										
$t = 30$	161	249	492	43	65	120	234	487	22	26	37	63	119	234	487	20	21	22	26	37	63	119	234	487			
	161	249	492	43	65	120	234	487	22	26	37	63	119	234	487	20	21	22	26	37	63	119	234	487			
	161	249	492	43	65	120	234	487	23	26	37	63	119	234	487	20	21	22	26	37	63	119	234	487			
	161	249	492	43	65	120	234	487	23	26	37	63	119	234	487	20	21	22	26	37	63	119	234	487			
	161	250	492	44	65	120	234	487	23	27	38	64	119	234	487	21	21	22	27	38	64	119	234	487			
	162	250	492	45	67	121	235	487	24	28	39	65	120	235	487	22	22	24	28	39	65	120	235	487			
	164	252	493	48	70	124	237	488	28	32	43	68	123	236	488	26	27	28	32	43	68	123	236	488			
	170	257	495	58	79	131	242	491	39	43	53	77	131	242	491	37	38	39	43	53	77	131	242	491			
	186	270	502	82	101	151	256	498	65	68	77	100	150	256	498	63	64	65	68	77	100	150	256	498			
	225	302	520	135	151	195	291	516	121	123	131	150	194	291	516	119	119	120	123	131	150	194	291	516			
	313	378	566	245	257	291	370	564	235	236	242	256	291	370	564	234	234	235	236	242	256	291	370	564			
	527	568	683	492	498	517	564	682	487	488	491	498	516	564	682	487	487	487	488	491	498	516	564	682			

r=60	343	439	684	126	160	237	382	660	49	62	91	142	229	378	659	26	30	40	58	89	142	229	379	659
	343	439	684	126	160	237	382	660	49	62	91	143	229	379	659	27	31	40	58	90	142	229	379	659
	343	439	684	127	161	238	382	660	50	63	92	143	230	379	659	28	32	41	59	90	143	229	379	659
	343	440	684	128	162	239	383	661	52	65	94	145	231	379	660	30	34	44	61	92	144	230	379	660
	344	441	685	131	165	241	384	661	57	69	97	148	233	381	660	35	39	48	65	96	147	233	381	660
	347	442	686	137	171	246	388	663	65	78	105	154	238	384	662	45	49	57	74	103	154	238	384	662
	352	447	688	150	182	255	395	667	82	93	119	167	248	392	666	63	66	74	90	118	166	248	392	666
	364	457	694	172	203	273	408	674	110	121	145	190	267	406	673	93	96	104	118	114	189	267	406	673
	387	477	705	213	242	307	435	688	159	169	190	230	302	433	687	145	148	154	166	189	230	301	432	687
	434	518	728	286	310	368	484	715	242	250	268	302	364	483	715	231	233	238	248	267	301	364	483	715
	535	605	772	419	438	485	581	764	387	393	406	433	483	580	764	380	381	384	392	406	432	483	580	764
	740	775	857	679	690	716	764	854	663	666	673	688	715	764	854	660	660	662	666	673	687	715	764	854
r=90	478	577	803	213	250	332	487	766	95	112	149	211	310	475	762	46	54	70	98	141	207	308	474	478
	479	577	803	214	251	333	487	766	96	113	150	212	310	476	762	48	56	72	99	143	208	309	475	479
	479	577	803	215	252	334	488	767	99	116	152	214	312	477	762	52	59	75	102	145	210	310	476	479
	480	578	803	218	255	336	490	768	104	121	157	217	315	478	763	58	65	81	108	150	214	313	478	480
	481	579	804	224	260	340	493	769	113	129	164	224	320	482	765	68	75	91	116	157	220	318	481	481
	485	582	805	233	269	348	498	772	127	143	177	235	328	488	768	86	92	107	131	171	232	327	488	485
	492	588	808	250	284	361	509	777	151	165	198	253	344	500	774	113	119	132	155	192	250	342	499	492
	505	600	813	278	310	384	527	786	188	201	231	283	369	519	783	154	160	172	193	227	281	368	519	505

segue nella pagina successiva

3) Il comportamento meccanico delle strutture esposte a fuoco

NTC 2008

3.6.1.5.2 Analisi dell'evoluzione della temperatura

Il campo termico all'interno dei componenti della struttura viene valutato risolvendo il corrispondente problema di propagazione del calore, tenendo conto del trasferimento di calore per irraggiamento e convezione dai gas di combustione alla superficie esterna degli elementi e considerando l'eventuale presenza di materiali protettivi.

3.6.1.5.3 Analisi del comportamento meccanico

Il comportamento meccanico della struttura viene analizzato tenendo conto della riduzione della resistenza meccanica dei componenti dovuta al danneggiamento dei materiali per effetto dell'aumento di temperatura.

L'analisi del comportamento meccanico deve essere effettuata per lo stesso periodo di tempo usato nell'analisi dell'evoluzione della temperatura.

Si deve tener conto della presenza delle azioni permanenti e di quelle azioni variabili che agiscono contemporaneamente all'incendio secondo la combinazione eccezionale.

Non si prende in considerazione la possibilità di concomitanza dell'incendio con altre azioni eccezionali e con le azioni sismiche.

Si deve tener conto, ove necessario, degli effetti delle sollecitazioni iperstatiche dovute alle dilatazioni termiche contrastate, ad eccezione dei seguenti casi:

- è riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli;
- sono implicitamente tenute in conto nei modelli semplificati e conservativi di comportamento strutturale in condizioni di incendio.

Generalità

(1)P Espansioni imposte e vincolate e deformazioni causate da variazioni di temperatura conseguenti all'esposizione al fuoco producono effetti di azioni, per esempio forze o momenti, che devono essere considerati con l'esclusione di quei casi dove le azioni:

(1a)

- possono essere riconosciute trascurabili o a favore di sicurezza a priori;

(1b)

- sono introdotte per mezzo di modelli e condizioni di vincolamento scelte a favore di sicurezza, e/o sono implicitamente comprese nel calcolo per effetto di requisiti di sicurezza al fuoco definiti in modo conservativo.

(2) Si raccomanda che per una stima delle azioni indirette siano considerate le seguenti situazioni:

(2a)

- espansione termica contrastata degli elementi stessi, per esempio colonne in un edificio multi piano a struttura intelaiata con pareti molto rigide;
- distribuzione dell'espansione termica all'interno di elementi staticamente indeterminati, per esempio solette continue;
- gradienti termici all'interno delle sezioni trasversali che danno luogo a tensioni di coazione;
- espansione termica di elementi adiacenti, per esempio lo spostamento della testa di una colonna a seguito dell'espansione della soletta di solaio, o espansione dei cavi di sospensione;

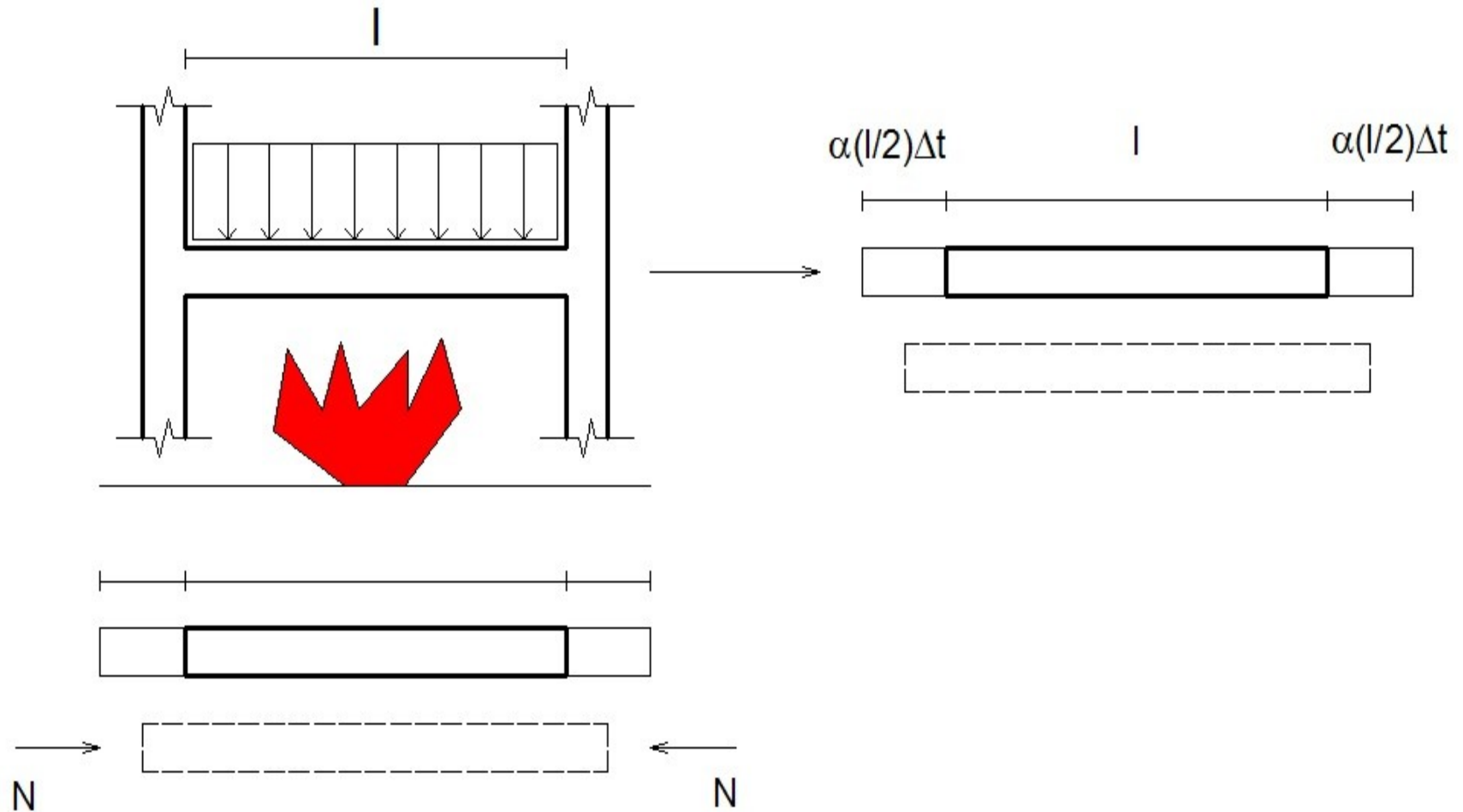
(2b)

- espansione termica di elementi che sollecitano altri elementi posizionati fuori del compartimento antincendio.

(3) Si raccomanda che i valori di progetto delle azioni indirette dovute all'incendio $A_{ind,d}$ siano determinati sulla base dei valori di progetto delle proprietà termiche e meccaniche dei materiali forniti nelle parti dei prEN da prEN 1992 a prEN 1999 riguardanti la progettazione contro l'incendio e sulla base della relativa esposizione al fuoco.

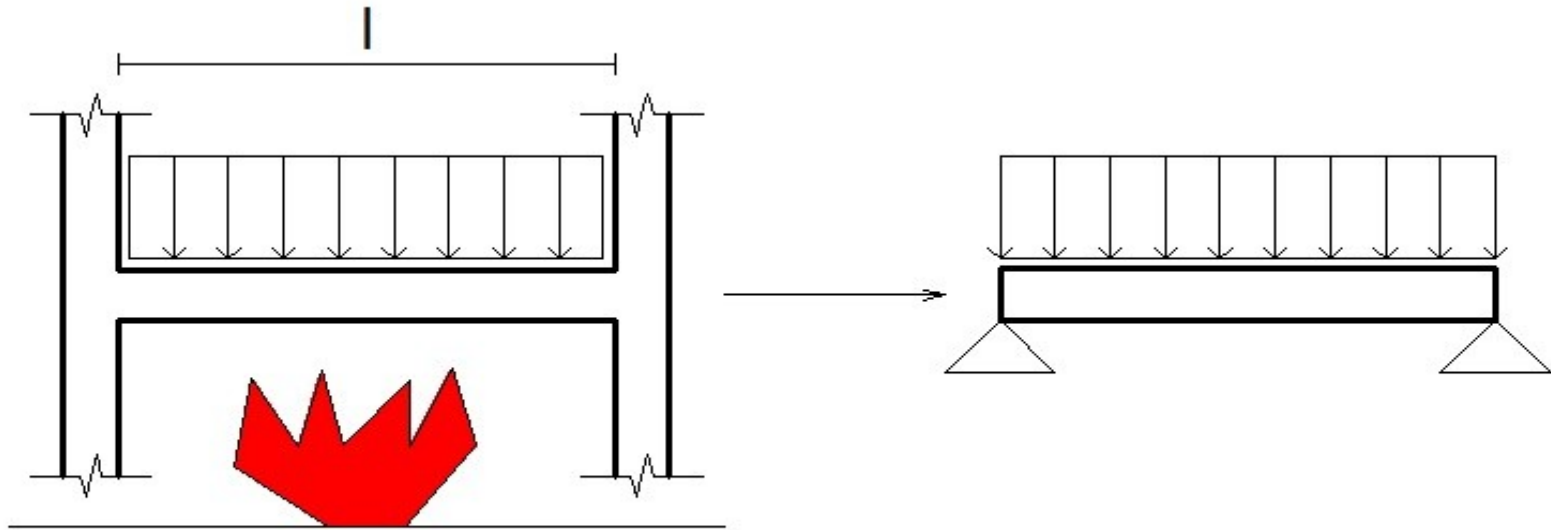
(4) Non occorre considerare le azioni indirette dagli elementi adiacenti quando i requisiti di sicurezza in caso di incendio si riferiscono ad elementi in condizioni di incendio normalizzato.

(1a)



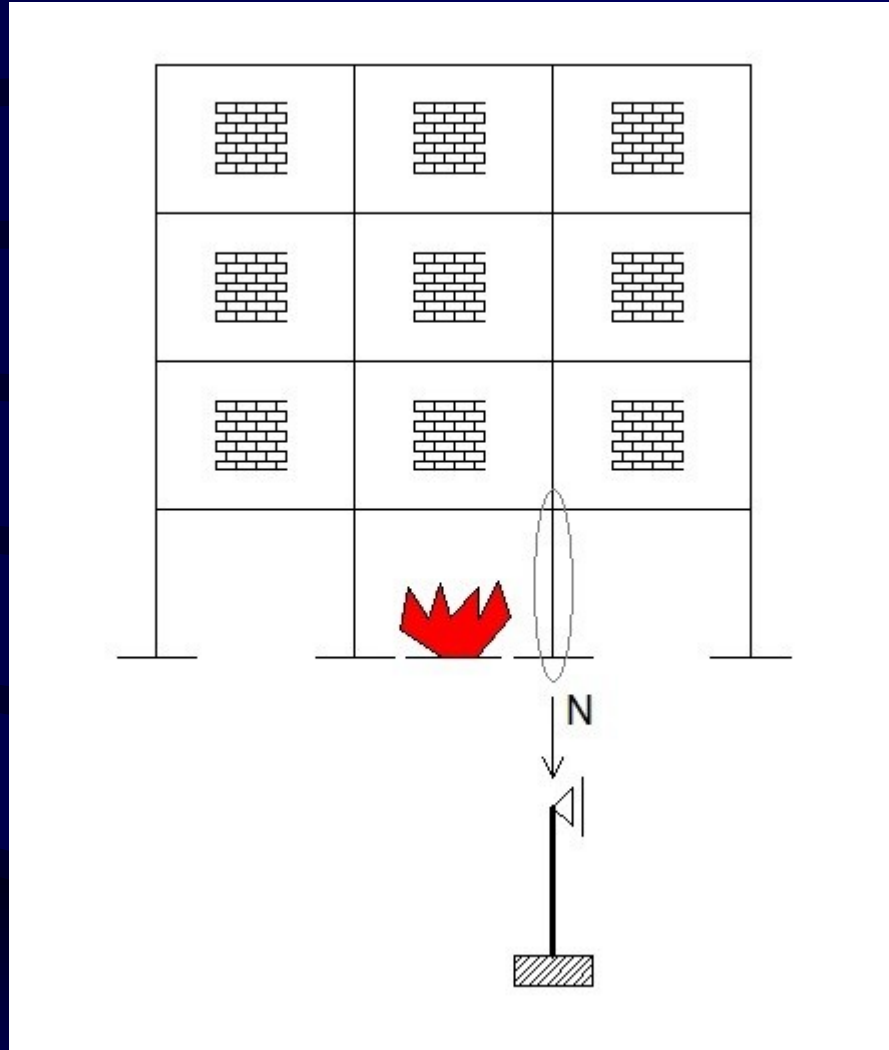
N.B. N può trascurarsi nelle travi in C.A., non può trascurarsi nelle travi in acciaio !!!

(1b)



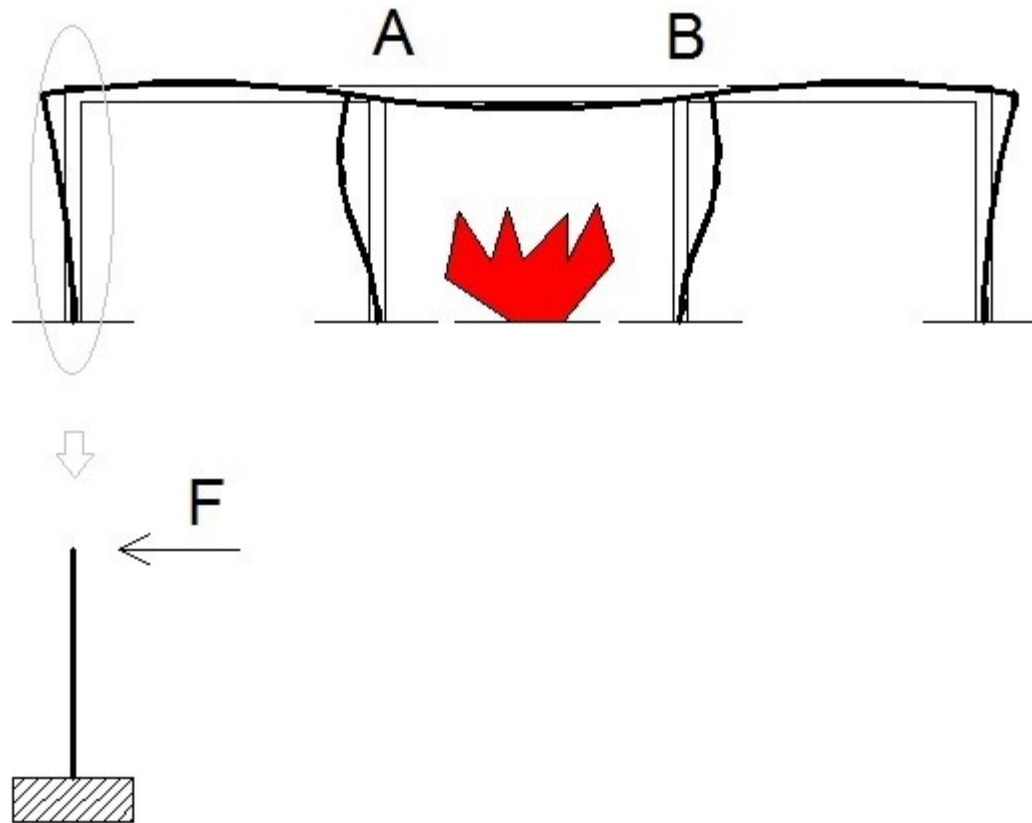
N.B. Non considerare N porta ad uno schema statico di verifica a vantaggio di sicurezza!!!!

(2a)



N.B. La colonna a causa della rigidezza del telaio e dei tamponamenti non è libera di espandersi, per questo si genera uno sforzo N aggiuntivo in testa alla colonna. Non considerare N è a svantaggio di sicurezza !!!!

(2b)



N.B. F azione di spinta in testa ai pilastri di estremità dovuta all'incendio nel solo tratto AB.

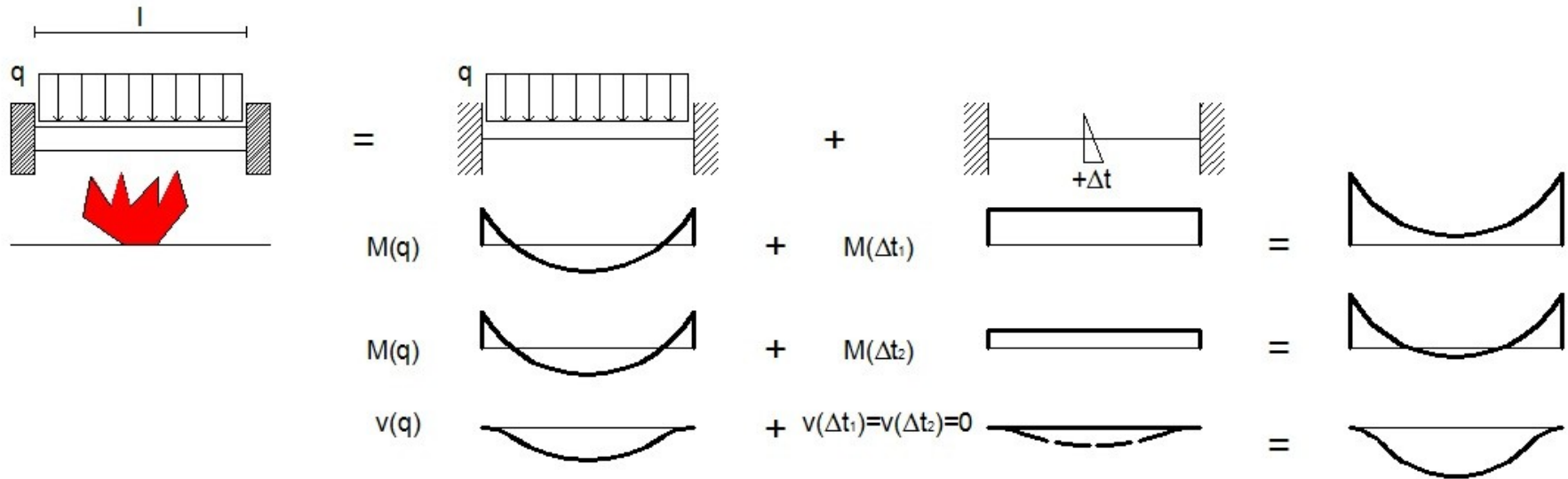
4.2

Simultaneità delle azioni

4.2.1

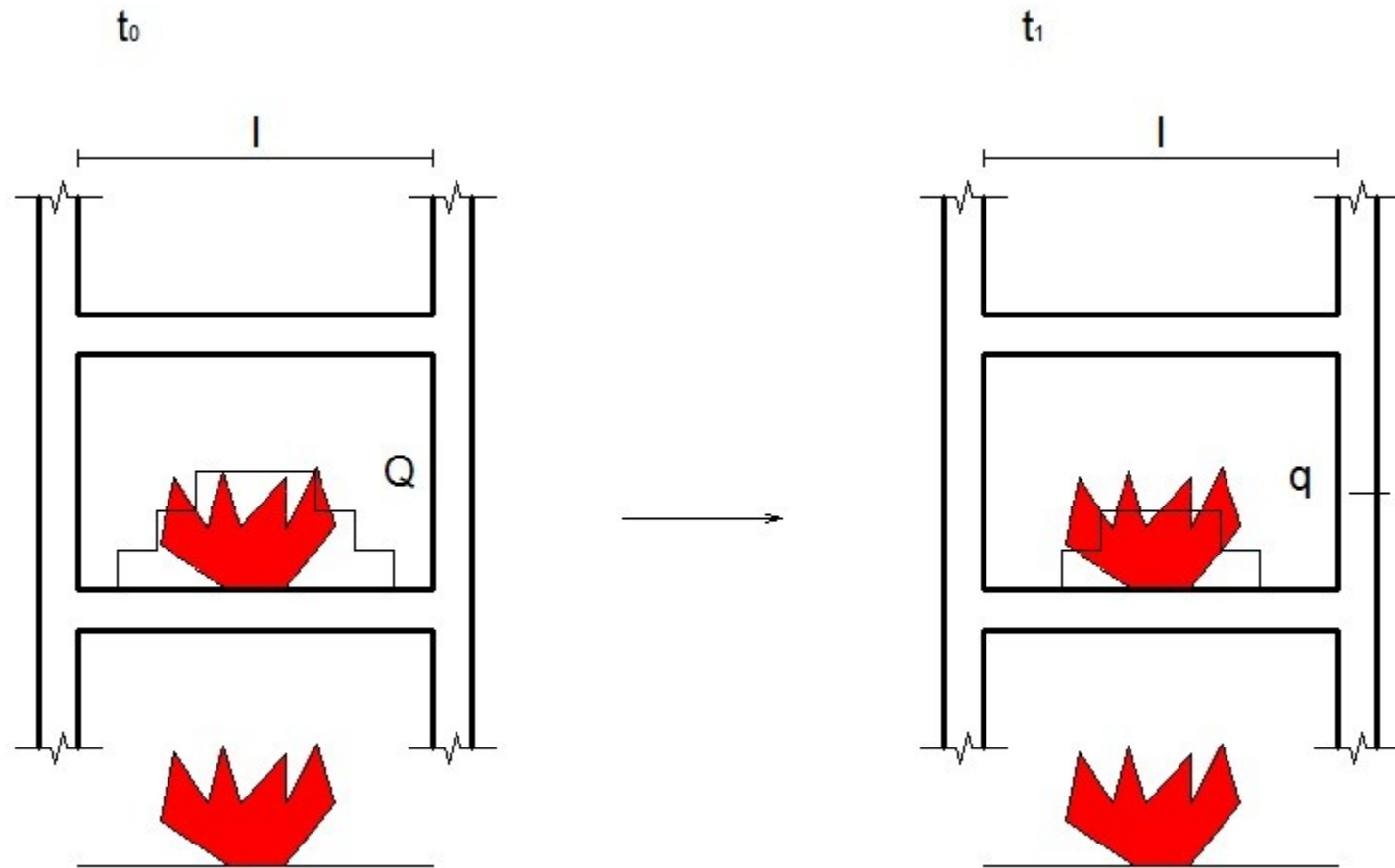
Azioni dal progetto a temperatura ordinaria

- (1)** (1)P Le azioni devono essere considerate come per il progetto a temperatura ordinaria, se esse facilmente agiscono anche in situazione d'incendio.
- (2) Si raccomanda che valori rappresentativi delle azioni variabili, che considerano la situazione di progetto eccezionale di esposizione al fuoco, siano definiti in accordo a EN 1990.
- (3)** (3) Si raccomanda che la diminuzione dei sovraccarichi conseguente alla combustione non sia considerata.
- (4)** (4) Si raccomanda che i casi in cui non occorre considerare i carichi da neve, a causa dello scioglimento della neve, siano verificati individualmente.
- (5) Non occorre considerare le azioni conseguenti ad operazioni industriali.



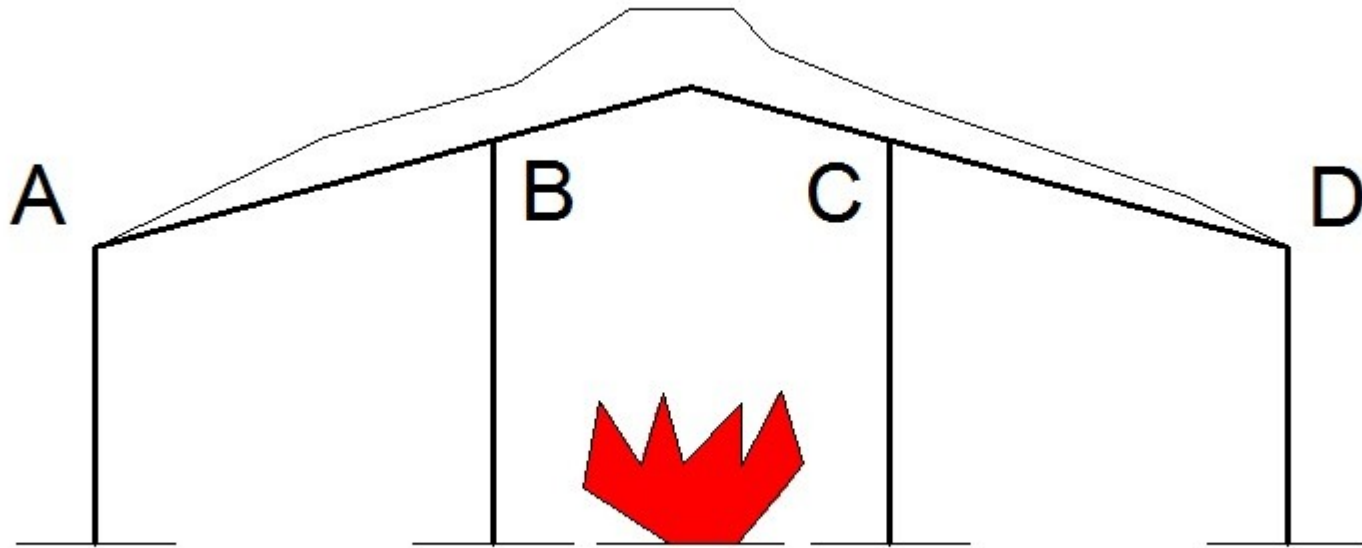
(1) **N.B.** Le tensioni dovute all'effetto termico si sommano a quelle dovute ai carichi. Nello schema adottato la deformata varia solo per effetto del danno sul materiale!, non per la curvatura !!

(3)



N.B. Il sovraccarico per la verifica della trave AB è Q non q !!!

(4)



N.B. Per la verifica della trave BC non considero il sovraccarico dovuto alla neve. La neve si considera per la verifica del pilastro B.

EFFETTI DELLE ALTE TEMPERATURE SUL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo è un materiale composito che mostra un comportamento complesso se sottoposto ad alte temperature.

Gli elementi in calcestruzzo resistono bene alle alte temperature grazie al potere isolante del materiale.

- Gli elementi strutturali in c.a./c.a.p. resistono bene all'alta temperatura, grazie al potere isolante del calcestruzzo:

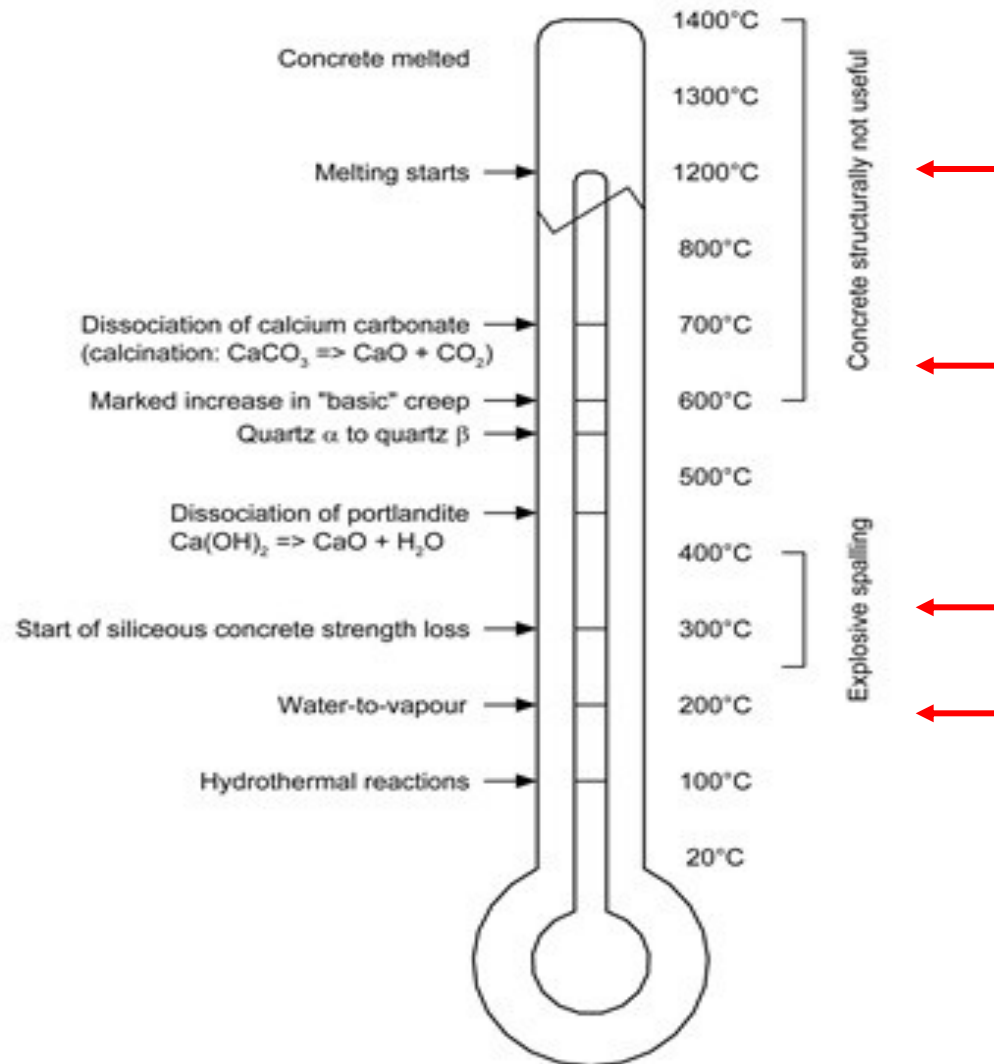
a 20°C/800°C

conducibilità termica "λ"	calcestruzzo	1.5-2.0/1.0 W/mK
	acciaio/calcestruzzo	30÷20
calore specifico "c"	calcestruzzo	900/1250 J/kgK
	acciaio/calcestruzzo	0.55÷0.80
densità "ρ"	calcestruzzo	2100-2400 kg/m³
	acciaio/calcestruzzo	3.7÷3.2
diffusività termica "D"	calcestruzzo	0.3-0.8/0.3-0.4 mm²/s
	acciaio/calcestruzzo	18÷7

$$D = \lambda / (c \rho)$$

Quello che accade al calcestruzzo sottoposto a riscaldamento può essere bene evidenziato attraverso la figura seguente.

“Termometro” del calcestruzzo



Avvengono reazioni chimiche che mutano la natura del materiale. Al microscopio elettronico sono ben visibili tali trasformazioni.



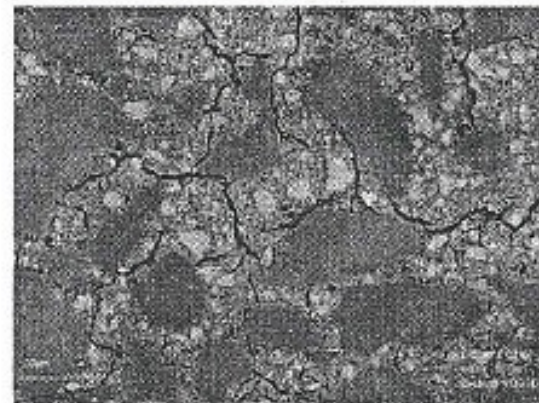
$T_{\max} = 20\text{ °C}$



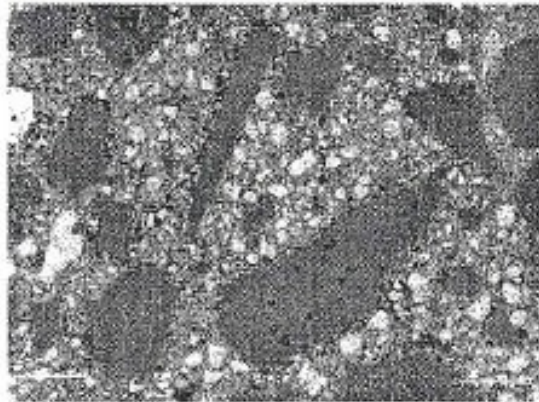
$T_{\max} = 450\text{ °C}$



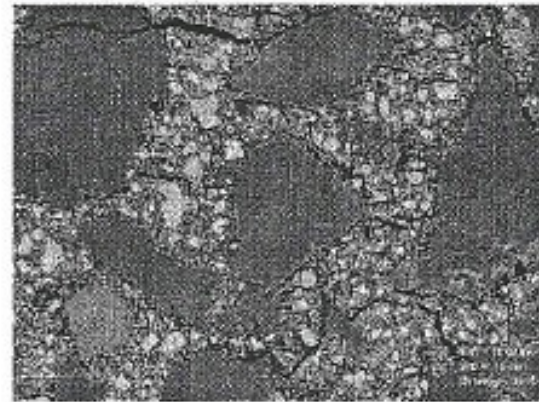
$T_{\max} = 150\text{ °C}$



$T_{\max} = 600\text{ °C}$



$T_{\max} = 300\text{ °C}$



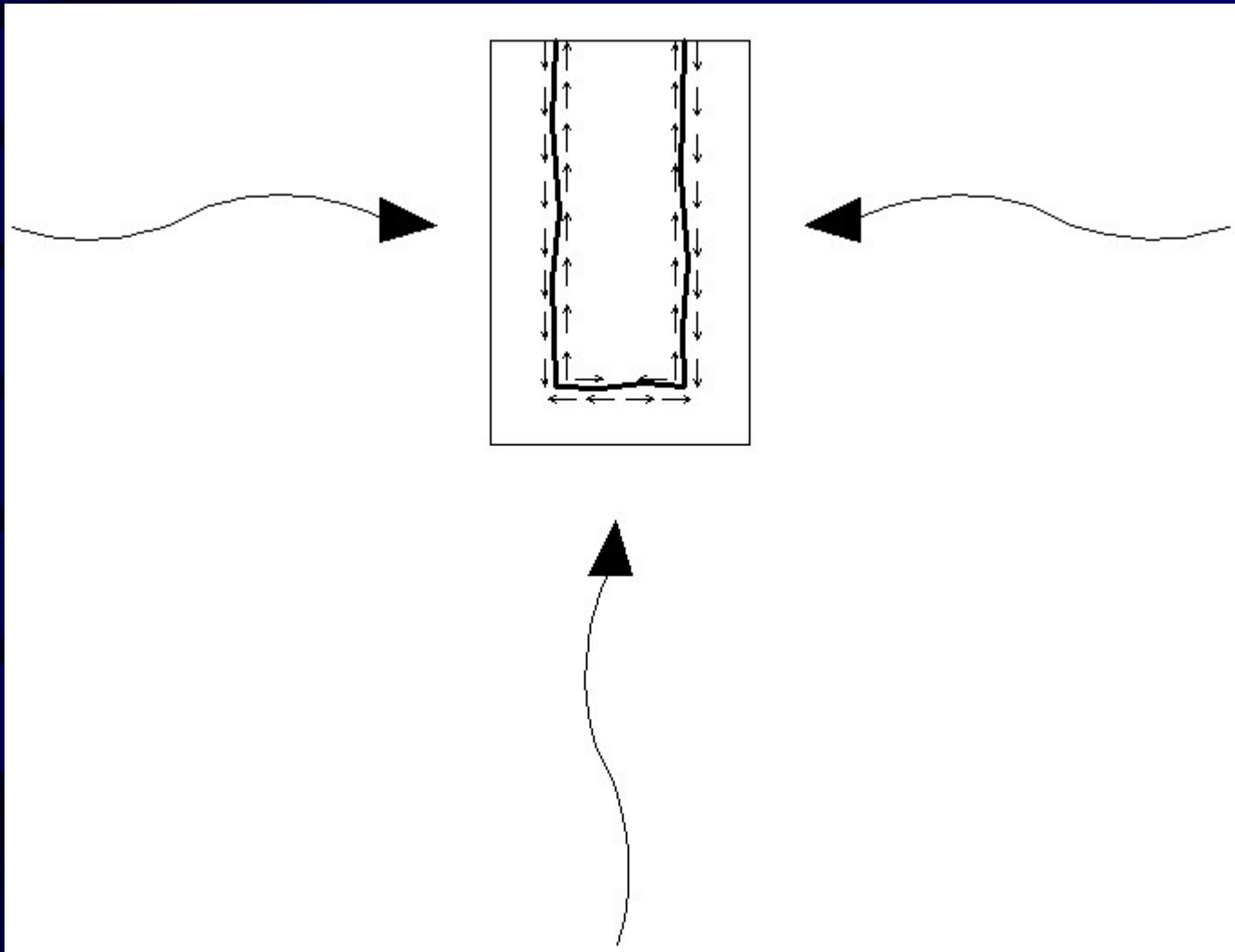
$T_{\max} = 750\text{ °C}$

Tale comportamento, visibile al microscopio, è in sostanza dovuto al diverso comportamento presentato da pasta cementizia ed aggregati:

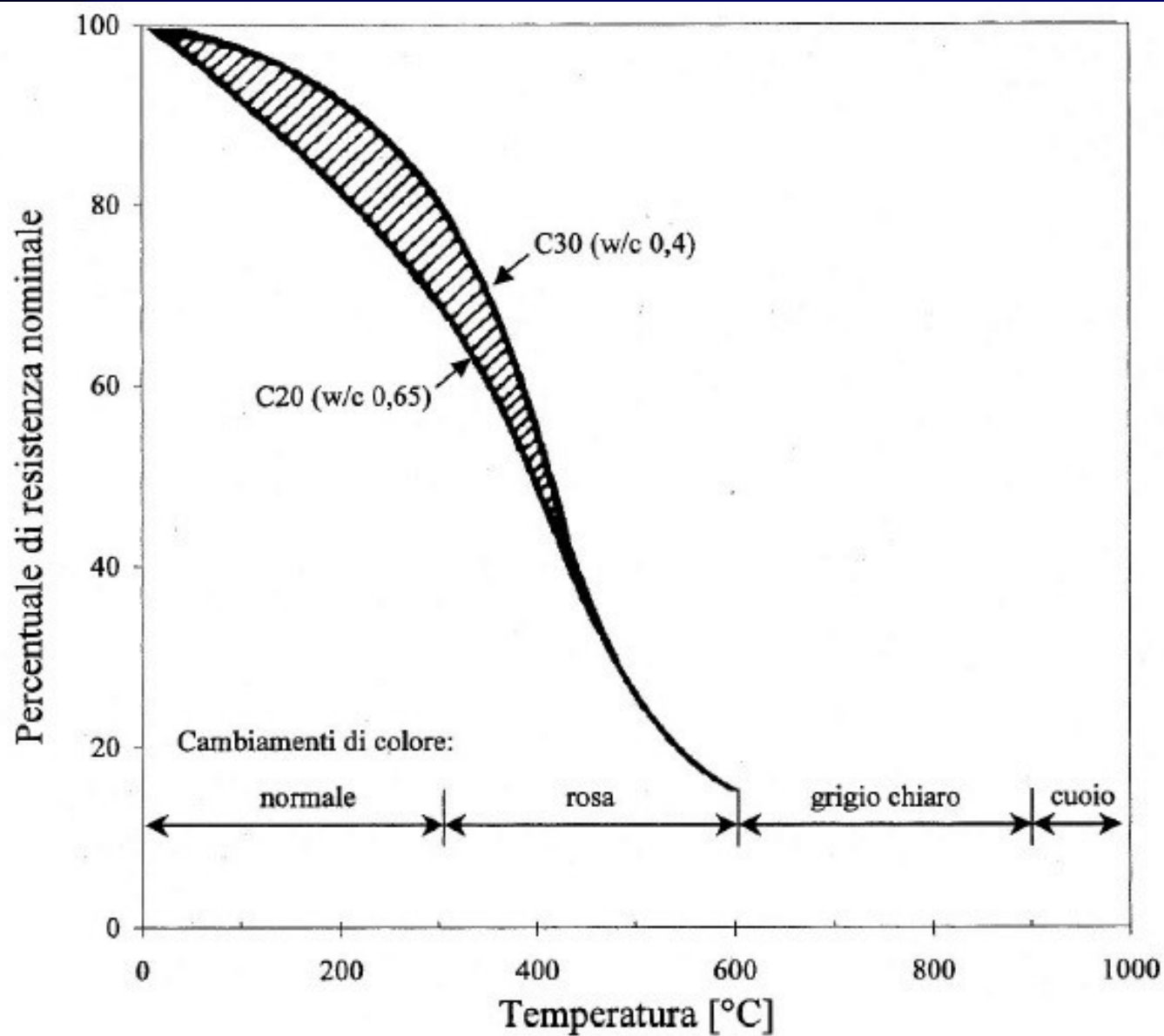
- Inizialmente la pasta cementizia si ritira, mentre gli aggregati si espandono (**transient creep**).
- A temperature comprese fra **300° C e 500°C** gli aggregati **tendono a rompersi**.
- Da questo punto in poi il calcestruzzo subisce un fenomeno irreversibile.
- A temperature superiori a **500 / 600°** il CA(OH)_2 si decompone in CO e H_2O ,, dando luogo ad ulteriori pressioni sulle rotture interne già verificatesi.
- Nella fase di raffreddamento il calcestruzzo tende a riassorbire umidità dall'ambiente circostante.

Il 'danno' nel materiale che rimane, dipende da così come il comportamento sotto incendio da numerosi fattori:

- Contenuto iniziale di umidità nella pasta cementizia.
- Presenza di inerti calcarei o silicei.
- Presenza nella pasta cementizia di additivi (scorie di altoforno, fumi di silice, etc...).
- Velocità di riscaldamento (**influenza del tipo di combustibile !!!**).
- Modalità di raffreddamento del calcestruzzo, etc... (**l'intervento dei vigili del fuoco può provocare maggior danno !!!**)

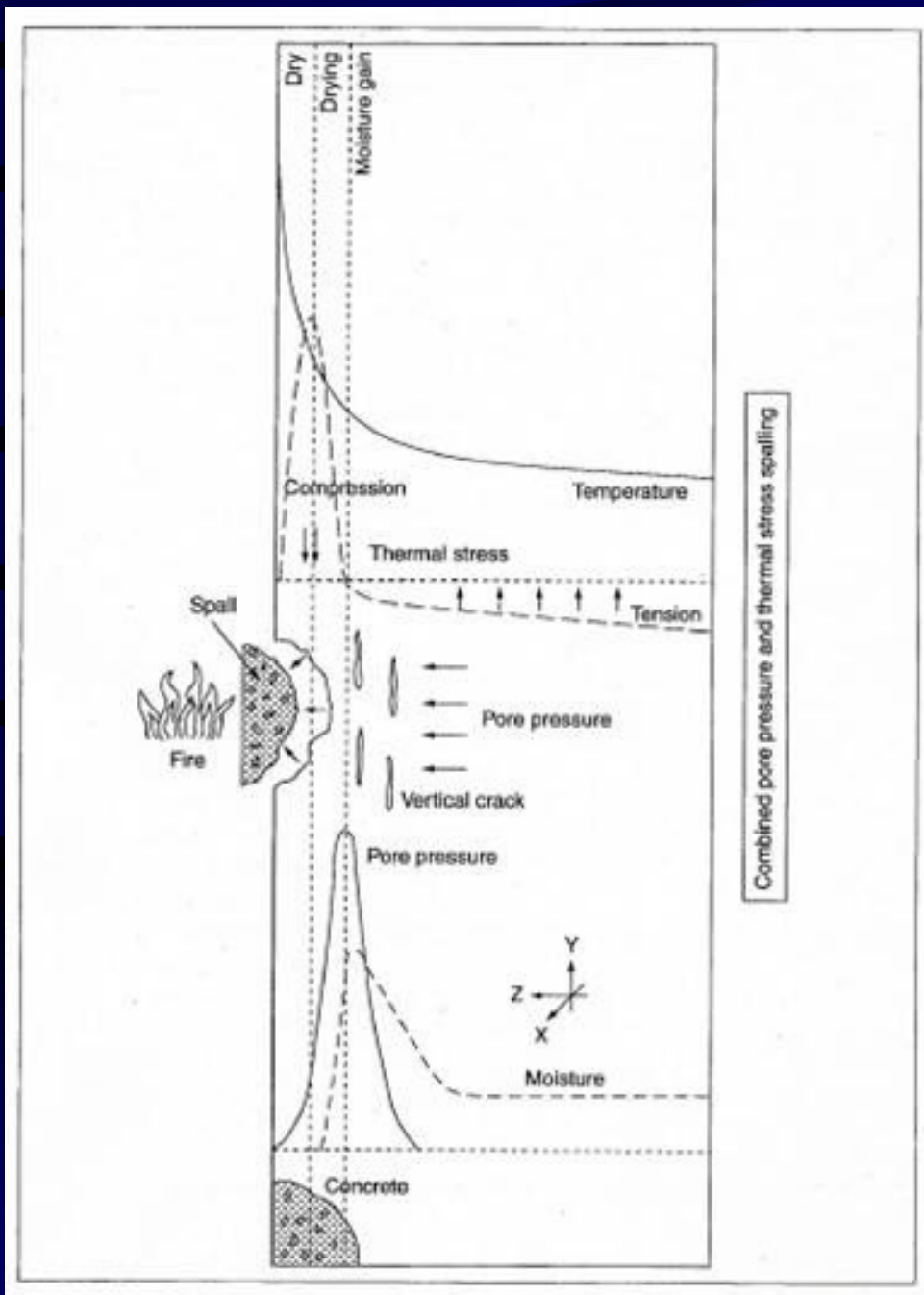


A tale mutamento meccanico, corrisponde in genere anche una variazione della colorazione superficiale.









Un altro fenomeno importante che può manifestarsi nelle strutture in C.A. è quello dello «SPALLING». Tale fenomeno consiste nella perdita da parte degli elementi in calcestruzzo di piccole porzioni o intere scaglie superficiali, che vengono espulse verso l'esterno, a seguito del riscaldamento dell'elemento.

Lo spalling può essere di piccola entità o di grande entità.

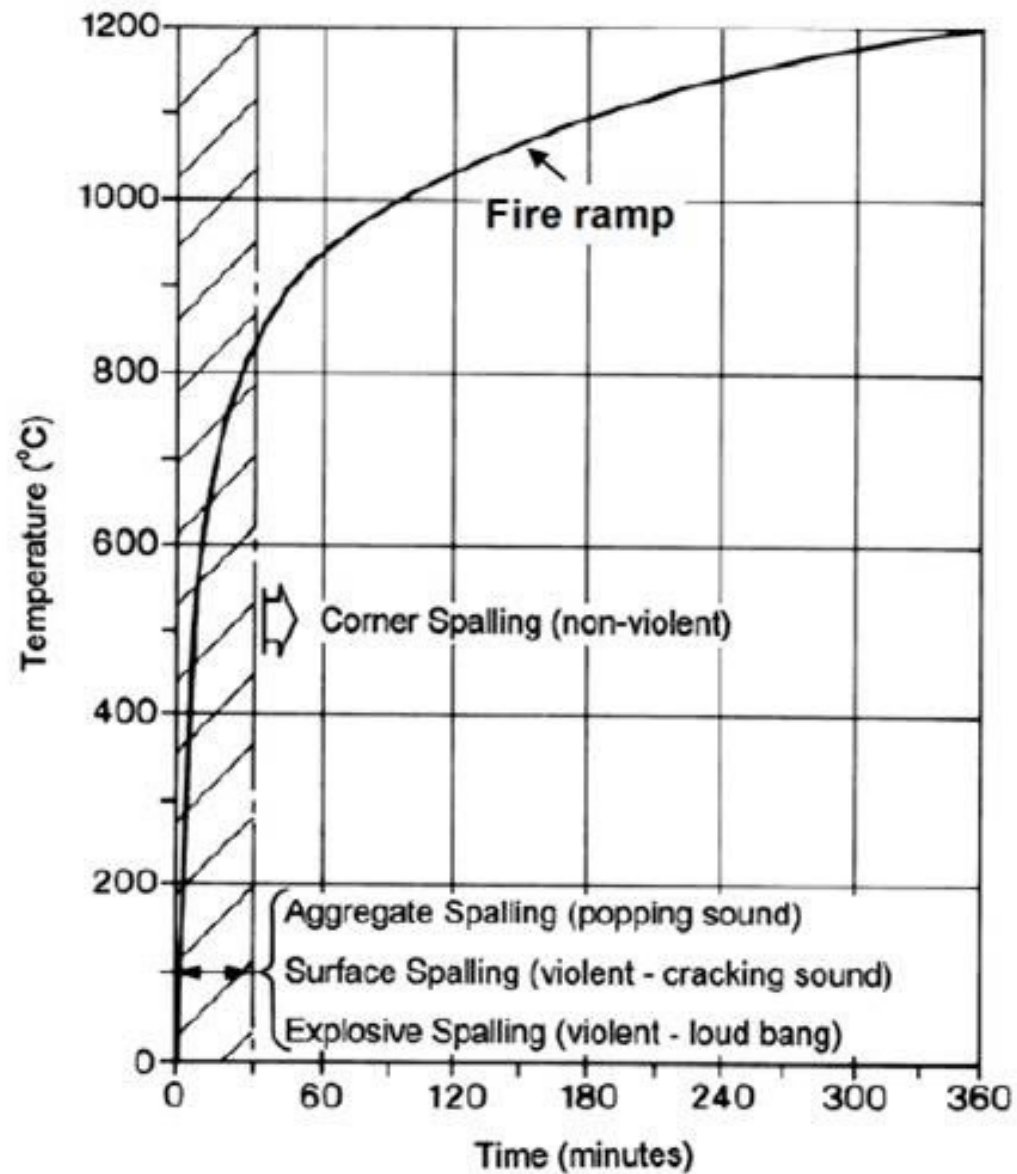


Table 1. *Characteristics of the different forms of spalling (Khoury, 2003)*

Spalling	Time of Occurrence	Nature	Sound	Influence	Main Influences
Aggregate	7-30 mins	Splitting	Popping	Superficial	H, A, S, D, W
Corner	30-90 mins	Non-violent	None	Can be serious	T, A, F _t , R
Surface	7-30 mins	Violent	Cracking	Can be serious	H, W, P, F _t
Explosive	7-30 mins	Violent	Loud bang	Serious	H, A, S, F _s , G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Post cooling	Upon cooling	Non-violent	None	Can be serious	T, X

A = Aggregate thermal expansion

P = Permeability

D = Aggregate thermal diffusivity

Q = Section shape

F_s = Shear strength of concrete

R = Reinforcement

F_t = Tensile strength of concrete

S = Aggregate size

G = Age of concrete

T = Maximum temperature

H = Heating Rate

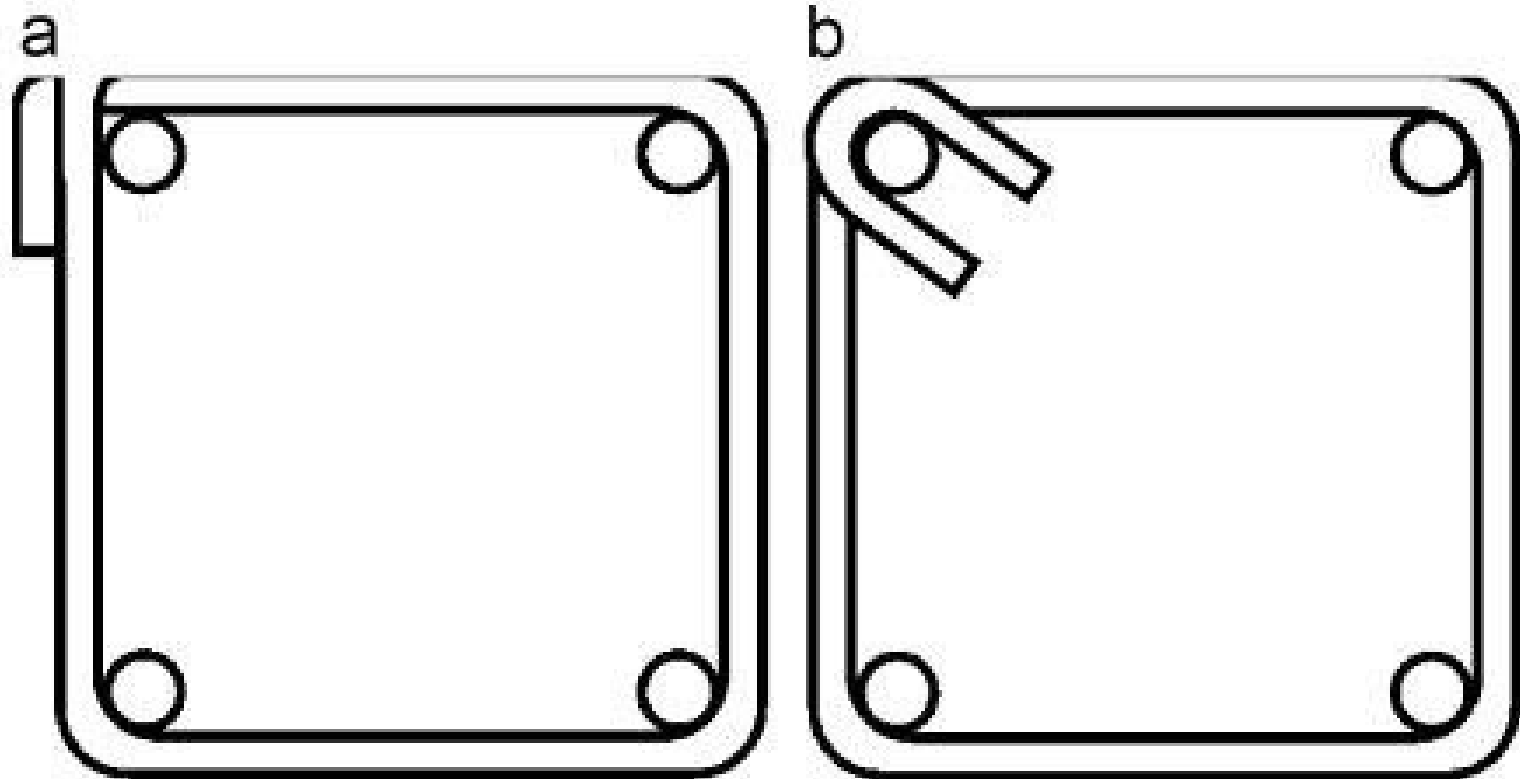
W = Moisture content

L = Loading/restraint

X = Rehydration of lime

O = Heating profile

Z = Section size



(a) conventional tie configuration; (b) modified tie configuration.



Conventional tie configuration



Modified tie configuration



I fattori che influenzano lo 'spalling' sono diversi:

- Velocità di riscaldamento (stress termici!)
- Forma della sezione (nelle travi riscaldate è molto più pericoloso che nelle solette! Attenzione agli spigoli vivi!)
- Contenuto di umidità
- Età del calcestruzzo (i calcestruzzi vecchi si comportano meglio!!!)
- Compressione degli elementi (nei pilastri è più pericoloso che nelle travi!!!)
- Entità del copriferro (con copriferri grandi occorrerebbero armature secondarie!!!)
- Presenza di additivi (buon comportamento di calcestruzzo con aggiunta di fibre di polipropilene)

Notare che a seguito del fenomeno dello 'spalling' le barre di armatura possono essere completamente esposte all'incendio: →

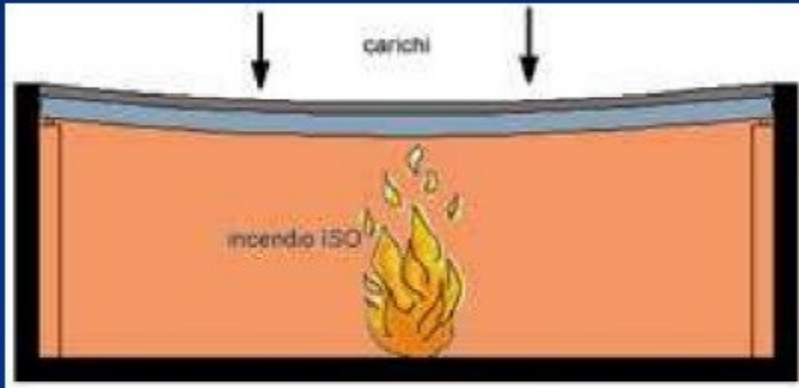
- Rammollimento dell'acciaio ed instabilizzazione delle barre
- Il fenomeno non è tenuto in considerazione nella verifica di elementi in C.A.





4) Verifiche di sicurezza delle strutture

Verifica sperimentale: la valutazione della resistenza al fuoco può essere condotta mediante **prove in forno** di elementi carichi soggetti ad un **incendio convenzionale**.



Valutazione analitica della resistenza al fuoco:

- Verifica tabellare o grafica
- Metodi di calcolo semplificati
- Calcolo analitico (metodi di calcolo “avanzati”).

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

La verifica dell'elemento può essere condotta come:

In termini di sollecitazioni

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

- nel dominio del tempo

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

- nel dominio della temperatura

$$\theta_{d,t} \geq \theta_{cr,d}$$

dove:

$t_{fi,d}$ è il valore di progetto della resistenza al fuoco;

$t_{fi,requ}$ è il tempo di resistenza al fuoco richiesto;

$R_{fi,d,t}$ è il valore di progetto della resistenza dell'elemento in caso d'incendio al tempo t ;

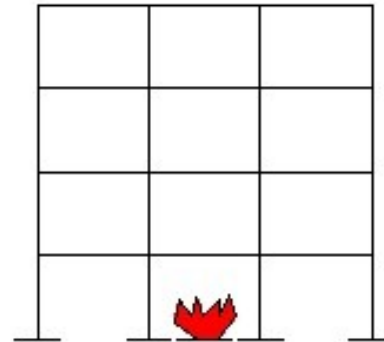
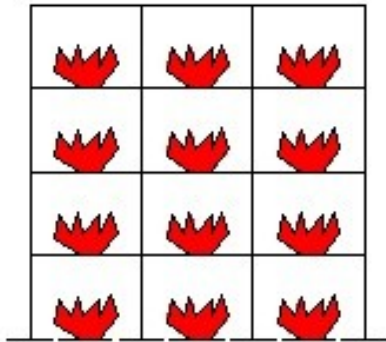
$E_{fi,d,t}$ è il valore di progetto degli effetti pertinenti delle azioni in caso d'incendio al tempo t ;

θ_d è il valore di progetto della temperatura del materiale;

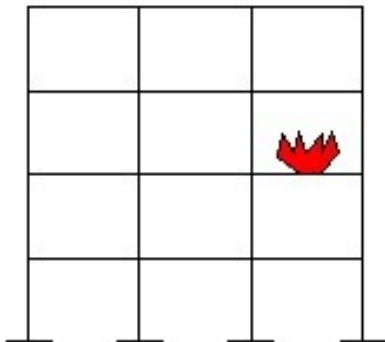
$\theta_{cr,d}$ è il valore di progetto della temperatura critica del materiale.

Per effettuare le verifiche di sicurezza degli elementi strutturali sotto incendio, è necessario prima definire la struttura sottoposta ad incendio.

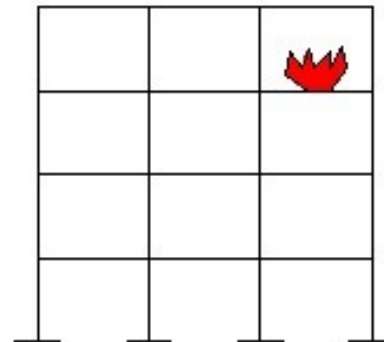
- Per prima cosa occorre definire i compartimenti:



ed anche...



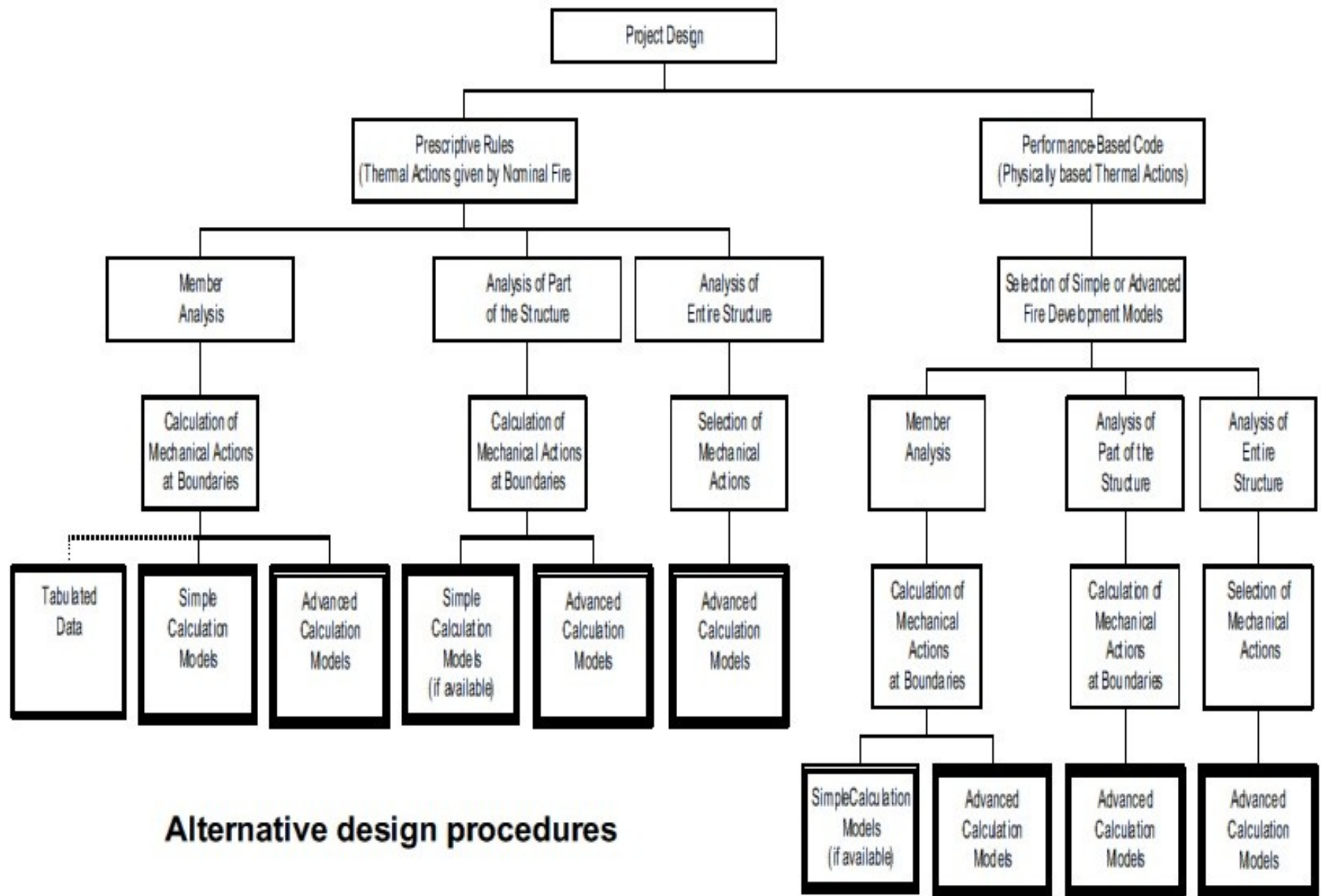
ed anche...



Incendio di progetto

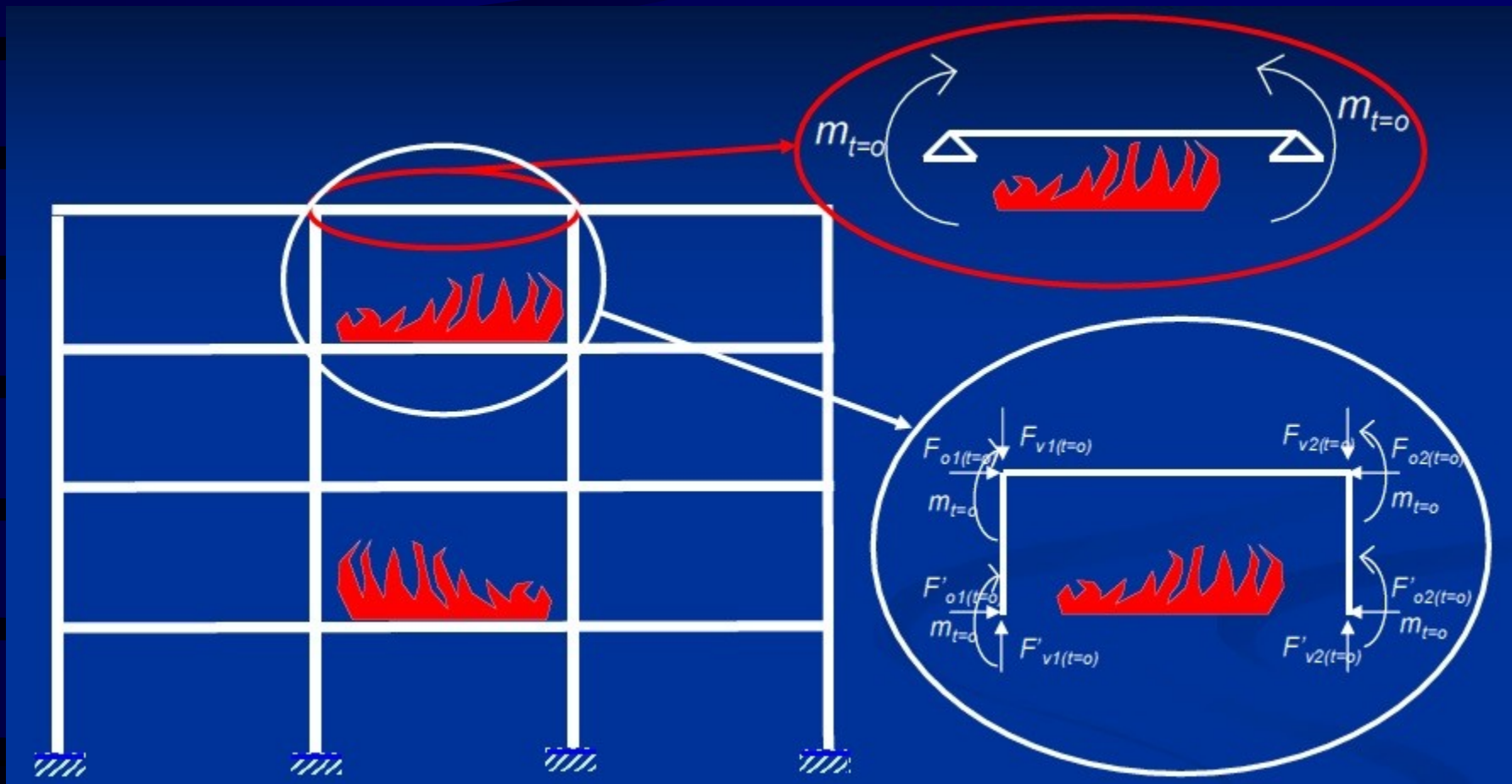
- (1) Per ogni scenario d'incendio di progetto, si raccomanda che sia definito un incendio di progetto in ogni compartimento in accordo alla sezione 3 della presente parte.
- (2) Si raccomanda che l'incendio di progetto sia applicato soltanto ad un compartimento dell'edificio alla volta, a meno che non diversamente specificato nello scenario d'incendio di progetto.
- (3) Per strutture per le quali le autorità nazionali definiscono requisiti di resistenza strutturale all'incendio, si può assumere che l'appropriato incendio di progetto è fornito dall'incendio normalizzato, se non diversamente specificato.

Individuato il compartimento, i metodi di analisi sono ben chiariti nell'EUROCODICE.



Summary table showing alternative methods of verification for fire resistance

	Tabulated data	Simplified calculation methods	Advanced calculation models
<u>Member analysis</u> The member is considered as isolated. Indirect fire actions are not considered, except those resulting from thermal gradients	YES - Data given for standard fire only, 5..1(1) - In principle data could be developed for other fire curves	YES - standard fire and parametric fire, 4.2.1(1) - temperature profiles given for standard fire only, 4.2.2(1) - material models apply only to heating rates similar to standard fire, 4.2.4.1(2)	YES , 4.3.1(1)P Only the principles are given
<u>Analysis of parts of the structure</u> Analysis of parts of the structure Indirect fire actions within the sub-assembly are considered, but no time-dependent interaction with other parts of the structure.	NO	YES - standard fire and parametric fire, 4.2.1(1) - temperature profiles given for standard fire only, 4.2.2(1) - material models apply only to heating rates similar to standard fire, 4.2.4.1(2)	YES 4.3.1(1)P Only the principles are given
<u>Global structural analysis</u> Analysis of the entire structure. Indirect fire actions are considered throughout the structure	NO	NO	YES 4.3.1(1)P Only the principles are given



- Tutti i metodi sono accomunati dal considerare invariabili sotto l'azione del fuoco i vincoli di estremità, e le azioni statiche determinate a freddo. Ho diverse possibilità di scelta per l'analisi della struttura sottoposta a fuoco. Deve essere chiaro che l'analisi è più premiante, quanto più estesa è la struttura, ma occorre riflettere sui costi / benefici dell'analisi!!!.

- **Resistenze di calcolo dei materiali**

- **Calcestruzzo, resistenza di calcolo a compressione:**

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C$$

dove:

α_{cc} è il coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata;

γ_C è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo;

f_{ck} è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo a 28 giorni.

- **Calcestruzzo, resistenza di calcolo a trazione:**

$$f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_C$$

dove:

γ_C è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo

f_{ctk} è la resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo

- **Acciaio, resistenza di calcolo:**

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_S$$

dove:

γ_S è il coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio;

f_{yk} per armatura ordinaria è la tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio

- Nelle verifiche allo stato limite ultimo:

Il coefficiente γ_c è pari ad 1,5.

Il coefficiente α_{cc} è pari a 0,85.

Il coefficiente γ_s assume sempre, per tutti i tipi di acciaio, il valore 1,15.

- Nel caso di verifiche per situazioni eccezionali (tra cui incendio):

4.1.4 VERIFICHE PER SITUAZIONI ECCEZIONALI

Le resistenze di calcolo dei materiali riferite ad una specifica situazione di verifica si ottengono con i seguenti coefficienti parziali di sicurezza:

- calcestruzzo e aderenza con le armature $\gamma_c = 1,0$
- acciaio d'armatura $\gamma_s = 1,0$

4.1.13 RESISTENZA AL FUOCO

Le verifiche di resistenza al fuoco potranno eseguirsi con riferimento a UNI EN 1992-1-2, utilizzando i coefficienti γ_M (v. § 4.1.4) relativi alle combinazioni eccezionali ed assumendo il coefficiente α_{cc} pari a 1,0.

Ad esempio:
Per calcestruzzo C30/37 ed acciaio B450C.

A freddo

$$f_{cd} = (0,85f_{ck})/\gamma_c = (0,85*0,83)R_{ck}/1,5 = 0,47R_{ck} = 170 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 4500/1,15 = 3900 \text{ kg/cm}^2$$

A caldo:

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_{c,fi} = 0,83R_{ck}/1 = 0,83R_{ck} = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{s,fi} = 4500/1 = 4500 \text{ kg/cm}^2$$

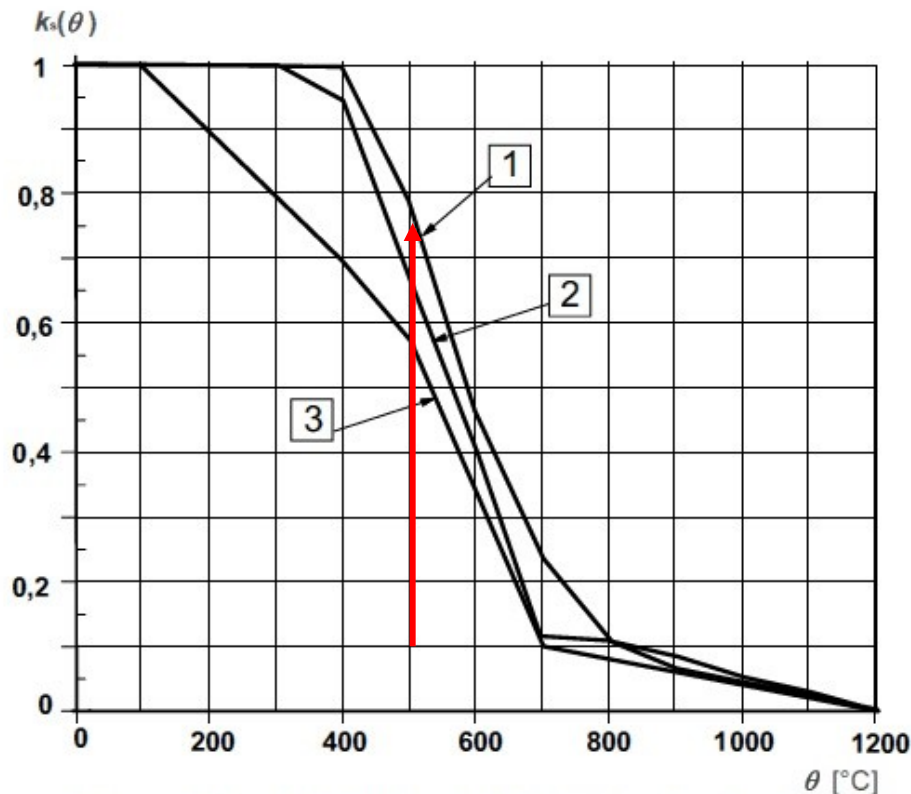
Quindi per il calcestruzzo, abbiamo un incremento pari a circa il 75%, per l'acciaio pari al 15%.

Gli aspetti che abbiamo visto sono condensati dall'Eurocodice nelle curve di decadimento delle proprietà meccaniche.

CURVE DI RIDUZIONE DELLE PROPRIETA' MECCANICHE

- ACCIAIO

EN 1992-1-2:2004 (E)



Curve **1** : Tension reinforcement (hot rolled) for strains $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$

Curve **2** : Tension reinforcement (cold worked) for strains $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$

Curve **3** : Compression reinforcement and tension reinforcement for strains $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$

Figure 4.2a: Coefficient $k_s(\theta)$ allowing for decrease of characteristic strength (f_{yk}) of tension and compression reinforcement (Class N)

(1) For tension reinforcement the reduction of the characteristic strength of reinforcing steel as a function of the temperature θ is given in Table 3.2a. For tension reinforcement in beams and slabs where $\varepsilon_{s,fi} \geq 2\%$, the strength reduction for Class N reinforcement may be used as given in Table 3.2a, Column 2 for hot rolled and Column 3 for cold worked reinforcing steel (see Figure 4.2a, curve 1 and 2). The strength reduction for Class X reinforcement may be used as given in Table 3.2b for hot rolled and cold worked reinforcing steel (see Figure 4.2b, curve 1).

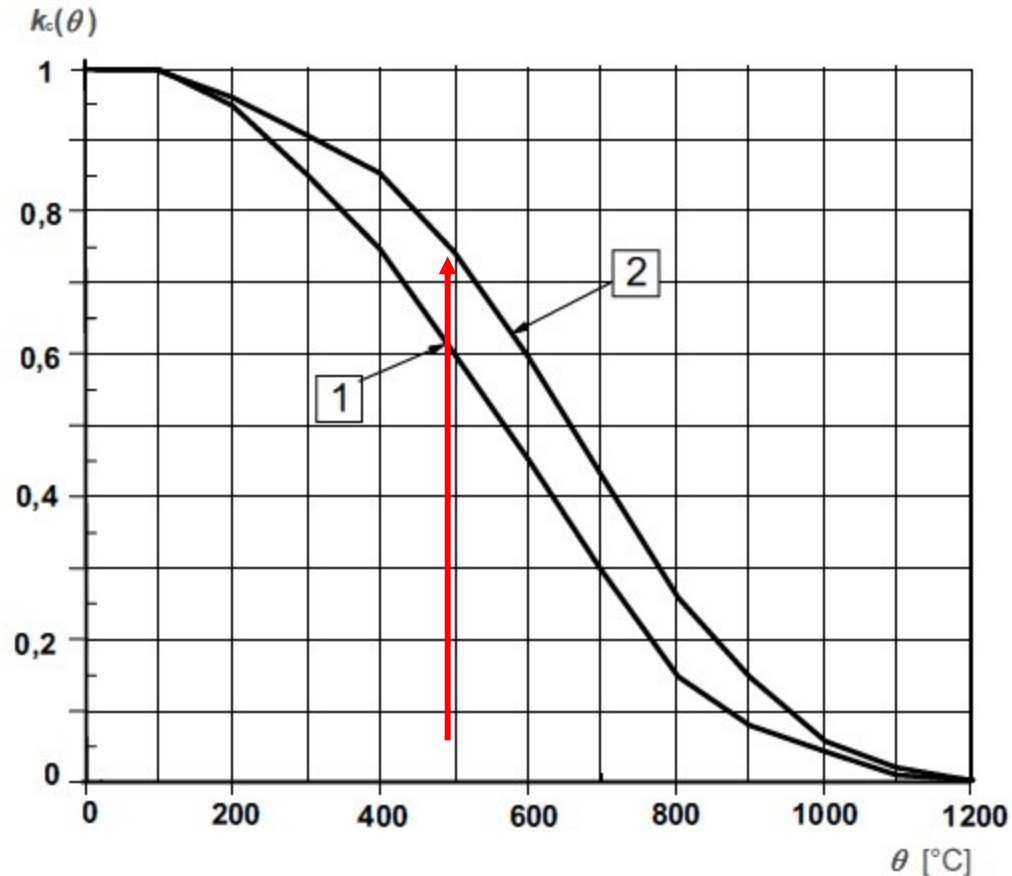
For compression reinforcement in columns and compressive zones of beams and slabs the strength reduction at 0,2% proof strain for Class N reinforcement should be used as given below. This strength reduction also applies for tension reinforcement where $\varepsilon_{s,fi} < 2\%$ when using simplified cross-section calculation methods (see Figure 4.2a, curve 3):

$k_s(\theta) = 1,0$	for $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$
$k_s(\theta) = 0,7 - 0,3 (\theta - 400)/300$	for $100^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$
$k_s(\theta) = 0,57 - 0,13 (\theta - 500)/100$	for $400^\circ\text{C} < \theta \leq 500^\circ\text{C}$
$k_s(\theta) = 0,1 - 0,47 (\theta - 700)/200$	for $500^\circ\text{C} < \theta \leq 700^\circ\text{C}$
$k_s(\theta) = 0,1 (1200 - \theta)/500$	for $700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$

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 $\theta [^{\circ}\text{C}]$	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	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

4.2.4.2 Concrete



Curve **1** : Normal weight concrete with siliceous aggregates

Curve **2** : Normal weight concrete with calcareous aggregates

Figure 4.1: Coefficient $k_c(\theta)$ allowing for decrease of characteristic strength (f_{ck}) of concrete

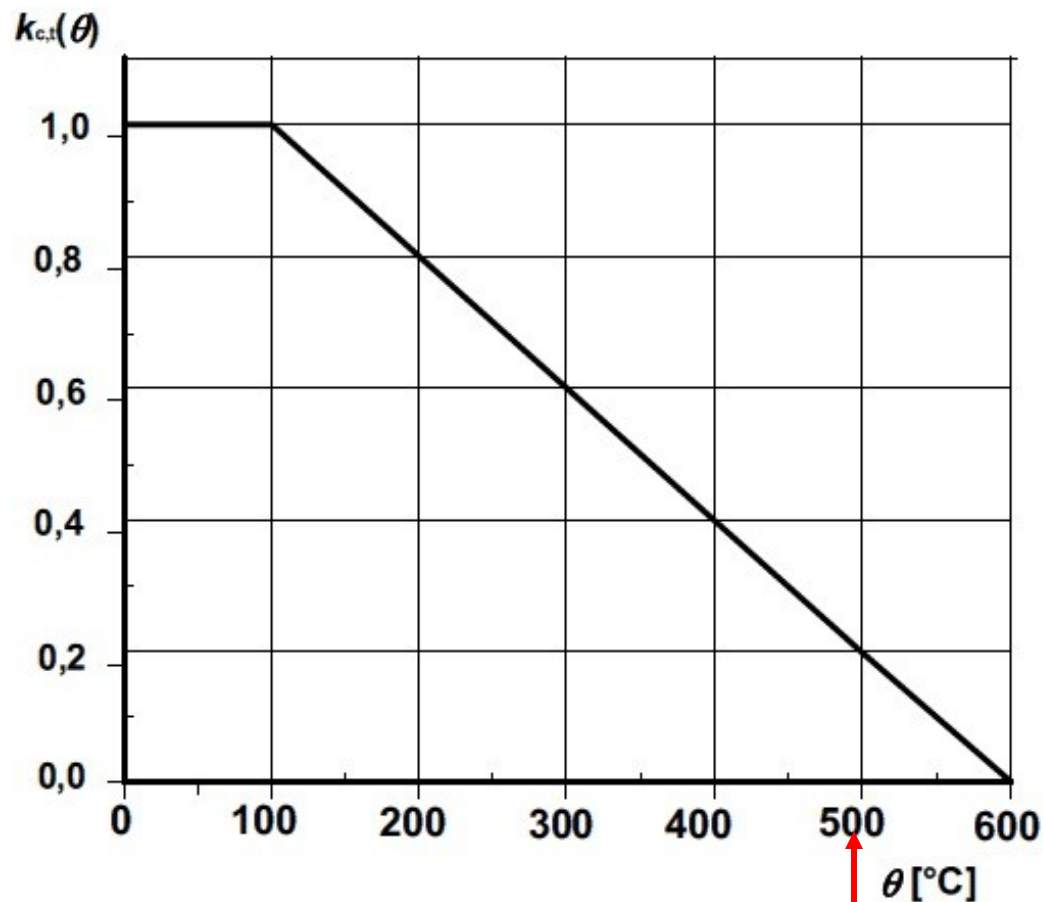
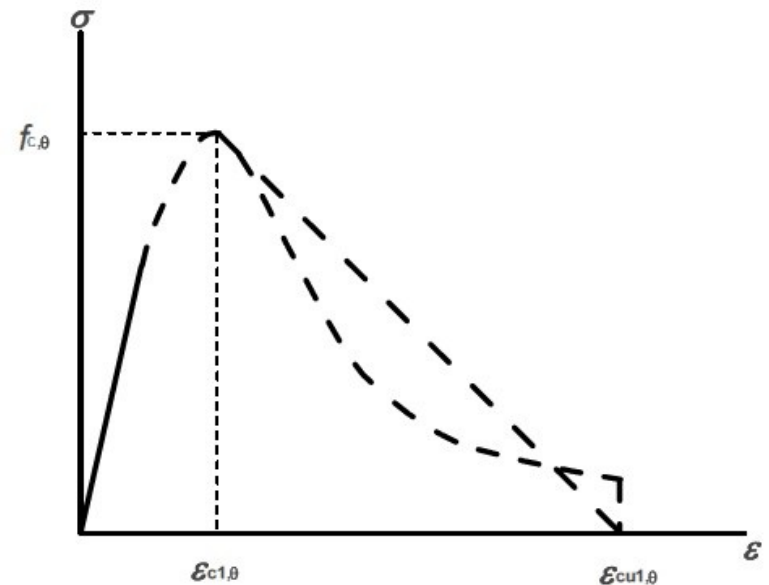


Figure 3.2: Coefficient $k_{c,t}(\theta)$ allowing for decrease of tensile strength ($f_{ck,t}$) of concrete at elevated temperatures

N.B. Se il contributo strutturale del calcestruzzo teso, è modesto a freddo, ad elevate temperature è ancora più trascurabile. → Ripercussioni sugli ancoraggi delle barre, e sulla deformabilità delle travi.

Table 3.1: Values for the main parameters of the stress-strain relationships of normal weight concrete with siliceous or calcareous aggregates concrete at elevated temperatures.

Concrete temp. θ [°C]	Siliceous aggregates			Calcareous aggregates		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$ [-]	$\varepsilon_{c1,\theta}$ [-]	$\varepsilon_{cu1,\theta}$ [-]	$f_{c,\theta} / f_{ck}$ [-]	$\varepsilon_{c1,\theta}$ [-]	$\varepsilon_{cu1,\theta}$ [-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-	0,00	-	-



Il modulo elastico del calcestruzzo di normale resistenza varia all'aumentare della temperatura in base alla seguente formula:

$$E_c(\theta) = E_c \quad \text{se } \theta \text{ compresa tra } 20^\circ \text{ e } 60^\circ\text{C}$$

$$E_c(\theta) = (0,83 - 0,0011T)E_c \quad \text{se } \theta \text{ compresa } 60^\circ\text{C e } 700^\circ\text{C}$$

θ	$E_c(\theta)/E_c$
20	1
100	0,72
200	0,61
300	0,5
400	0,39
500	0,28
600	0,17
700	0,06

D.M. 16 Febbraio 2007: Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione.

Art. 2.

Classificazione di resistenza al fuoco

1. I prodotti e gli elementi costruttivi sono classificati in base alle loro caratteristiche di resistenza al fuoco, secondo i simboli e le classi indicate nelle tabelle dell'allegato A al presente decreto, in conformità alle decisioni della Commissione dell'Unione europea 2000/367/CE del 3 maggio 2000 e 2003/629/CE del 27 agosto 2003.
2. Con successivi provvedimenti del Ministro dell'interno si aggiornano le tabelle di cui al precedente comma 1, a seguito delle ulteriori decisioni della Commissione dell'Unione europea emanate in materia.
3. Le prestazioni di resistenza al fuoco dei prodotti e degli elementi costruttivi possono essere determinate in base ai risultati di:
 - a) prove;
 - b) calcoli;
 - c) confronti con tabelle.
4. Le modalità per la classificazione di prodotti ed elementi costruttivi in base ai risultati di prove di resistenza al fuoco e di tenuta al fumo sono descritte nell'allegato B al presente decreto.
5. Le modalità per la classificazione di prodotti ed elementi costruttivi in base ai risultati di calcoli sono descritte nell'allegato C al presente decreto.
6. Le modalità per la classificazione di elementi costruttivi in base a confronti con tabelle sono descritte nell'allegato D al presente decreto.

Allegato C –Modalità per la classificazione in base ai risultati di calcoli

C.1 I metodi di calcolo della resistenza al fuoco hanno l'obiettivo di consentire la progettazione di elementi costruttivi portanti, separanti o non separanti, resistenti al fuoco anche prendendo in considerazione i collegamenti e le mutue interazioni con altri elementi, sotto specifiche condizioni di esposizione al fuoco e attraverso il rispetto di criteri prestazionali e l'adozione di particolari costruttivi .

C.2 Le condizioni di esposizione al fuoco sono definite in specifici regolamenti e basate sugli scenari di incendio in essi prescritti o su quelli attesi. Nei medesimi regolamenti sono definite le combinazioni di carico da considerare agenti insieme all'azione del fuoco e i coefficienti di sicurezza sui materiali e sui modelli.

C.3 I metodi di calcolo da utilizzare ai fini del presente decreto sono quelli contenuti negli eurocodici di seguito indicati se completi delle appendici contenenti i parametri definiti a livello nazionale (NOP_s):

C.3.1 EN 1991-1-2 «Azioni sulle strutture - Parte 1-2: Azioni generali -Azioni sulle strutture esposte al fuoco»

C.3.2 EN 1992-1-2 «Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.3.3 EN 1993-1-2 «Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-2 Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.3.4 EN 1994-1-2 «Progettazione delle strutture miste acciaio calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.3.5 EN 1995-1-2 «Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.3.6 E~J 1996-1-2 «Progettazione delle strutture di muratura - ..e~rt~ 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.3.7 E~J 1999-1-2 «(Progettazione delle strutture di alluminio A'artg,1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio»

C.4 In attesa della pubblicazione delle appendici nazionali degli eurocodici, è possibile limitare l'impiego dei metodi di calcolo alla sola verifica della resistenza al fuoco degli elementi costruttivi portanti, con riferimento agli eurocodici indicati in C.3.2, C.3.3, C.3.4 e C.3.5 con i valori dei parametri da definire a livello nazionale presenti nelle norme stesse come valori di riferimento ovvero con riferimento alle norme UNI di seguito indicate:

C.4.1 UNI 9502 «Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso»

C.4.2 UNI 9503 «Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio»

CA.3 UNI 9504 «Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno»

N.B. UNI 9502, 9503, 9504 non possono più essere utilizzate!

C.5 I metodi di calcolo di cui in C.3 e C.4 possono necessitare della determinazione, al variare delle temperature, dei parametri termo-fisici dei sistemi protettivi eventualmente presenti sugli elementi costruttivi portanti. In questi casi i valori che assumono detti parametri vanno determinati esclusivamente attraverso le prove indicate all'articolo 2 comma 4 del presente decreto ed elencate nella tabella A.3 dell'allegato A. I valori dei parametri presenti nelle norme citate in C.4 possono essere ancora utilizzati purché il produttore, sulla base di idonee esperienze sperimentali, dichiarare sotto la propria responsabilità, che il sistema protettivo garantisca le prestazioni definite in suddette norme, nonché aderenza e coesione per tutto il tempo necessario e ne fornisca le indicazioni circa i cicli di posa o di installazione. Tale possibilità decade con l'obbligo della marcatura CE dei sistemi protettivi, prevista in conformità alla pertinenti specificazioni tecniche ovvero dopo 3 anni dall'entrata in vigore del presente decreto.

Elaborazioni numeriche dei valori d detti parametri, che esulano dall'ambito delle prove indicate all'articolo 2 comma 4 del presente decreto o dalle norme citate in C.4 sotto le condizioni suddette, non sono valide ai fini della verifica della resistenza al fuoco degli elementi costruttivi portanti.

Allegato D - Modalità per la classificazione in base a confronti con tabelle

D.1 Le tabelle seguenti propongono delle condizioni sufficienti per la classificazione di elementi costruttivi resistenti al fuoco. Dette condizioni non costituiscono un obbligo qualora si proceda alla determinazione delle prestazioni di resistenza al fuoco secondo gli altri metodi di cui all'articolo 2 commi 4 e 5 del presente decreto. I valori contenuti nelle tabelle sono il risultato di campagne sperimentali e di elaborazioni numeriche e si riferiscono alle tipologie costruttive e ai materiali di maggior impiego.,Detti valori pur essendo cautelativi, non consentono estrapolazioni o interpolazioni tra gli stessi ovvero modifiche delle condizioni di utilizzo.

N.B. I valori non consentono interpolazioni per i valori intermedi!
Per dimensioni non indicate è necessario procedere al calcolo.

Tabelle a seguire le indicazioni del D.M. 16/02/2007

- SOLAI

D.5 Solette piene e solai alleggeriti

D.5.1 La tabella seguente riporta i valori minimi (mm) dello spessore totale H di solette e solai, della distanza a dall'asse delle armature alla superficie esposta sufficienti a garantire il requisito R per le classi indicate.

Classe	30	60	90	<u>120</u>	180	240
Solette piene con armatura monodirezionale	$H = 80/a = 10$	120/20	120/30	160/40	200/55	240/65
Solai misti di lamiera di acciaio con riempimento di calcestruzzo (1)	$H = 80/a = 10$	120/20	120/30	160/40	200/55	240/65
Solai a travetti con alleggerimento (2)	$H = 160/a = 15$	200/30	240/35	240/45	300/60	300/75
Solai a lastra con alleggerimento (3)	$H = 160/a = 15$	200/30	240/35	240/45	300/60	300/75

I valori di a devono essere non inferiori ai minimi di regolamento per le opere di c.a. e c.a.p. In caso di armatura pre-tesa aumentare i valori di a di 15 mm. In presenza di intonaco i valori di H e a ne devono tenere conto nella seguente maniera: 10 mm di intonaco normale (definizione in D.4.1) equivale ad 10 mm di calcestruzzo; 10 mm di intonaco protettivo antincendio (definizione in D.4.1) equivale a 20 mm di calcestruzzo. Per ricoprimenti di calcestruzzo superiori a 50 mm prevedere una armatura diffusa aggiuntiva che assicuri la stabilità del ricoprimento.

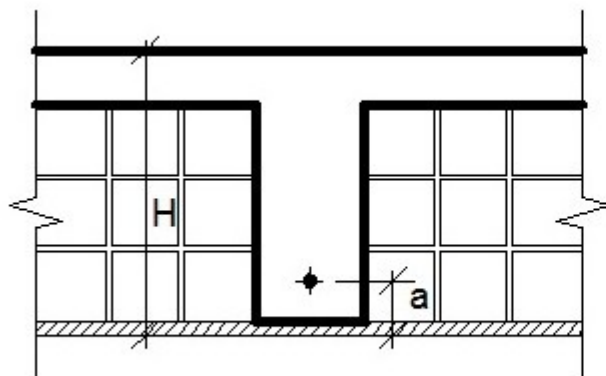
(1) In caso di lamiera grecata H rappresenta lo spessore medio della soletta. Il valore di a non comprende lo spessore della lamiera. La lamiera ha unicamente funzione di cassero. In caso contrario la lamiera va protetta secondo quanto indicato in D.7.1

(2) Deve essere sempre presente uno strato di intonaco normale di spessore non inferiore a 20 mm ovvero uno strato di intonaco isolante di spessore non inferiore a 10 mm.

(3) In caso di alleggerimento in polistirene o materiali affini prevedere opportuni sfoghi delle sovrappressioni

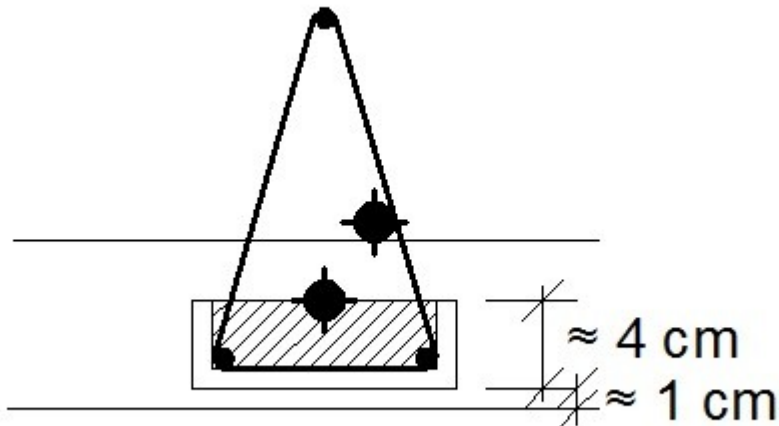
N.B. (2) Fenomeni di sfondellamento.

N.B. (3) Fenomeni di scoppio per 'spalling'.



$\equiv s \begin{cases} \text{intonaco normale} \geq 20 \text{ mm} \\ \text{intonaco antincendio} \geq 10 \text{ mm} \end{cases}$

N.B. H comprende s! ; a comprende s!

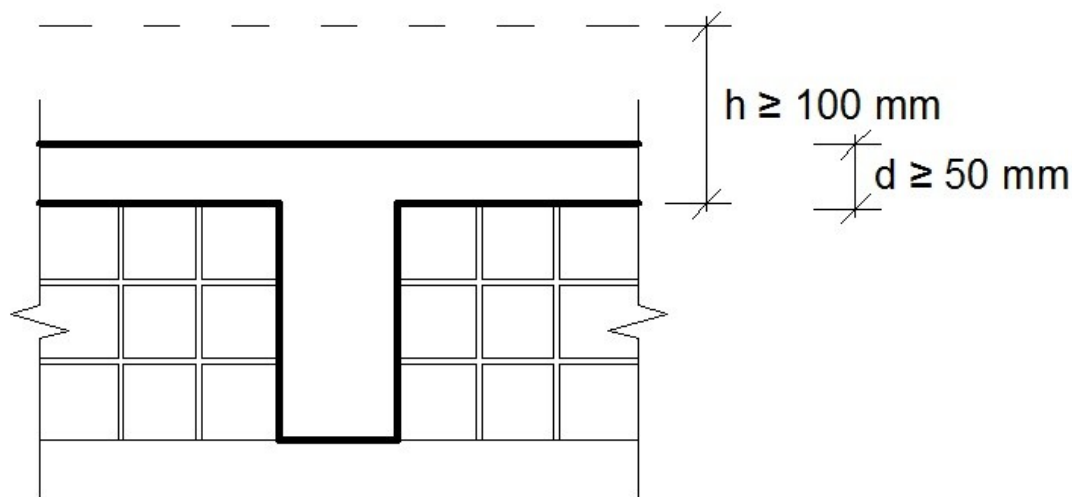


N.B. Posizione armatura nel travetto per R120.
Disporre l'armatura aggiuntiva con criterio da parte dello strutturista esperto di fuoco!!

D.5.2 Per garantire i requisiti di tenuta e isolamento i solai di cui alla tabella D.5.1 devono presentare uno strato pieno di materiale isolante, non combustibile e con conducibilità termica non superiore a quella del calcestruzzo, di cui almeno una parte in calcestruzzo armato. La tabella seguente riporta i valori minimi (cm) dello spessore h dello strato di materiale isolante e della parte d di c.a., sufficienti a garantire i requisiti EI per le classi indicate.

Classe	30	60	90	120	180	240
Tutte le tipologie	$h = 60 / d = 40$	60/40	100/50	100/50	150/60	150/60
In presenza di intonaco i valori di h e di a ne possono tenere conto nella maniera indicata nella tabella D.5.1. In ogni caso a non deve mai essere inferiore a 40 mm.						
In presenza di strati superiori di materiali di finitura incombustibile (massetto, malta di allettamento, pavimentazione, etc.) i valori di h ne possono tener conto						

R 120



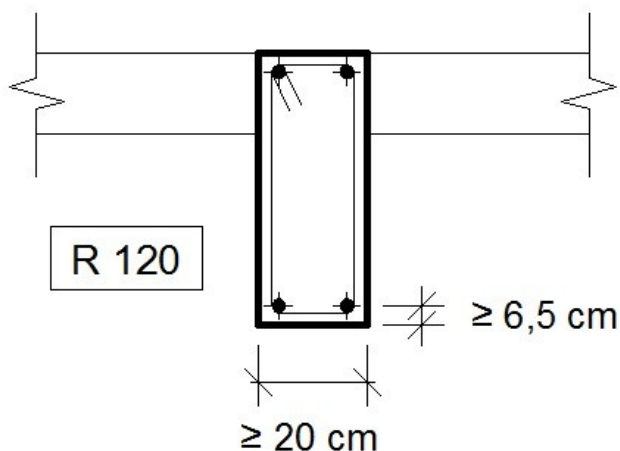
N.B. Sembrerebbe non potessero appoggiarsi i pavimenti sopraelevati direttamente sulla soletta.

D.6 Travi, pilastri e pareti in calcestruzzo armato ordinario e precompresso

D.6.1 La tabella seguente riporta i valori minimi (mm) della larghezza b della sezione, della distanza a dall'asse delle armature alla superficie esposta e della larghezza d'anima b_w di travi con sezione a larghezza variabile sufficienti a garantire il requisito R per le classi indicate di travi semplicemente appoggiate. Per travi con sezione a larghezza variabile b è la larghezza in corrispondenza della linea media delle armature tese.

Classe	Combinazioni possibili di b e a				b_w
30	$b = 80 / a = 25$	120/20	160/15	200/15	80
60	$b = 120 / a = 40$	160/35	200/30	300/25	100
90	$b = 150 / a = 55$	200/45	300/40	400/35	100
120	$b = 200 / a = 65$	240/60	300/55	500/50	120
180	$b = 240 / a = 60$	300/70	400/65	600/60	140
240	$b = 260 / a = 90$	350 / 60	500/75	700/70	160

I valori di a devono essere non inferiori ai minimi di regolamento per le opere di c.a. e c.a.p. In caso di armatura pre-tesa aumentare i valori di a di 15 mm. In presenza di intonaco i valori di b e a ne possono tenere conto nella maniera indicata nella tabella D.5.1. Per ricopri menti di calcestruzzo superiori a 50 mm prevedere una armatura diffusa aggiuntiva che assicuri la stabilità del ricoprimento.



N.B.

- Molte delle strutture reali sono da proteggere
- Necessario disporre armatura di 'pelle'.

Lo strutturista o il DL deve saperlo. Armatura di pelle o fibre?

Valori minimi del copriferro secondo NTC 2008

Tabella C4.1.IV Copriferri minimi in mm

			barre da c.a. elementi a piastra		barre da c.a. altri elementi		cavi da c.a.p. elementi a piastra		cavi da c.a.p. altri elementi	
C_{min}	C_o	ambiente	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$	$C \geq C_o$	$C_{min} \leq C < C_o$
C25/30	C35/45	ordinario	15	20	20	25	25	30	30	35
C28/35	C40/50	aggressivo	25	30	30	35	35	40	40	45
C35/45	C45/55	molto ag.	35	40	40	45	45	50	50	50

A tali valori di tabella vanno aggiunte le tolleranze di posa, pari a 10 mm o minore, secondo indicazioni di norme di comprovata validità.

I valori della Tabella C4.1.IV si riferiscono a costruzioni con vita nominale di 50 anni (Tipo 2 secondo la Tabella 2.4.I delle NTC). Per costruzioni con vita nominale di 100 anni (Tipo 3 secondo la citata Tabella 2.4.I) i valori della Tabella C4.1.IV vanno aumentati di 10 mm. Per classi di resistenza inferiori a C_{min} i valori della tabella sono da aumentare di 5 mm. Per produzioni di elementi sottoposte a controllo di qualità che preveda anche la verifica dei copriferri, i valori della tabella possono essere ridotti di 5 mm.

N.B.

La realizzazione di strutture antincendio ha incidenza sui costi strutturali. Tale incidenza appare però modesta sul costo dell'intera struttura e degli altri sistemi di protezione passiva.

D.6.2 La tabella seguente riporta i valori minimi (mm) del lato più piccolo b di pilastri a sezione rettangolare ovvero del diametro di pilastri a sezione circolare e della distanza a dall'asse delle armature alla superficie esposta sufficienti a garantire il requisito R per le classi indicate di pilastri esposti su uno o più lati che rispettano le seguenti limitazioni:

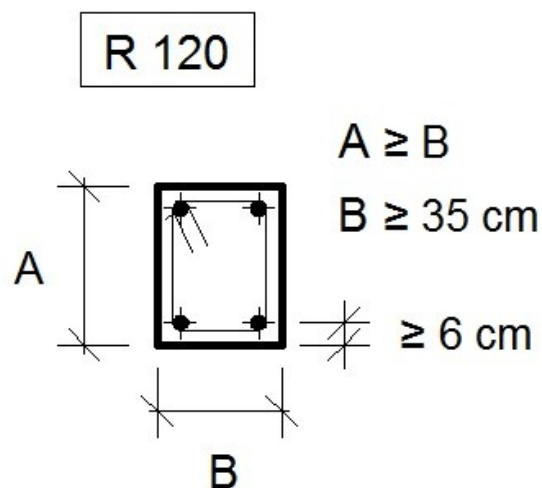
- lunghezza effettiva del pilastro (da nodo a nodo) ≤ 6 m (per pilastri di piani intermedi) ovvero $\leq 4,5$ m (per pilastri dell'ultimo piano);

e

- area complessiva di armatura $A_s \leq 0,04 A_c$ area efficace della sezione trasversale del pilastro

Classe	Esposto su più lati		Esposto su un lato
30	$B=200 / a = 30$	300/25	160/25
60	$B=250 / a=45$	350/40	160/25
90	$B=350 / a=50$	450/40	160/25
120	$B=350 / a =60$	450/50	180/35
180	$B=450 / a =70$		230/55
240			300/70

I valori di a devono essere non inferiori ai minimi di regolamento per le opere di c.a. e c.a.p. In caso di armatura pre-tesa aumentare i valori di a di 15 mm. In presenza di intonaco i valori di a ne possono tenere conto nella maniera indicata nella tabella D.5.1. Per ricoprimenti di calcestruzzo superiori a 50 mm prevedere una armatura diffusa aggiuntiva che assicuri la stabilità del ricoprimento.



N.B.

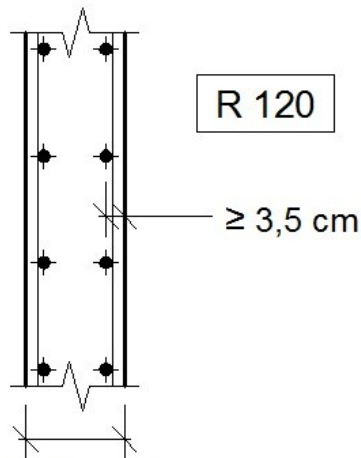
- Molte delle strutture reali sono da proteggere
- Necessario disporre armatura di 'pelle' o 'fibre'.
- Non è possibile che un pilastro 30 x 30, esposto su più lati, sia R 90 ???.

D.6.3 La tabella seguente riporta i valori minimi (mm) dello spessore s e della distanza a dall'asse delle armature alla superficie esposta sufficienti a garantire il requisito REI per le classi indicate di pareti portanti esposte su uno o due lati che rispettano le seguenti limitazioni;

- altezza effettiva della parete (da nodo a nodo) ≤ 6 m (per pareti di piani intermedi) ovvero $\leq 4,5$ m (per pareti dell'ultimo piano);

Classe	Esposto su un lato	Esposto su due lati
30	$s=120 / a=10$	120/10
60	$s=130 / a=10$	140/10
90	$s=140 / a=25$	170/25
120	$s=160 / a=35$	220/35
180	$s=210 / a=50$	270/55
240	$s=270 / a=60$	350/60

I valori di a devono essere non inferiori ai minimi di regolamento per le opere di c.a. e c.a.p. In caso di armatura pre-tesa aumentare i valori di a di 15 mm. In presenza di intonaco i valori di a ne possono tenere conto nella maniera indicata nella tabella D.5.1. Per ricoprimenti di calcestruzzo superiori a 50 mm prevedere una armatura diffusa aggiuntiva che assicuri la stabilità del ricoprimento.



≥ 16 cm (esposto su un lato)

≥ 22 cm (esposto su due lati)

N.B.

- Le pareti in C.A. da 15 cm hanno bisogno di protezione
- Congestionamento armature nel caso $s=16$ cm

N.B.

- Per tutte le tabelle a è la distanza fra l'asse della armatura che lavora secondo il funzionamento principale dell'elemento strutturale, non della armatura più vicina!!!

D.M. 9 Marzo 2007: Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco.

All'interno di tale D.M. si definisce:

- il carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ sulla base delle caratteristiche planimetriche, funzionali, di combustibile presente, di una costruzione.
- I livelli di prestazione da richiedere ad una certa costruzione.

Livello I	Nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze della perdita dei requisiti stessi siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile
Livello II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione
Livello III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza
Livello IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione
Livello V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa

- A ciascun livello di prestazione si associa una definita classe di resistenza.

Carichi d'incendio specifici di progetto ($q_{f,d}$)	Classe
Non superiore a 100 MJ/m ²	0
Non superiore a 200 MJ/m ²	15
Non superiore a 300 MJ/m ²	20
Non superiore a 450 MJ/m ²	30
Non superiore a 600 MJ/m ²	45
Non superiore a 900 MJ/m ²	60
Non superiore a 1200 MJ/m ²	90
Non superiore a 1800 MJ/m ²	120
Non superiore a 2400 MJ/m ²	180
Superiore a 2400 MJ/m ²	240

La tabella indica le classi di resistenza al fuoco necessarie per garantire il livello III di prestazione in funzione del carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$.

Il livello III di prestazione può ritenersi adeguato per tutte le strutture rientranti nel campo di applicazione del presente decreto, fatte salve quelle per le quali sono richiesti i livelli IV o V.