

Metodi semplificati per la valutazione della resistenza al fuoco di elementi strutturali in legno e acciaio

Seminario di aggiornamento

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Sondrio



Ing G. Biffarella - *Sondrio, 27 febbraio 2014*

La progettazione strutturale in caso di incendio



Inquadramento del problema

La **progettazione al fuoco** di una costruzione, nuova o esistente, spesso non è integrata con altri aspetti progettuali, tant'è che spesso è relegata al ruolo di adempimento conclusivo, a volte **a valle della realizzazione dell'opera**

In questi casi, le **misure antincendio** necessarie risultano spesso invasive, eccessivamente costose e irrealizzabili, con necessità di ricorrere al procedimento di deroga.

Inquadramento del problema

Le Norme Tecniche per le costruzioni (DM 14/01/2008 – Cap. 3.6), rendono sempre più attuale la tematica della **progettazione al fuoco delle costruzioni**, in quanto il progettista, per gli edifici di nuova realizzazione, dovrà:

- occuparsene con gradualità,
- curarne la realizzazione quando previsto.

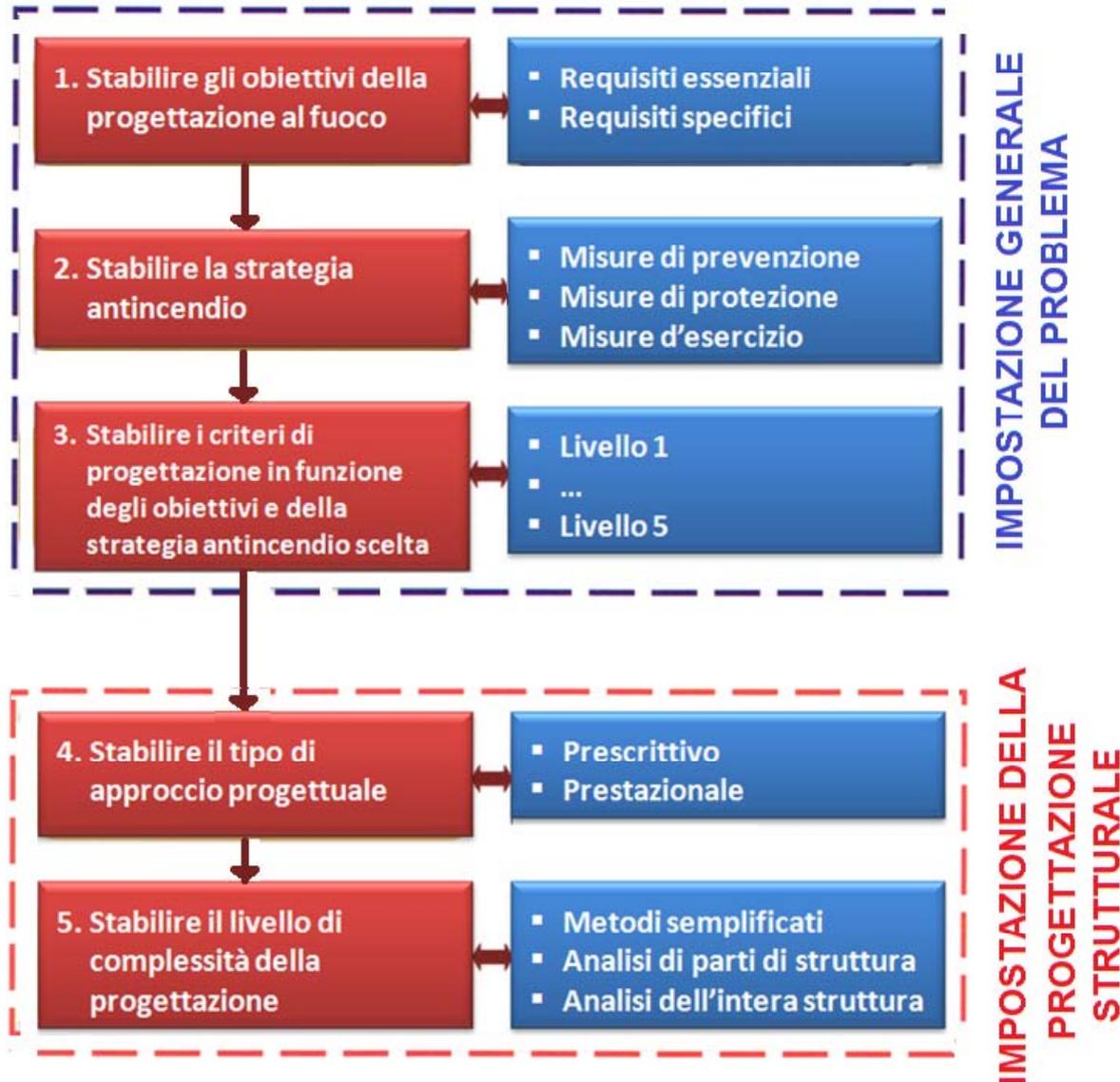
Comunque:

“qualora non si effettuino verifiche specifiche nei confronti dell’incendio, la concezione strutturale, i dettagli costruttivi e i materiali usati dovranno essere tali da evitare che la struttura possa essere danneggiata in misura sproporzionata rispetto alla causa”.

Inquadramento del problema

La progettazione di una struttura resistente al fuoco si realizza:
*adottando una serie di **misure tecniche** atte a garantire la capacità portante della struttura (o di una sua parte), nei confronti delle **azioni meccaniche** di progetto (in condizioni d'incendio), in presenza di un'azione termica di progetto che rappresenta convenzionalmente l'effetto di un incendio.*

Inquadramento del problema



(in presenza di una Regola tecnica di Prevenzione Incendi, questi aspetti sono già definiti). ←

Gli obiettivi della progettazione al fuoco

In Italia, gli **obiettivi** della progettazione al fuoco sono definiti dal legislatore per salvaguardare:

- la vita umana (occupanti e soccorritori),
- l'integrità dei beni.

In Europa, il nuovo **REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011 del 9/03/2011**, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione di prodotti da costruzione e abroga la Direttiva 89/106/CEE, all'Allegato 1, ribadisce i **7 requisiti essenziali** che devono possedere le opere di costruzione:

1. Resistenza meccanica e stabilità
2. Sicurezza in caso di incendio
3. Igiene, salute e ambiente
4. Sicurezza e accessibilità nell'uso
5. Protezione contro il rumore
6. Risparmio energetico e ritenzione del calore
7. Uso sostenibile delle risorse naturali

Gli obiettivi della progettazione al fuoco

Allegato 1 - REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011 del 9 marzo 2011

2. Sicurezza in caso di incendio: le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo che, in caso di **incendio**:

- a) la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo determinato;*
 - b) la generazione e la propagazione del fuoco e del fumo al loro interno siano limitate;*
 - c) la propagazione del fuoco a opere di costruzione vicine sia limitata;*
 - d) gli occupanti possano abbandonare le opere o essere soccorsi in altro modo;*
 - e) si tenga conto della sicurezza delle squadre di soccorso.*
-

Gli obiettivi della progettazione al fuoco

Analizzando i vari punti per il Requisito n. 2:

- le voci *a)*, *c)* ed *e)* sono strettamente correlate con la capacità delle strutture portanti e separanti di resistere all'azione dell'incendio (*resistenza al fuoco*)
- la voce *b)* riguarda l'attitudine dei materiali a partecipare all'incendio alimentando le reazioni di combustione (*reazione al fuoco*)
- la voce *d)* riguarda la progettazione delle vie d'esodo (*riassume tematiche di reazione e resistenza al fuoco*).

Al riguardo, si sottolinea che la resistenza strutturale all'incendio contribuisce, in concorrenza con altri accorgimenti, al raggiungimento di un ragionevole livello di sicurezza.

Gli obiettivi della progettazione al fuoco

Le voci *a)*, *c)* ed *e)* erano già presenti nella Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106/CEE e sono state il motore che ha indirizzato la comunità tecnico-scientifica verso l'individuazione di criteri e codici condivisi, con l'obiettivo di armonizzare il calcolo strutturale sul territorio europeo (**Eurocodici**).

Gli Eurocodici 0 ed 1 (*norme EN 1990 e 1991*) forniscono i **criteri generali**, gli Eurocodici da 2 a 6 e 9 (*norme EN 1992 - 1996 e 1999*), forniscono i **criteri da adottarsi nella progettazione** di elementi strutturali realizzati con particolari materiali.

L'aspetto antincendio e la rispondenza ai requisiti *a)*, *c)* ed *e)* del CPR sono esplicitamente trattati nelle **parti 1.2** degli Eurocodici 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 9.

Gli obiettivi della progettazione al fuoco

Gli obiettivi indicati in Allegato 1 al REGOLAMENTO (UE) n. 305/2011 per il Requisito n. 2, sono sintetizzati anche all'art. 2 del DM 9/03/2007:

Al fine di limitare i rischi derivanti dagli incendi, le costruzioni devono essere progettate, realizzate e gestite in modo da garantire:

- 1) la stabilità degli elementi portanti per un tempo utile ad assicurare il soccorso agli occupanti;*
- 2) la limitata propagazione del fuoco e dei fumi, anche riguardo alle opere vicine;*
- 3) la possibilità che gli occupanti lascino l'opera indenni o che gli stessi siano soccorsi in altro modo;*
- 4) la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza.*

La strategia antincendio

All'art. 2 del DM 9/03/2007 viene inoltre ribadito che:

I requisiti di protezione delle costruzioni dagli incendi, finalizzati al raggiungimento degli obiettivi da 1) a 4), devono essere garantiti attraverso l'adozione di misure e sistemi di protezione attiva e passiva.

Tutte le misure e i sistemi di protezione devono essere adeguatamente:

- *progettati,*
- *realizzati,*
- *mantenuti,*

secondo quanto prescritto da:

- *specifiche normative tecniche,*
 - *indicazioni fornite dal produttore.*
-

La strategia antincendio

In allegato al DM 9/03/2007 viene indicato come:

la RESISTENZA AL FUOCO sia una delle fondamentali strategie di protezione da perseguire per garantire un adeguato livello di sicurezza della costruzione in condizioni di incendio.

Essa riguarda:

- la capacità portante in caso di incendio, per *una struttura, per una parte della struttura o per un elemento strutturale*
 - la capacità di compartimentazione rispetto all'incendio per gli elementi di separazione sia strutturali, come *muri e solai*, sia non strutturali, come *porte e tramezzi*.
-

La strategia antincendio

Per quanto riguarda il primo aspetto (la capacità portante in caso di incendio):

la determinazione del comportamento di un sistema strutturale in condizioni d'incendio richiede analisi complesse, a causa di:

- comparsa di stati coattivi,
- elevate deformazioni,
- comportamenti non lineari delle:
 - *caratteristiche meccaniche dei materiali*
 - *configurazioni geometriche degli elementi.*

A tale complessità, supplisce l'esperienza del progettista con il ricorso a metodi semplificati e conservativi del comportamento strutturale, che riconducono l'analisi globale a quella della sottostruttura o degli elementi componenti.

La strategia antincendio

Per quanto riguarda il secondo aspetto (la capacità di compartimentazione rispetto all'incendio):

la compartimentazione è una strategia più articolata della semplice separazione antincendio degli spazi interni di una costruzione, in quanto deve rispondere anche ad esigenze legate all'esodo in sicurezza degli occupanti.

Inoltre, il contenimento dell'incendio coinvolge necessariamente l'adozione di misure di protezione attiva, oltre alla resistenza intrinseca del compartimento.

Criteri di progettazione

I criteri di progettazione possono riguardare tre ambiti:

Le richieste di prestazione, determinate da un tempo minimo necessario atto a garantire la stabilità strutturale in caso d'incendio.

La progettazione strutturale, ossia le modalità tecniche di effettuazione delle verifiche e le norme di riferimento da utilizzare.

La qualificazione dei prodotti da costruzione nei confronti del requisito della sicurezza in caso d'incendio ai fini del loro impiego nelle opere di costruzione.

Livelli di prestazione

Ad eccezione delle costruzioni in cui si svolgono attività per le quali è imposto un livello minimo di prestazione (*Regole Tecniche di P.I.*), per le altre, il livello di prestazione è scelto dal progettista, sulla scorta delle indicazioni fornite dal committente e dal punto 3 dell'Allegato al DM 9/03/2007 (*Livelli I-V*), in funzione dello specifico obiettivo che s'intende perseguire attraverso la resistenza al fuoco e la capacità di compartimentazione.

Livelli di prestazione

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

Livelli di prestazione

In ogni caso, è vietato il **livello di prestazione I** per le costruzioni soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco ai sensi del DPR 151/2011.

Il livello II di prestazione è adeguato per:

- costruzioni fino a 2 piani f.t. ed 1 piano interrato, isolate - eventualmente adiacenti ad altre purché strutturalmente e funzionalmente separate - destinate ad un'unica attività non aperta al pubblico,
- i relativi impianti tecnologici di servizio e depositi,

qualora si verificchino tutte le seguenti ulteriori condizioni:

- *le dimensioni della costruzione siano tali da garantire l'esodo in sicurezza degli occupanti;*
 - *gli eventuali crolli totali o parziali della costruzione non arrechino danni ad altre costruzioni;*
 - *gli eventuali crolli totali o parziali della costruzione non compromettano l'efficacia degli elementi di compartimentazione e gli impianti di protezione attiva che proteggono altre costruzioni,*
 - *il massimo affollamento complessivo della costruzione non superi 100 persone e la densità di affollamento media non sia superiore a 0,2 pers/m²;*
 - *la costruzione non sia adibita ad attività che prevedono posti letto;*
 - *la costruzione non sia adibita ad attività specificamente destinate a malati, anziani, bambini o a persone con ridotte o impedito capacità motorie, sensoriali o cognitive.*
-

Livelli di prestazione

Le classi di resistenza al fuoco sufficienti a garantire il **livello II** di prestazione non dipendono dal valore del carico di incendio specifico di progetto.

Nelle costruzioni che ospitano attività soggette ai controlli di prevenzione incendi, le classi di resistenza al fuoco necessarie per garantire il **livello II di prestazione** sono stabilite dal legislatore:

30*	per costruzioni ad un piano fuori terra senza interrati
60*	per costruzioni fino a due piani fuori terra e un interrato

* sono consentite classi inferiori se compatibili con il **livello III**.

Livelli di prestazione

Il livello III di prestazione è adeguato per le costruzioni soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco ai sensi del DPR 151/2011.

Le classi di resistenza al fuoco necessarie per garantire il livello III sono indicate nella tabella 4 del punto 3 dell'Allegato al DM 9/03/2007, in funzione del carico d'incendio specifico di progetto ($q_{f,d}$).

I livelli IV o V possono essere:

- oggetto di specifiche richieste del committente,
 - previsti da capitolati tecnici di progetto,
 - richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.
-

Livelli di prestazione

Per garantire il **livello IV** le costruzioni devono essere oggetto delle seguenti verifiche:

- capacità portante mantenuta per tutta la durata dell'incendio;
- regime deformativo contenuto;
- capacità portante residua che consenta interventi di ripristino.

Per garantire il **livello V** le costruzioni devono essere oggetto delle seguenti verifiche:

- capacità portante mantenuta per tutta la durata dell'incendio;
 - regime deformativo trascurabile;
 - capacità portante residua adeguata alla funzionalità immediata della costruzione.
-

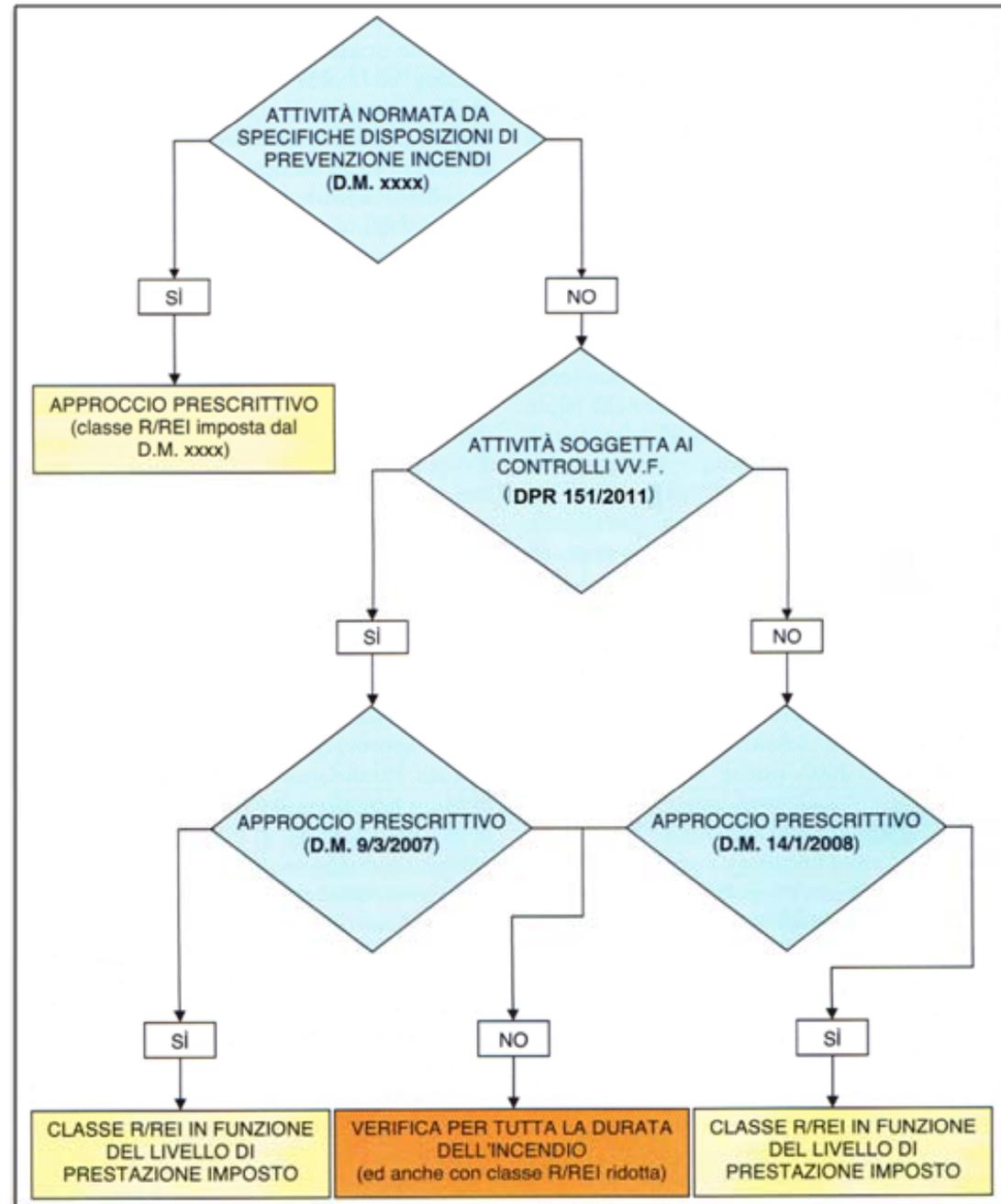
L'approccio progettuale

In Italia è prassi consolidata seguire **l'approccio prescrittivo**, per:

- l'esigenza di semplificare il comportamento strutturale in caso d'incendio,
- la disponibilità di metodi semplificati,
- la scarsa attitudine del mondo professionale ad abbandonare prassi consolidate.

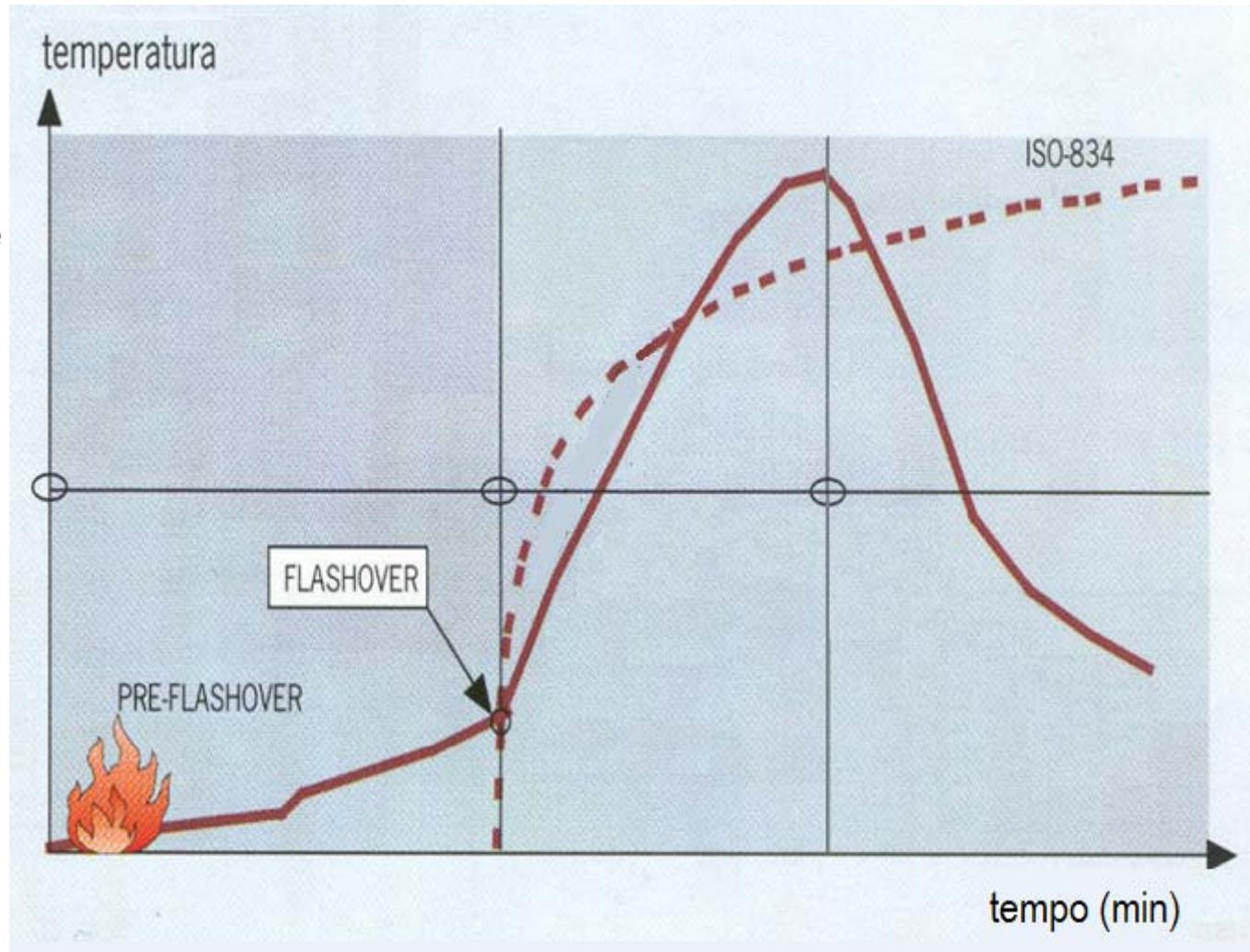
In assenza di Regole tecniche di prevenzione incendi, il DM 9/03/2007 consente al progettista di utilizzare l'approccio ingegneristico-prestazionale, secondo le indicazioni contenute nel DM 9/05/2007, in alternativa al metodo che fa riferimento alle classi di resistenza al fuoco.

L'approccio progettuale



L'approccio prescrittivo

Nell'approccio prescrittivo, una 1^a semplificazione consiste nell'adottare una curva tempo-temperatura rappresentativa della fase d'incendio generalizzato post-flash-over, che rappresenta convenzionalmente il contenuto termico di un incendio confinato in un compartimento.



L'approccio prescrittivo

Tale curva può essere riproducibile in laboratorio e rappresenta l'andamento della temperatura media dei gas caldi nella camera di un forno di prova.

La curva è interrotta in corrispondenza dell'istante di tempo coincidente con la classe dell'elemento in prova.

L'adozione della curva nominale e quindi delle classi di resistenza al fuoco, conduce ad un metodo di verifica **conservativo e cautelativo**, in quanto presuppone che la durata dell'incendio, *molto diversa dalla durata di incendi reali*, dipenda solo dal quantitativo di materiale combustibile presente nel compartimento.

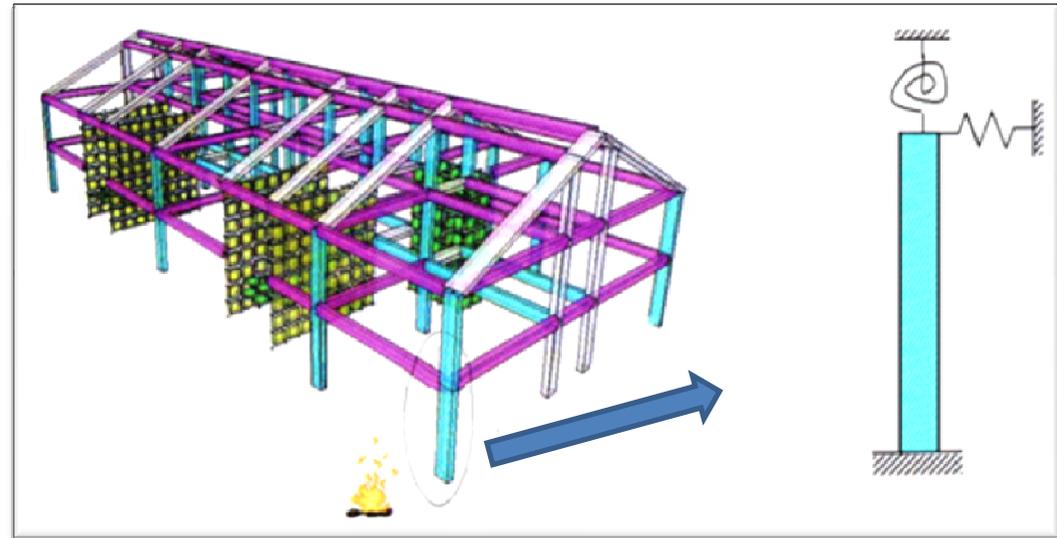
L'approccio prescrittivo

Nell'approccio prescrittivo, una 2^a semplificazione consiste nel ridurre il problema dell'analisi alla **verifica di un elemento strutturale alla volta**:

- si considerano le azioni trasmesse dalle altre membrature (mediante opportune condizioni al contorno),
 - si trascurano le azioni indirette causate dagli elementi strutturali adiacenti (*punto 4.1 Eurocodice 1*),
 - si trascurano gli effetti delle deformazioni termiche impedito se è riconoscibile a priori che esse sono trascurabili o favorevoli.
-

L'approccio prescrittivo

Tali semplificazioni traggono origine dal fatto che storicamente le prestazioni richieste ai singoli elementi erano collegate ad una prova sperimentale con incendio nominale, in assenza di azioni indirette (e il calcolo analitico doveva cogliere il risultato della prova, non il comportamento reale della struttura).



L'approccio ingegneristico-prestazionale

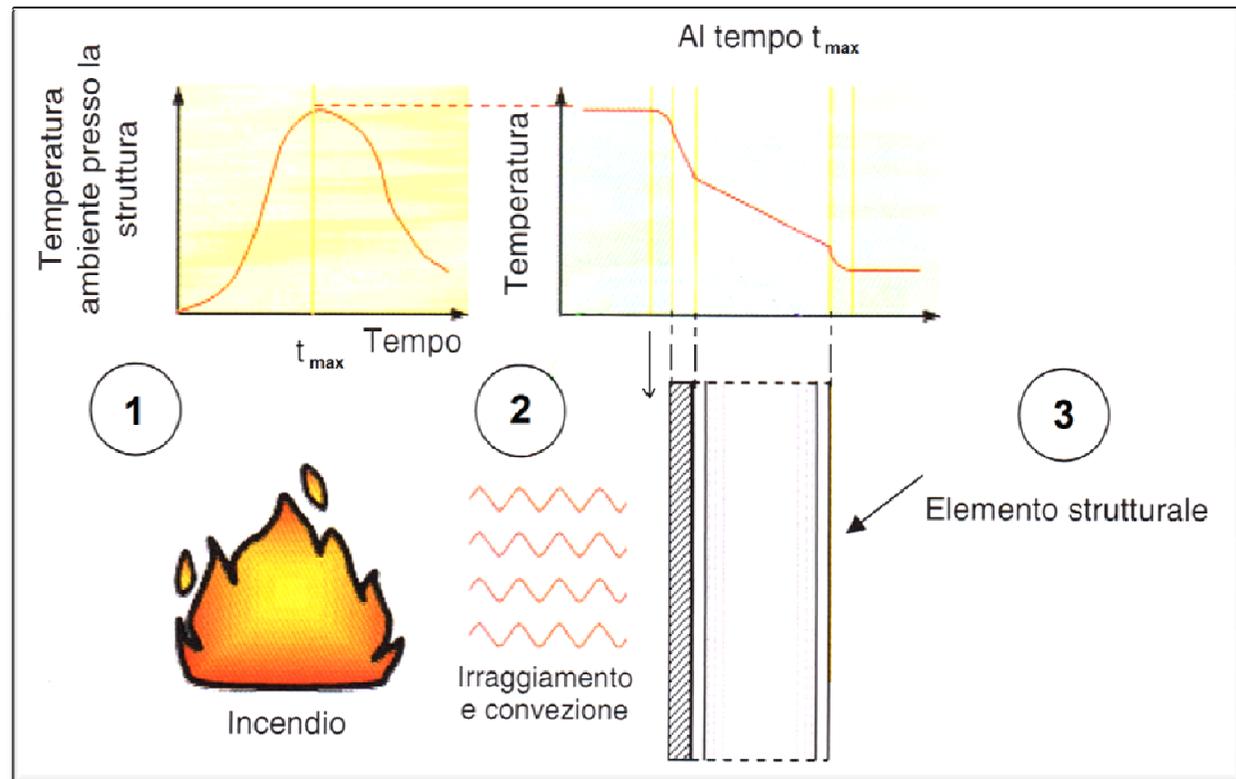
Con la disponibilità di nuovi modelli di calcolo, è oggi possibile stimare **l'andamento nel tempo delle temperature** (*curva d'incendio reale o naturale*) dei gas di combustione nelle varie zone del compartimento, in tutte le fasi dell'incendio.

- *A differenza del metodo prescrittivo, il progettista è libero di modellare l'incendio, al fine di determinare tra gli incendi attesi quello maggiormente probabile o più gravoso per la costruzione.*
 - *La modellazione dell'incendio è un'operazione delicata che può essere percorsa attraverso metodi più o meno complessi e onerosi.*
 - *Sta all'esperienza del progettista la scelta, di volta in volta, del modello più opportuno.*
-

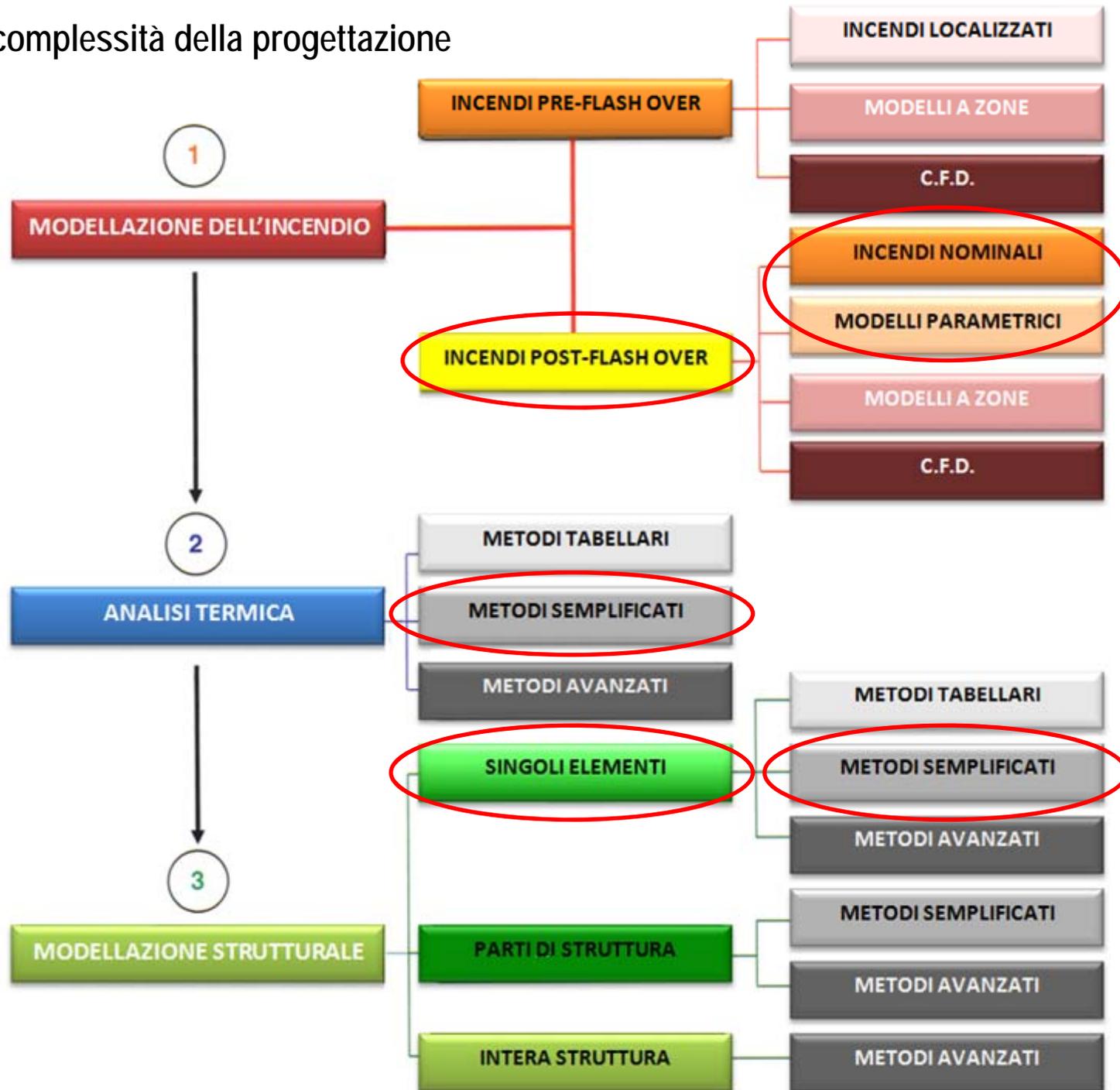
Il livello di complessità della progettazione

I tre aspetti fondamentali che caratterizzano il livello di complessità della progettazione al fuoco sono relativi a:

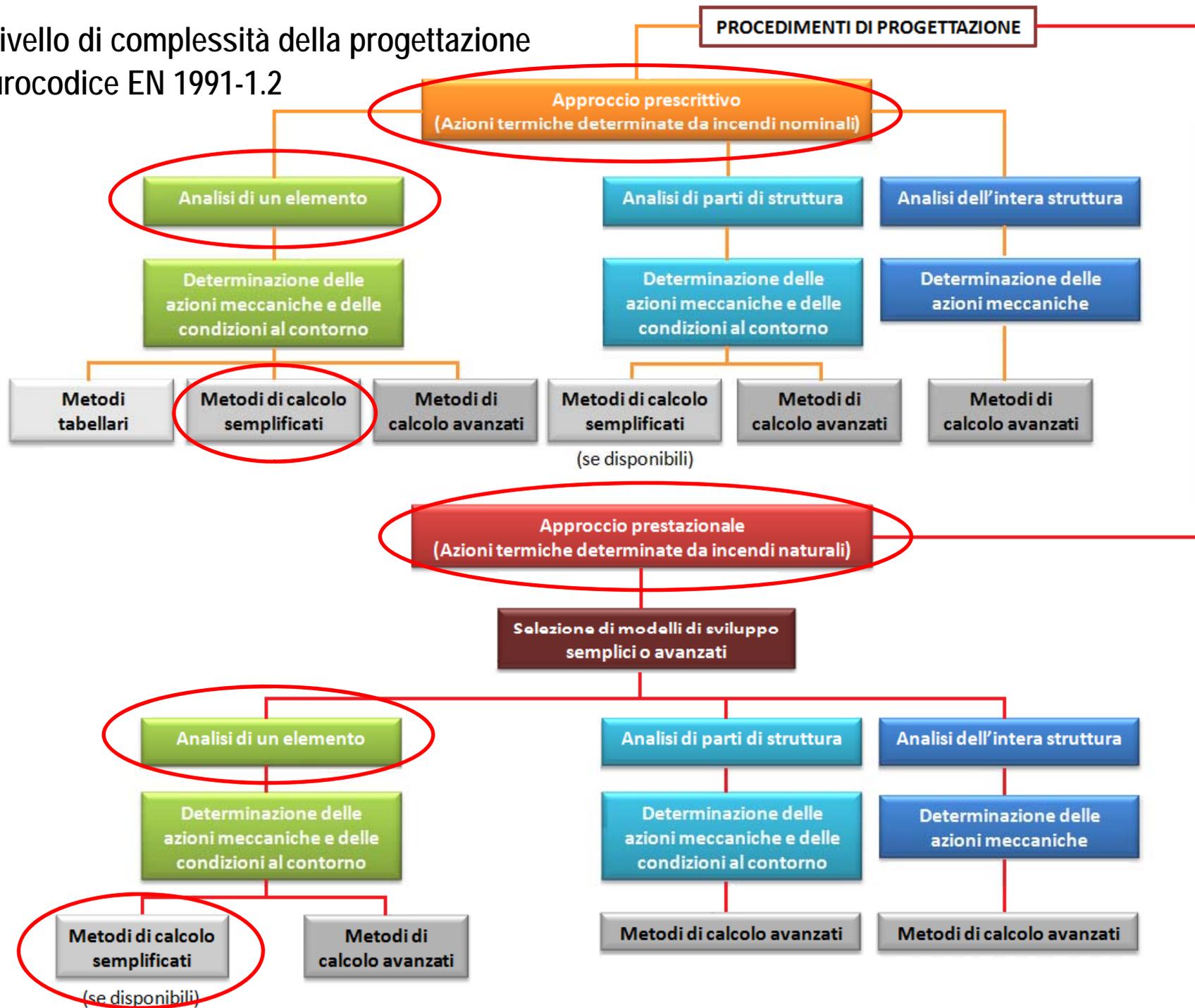
- 1) la modellazione dell'incendio,
- 2) l'analisi della trasmissione del calore agli elementi strutturali,
- 3) la modellazione strutturale per l'effettuazione delle verifiche.



Il livello di complessità della progettazione



Il livello di complessità della progettazione Eurocodice EN 1991-1.2

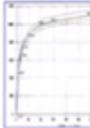
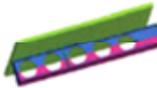
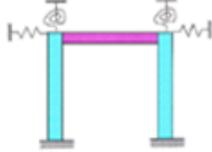
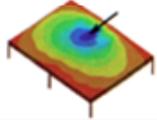
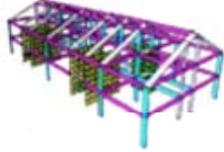


Il livello di complessità della progettazione

Per i modelli strutturali parziali (*singoli elementi o parti di struttura*), si devono stabilire idonee condizioni al contorno. La struttura diventa una somma di singoli elementi e la resistenza al fuoco è definita da quello con la resistenza minore.

L'applicabilità dei metodi di verifica semplificati comporta una valutazione approssimata della resistenza degli elementi. In genere, i singoli elementi sottoposti alla curva nominale, sono sottoposti ad un cimento termico più gravoso (e conservativo) dell'incendio reale.

I metodi avanzati sono applicabili in qualsiasi circostanza e costituiscono l'unico strumento disponibile per le analisi su intere strutture.

		INCENDI NOMINALI 	INCENDI NATURALI 
 SINGOLO ELEMENTO	TABELLARE 	APPLICABILI	NON APPLICABILI
	SEMPLIFICATO 	APPLICABILI	APPLICABILI (se disponibili)
	AVANZATO 	APPLICABILI	APPLICABILI
 PARTI DI STRUTTURA	TABELLARE 	NON APPLICABILI	NON APPLICABILI
	SEMPLIFICATO 	APPLICABILI (se disponibili)	NON APPLICABILI
	AVANZATO 	APPLICABILI	APPLICABILI
 INTERA STRUTTURA	TABELLARE 	NON APPLICABILI	NON APPLICABILI
	SEMPLIFICATO 	NON APPLICABILI	NON APPLICABILI
	AVANZATO 	APPLICABILI	APPLICABILI

Le norme tecniche



Le norme tecniche

Il DM 16/02/2007 prevede 3 metodologie per l'attribuzione della classe di resistenza al fuoco di un elemento costruttivo:



Le norme tecniche – Metodo sperimentale

Allegato B – Modalità per la classificazione in base ai risultati di prove

Le prove di resistenza al fuoco hanno l'obiettivo di valutare il comportamento al fuoco dei *prodotti* e degli *elementi costruttivi*, sotto specifiche condizioni di esposizione e attraverso il rispetto di criteri prestazionali misurabili.

Le parti 2, 3 e 4 della norma EN 13501 indicano:

- *le condizioni di esposizione,*
 - *i criteri prestazionali,*
 - *le procedure di classificazione da utilizzare nell'ambito delle prove.*
-

Le norme tecniche – Metodo sperimentale

Allegato B – Modalità per la classificazione in base ai risultati di prove

Rapporto di classificazione: documento redatto dal laboratorio di prova, che attesta, sulla base di uno o più rapporti di prova, la classe del *prodotto* o dell'*elemento costruttivo* oggetto della prova.

In caso di variazioni del *prodotto* o dell'*elemento costruttivo* classificato, il produttore predispone il fascicolo tecnico contenente:

1. elaborati grafici di dettaglio del prodotto modificato;
2. relazione tecnica basata su prove, calcoli e altre valutazioni sperimentali e/o tecniche, tesa a dimostrare il mantenimento della classe di resistenza al fuoco;
3. approvazioni maturate presso uno degli Stati dell'UE o uno degli Stati contraenti l'accordo SEE e la Turchia.
4. parere tecnico positivo sulla completezza e correttezza delle ipotesi a supporto e delle valutazioni effettuate per *l'estensione del risultato di prova* rilasciato dal laboratorio di prova che ha prodotto il rapporto di classificazione.

Il produttore è tenuto a rendere disponibile il fascicolo tecnico al professionista, che se ne avvale per la certificazione della classe di resistenza al fuoco del *prodotto* o dell'*elemento costruttivo*.

Le norme tecniche – Metodo sperimentale

Allegato B – Modalità per la classificazione in base ai risultati di prove

Lett. Circ. n. 9663 del 23/07/2012

L'abrogazione della Circolare n. 91/61 a partire dal 25 settembre 2007 implica che i rapporti di prova emessi:

- entro il 31/12/1985 sono decaduti il 25/09/2008,
- dall'1/01/1986 al 31/12/1995 sono decaduti il 25/09/2010,
- dall'1/01/1996 sono decaduti il 25/09/2012.

È possibile utilizzare i rapporti di prova anche oltre le date di scadenza previste, esclusivamente per le costruzioni il cui progetto sia stato presentato al competente Comando prima delle suddette date.

Le norme tecniche – Metodo analitico

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

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, sotto specifiche condizioni di esposizione al fuoco e attraverso il rispetto di criteri prestazionali e l'adozione di particolari costruttivi.

I metodi di calcolo da utilizzare sono quelli contenuti negli Eurocodici :

- EN 1991-1-2 «Azioni sulle strutture»
 - EN 1992-1-2 «Progettazione delle strutture di calcestruzzo»
 - EN 1993-1-2 «Progettazione delle strutture di acciaio»
 - EN 1994-1-2 «Progettazione delle strutture miste acciaio calcestruzzo»
 - EN 1995-1-2 «Progettazione delle strutture di legno»
 - EN 1996-1-2 «Progettazione delle strutture di muratura»
 - EN 1999-1-2 «Progettazione delle strutture di alluminio»
-

Le norme tecniche – Metodo analitico

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

Con l'emanazione del DM DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI 31 luglio 2012, di approvazione delle Appendici nazionali con i parametri tecnici necessari per l'applicazione degli Eurocodici, non è più consentito utilizzare le Norme UNI 9502, UNI 9503, UNI 9504 per i procedimenti analitici di verifica della resistenza al fuoco di elementi costruttivi portanti realizzati in conglomerato cementizio armato, acciaio e legno.

Lett. Circ. n. 4638 del 5/04/2013:

l'uso delle citate Norme UNI è tuttavia consentito anche oltre il 31/07/2012, esclusivamente per le costruzioni i cui progetti o le S.C.I.A. siano stati presentati ai Comandi prima dell'entrata in vigore del decreto.

Le norme tecniche – Metodo tabellare

Allegato D – Modalità di classificazione in base a confronti con tabelle

I valori tabellari sono il risultato di campagne sperimentali e di elaborazioni numeriche e si riferiscono alle **tipologie costruttive** e ai **materiali** di maggior impiego.

Le tabelle propongono delle **condizioni sufficienti** per la classificazione di **elementi costruttivi resistenti al fuoco** (non prodotti).

Tali condizioni non costituiscono un obbligo qualora si utilizzino i metodi sperimentali o analitici per la determinazione delle prestazioni di resistenza al fuoco.

Le norme tecniche – Metodo tabellare

Allegato D – Modalità di classificazione in base a confronti con tabelle

L'uso delle tabelle è limitato alla classificazione di elementi costruttivi per i quali è richiesta la resistenza al fuoco nei confronti della curva temperatura-tempo standard e delle altre azioni meccaniche previste in caso di incendio.

Altre tabelle di natura sperimentale o analitica diverse da quelle indicate in allegato D, non possono essere utilizzate.

L'utilizzo delle tabelle D.7 per *travi semplicemente appoggiate, tiranti e colonne di acciaio*, protette da *intonaci, pannelli e lastre*, è decaduto con l'obbligo della marcatura CE dei sistemi protettivi, ovvero dopo 3 anni dall'entrata in vigore del decreto 16/02/2007.

Le norme tecniche – Metodo tabellare

Allegato D – Modalità di classificazione in base a confronti con tabelle

Al riguardo, per l'acciaio protetto, il metodo analitico proposto dall'Eurocodice deve essere integrato con l'impiego delle Norme di prova della serie EN13381-4 ed EN 13381-8, che dal 30/11/2013 sono entrate in vigore in forma esclusiva, per i protettivi passivi e reattivi.

Queste ultime non conducono ad un rapporto di classificazione con l'esplicitazione della classe di resistenza al fuoco dell'elemento costruttivo, ma ad un rapporto di valutazione con l'indicazione del contributo alla protezione al fuoco dell'elemento in acciaio fornito dal protettivo.

Le norme tecniche – Metodo tabellare

Lettera Circolare n. 17381 del 27/12/2013

Qualificazione di resistenza al fuoco di protettivi da applicare ad elementi strutturali in acciaio

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	Per rapporti di prova emessi prima del 30/11/2013
EN 13381-8:2010	Sì	NO	Per rapporti di prova emessi prima del 30/11/2013
EN 13381-4:2013	NO	Sì	Per rapporti di prova emessi dal 30/11/2013
EN 13381-8:2013	Sì	NO	Per rapporti di prova emessi dal 30/11/2013

* vernici intumescenti e sublimanti che variano conducibilità termica e spessore con la temperatura .

Le norme tecniche – La modulistica richiesta

Modulistica in materia di resistenza al fuoco

Lettera Circolare n. 1681 del 16/02/2014

Categoria del DM 16/02/2007		Prodotto/elemento costruttivo	Metodo di classificazione			Note
Generale	Identificazione Prodotto Elemento costruttivo		T	A	S	
A.1 Elementi portanti privi di funzione compartimento	A.1.1	Muri, Solai, travi, colonne	C	C	C	-
	A.1.1	Tetti, balconi, scale, passerelle	-	C	C	
A.2 Elementi portanti con funzione di compartimento	A.2.1	Muri	C	C	C	
	A.2.2	Solai	C	C	C	
	A.2.2	Tetti	-	C	C	
A.3 Protettivi di elementi portanti (prodotti e sistemi)	A.3.1	Controsoffitti privi di intrinseca resistenza al fuoco	-	D	-	
	A.3.2	Rivestimenti, pannelli, intonaci, vernici e schermi protettivi dal fuoco	-	D	-	

Le norme tecniche – La modulistica richiesta

Modulistica in materia di resistenza al fuoco

A.4 Elementi non portanti e simili	A.4.1	Pareti divisorie (comprese quelle che presentano parti non isolate)	C	C	C	-
	A.4.2	Controsoffitti dotati di intrinseca resistenza al fuoco	-	-	C	
	A.4.3	Facciate (curtain walls) e muri esterni (che includono parti vetrate)	-	C	C	
	A.4.4	Pavimenti sopraelevati	-	-	C	
	A.4.5	Sistemi di sigillatura di fori passanti e di giunti lineari	-	-	D	
	A.4.6	Porte e chiusure resistenti al fuoco (comprese quelle che includono parti vetrate e accessori), e rispettivi sistemi di chiusura	-	-	D	
	A.4.7	Porte a prova di fumo	-	-	D	
	A.4.8	Chiusure dei passaggi destinati ai nastri trasportatori e ai sistemi di trasporto su rotaia	-	-	D	
	A.4.9	Canalizzazioni di servizio e cavedi	-	-	D	
	A.4.10	Camini	-	-	D	
	A.4.11	Rivestimenti per pareti e soffitti	-	-	D	

Le norme tecniche – La modulistica richiesta

Modulistica in materia di resistenza al fuoco

A.5 prodotti per sistemi ventilazione	A.5.1	Condotte di ventilazione	-	-	D	-
	A.5.2	Serrande tagliafuoco	-	-	D	
A.6 Prodotti per installazioni tecniche	A.6.1	Cavi elettrici e in fibre ottiche e accessori; Condotte e sistemi di protezione dal fuoco per cavi elettrici	-	-	DC	Nota 1
	A.6.2	Cavi e sistemi di cavi elettrici o per la trasmissione di segnali di diametro ridotto (diametro inferiore a 20 mm e muniti di conduttori inferiori a 2,5 mm ²)	-	-	DC	
A.7 Prodotti per controllo fumi e calore	A.7.1	Condotti di estrazione del fumo per comparto singolo	-	-	DI/CI	Nota 2
	A.7.2	Condotti di estrazione del fumo resistenti al fuoco per comparti multipli	-	-	DI/CI	
	A.7.3	Serrande per il controllo del fumo di un comparto singolo	-	-	DI/CI	
	A.7.4	Serrande per il controllo del fumo di comparti multipli	-	-	DI/CI	
	A.7.5	Barriere al fumo	-	-	DI/CI	
	A.7.6	Evacuatori motorizzati di fumo e calore (ventilatori), giunti di connessione	-	-	DI/CI	
	A.7.7	Evacuatori naturali di fumo e calore	-	-	DI/CI	

Le norme tecniche – La modulistica richiesta

Modulistica in materia di resistenza al fuoco

LEGENDA

Simbolo	Descrizione
T	Metodo tabellare di cui al DM 16/2/2007 e Circolare prot.1968 del 15/02/2008 per i muri portanti
S	Metodo sperimentale di cui al DM 16/02/2007 (allegato B)
A	Metodo analitico con Eurocodici
C	Modello CERT.REI
D	Modello DICH.PROD
DC	Dichiarazione di conformità dell'impianto ex DM 37/2008
DI/CI	Modello DICH.IMP o CERT.IMP

Le norme tecniche – La modulistica richiesta

Modulistica in materia di resistenza al fuoco

NOTE

Nota 1

Si rimanda alla dichiarazione di conformità dell'impianto di cui all'art. 7 del DM dello Sviluppo Economico 22/01/2008 n. 37 che citerà i riferimenti dei documenti riportati nell'*elenco allegati* del modello DICH.PROD relativi ai prodotti impiegati.

Per impianti non ricadenti nel campo di applicazione del DM 37/2008, si ricorrerà, a seconda dei casi, ai modelli DICH-IMP e CERT.IMP con le medesime indicazioni.

Nota 2

Si rimanda, a seconda dei casi, ai modelli DICH.IMP o CERT.IMP che citeranno i riferimenti dei documenti riportati nell'*elenco allegati* del modello DICH.PROD relativi ai prodotti impiegati.

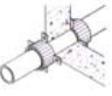
In caso di installazione di singoli prodotti non riconducibile alla compilazione dei modelli citati, sarà necessaria la compilazione del modello DICH.PROD.

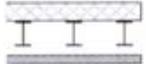
I metodi utilizzabili

Disponibilità di metodologie per la verifica di resistenza al fuoco di elementi strutturali

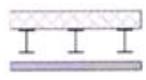
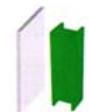
Materiale	Metodo tabellare	Metodo sperimentale	Metodo analitico
Calcestruzzo normale e precompresso	X	X	X
Acciaio	NO	X	X
Misto acciaio - calcestruzzo armato	X	X	X
Legno	NO	X	X
Muratura	X	X	X
Lega di alluminio	NO	X	X

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale			
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova	
Lastre alveolari prefabbricate in c.a. o c.a.p. 	EN 1168	SI	EN 13369	EN 1991 1-2 EN 1992 1-2	EN 1363-1 EN 1363-3	EN 13501-2	Serie EN 1365	Non consentita dalla norma di prodotto
Elementi prefabbricati in c.a. alleggerito a struttura aperta	EN 1520		-	-	EN 1363-1 EN 1363-2 EN 1363-3			
Elementi prefabbr. ti in c.a. o c.a.p. per solai nervati 	EN 13224		EN 13369	EN 1991 1-2 EN 1992 1-2	EN 1363-1 EN 1363-3			
Elementi prefabbr. ti in c.a. o c.a.p. a sviluppo lineare 	EN 13225							
Tegoli prefabbricati in c.a. o c.a.p. 	EN 13693							
Elementi prefabbr. ti in c.a. o c.a.p. per solai 	EN 13747							

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale			Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova	
Garages prefabbricati in c.a.	EN13978-1	SI	EN 13369	EN 1991 1-2 EN 1992 1-2	EN 1363-1 EN 1363-3	EN 13501-2	Serie EN 1365	Non consentita dalla norma di prodotto
Elementi portanti (muri, solai, tetti, travi, colonne, balconi, scale, passerelle)	-	NO		Eurocodici		Serie EN 13501	Serie EN 1365 Norme prEN Norme ENV	Ammessa in base all'elemento ed al materiale
Tramezzi e divisori leggeri 								
Facciate continue 	EN 13830	SI	-		EN 1363-1 EN 1363-2 EN 1363-3	EN 13501-2	EN 1364-3 (configurazione completa) EN 1354-4 (configurazione parziale)	Non pertinente
Dispositivi di tenuta di attraversamenti 	ETAG 026-2 in studio	NO					EN 1366-3	
Dispositivi di tenuta a giunto lineare 	-							

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007		
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale					
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova			
Controsoffitti in kit 	EN 13964	SI	-	-	EN 1363-1 EN 1363-2 EN 1363-3		EN 1366-4	Non pertinente		
Pavimenti sopraelevati 	EN 12825 EN 13213	NO			EN 1363-1 EN 1363-3		EN 13501-2		EN 1366-6	
Canalizzazioni di servizio e cavedi 	-				EN 1366-5					
Impianti di ventilazione: serrande tagliafuoco 	prEN 15650				EN 13501-3	EN 1366-2				
Porte e serramenti resistenti al fuoco	EN 14351-3 EN 13241-2	omologaz. nazionale			EN 14600	EN 1363-1 EN 1363-2 EN 1363-3	EN 13501-2		EN 1634-1 oppure UNI-CNVVF 9723/FA1	Non pertinente
Porte a prova di fumo	-	NO			-				EN 1634-3	
Chiusure per nastri trasportatori 	-	NO			-		EN 1366-7			
Vetri 	varie	SI	EN 357	EN 13501-2 oppure EN 13501-5 incendi esterni	Funzione dell'elemento ospitante					

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007		
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale					
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova			
Condotti impianti di ventilazione 	-	NO	-	-	EN 1363-1 EN 1363-2 EN 1363-3	EN 13501-3	EN 1366-1	Non pertinente		
Barriere o cortine al fumo 	EN 12101-1	SI			-	-	EN 1363-1 EN 1363-3		EN 13501-4	EN 12101-1
Evacuatori naturali di fumo e calore 	EN 12101-2									EN 12101-2
Evacuatori motorizzati di fumo e calore 	EN 12101-3									EN 12101-3
Kit per il controllo di fumo e calore	CEN/TR 12101-4	NO			-	-	-		EN 13501-3 EN 13501-4	CEN/TR 12101-4
Sistemi di evacuazione a differenza di pressione	EN 12101-6	SI							EN 12101-6	
Condotte per l'estrazione dei fumi per comparti multipli 	EN 12101-7	NO			-	-	EN 1363-1 EN 1363-3		EN 13501-4	EN 1366-8
Condotte per l'estrazione dei fumi per comparto singolo 										EN 1366-9

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale			
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova	
Serrande tagliafuoco per sistemi di controllo dei fumi 	EN 12101-8	NO			EN 1363-1 EN 1363-3	EN 13501-4	EN 1366 2-8-9-10	Non pertinente
Centraline di controllo per sistemi di estrazione dei fumi 	prEN 12101-9				-	-	-	
Apparecchiature di alimentazione dei sistemi di controllo dei fumi e del calore	EN 12101-10	SI		-	-	-	-	
Camini 	varie	in base al prodotto	EN 1443				EN 13216-1	
Membrane protettive orizzontali 	ETAG 018	NO	-	Eurocodici	EN 1363-1 EN 1363-3	EN 13501-2		
Membrane protettive Verticali 	-						EN 13381-1	

Prodotto	Norma di Prodotto o linea guida EOTA	Obbligo di marcatura CE	Valutazione della resistenza al fuoco dell'elemento strutturale					Valutazione tabellare D.M. 16/2/2007
			Norma di supporto	Valutazione analitica	Valutazione sperimentale			
					Norme generali di prova	Norme di classificazione	Norme di prova	
Protettivi applicati ad elementi di calcestruzzo 	-	NO	-	EN 1992 1-2	EN 1363-1 EN 1363-3	EN 13501-2	EN 13381-3	Ammessa solo con intonaco previsto
Protettivi applicati ad elementi di acciaio 	ETAG 018			EN 1993 1-2			EN 13381-4	Ammessa solo con i protettivi previsti
Protettivi applicati ad elementi di calcestruzzo e acciaio 				EN 1994 1-2			EN 13381-5	Ammessa solo per solai misti con i protettivi previsti
Protettivi applicati a colonne cave di acciaio riempite di calcestruzzo 	-						EN 13381-6	Non prevista
Protettivi applicati ad elementi in legno 				EN 1995 1-2			EN 13381-7	

La modellazione dell'incendio



Procedimento per la progettazione strutturale in caso di incendio

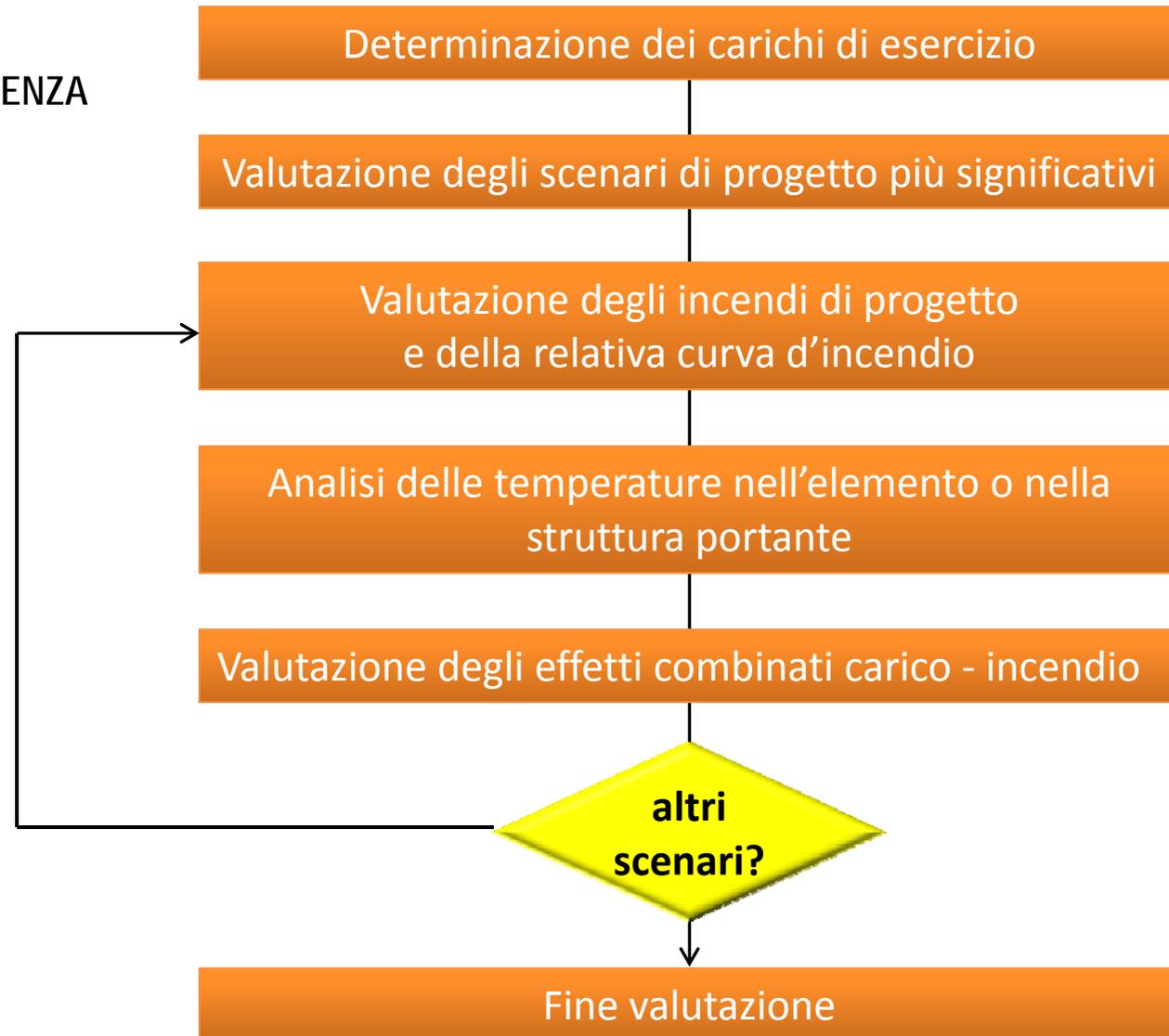
L'analisi in caso d'incendio per attività prive di Regola tecnica, si effettua seguendo i seguenti passi:

- scelta di uno scenario d'incendio significativo;
- determinazione dei relativi incendi di progetto;
- calcolo dell'evoluzione della temperatura all'interno degli elementi strutturali
- analisi del comportamento meccanico della struttura esposta al fuoco (in funzione delle azioni termiche e dei loro effetti termici sulle proprietà dei materiali e delle azioni meccaniche indirette, nonché degli effetti diretti delle azioni meccaniche).

Le azioni sulle strutture derivanti dall'esposizione all'incendio, sono classificate come azioni eccezionali.

Procedimento per la progettazione strutturale in caso di incendio

PROCESSO LOGICO PER
L'ANALISI DELLA RESISTENZA
AL FUOCO



Scenari e incendi di progetto

Ad ogni scenario significativo, chiamato **scenario di progetto**, è associata un'evoluzione dell'incendio, che può essere descritta dalla ***variazione nel tempo della potenza termica*** generata dalle reazioni di combustione.

Quest'ultima definisce l'**incendio di progetto**.

Ciascun incendio di progetto, a sua volta, genera un campo di temperature variabili nel tempo e nello spazio, che costituiscono l'**azione termica sulle strutture**.

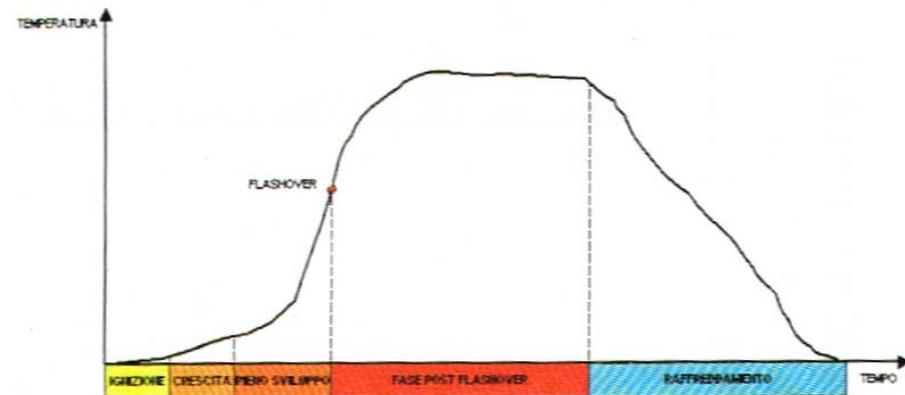
La conoscenza di tale evoluzione, chiamata **curva d'incendio**, consente di verificare il comportamento delle strutture e quindi di verificarne la stabilità per un tempo compatibile con i livelli di prestazioni previsti.

Lo scenario d'incendio

Lo scenario d'incendio descrive **qualitativamente** l'evoluzione di un incendio, individua gli eventi chiave che lo caratterizzano e lo differenziano dagli altri incendi.

Di solito comprende le seguenti fasi:

- innesco,
- crescita,
- propagazione
- incendio generalizzato,
- decadimento.



Lo scenario di incendio deve inoltre definire l'**ambiente** nel quale si sviluppa l'incendio di progetto ed i **sistemi** che possono avere impatto sulla sua evoluzione (impianti di protezione attiva..).

Lo scenario d'incendio

Scenario d'incendio di progetto

- Deve essere determinato attraverso la valutazione del rischio incendio.
- L'identificazione degli elementi di rischio d'incendio, se condotta in conformità al DM 10/03/1998, permette di definire gli scenari d'incendio, ossia le **proiezioni** dei possibili eventi di incendio.
- Nel processo di individuazione degli scenari di incendio di progetto, devono essere valutati gli **incendi realisticamente ipotizzabili** nelle condizioni di esercizio previste, scegliendo i più gravosi per:
 - lo sviluppo e la propagazione dell'incendio,
 - la sollecitazione strutturale,
 - la salvaguardia degli occupanti
 - la sicurezza delle squadre di soccorso.

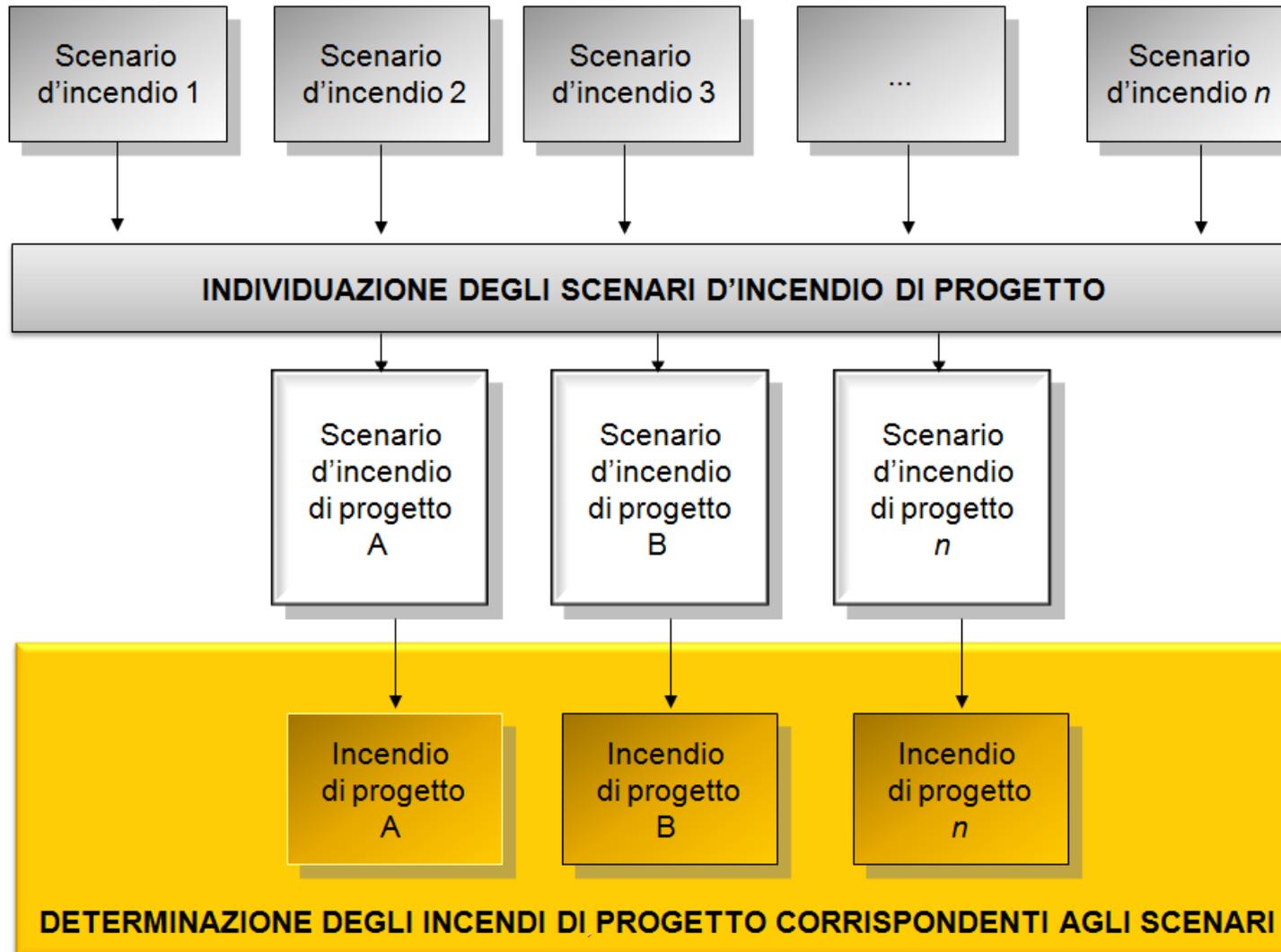
Lo scenario d'incendio

Scenario d'incendio di progetto

Nell'individuazione degli scenari d'incendio di progetto, è necessario tenere conto di:

- stato, tipo e quantitativo di combustibile;
 - configurazione e posizione del combustibile;
 - caratteristiche dell'edificio (*geometria del locale, condizioni di ventilazione interna ed esterna, stato delle porte e delle finestre, eventuale rottura di vetri, ecc.*);
 - condizioni delle persone presenti (*affollamento, stato psico-fisico, presenza di disabili, ecc.*).
-

Lo scenario d'incendio



L'incendio di progetto

L'incendio convenzionale di progetto è 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.
-

L'incendio di progetto

Un documento ufficiale del NBS nel 1928 riportava per la prima volta una correlazione tra il carico d'incendio presente nello scenario reale, e la resistenza al fuoco delle strutture.

In esso venivano anche individuati una serie di fattori per stabilire:

- *la velocità di propagazione dell'incendio,*
- *la severità dell'azione termica sulle strutture.*

Venne anche evidenziato:

- il ruolo della ventilazione degli ambienti nell'evoluzione delle temperature,
 - l'importanza dell'azione termica nella fase di raffreddamento.
-

Il tempo equivalente di esposizione

Lo stesso documento introdusse il concetto di “tempo equivalente di esposizione” all’incendio nominale.

Ciò consentì di correlare i risultati delle prove in scala reale, in tempo equivalente di esposizione alla curva standard di un elemento strutturale in una fornace, collegando direttamente il carico d'incendio, unica variabile, al tempo equivalente di esposizione.

Il tempo equivalente di esposizione

1° definizione

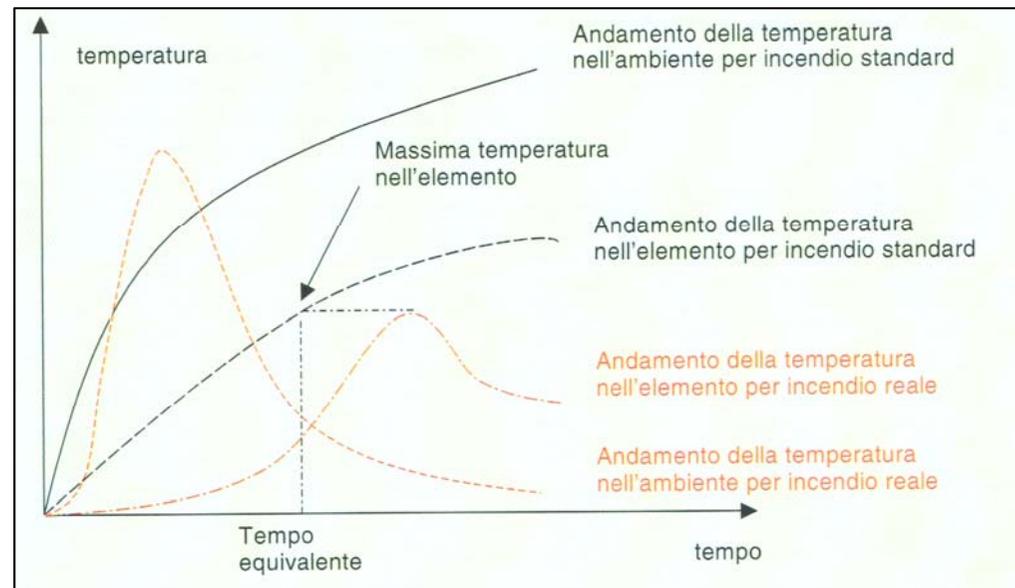
Due incendi possono essere considerati fra loro “equivalenti” se le aree sottese al di sopra di 300°C dalle due curve temperatura-tempo che li descrivono, sono uguali.

Con tale definizione non si tiene conto tuttavia della quantità di energia termica che effettivamente investe un elemento strutturale, poiché curve temperature-tempo fra loro diverse originano, a temperatura elevata, flussi termici radianti diversi fra loro.

Il tempo equivalente di esposizione

2° definizione

Il tempo equivalente di esposizione all'incendio standard è il periodo durante il quale un dato elemento strutturale deve essere sottoposto all'incendio standard (ISO 834) per ottenere, nello stesso elemento, la stessa massima temperatura ottenuta nell'incendio reale.



Il calcolo del tempo equivalente di esposizione

Il tempo equivalente di esposizione al fuoco normalizzata è definito da:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f) k_c \quad [\text{min}]$$

$$t_{e,d} < t_{fi,d}$$

$q_{f,d}$ è il carico d'incendio specifico di progetto

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

$$w_f = (6,0 / H)^{0,3} [0,62 + 90(0,4 - \alpha_v)^4 / (1 + b_v \alpha_h)] \geq 0,5 \quad [-]$$

$\alpha_v = A_v / A_f$ è l'area delle aperture verticali nella facciata (A_v) in relazione all'area in pianta del compartimento (A_f),

$\alpha_h = A_h / A_f$ è l'area delle aperture orizzontali nella copertura in relazione all'area in pianta del compartimento (A_f).

$$b_v = 12,5 (1 + 10 \alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10,0$$

H è l'altezza del compartimento antincendio [m]

Il calcolo del tempo equivalente di esposizione

Fattore di correzione k_c al fine di considerare i vari materiali (O è il fattore di apertura)

Materiale della sezione trasversale	Fattore di correzione k_c
Calcestruzzo armato	1,0
Acciaio protetto	1,0
Acciaio non protetto	$13,7 \cdot O$

O = fattore di apertura $A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t$ $[m^{1/2}]$ con i limiti $0,02 \leq O \leq 0,20$

Fattore di conversione k_b dipendenti dalle proprietà termiche dell'involucro

$b = \sqrt{(\rho c \lambda)}$ [J/m ² s ^{1/2} K]	k_b [min · m ² /MJ]
$b > 2\,500$	0,04
$720 \leq b \leq 2\,500$	0,055
$b < 720$	0,07

Il calcolo del tempo equivalente di esposizione

Valutato il tempo d'esposizione all'incendio standard equivalente all'incendio reale, la classe risultante, in ogni caso, **non può essere inferiore** al valore minimo associato al carico d'incendio specifico di progetto $q_{f,d}$ secondo la tabella 5 del DM 9/03/2007:

Carico d'incendio specifico di progetto	Classe di resistenza al fuoco *
non superiore a 300 MJ/m ²	0
non superiore a 450 MJ/m ²	15
non superiore a 600 MJ/m ²	20
non superiore a 900 MJ/m ²	30
non superiore a 1200 MJ/m ²	45
non superiore a 1800 MJ/m ²	60
non superiore a 2400 MJ/m ²	90
superiore a 2400 MJ/m ²	120

Curve d'incendio nominali

Il primo passo compiuto dal mondo della ricerca per compensare le anomalie scientifiche della curva nominale standard, è stato quello di affiancarle altre curve nominali, per descrivere modelli d'incendio differenti da quelli cellulosici e confinati:

- *curve nominali dedicate all'incendio di idrocarburi,*
 - *curve nominali dedicate ad incendi all'aperto,*
 - *curve nominali dedicate ad incendi fortemente anossici.*
-

Curve d'incendio nominali

Curva tempo - temperatura normalizzata (ISO 834)

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Curva nominale dell'incendio esterno

$$\theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Curva nominale degli idrocarburi

$$\theta_g = 1.080 (1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$$

θ_g temperatura del gas all'interno del compartimento antincendio [$^{\circ}\text{C}$]

t è il tempo in minuti

Curve d'incendio nominali

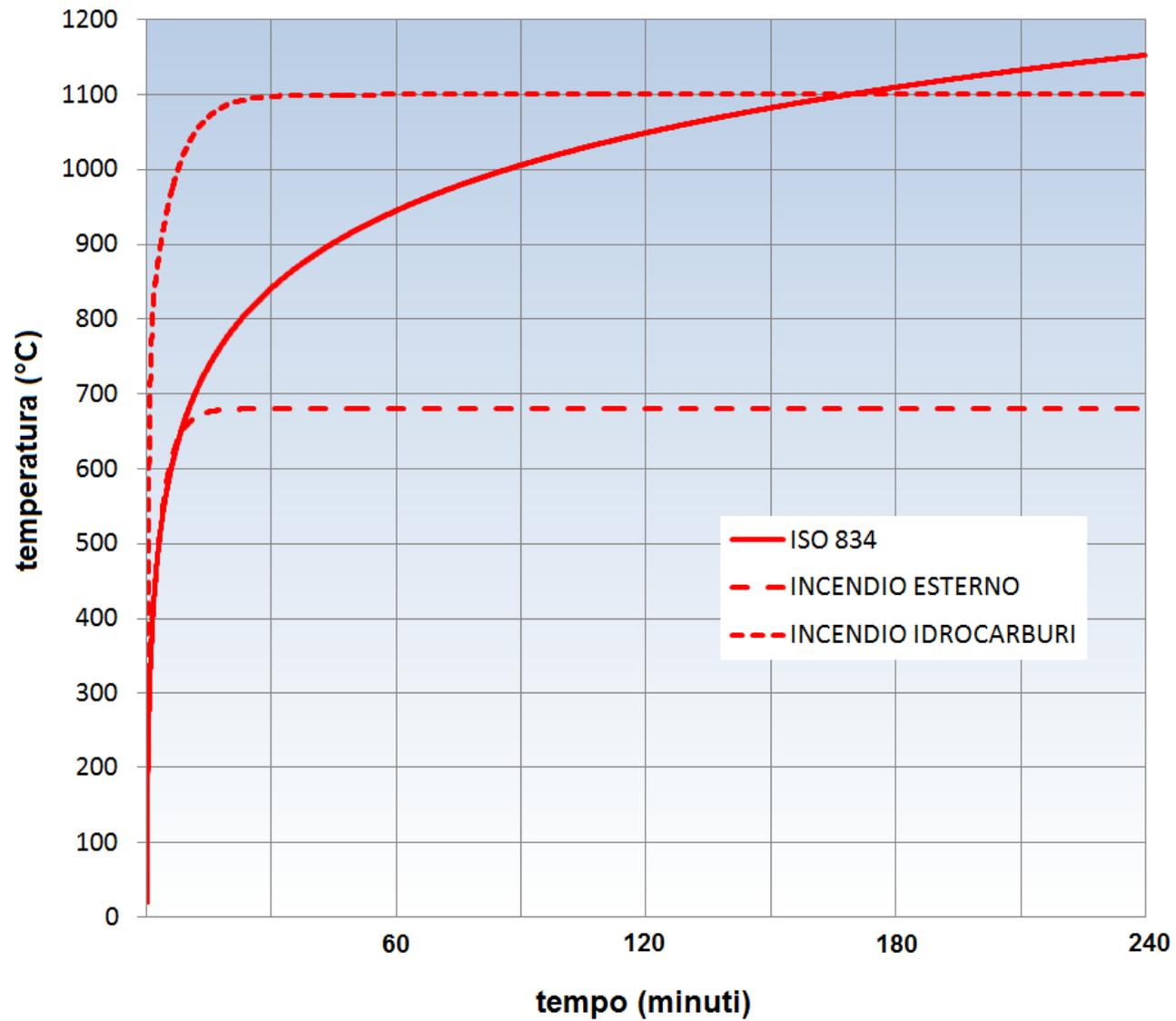
Curva nominale dell'incendio covante

$$\theta_g = 20 + 154 \cdot t^{0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{per } 0 < t < 21^\circ\text{C}$$
$$\theta_g = 345 \log_{10} (8 (t-20) + 1) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{per } t \geq 20^\circ\text{C}$$

Curva nominale dell'incendio nei tunnel

Descritta per punti

Curve d'incendio nominali



Curve d'incendio naturali

La necessità di riprodurre quanto più possibile l'evoluzione reale dell'incendio comporta un grado di conoscenza del contesto più approfondito, e quindi non risulta più sufficiente conoscere il carico d'incendio, ma bisogna avere dettagliate informazioni su:

- *le strutture coinvolte,*
- *gli impianti esistenti*
- *il comportamento al fuoco dei prodotti presenti.*

Con le curve naturali si sostituisce il tempo equivalente di esposizione con l'imposizione delle sollecitazioni termiche riferibili all'intera storia della combustione (dalla crescita, all'incendio generalizzato, al raffreddamento).

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

CURVE PARAMETRICHE

Compartimenti antincendio di superficie fino a 500 m², privi di aperture nelle coperture e di altezza massima fino a 4 m.

Temperatura uniforme nel compartimento funzione del tempo

Carico d'incendio legato a materiali combustibili di tipo celluloso, completamente coinvolti nell'incendio fino all'estinzione. Nella fase di riscaldamento:

$$\theta_g = 20 + 1.325 (1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$
$$\alpha_c = 35 \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

con:

θ_g temperatura del gas all'interno del compartimento antincendio [$^{\circ}\text{C}$]

$t^* = t \cdot \Gamma$ in ore

t tempo in minuti

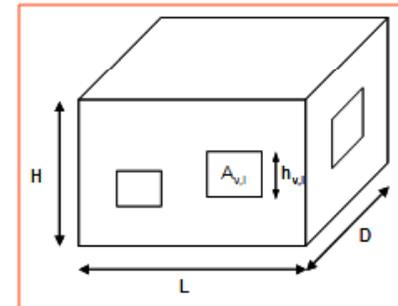
$$\Gamma = [O/b]^2 / [0,04/1.160]^2$$

$$b = (\rho c \lambda)^{0,5} \quad [\text{J}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}]$$

$$O = A_v (h_{eq})^{0,5} / A_t \text{ fattore di apertura } [\text{m}^{1/2}]$$

$$\text{con } 100 \leq b \leq 2.200$$

$$\text{con } 0,02 \leq O \leq 0,20$$



Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

CURVE PARAMETRICHE

ρ	massa volumica della superficie esterna del compartimento [kg/m ³]
c	calore specifico della superficie del compartimento [J/kg K]
λ	conducibilità termica della superficie del compartimento [W/mK]
A_v	area totale delle aperture verticali sulle pareti [m ²]
h_{eq}	media pesata delle altezze delle finestre sulle pareti [m]
A_t	area totale del compartimento (pareti, soffitto e pavimento, incluse le aperture) [m ²]

La massima temperatura θ_{max} nella fase di riscaldamento si verifica per il tempo $t^* = t_{max} \cdot \Gamma$, con:

$$t_{max} = \max [(0,2 \cdot 10^{-3} q_{t,d} / \theta); t_{lim}] \quad [h]$$

dove:

$q_{t,d}$	valore di progetto del carico d'incendio specifico relativo all'area totale A_t del compartimento ($q_{t,d} = q_{f,d} A_f / A_t$ [MJ/m ²], con $50 \leq q_{t,d} \leq 1.000$ [MJ/m ²])
$q_{f,d}$	valore di progetto del carico d'incendio specifico relativo all'area in pianta A_f del pavimento [MJ/m ²]
t_{lim}	15, 20, 25 minuti per velocità di crescita dell'incendio bassa, media, rapida

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

CURVE PARAMETRICHE

Quando $t_{max} = t_{lim}$, $t^* = t \cdot [O_{lim} / b]^2 / [0,04 / 1.160]^2$

con $O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{lim}$

Le curve temperatura-tempo nella fase di raffreddamento sono date da:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 (t^* - t_{max}^{\cdot} \cdot x) \quad \text{per } t_{max}^{\cdot} \leq 0,5$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (3 - t_{max}^{\cdot}) (t^* - t_{max}^{\cdot} \cdot x) \quad \text{per } 0,5 < t_{max}^{\cdot} < 2$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (t^* - t_{max}^{\cdot} \cdot x) \quad \text{per } t_{max}^{\cdot} \geq 2$$

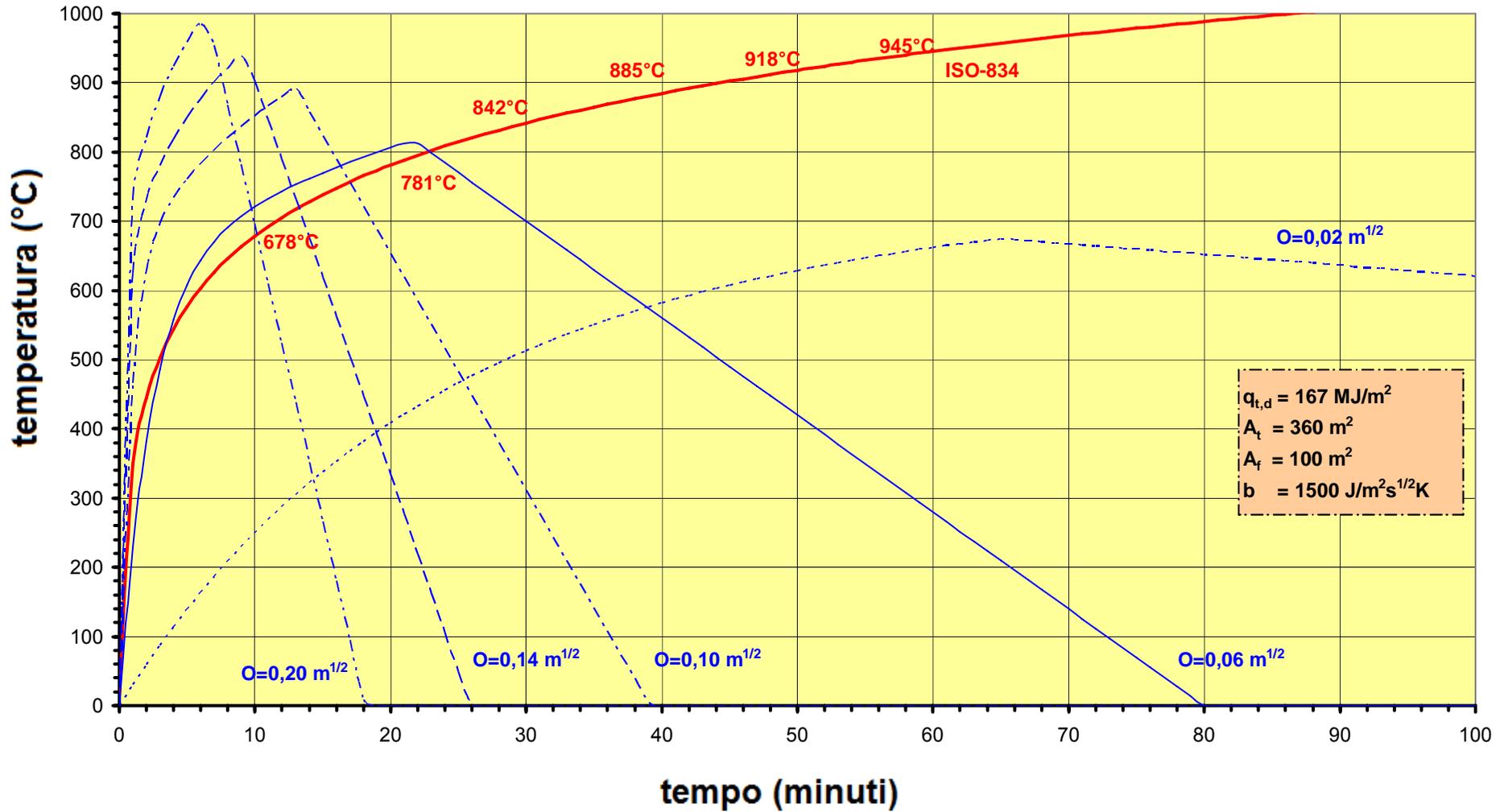
dove:

$$t^* = t \cdot \Gamma$$

$$t_{max}^{\cdot} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) \cdot \Gamma$$

$$x = 1,0 \text{ se } t_{max} > t_{lim}, \text{ oppure } x = t_{lim} \cdot \Gamma / t_{max}^{\cdot} \quad \text{se } t_{max} = t_{lim}$$

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati



Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

CURVE PARAMETRICHE

Sebbene le curve parametriche rappresentino una evoluzione delle curve nominali d'incendio, risultano comunque complesse e data la loro natura empirica, non garantiscono l'estendibilità dei risultati al di fuori dei limiti delle campagne sperimentali alle quali sono riferiti.

Ciò comporta che la loro applicabilità deve essere scelta con molta attenzione, tenendo sempre presente che il livello di descrizione del fenomeno naturale è grossolano e mirato alla definizione dei profili di temperatura nelle fasi post-flashover.

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

Azioni termiche su elementi esterni

Il metodo consente di determinare:

- la massima temperatura di un compartimento antincendio,
- la dimensione e le temperature delle fiamme fuoriuscenti dalle aperture,
- i parametri di irraggiamento e convezione.

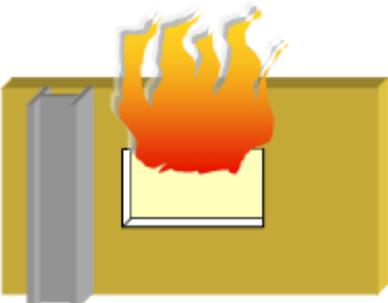
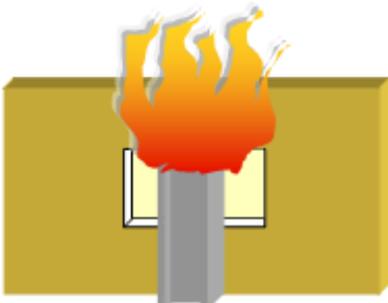
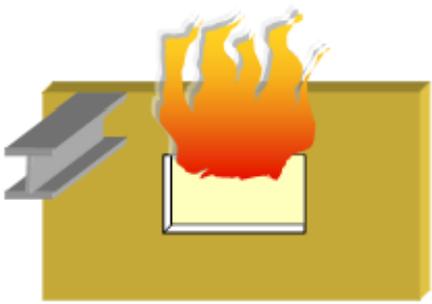
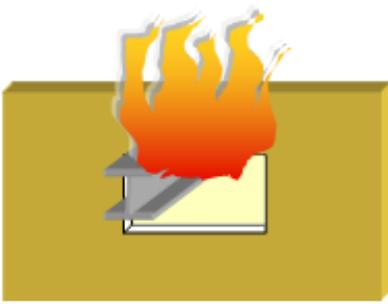
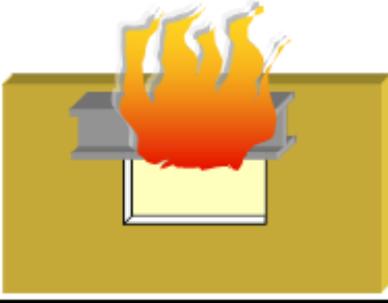
Il metodo assume condizioni stazionarie dei vari parametri, ed è applicabile solo per carichi d'incendio $q_{f,d}$ maggiori di 200 MJ/m^2 .

Il metodo tiene conto di:

- geometria delle finestre
 - vento
 - ventilazione naturale e forzata
 - fattori di configurazione
 - carico di incendio $q_{f,d}$
-

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

Azioni termiche su elementi esterni

	Elementi non avvolti dalle fiamme	Elementi avvolti dalle fiamme
COLONNE	 A diagram showing a grey vertical column on the left side of a yellow wall. A fire is burning in a window opening to the right of the column. The flames are contained within the window and do not touch the column.	 A diagram showing a grey vertical column in the center of a yellow wall. A fire is burning in a window opening behind the column. The flames are wrapped around the column.
TRAVI	 A diagram showing a grey horizontal beam on the left side of a yellow wall. A fire is burning in a window opening to the right of the beam. The flames are contained within the window and do not touch the beam.	 A diagram showing a grey horizontal beam in the center of a yellow wall. A fire is burning in a window opening behind the beam. The flames are wrapped around the beam.
	 A diagram showing a grey horizontal beam on top of a yellow wall. A fire is burning in a window opening below the beam. The flames are contained within the window and do not touch the beam.	 A diagram showing a grey horizontal beam on top of a yellow wall. A fire is burning in a window opening below the beam. The flames are wrapped around the beam.

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

Incendi localizzati - *Fiamma non impattante il soffitto*

Lo sviluppo della fiamma L_f di un incendio localizzato è data da:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5} \quad [\text{m}]$$

Quando la fiamma non impatta sul soffitto del compartimento ($L_f < H$), o nel caso di incendio all'aria aperta, la **temperatura** $\theta(z)$ nel pennacchio lungo l'asse verticale di simmetria è fornita dalla relazione:

$$\theta(z) = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad [^\circ\text{C}]$$

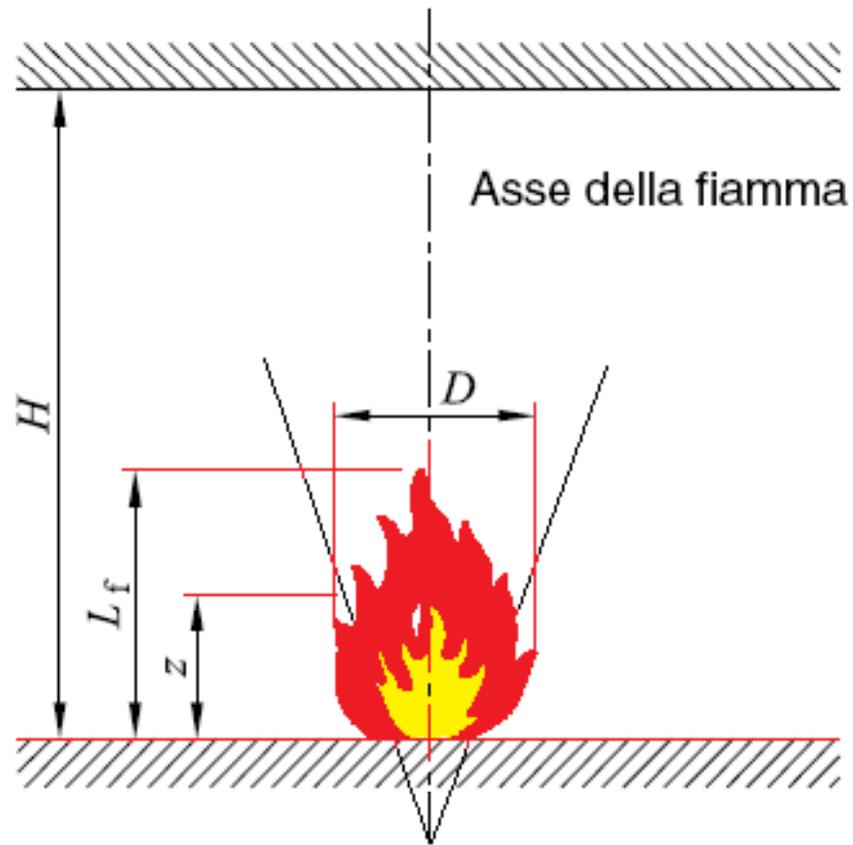
con:

D	diametro dell'incendio [m]
Q	velocità di rilascio di calore [W] dell'incendio
Q_c	parte convettiva del rilascio di calore [W], con $Q_c = 0,8 Q$ per definizione;
z	altezza [m] lungo l'asse della fiamma
H	distanza [m] tra la sorgente della fiamma e il soffitto
z_0	origine virtuale dell'asse della fiamma:

$$z_0 = 1,02 D + 0,00524 Q^{2/5} \quad [\text{m}]$$

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

Incendi localizzati - *Fiamma non impattante il soffitto*



Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

Incendi localizzati – *Fiamma impattante il soffitto*

- Il diametro del fuoco è limitato a $D \leq 10 \text{ m}$;
- La velocità di rilascio di calore del fuoco è limitata a $Q \leq 50 \text{ MW}$.

Il flusso termico h' [W/m^2] ricevuto dalla superficie unitaria del soffitto esposta alla fiamma, è:

$$\begin{array}{ll} h' = 100.000 & \text{se } y \leq 0,30 \\ h' = \text{da } 136.300 \text{ a } 121.000 y & \text{se } 0,30 < y < 1,0 \\ h' = 15.000 y^{-3,7} & \text{se } y \geq 1,0 \end{array}$$

con:

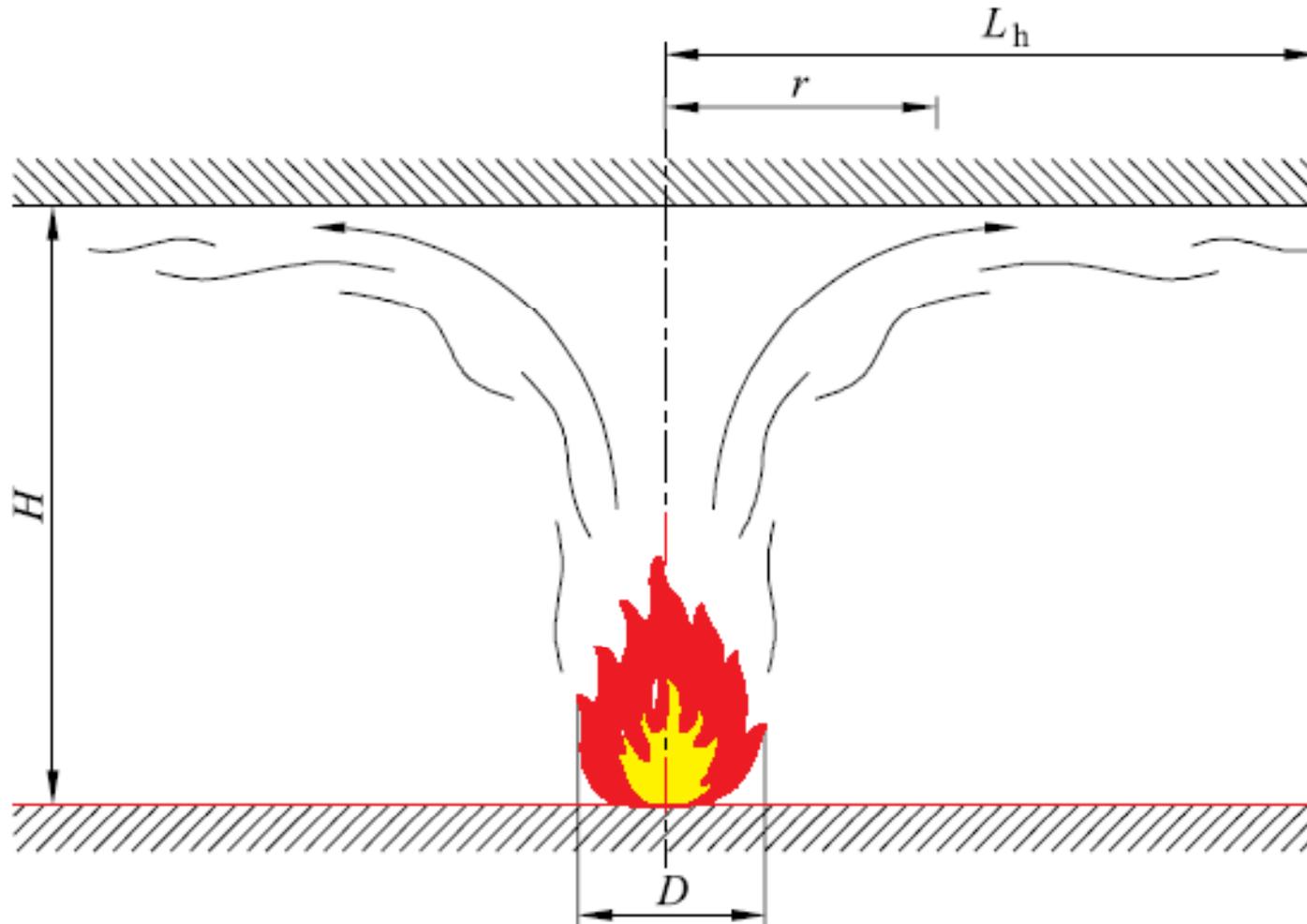
$$y = (r+H+z')/(L_h+H+z')$$

r distanza orizzontale [m] tra l'asse verticale dell'incendio e il punto appartenente al soffitto nel quale viene calcolato il flusso di calore

H distanza [m] tra la sorgente dell'incendio e il soffitto

Curve d'incendio naturali – Modelli semplificati

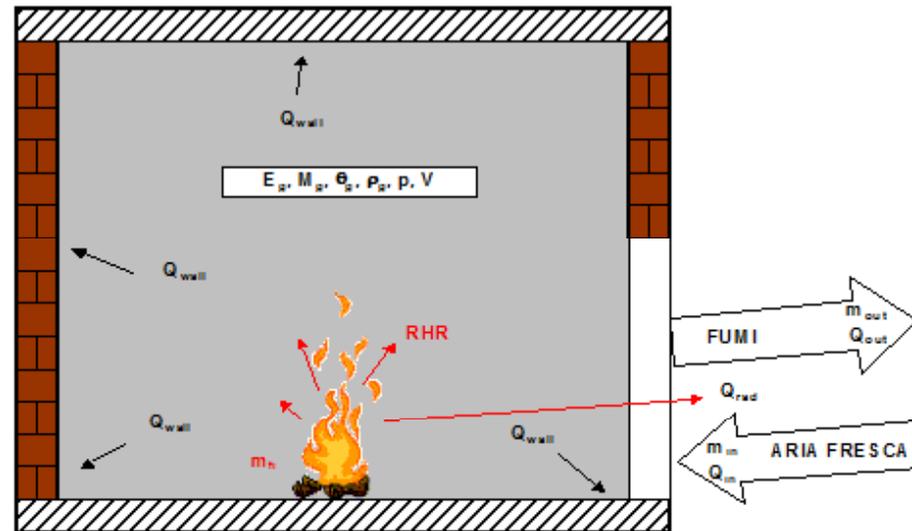
Incendi localizzati – *Fiamma impattante il soffitto*



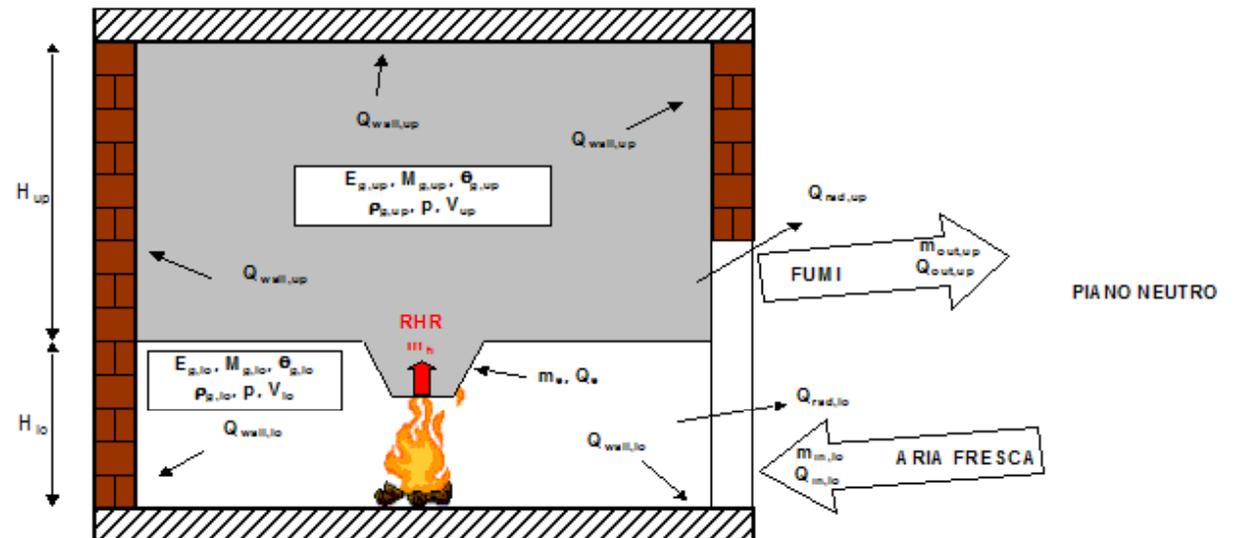
Curve d'incendio naturali – Modelli avanzati

Modello ad una zona

Nel compartimento si assumono valori omogenei di temperatura, massa, pressione e energia interna del gas.



Modello ad due zone



Azioni sulle strutture



AZIONI SULLE STRUTTURE

Le azioni agenti sulle strutture sottoposte ad incendio sono di duplice natura:

- meccanica,
- termica.

La costruzione deve essere in grado di portare i carichi agenti per un tempo minimo prestabilito facendo fronte al decadimento della proprietà meccaniche dei materiali di cui essa è costituita per effetto dell'incremento di temperatura.

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni termiche

Le azioni termiche sono determinate dal flusso termico netto $\dot{h}_{net,d}$ [W/m²] sulla superficie dell'elemento:

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,conv} + \dot{h}_{net,rad}$$

con:

$$\dot{h}_{net,conv} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2]$$

α_c coefficiente di trasferimento di calore per convezione [W/m²K];
 θ_g temperatura del gas in vicinanza dell'elemento esposto al fuoco [°C];
 θ_m temperatura superficiale dell'elemento [°C].

$\alpha_c = 4$ [W/m²K] sulla faccia non esposta di elementi di separazione il flusso
 $\alpha_c = 9$ [W/m²K] quando si considerano compresi in esso gli effetti per irraggiamento.

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni termiche

con:

$$\dot{h}_{net,rad} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2]$$

- Φ fattore di configurazione;
- ε_m emissività superficiale dell'elemento;
- ε_f emissività delle fiamme;
- σ costante di Stephan Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- θ_r temperatura effettiva di irraggiamento della zona incendiata [$^{\circ}\text{C}$];
- θ_m temperatura superficiale dell'elemento [$^{\circ}\text{C}$].

$\varepsilon_m = 0,8$ se non precisato

$\varepsilon_f = 1,0$ in generale

$\Phi = 1,0$ se non precisato (un valore inferiore è consentito per includere nell'analisi effetti dovuti a schermatura o posizione)

$\theta_r = \theta_g$ nel caso di elementi completamente avvolti dalle fiamme

θ_g è definita dalla curva tempo-temperatura utilizzata

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Le azioni meccaniche derivano dalla presenza dei carichi che durante l'incendio sollecitano le strutture.

Esse sono di molteplice natura:

- **G** carichi permanenti
- **Q** carichi variabili
- **A** azioni indirette dovute all'esposizione all'incendio

Di ognuna di dette azioni deve essere determinato:

- il valore caratteristico (k)
 - il coefficiente parziale di sicurezza (γ) per le azioni permanenti
 - i coefficienti di combinazione ψ delle azioni variabili.
-

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Permanenti (G):

- (G1) peso proprio di tutti gli elementi strutturali;
peso proprio del terreno, quando pertinente;
forze indotte dal terreno;
forze risultanti dalla pressione dell'acqua.
 - (G2) peso proprio di tutti gli elementi non strutturali
spostamenti e deformazioni imposti.
 - (P) pretensione e precompressione;
ritiro e viscosità;
spostamenti differenziali.
-

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Variabili (Q):

- *di lunga durata:*
 - peso di oggetti collocati sulla struttura,
 - carichi di esercizio di lunga durata.

- *di breve durata:*
 - vento, neve, sisma (da non considerare in caso d'incendio)
 - variazioni termiche ambientali,
 - azioni variabili dell'acqua,
 - carichi di esercizio di breve durata.

Tabella 3.1.II – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	≥ 6,00 —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 — —	1,00 — —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Variabili (Q):

Q_{k1} è l'azione variabile dominante, Q_{k2} , Q_{k3} , ... sono le azioni variabili che possono agire contemporaneamente a quella dominante.

Le azioni variabili Q_{kj} vengono combinate con i coefficienti di combinazione ψ_{0j} , ψ_{1j} e ψ_{2j} :

- valore **quasi permanente** $\psi_{2j} \times Q_{kj}$
- valore **frequente** $\psi_{1j} \times Q_{kj}$
- valore **raro** $\psi_{0j} \times Q_{kj}$

Categoria	Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
A	Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
B	Uffici	0,7	0,5	0,3
C	Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
D	Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
F	Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
G	Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
H	Coperture	0,0	0,0	0,0
-	Vento	0,6	0,2	0,0
-	Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
-	Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
-	Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

c) Eccezionali (A) con carattere di estrema rarità:

- **incendi** (*per incendio, si intende la combustione autoalimentata ed incontrollata di materiali combustibili presenti in un compartimento*);
- esplosioni;
- urti e impatti.

d) Sismiche (E)

Non considerate in caso d'incendio

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

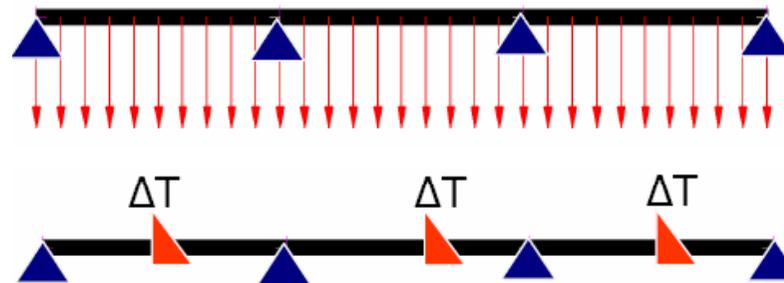
Azioni indirette dovute alle deformazioni termiche

Per le azioni indirette dovrebbero essere considerate le seguenti situazioni:

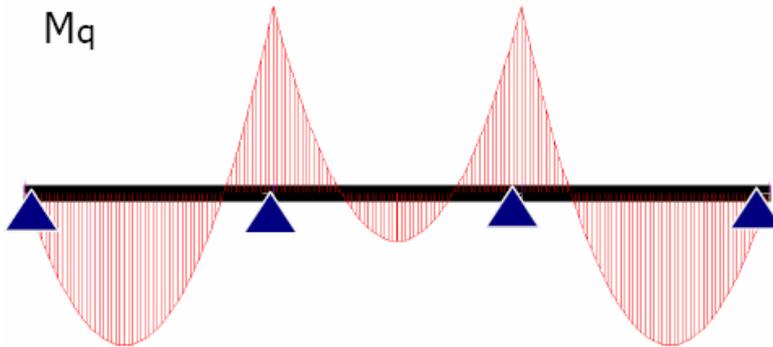
- espansione termica contrastata degli elementi stessi, per esempio colonne di un edificio multi piano a struttura intelaiata con pareti molto rigide;
 - distribuzione dell'espansione termica all'interno di elementi staticamente indeterminati, per esempio solette continue;
 - gradienti termici all'interno di sezioni trasversali che danno luogo a tensioni di coazione;
 - espansione termica di elementi adiacenti, per esempio lo spostamento del nodo di un pilastro a seguito dell'espansione della soletta di solaio;
 - espansione termica di elementi che sollecitano altri elementi posizionati fuori del compartimento antincendio.
-

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

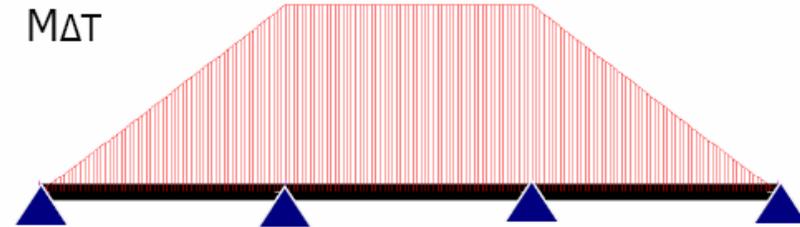
q = carico uniformemente distribuito



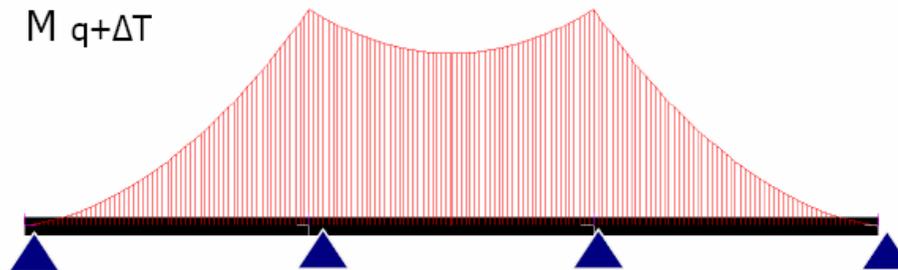
M_q



$M_{\Delta T}$



$M_{q+\Delta T}$



AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

I valori di progetto delle azioni indirette dovute all'incendio $A_{ind,d}$ devono essere determinati sulla base dei valori di progetto delle proprietà termiche e meccaniche dei materiali.

Non occorre considerare le azioni indirette causate da elementi adiacenti quando i requisiti di sicurezza in caso di incendio si riferiscono ad elementi in condizioni di incendio normalizzato.

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

elementi strutturali singoli

le condizioni di vincolo vengono fissate nella configurazione iniziale e ci si limita a considerare l'effetto dei gradienti termici



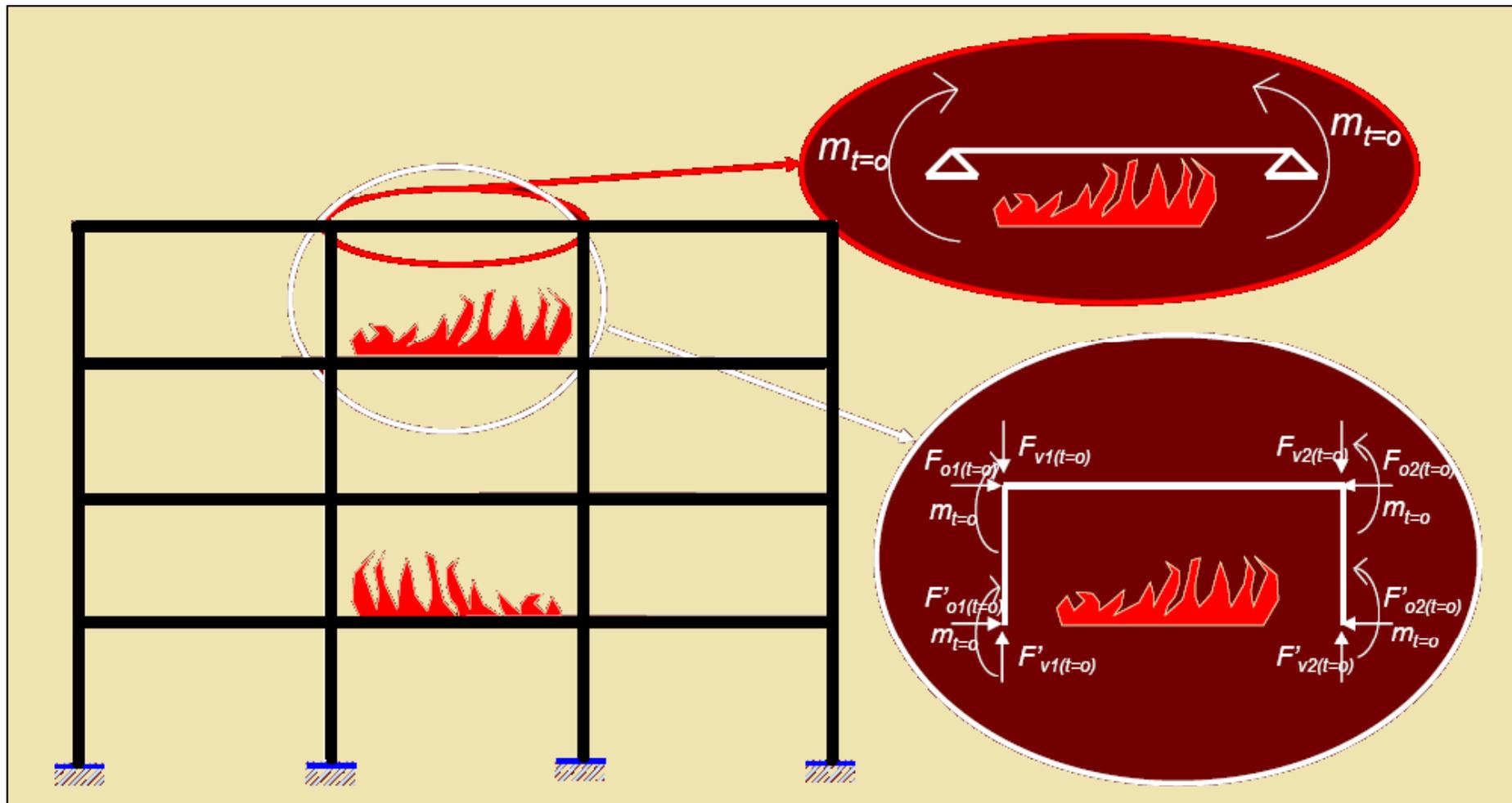
parti significative della struttura (*sottostruttura*)

le condizioni di vincolo vengono fissate nella configurazione iniziale ma le azioni indirette possono svilupparsi tra gli elementi della sottostruttura.

l'intera struttura

vengono prese in considerazione tutte le azioni indirette che si sviluppano durante l'incendio.

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche



AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

La combinazione eccezionale, impiegata per lo stato limite di esercizio con combinazione quasi-permanente, è:

$$F_{fi,d} = \sum \gamma_{GA} G_{k,i} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + \sum A_{d,i} (t)$$

dove:

- $G_{k,i}$ valori caratteristici delle azioni permanenti;
- $Q_{k,1}$ valore caratteristico dell'azione variabile considerata come principale;
- $Q_{k,i}$ valori caratteristici delle altre azioni variabili;
- $A_{d,i} (t)$ valori di progetto delle azioni derivanti dall'esposizione all'incendio;
- γ_{GA} coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti in situazioni eccezionali da porsi uguale a $\gamma_{GA} = 1$;
- $\psi_{1,1}$ coefficiente di combinazione dell'azione variabile considerata principale;
- $\psi_{2,i}$ coefficiente di combinazione dell'azione variabile considerata secondaria.

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

*Esempio: combinazioni di carico per un edificio adibito a uffici
(non aperti al pubblico e senza azioni dovute a traffico e precompressione)*

Usando le combinazioni frequenti e i coefficienti di combinazione $\psi_{1,i}$ e $\psi_{2,i}$ delle Norme tecniche per le costruzioni:

Il sovraccarico è l'azione variabile principale:

$$F_{fi,d} = \text{permanente} + \mathbf{0.5} \times \text{sovraccarico} + \mathbf{0.1} \times \text{neve} + \mathbf{0} \times \text{vento}$$

la neve è l'azione variabile principale:

$$F_{fi,d} = \text{permanente} + \mathbf{0.3} \times \text{neve} + \mathbf{0.3} \times \text{sovraccarico} + \mathbf{0} \times \text{vento}$$

il vento è l'azione variabile principale:

$$F_{fi,d} = \text{permanente} + \mathbf{0.2} \times \text{vento} + \mathbf{0.3} \times \text{sovraccarico} + \mathbf{0.1} \times \text{neve}$$

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Regole semplificate

In caso di analisi su **parti di strutture o su singole membrature**, la valutazione degli effetti $E_{fi,d}$ delle azioni di progetto in condizioni di incendio $F_{fi,d}$ può essere ricavata in via approssimata mediante:

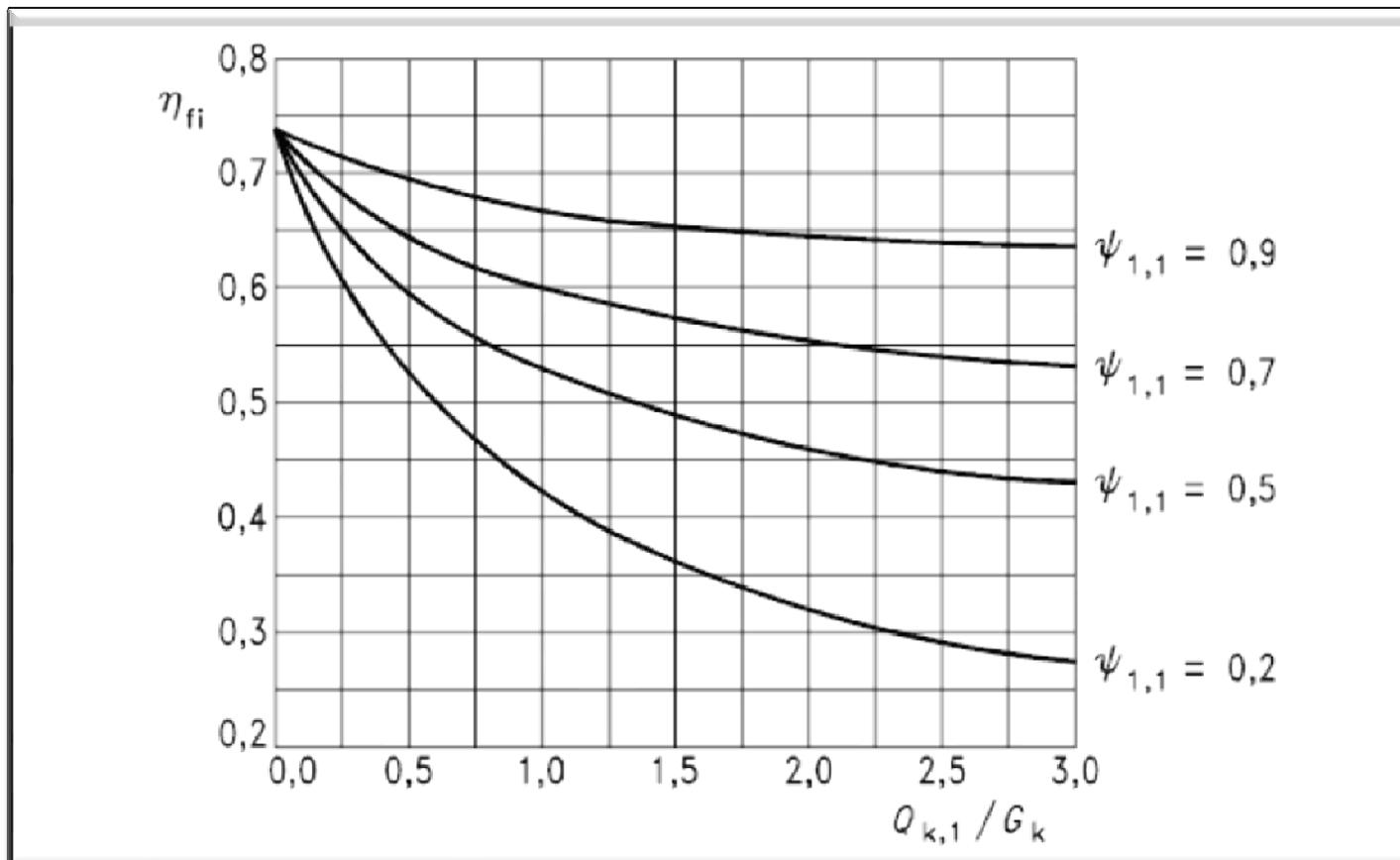
$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

$$\eta_{fi} = (\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \xi) / (\gamma_G + \gamma_Q \xi) \quad ; \quad \xi = Q_{k,1} / G_k \quad (0,5 \div 0,7)$$

E_d	effetto delle azioni di calcolo allo stato limite ultimo utilizzando la combinazione fondamentale
γ_G	coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti a temperatura ambiente = 1,4
γ_Q	coefficiente parziale di sicurezza per le azioni variabili a temperatura ambiente = 1,5
γ_{GA}	coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti a temperatura elevata = 1,0

AZIONI SULLE STRUTTURE – Azioni meccaniche

Variazione del fattore di riduzione η_{fi} con il rapporto $Q_{k,1}/G_k$



VERIFICHE

La verifica di resistenza può essere condotta:

nel dominio del tempo:

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

nel dominio delle resistenze:

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

nel dominio delle temperature:

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

dove:

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

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

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

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

θ_d valore di progetto della temperatura del materiale;

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

EUROCODICE 3 – Parte 1-2

STRUTTURE DI ACCIAIO



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

La determinazione della resistenza al fuoco di elementi strutturali di acciaio è limitata alla valutazione del requisito R in condizioni d'incendio.

I modelli di calcolo semplificati simulano le seguenti fasi:

- 1. riscaldamento di un elemento di acciaio**, con o senza protezione, esposto all'azione termica di un incendio di riferimento;
- 2. decadimento delle caratteristiche meccaniche** dell'acciaio associate al campo di temperatura raggiunto dopo un tempo t di esposizione;
- 3. verifica della stabilità dell'elemento** di caratteristiche meccaniche degradate, sottoposto alle azioni di progetto.

L'evoluzione delle temperature è disgiunta dal decadimento meccanico conseguente.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Classificazione delle sezioni

La classe di un profilato dipende:

- dalla **geometria** del profilo, attraverso la snellezza (*rapporto lato/spessore*) delle piastre che lo compongono e che si trovano in zona compressa,
 - dal tipo di **sollecitazione** ed in particolare dall'estensione della parte di sezione sollecitata in compressione (*dipende dalla condizione di carico*)
 - dalle proprietà del **materiale**: a parità di modulo elastico, un aumento di resistenza rende più probabili fenomeni di instabilità prima di raggiungere lo snervamento
-

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Classificazione delle sezioni (parti compresse) in base alla duttilità rotazionale ed alla capacità di sviluppare le resistenze plastiche:

<p>M-ϕ diagram showing linear elastic behavior up to yield moment M_y, followed by a horizontal plastic plateau up to ultimate moment M_u. A dashed line indicates local instability occurring after yielding.</p>	<p>Elastic moment on full section</p>	<p>Sufficient</p>	<p>Classe 1 Capacità di formazione di una cerniera plastica con elevata duttilità rotazionale</p>
<p>M-ϕ diagram showing linear elastic behavior up to yield moment M_y, followed by a horizontal plastic plateau up to ultimate moment M_u. A dashed line indicates local instability occurring at the yield moment M_y.</p>	<p>Elastic moment on full section</p>	<p>Limited</p>	<p>Classe 2 Capacità di formazione di una cerniera plastica con limitata duttilità rotazionale dovuta all'instabilità locale</p>
<p>M-ϕ diagram showing linear elastic behavior up to yield moment M_y, followed by a linear elastic region up to ultimate moment M_u. A dashed line indicates local instability occurring at the yield moment M_y.</p>	<p>Elastic moment on full section</p>	<p>None</p>	<p>Classe 3 Incapacità di formazione di una cerniera plastica a causa dell'instabilità locale</p>
<p>M-ϕ diagram showing linear elastic behavior up to yield moment M_y, followed by a linear elastic region up to ultimate moment M_u. A dashed line indicates local instability occurring at the yield moment M_y.</p>	<p>Elastic moment on effective section</p>	<p>None</p>	<p>Classe 4 L'instabilità locale sopraggiunge prima dello snervamento</p>

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Classificazione delle sezioni

Il parametro adimensionale, derivato da considerazioni di instabilità di lastre piane, che governa la classificazione è: $\sqrt{E/f_y}$

A temperatura ambiente: $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$

In caso di incendio, il modulo elastico non è più costante: $\varepsilon = \left[(235/f_y) (k_{E,\theta} / k_{y,\theta}) \right]^{0,5}$

Nell'Eurocodice viene utilizzata l'espressione approssimata:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y}$$

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

che permette di fissare la classe del profilo all'inizio dell'analisi sulla base dello stato di sollecitazione iniziale (tempo $t = 0$).

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Classificazione delle sezioni

Parti interne compresse

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

Flange esterne

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

La classe di una sezione è data dalla classe più alta tra i pannelli che la compongono

SAGOMARI DI PROFILI COMMERCIALI IPE-HE

- G** massa per unità di lunghezza
- h** altezza della sezione
- b** larghezza del profilato
- t_w** spessore dell'anima
- t_f** spessore della flangia
- r** raggio dell'angolo di raccordo
- A** area della sezione
- h_i** altezza interna tra le ali
- d** altezza del tratto verticale dell'anima
- ∅** diametro massimo del bullone
- p_{min}** distanza minima ammissibile per bullonatura
- p_{max}** distanza massima ammissibile per bullonatura
- A_L** superficie verniciabile per unità di lunghezza

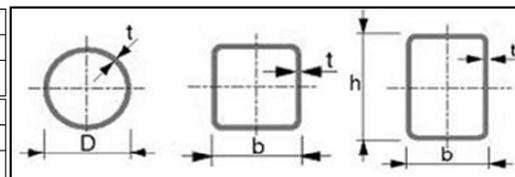
- A_G** superficie verniciabile per unità di massa
- I_y** momento d'inerzia asse y
- W_{el.y}** modulo di resistenza elastico asse y
- W_{pl.y}** modulo di resistenza a rottura asse y
- i_y** raggio d'inerzia asse y
- A_{vz}** carico di torsione
- I_z** momento d'inerzia asse z
- W_{el.z}** modulo di resistenza elastico asse z
- W_{pl.z}** modulo di resistenza a rottura asse z
- i_z** raggio d'inerzia asse z
- s_s** lunghezza del supporto rigido
- I_t** momento d'inerzia alla torsione
- I_w** momento d'inerzia alla torsione riferito al centro di torsione

Profili IPE		Profili IPN		Profili HE/HL		Profili HD		Profili HP																				
Profili IPE		G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	p _{min}	p _{max}	A _L	A _G	I _y	W _{el.y}	W _{pl.y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{el.z}	W _{pl.z}	i _z	s _s	I _t	I _w × 10 ⁻³	
IPE A 360		[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ² /m]	[m ² /t]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]	
		50,2	357,6	170	6,6	11,5	18	63,96	334,6	298,6	M22	86	88	1,351	26,91	14520	811,8	906,8	15,06	29,76	944,3	111,1	171,9	3,84	50,69	26,51	282	
Profili IPN		G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	p _{min}	p _{max}	A _L	A _G	I _y	W _{el.y}	W _{pl.y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{el.z}	W _{pl.z}	i _z	s _s	I _t	I _w × 10 ⁻³	
IPN 450		[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ² /m]	[m ² /t]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]
		115	450	170	16,2	24,3	16,2	9,7	147	363,6	M16	92	106	1,48	12,83	45850	2040	2400	17,7	77,79	1730	203	345	3,43	88,9	267	791	
Profili HE/HL		G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	p _{min}	p _{max}	A _L	A _G	I _y	W _{el.y}	W _{pl.y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{el.z}	W _{pl.z}	i _z	s _s	I _t	I _w × 10 ⁻³	
HE 140 A		[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ² /m]	[m ² /t]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]
		24,7	133	140	5,5	8,5	12	31,42	116	92	M16	64	76	0,794	32,21	1033	155,4	173,5	5,73	10,12	389,3	55,62	84,85	3,52	36,56	8,13	15,06	
Profili HD		G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	p _{min}	p _{max}	A _L	A _G	I _y	W _{el.y}	W _{pl.y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{el.z}	W _{pl.z}	i _z	s _s	I _t	I _w × 10 ⁻³	
HD 400 x 592		[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ² /m]	[m ² /t]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]
		592	465	421	45	72,3	15	754,9	320,4	290,4	M27	134	316	2,5	4,22	250200	10760	13140	18,2	200,3	90170	4284	6574	10,93	207,2	11560	34670	
Profili HP		G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	p _{min}	p _{max}	A _L	A _G	I _y	W _{el.y}	W _{pl.y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _{el.z}	W _{pl.z}	i _z	s _s	I _t	I _w × 10 ⁻³	
HP 320 x 103		[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m ² /m]	[m ² /t]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ³]	[cm ³]	[cm]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁶]
		103	307	306	14	14	27	131	279	225	M27	124	204	1,76	17,15	22050	1437	1611	12,97	54,84	6704	438,2	677,3	7,15	73,6	142,3	1435	

SAGOMARI DI PROFILI COMMERCIALI CAVI

- D** diametro esterno del profilo circolare
h altezza del profilo
b larghezza del profilo
t spessore
M massa per unità di lunghezza
A area
I momento d'inerzia assi principali
i raggio d'inerzia
W_{el} modulo di resistenza elastico
W_{pl} modulo di resistenza a rottura
I_t momento d'inerzia di torsione
C_t costante di torsione
Sup. est. Superficie esterna a metro lineare
L per ton Lunghezza per tonnellata

Circolari a caldo	D	t	M	A	I	i	W _{el}	W _{pl}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton					
	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]					
D = 21,3	21,3	2,6	1,2	1,53	0,681	0,668	0,639	0,915	1,36	1,28	0,067	834					
Circolari a freddo	D	t	M	A	I	i	W _{el}	W _{pl}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton					
	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]					
D = 1219	1219	20	591	753	1354155	42,4	22217	28755	2708309	44435	3,83	1,69					
Quadrati a caldo	b	t	M	A	I	i	W _{el}	W _{pl}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton					
	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]					
b = 350	350	12,5	131	167	31527	13,7	1802	2106	48934	2654	1,37	7,62					
Quadrati a freddo	b	t	M	A	I	i	W _{el}	W _{pl}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton					
	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]					
b = 400	400	12	141	180	44204	15,7	2210	2584	71843	3395	1,54	7,07					
Rettangolari a caldo	h	b	t	M	A	I _y	I _z	i _x	i _y	W _{el-y}	W _{el-z}	W _{pl-y}	W _{pl-z}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ⁴]	[cm]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]
h = 450	450	250	16	166	211	55666	22020	16,2	10,2	2474	1762	3069	2028	50545	2947	1,36	6,04
Rettangolari a freddo	h	b	t	M	A	I _y	I _z	i _x	i _y	W _{el-y}	W _{el-z}	W _{pl-y}	W _{pl-z}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m]	[cm ²]	[cm ⁴]	[cm ⁴]	[cm]	[cm]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]
h = 350	350	250	6,3	57	72,6	12913	7736	13,3	10,3	738	619	876	698	15291	1010	1,17	17,5



Profili cavi circolari	Profili cavi quadrati	Profili cavi rettangolari
Norme di riferimento UNI EN 10210-1-2 UNI EN 10219-1-2		

W _{pl-z}	I _t	C _t	Sup. est.	L per ton
[cm ³]	[cm ⁴]	[cm ³]	[m ² /m]	[m/t]
2028	50545	2947	1,36	6,04
698	15291	1010	1,17	17,5

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

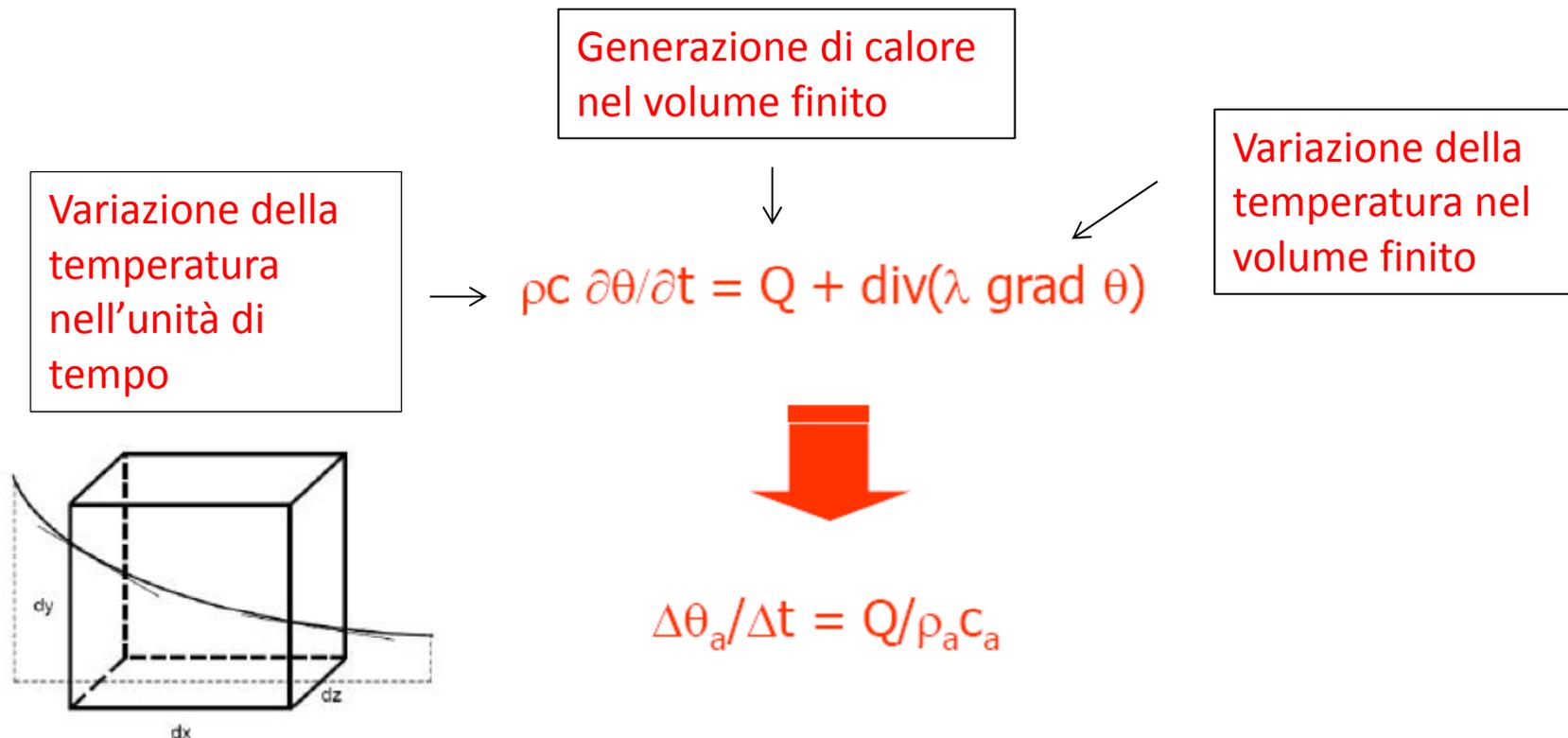
Ipotesi semplificative per elementi in acciaio

1. la sezione di acciaio assume al tempo t la massima temperatura registrata sul contorno esposto al fuoco
2. il deterioramento delle caratteristiche meccaniche è sovrastimato
3. le coazioni interne sono trascurate
4. le deformazioni e le rotazioni libere dell'elemento sono sottostimate

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Ipotesi semplificativa per elementi in acciaio $\theta_a = \theta_a(t)$



$Q = \dot{h}_{\text{net}}$ sulla superficie dell'elemento

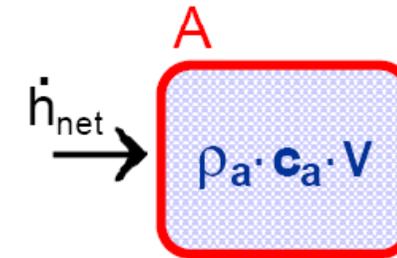
$\theta_a = \theta_0$ per $t = 0$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio non protetto sottoposto ad un carico termico determinato da una curva d'incendio

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



K_{sh} coefficiente che tiene conto delle “shadow effect”

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

A_m superficie esposta dell'elemento per unità di lunghezza

V volume dell'elemento per unità di lunghezza

c_a calore specifico dell'acciaio

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

Δt intervallo di tempo

ρ_a densità

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

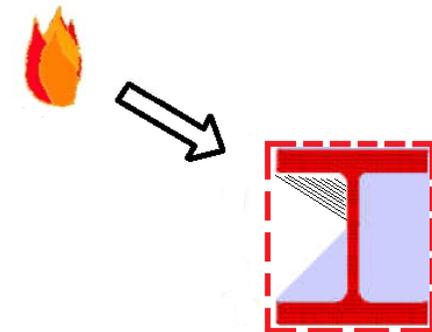
Curva di riscaldamento dell'acciaio – Il fattore ombra

k_{sh}

Coefficiente correttivo < 1 che tiene conto dell'effetto schermante della forma dei profilati investiti dal flusso termico radiante (se il profilo non è convesso la superficie esposta all'irraggiamento è inferiore).

Per sezioni convesse completamente avvolte dalle fiamme il coefficiente assume valore unitario.

Un valore unitario conduce ad analisi conservative.



$$k_{sh} = k \cdot \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_b}{\frac{A_m}{V}}$$

$K=0,9$ per sezioni a doppio T con incendi nominali

$K=1,0$ in tutti gli altri casi

Il pedice “b” sta ad indicare il valore del fattore di sezione del profilo convesso che inviluppa la sezione

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio – Il fattore di sezione

$$\frac{A_m}{V}$$

Rapporto tra superficie laterale A_m (che riceve il flusso termico) e il volume di materiale V (che accumula il calore)



$$\frac{A_m}{V} \approx \frac{p_{esp}}{A_{sez}}$$

Per elementi a sezione costante è pari al rapporto tra il perimetro esposto e l'area della sezione del profilato

L'ipotesi di uniformità della temperatura all'interno del profilato è valida per $A_m/V > 30$

Nell' Eurocodice 3 la limitazione per temperatura uniforme è $A_m/V > 10$

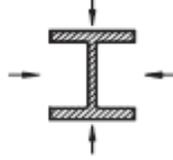
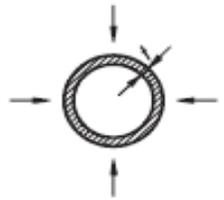
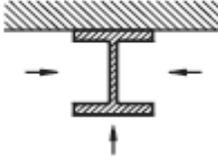
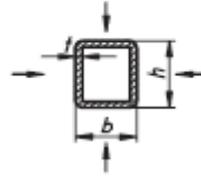
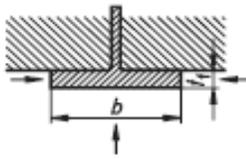
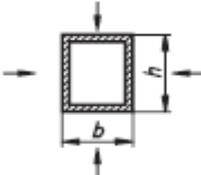
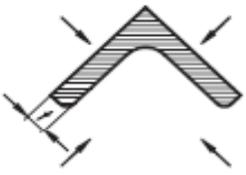
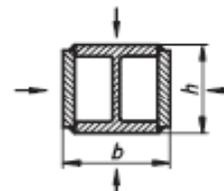
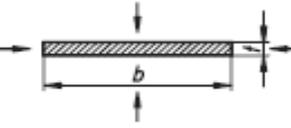
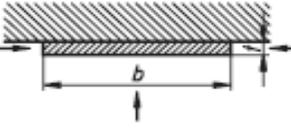
Per $A_m/V > 300$ la temperatura del profilato è praticamente uguale a quella del gas

EUROCODICE 3

Parte 1-2

Curva di riscaldamento dell'acciaio

Il fattore di sezione $\frac{A_m}{V}$

<p>Sezione aperta esposta al fuoco su tutti i lati: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perimetro}}{\text{area della sezione trasversale}}$</p> 	<p>Tubo esposto al fuoco su tutti i lati: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Sezione aperta esposta al fuoco su tre lati: $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superficie esposta al fuoco}}{\text{area della sezione trasversale}}$</p> 	<p>Sezione cava (o sezione scatolare saldata di uniforme spessore) esposta al fuoco su tutti i lati: Se $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Flangia della sezione ad I esposta al fuoco su tre lati: $A_m/V = (b + 2t_f) / (bt_f)$ Se $t \ll b$: $A_m/V = 1/t_f$</p> 	<p>Sezione scatolare saldata esposta al fuoco su tutti i lati: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{area della sezione trasversale}}$</p> 
<p>Angolare (o qualunque sezione aperta) esposto al fuoco su tutti i lati: $A_m/V = 2/t$</p> 	<p>Sezione ad I con rinforzo scatolare esposta al fuoco su tutti i lati: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{area della sezione trasversale}}$</p> 
<p>Profilo piatto esposto al fuoco su tutti i lati: $A_m/V = 2(b+t) / (bt)$ Se $t \ll b$: $A_m/V = 2/t$</p> 	<p>Profilo piatto esposto al fuoco su tre lati: $A_m/V = (b + 2t) / (bt)$ Se $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p> 

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

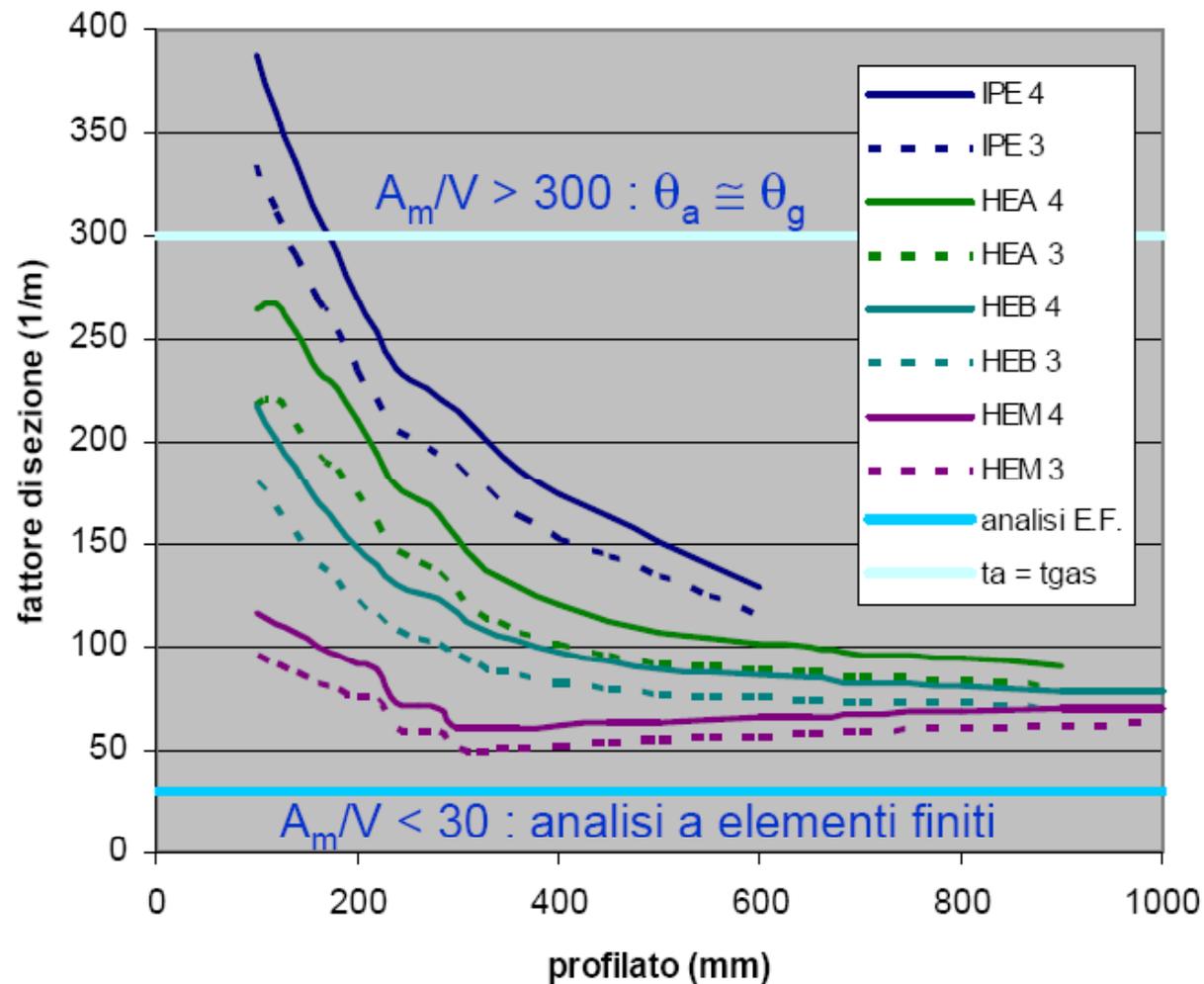
Curva di riscaldamento dell'acciaio – Il fattore di sezione $\frac{A_m}{V}$

	esposto su 4 lati			esposto su 3 lati			h	b	t _w	t _f	r	A	
	perimetro	fatt. sez $\frac{A_m}{V}$	fatt. ombra	perimetro	fatt. sez $\frac{A_m}{V}$	fatt. ombra							mm
IPE	100	400	387	0,698	345	334	0,574	100	55	4,1	5,7	7	10,32
	120	475	360	0,697	411	311	0,576	120	64	4,4	6,3	7	13,21
	140	551	335	0,696	478	291	0,577	140	73	4,7	6,9	7	16,43
	160	623	310	0,700	541	269	0,581	160	82	5	7,4	9	20,09
	180	698	291	0,699	607	253	0,582	180	91	5,3	8	9	23,95
	200	768	270	0,703	668	235	0,586	200	100	5,6	8,5	12	28,48
	220	848	254	0,701	738	221	0,584	220	110	5,9	9,2	12	33,37
	240	922	236	0,703	802	205	0,586	240	120	6,2	9,8	15	39,12
	270	1041	227	0,700	906	197	0,584	270	135	6,6	10,2	15	45,95
	300	1160	216	0,698	1010	188	0,582	300	150	7,1	10,7	15	53,81
	330	1254	200	0,703	1094	175	0,588	330	160	7,5	11,5	18	62,61
	360	1353	186	0,705	1183	163	0,592	360	170	8	12,7	18	72,73
	400	1467	174	0,712	1287	152	0,601	400	180	8,6	13,5	21	84,46
	450	1605	162	0,718	1415	143	0,611	450	190	9,4	14,6	21	98,82
	500	1744	151	0,723	1544	134	0,619	500	200	10,2	16	21	115,52
	550	1877	140	0,729	1667	124	0,628	550	210	11,1	17,2	24	134,42
600	2015	129	0,733	1795	115	0,634	600	220	12	19	24	155,98	

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio – Il fattore di sezione per IPE e HE



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio per elementi non protetti

Si ottiene integrando per passi considerando intervalli di tempo < 5 secondi:

tempo	temperatura dell'acciaio	temperatura gas nel comparto	differenza di temperatura	variazione termica acciaio
$t_1 = 0$	temper. iniziale $\theta_{a,1} = 20^\circ\text{C}$	temper. gas $\theta_{g,1}$ al centro dell'intervallo $t_{g,1} = \Delta t / 2$	$\theta_{g,1} - \theta_{a,1}$	calcolo di h_{net} e $\Delta\theta_{a,1}$ a partire da $\theta_{g,1}$ e $\theta_{a,1}$
$t_2 = t_1 + \Delta t$	$\theta_{a,2} = \theta_{a,1} + \Delta\theta_{a,1}$	temper. gas $\theta_{g,2}$ al centro dell'intervallo $t_{g,2} = t_1 + \Delta t / 2$	$\theta_{g,2} - \theta_{a,2}$	calcolo di h_{net} e $\Delta\theta_{a,2}$ a partire da $\theta_{g,2}$ e $\theta_{a,2}$

Le curve possono essere ottenute attraverso l'implementazione di un foglio di calcolo

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio per elementi non protetti

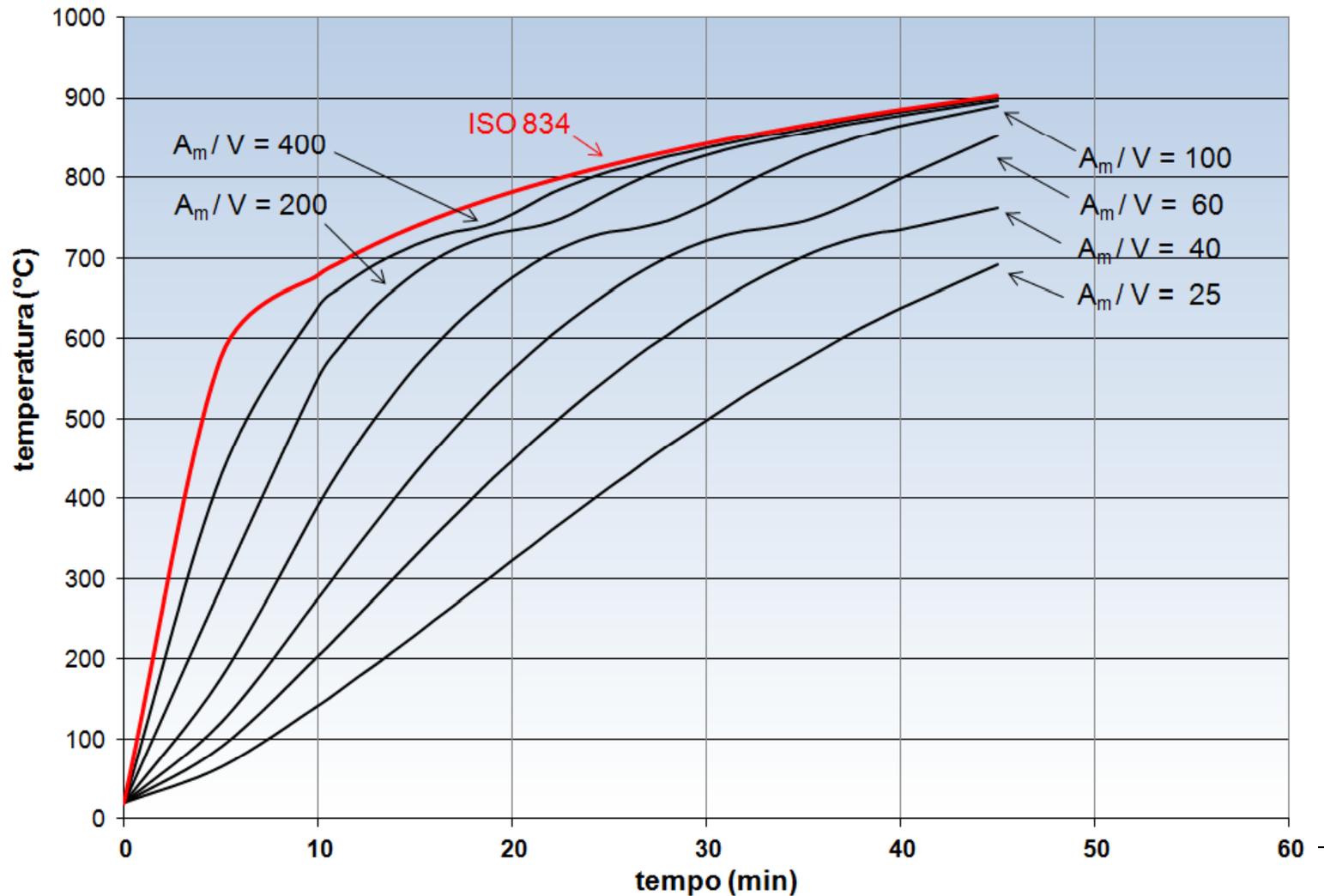
coeff. scambio termico per convezione α_c	25 W/m²°C
emissività risultante gas-elemento ε_r	0,70
fattore di sezione A_m/V	200 1/m
fattore correttivo per effetto ombra	1,0
intervallo di tempo Δt	5 secondi

passo	tempo t (s)	tempo t (min)	temp. elem. θ_a (°C)	temp. gas θ_g (°C)	h_{net} (W/m ²)	c_a (J/kg°°C)	$\Delta\theta_a$ (°C)
0	0	0,0	20,0	63,1	1296	440	0,38
1	5	0,1	20,4	123,9	3291	440	0,95
2	10	0,2	21,3	167,0	4852	441	1,40
3	15	0,3	22,7	200,4	6163	442	1,78
4	20	0,3	24,5	227,7	7305	443	2,10
5	25	0,4	26,6	250,8	8323	444	2,39
6	30	0,5	29,0	270,8	9245	446	2,64
7	35	0,6	31,6	288,5	10090	448	2,87
8	40	0,7	34,5	304,2	10871	450	3,08
9	45	0,8	37,6	318,5	11597	452	3,27
10	50	0,8	40,9	331,6	12276	454	3,45
11	55	0,9	44,3	343,6	12914	456	3,61

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio non protetto



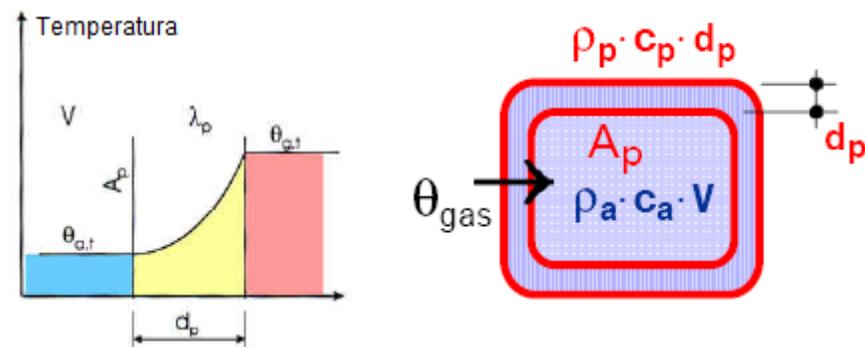
EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio protetto sottoposto ad un carico termico determinato da una curva d'incendio

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

$$\Phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot d_p < 1,5$$



Si ipotizza che la temperatura superficiale del protettivo sia uguale a quella del gas.

Le proprietà e le prestazioni dei materiali di protezione al fuoco usate nel progetto sono valutate con **le procedure di prova** esposte in ENV 13381-1, 13381-2, 13381-4.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio protetto sottoposto ad un carico termico determinato da una curva d'incendio

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

A_p superficie del materiale protettivo per unità di lunghezza

V volume dell'elemento per unità di lunghezza

c_a calore specifico dell'acciaio in funzione della temperatura

c_p calore specifico del materiale protettivo indipendente della temperatura

d_p spessore del materiale protettivo

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

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

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

λ_p conducibilità termica del materiale protettivo

Δt intervallo di tempo < 30 sec.

ρ_a densità dell'acciaio

ρ_p densità del materiale protettivo

EUROCODICE 3

Parte 1-2

Curva di riscaldamento dell'acciaio

IL FATTORE DI SEZIONE per elementi protetti A_p/V

A_p = superficie (perimetro) esposta

- rivestimento aderente:

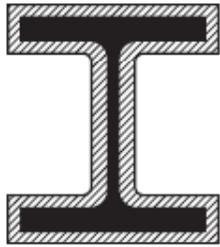
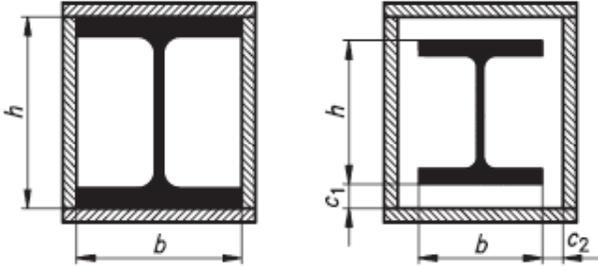
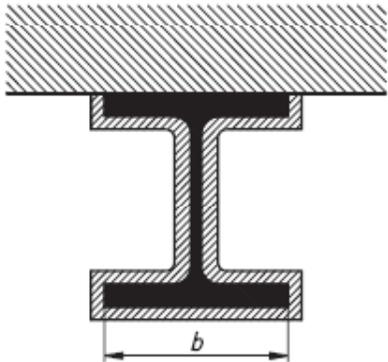
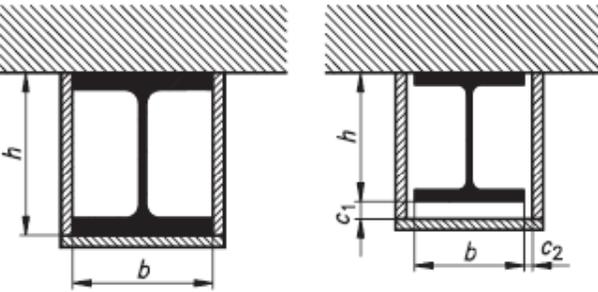
perimetro del profilato

- rivestimento scatolare:

perimetro della scatola aderente

V = volume (sezione) del profilato

si trascura lo spazio libero tra il profilato e il protettivo (che dovrebbe essere $< h/4$)

Disegno	Descrizione	Fattore di sezione (A_p/V)
	Rivestimento aderente di spessore uniforme	$\frac{\text{perimetro dell'acciaio}}{\text{area della sezione trasversale di acciaio}}$
	Rivestimento scatolare di spessore uniforme ¹⁾	$\frac{2(b+h)}{\text{area della sezione trasversale di acciaio}}$
	Rivestimento aderente di spessore uniforme, esposto al fuoco su tre lati	$\frac{\text{perimetro dell'acciaio} - b}{\text{area della sezione trasversale di acciaio}}$
	Rivestimento scatolare di spessore uniforme ¹⁾ esposto al fuoco su tre lati	$\frac{2h+b}{\text{area della sezione trasversale di acciaio}}$

1) Le dimensioni di gioco c_1 e c_2 non dovrebbero normalmente eccedere $h/4$.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio per elementi protetti

conducibilità protettivo λ_p	0,30	W/m°C	
calore specifico protettivo c_p	1.100	J/kg°C	$k_p = \lambda_p A_p / d_p V = 2.417,4 \text{ W/m}^3\text{°C}$
densità protettivo ρ_p	800	kg/m³	
spessore protettivo d_p	2,5	cm	
contenuto di umidità	0%		$t_v = 0,0 \text{ min}$
fattore di sezione A_p / V	205	1/m	
intervallo di tempo $\Delta t =$	10	s	

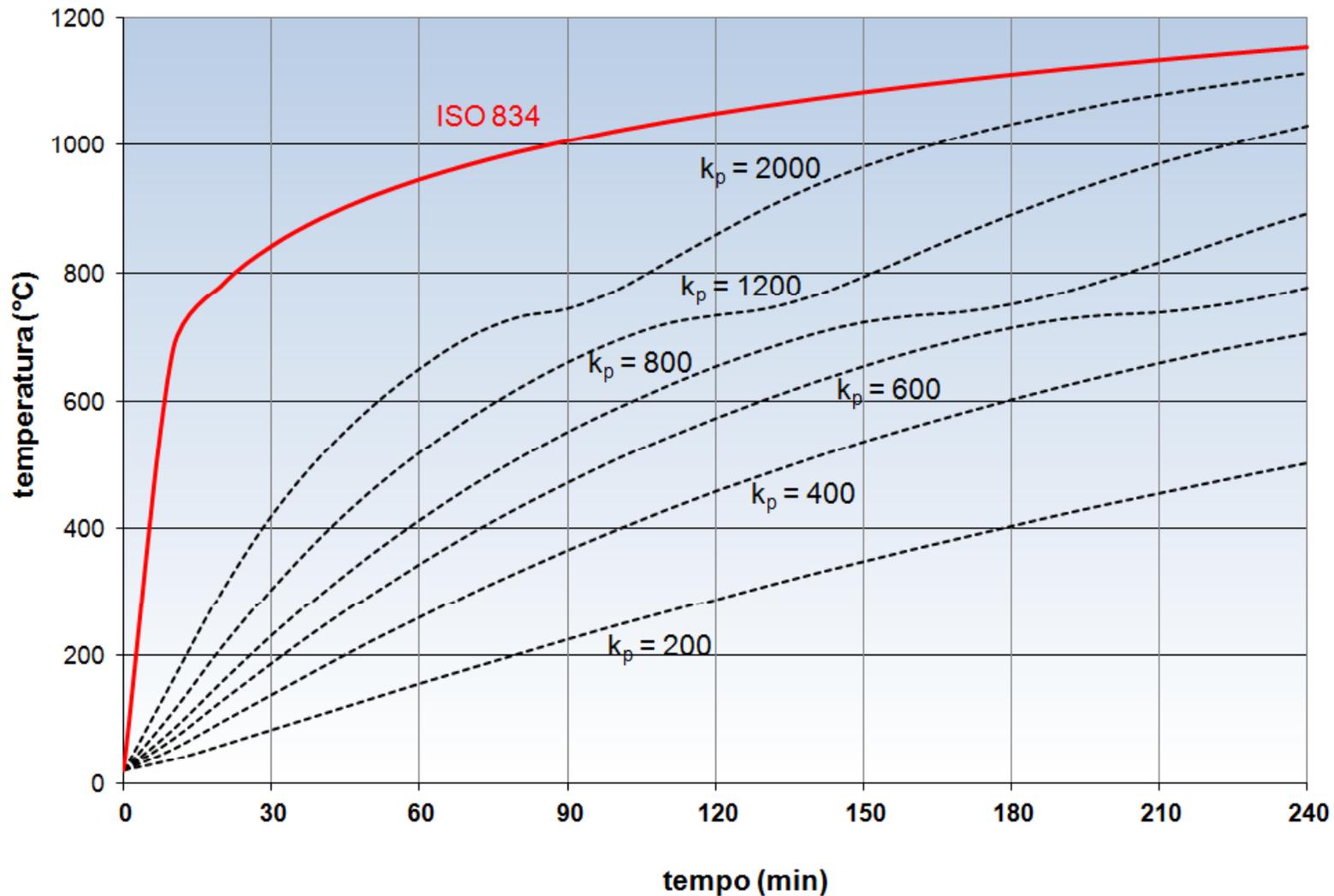
nei primi passi $\Delta\theta_a$ è negativo

passo	tempo t (s)	tempo t (min)	temp.elem θ_a (°C)	temp.gas θ_g (°C)	$\Delta\theta_g$ (°C)	c_a (J/kg°C)	Φ (adim)	$\Delta\theta_a$ (°C)
0	0	0,0	20,0	20,0	127,0	440	1,325	-17,99
1	10	0,2	20,0	147,0	67,7	440	1,325	-8,98
2	20	0,3	20,0	214,7	46,5	440	1,325	-5,64
3	30	0,5	20,0	261,1	35,4	440	1,325	-3,85
4	40	0,7	20,0	296,6	28,6	440	1,325	-2,71
5	50	0,8	20,0	325,2	24,0	440	1,325	-1,92
6	60	1,0	20,0	349,2	20,7	440	1,325	-1,33
7	70	1,2	20,0	369,9	18,2	440	1,325	-0,88
8	80	1,3	20,0	388,1	16,2	440	1,325	-0,51
9	90	1,5	20,0	404,3	14,6	440	1,325	-0,21
10	100	1,7	20,0	418,9	13,3	440	1,325	0,05

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio protetto



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio protetto

Effetto dell'umidità del protettivo – tempo di ritardo

È possibile tenere conto del contenuto d'acqua del protettivo utilizzando un valore di λ_p opportunamente modificato sulla base di idonee valutazioni sperimentali.

In alternativa è possibile valutare un tempo di ritardo nel riscaldamento dell'elemento di acciaio, dovuto al calore assorbito per la trasformazione di fase dell'acqua:

$$t_v = \frac{\rho_p \rho_p d_p^2}{5 \lambda_p}$$

ρ_p = contenuto di umidità del protettivo in%

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Curva di riscaldamento dell'acciaio protetto

Semplificazione

Si trascura il calore specifico del protettivo $c_p = 0$, ne consegue che $\Phi = 0$

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

Formalmente l'equazione è simile a quella degli elementi non protetti.
Tutto diventa funzione del parametro:

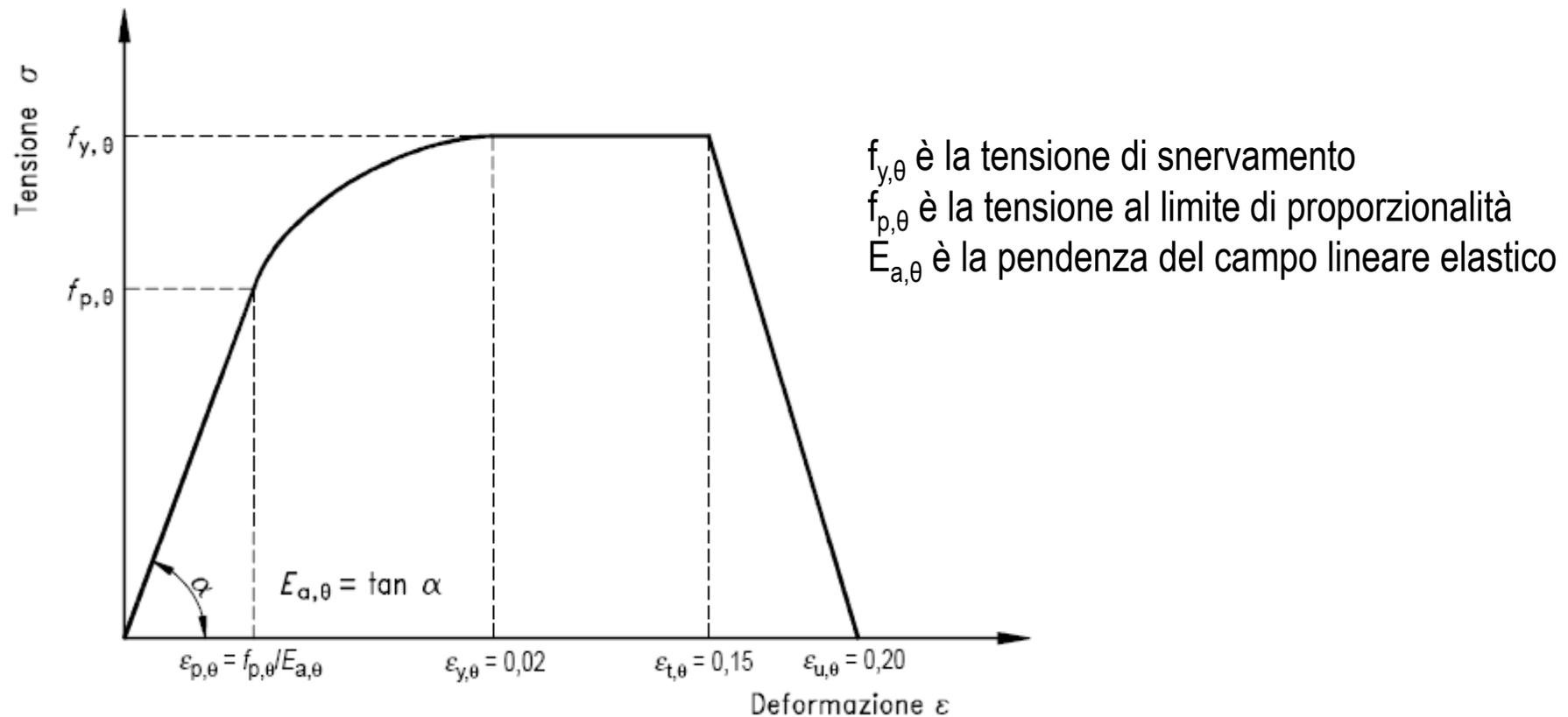
$$k_p = \frac{\lambda_p}{d_p} \frac{A_p}{V}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Proprietà meccaniche dell'acciaio ad alte temperature

Legame costitutivo



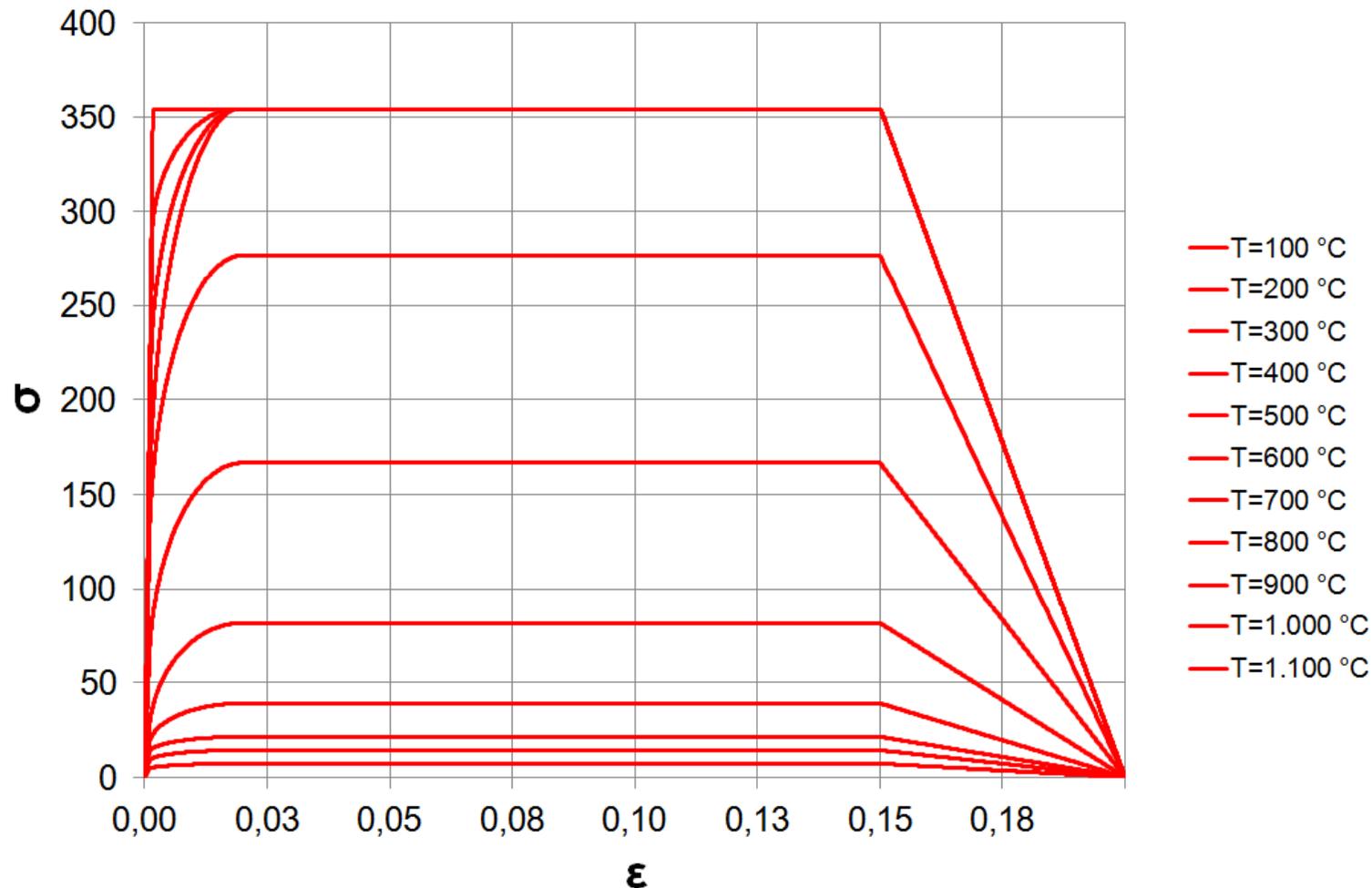
Densità ρ_a

costante con la temperatura - per acciai al carbonio e acciai inossidabili 7.850 kg/m^3

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Decadimento meccanico dell'acciaio alle alte temperature



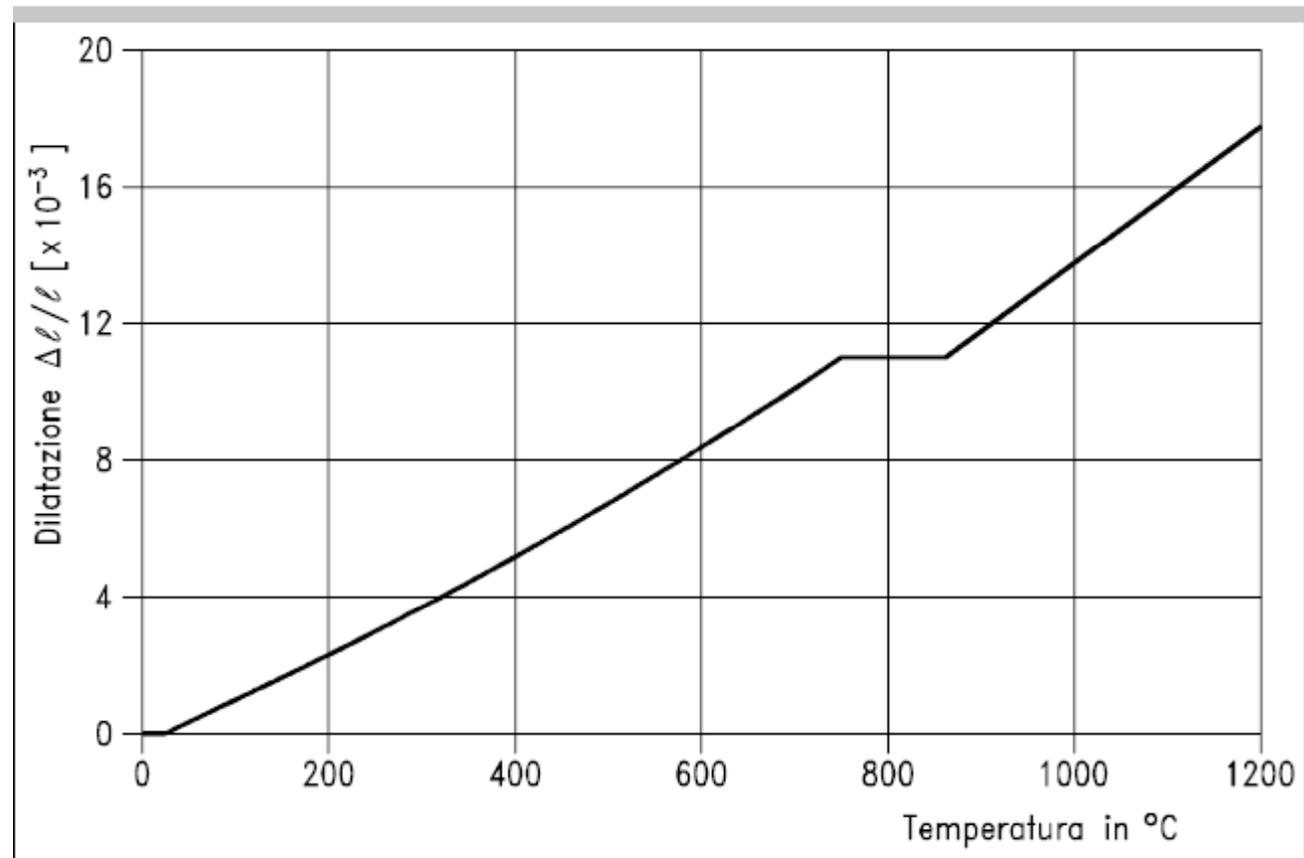
EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Proprietà termiche dell'acciaio – Dilatazione termica

Nei modelli di calcolo semplificati la relazione tra la dilatazione termica e la temperatura dell'acciaio è considerata costante:

$$\Delta l/l = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20)$$



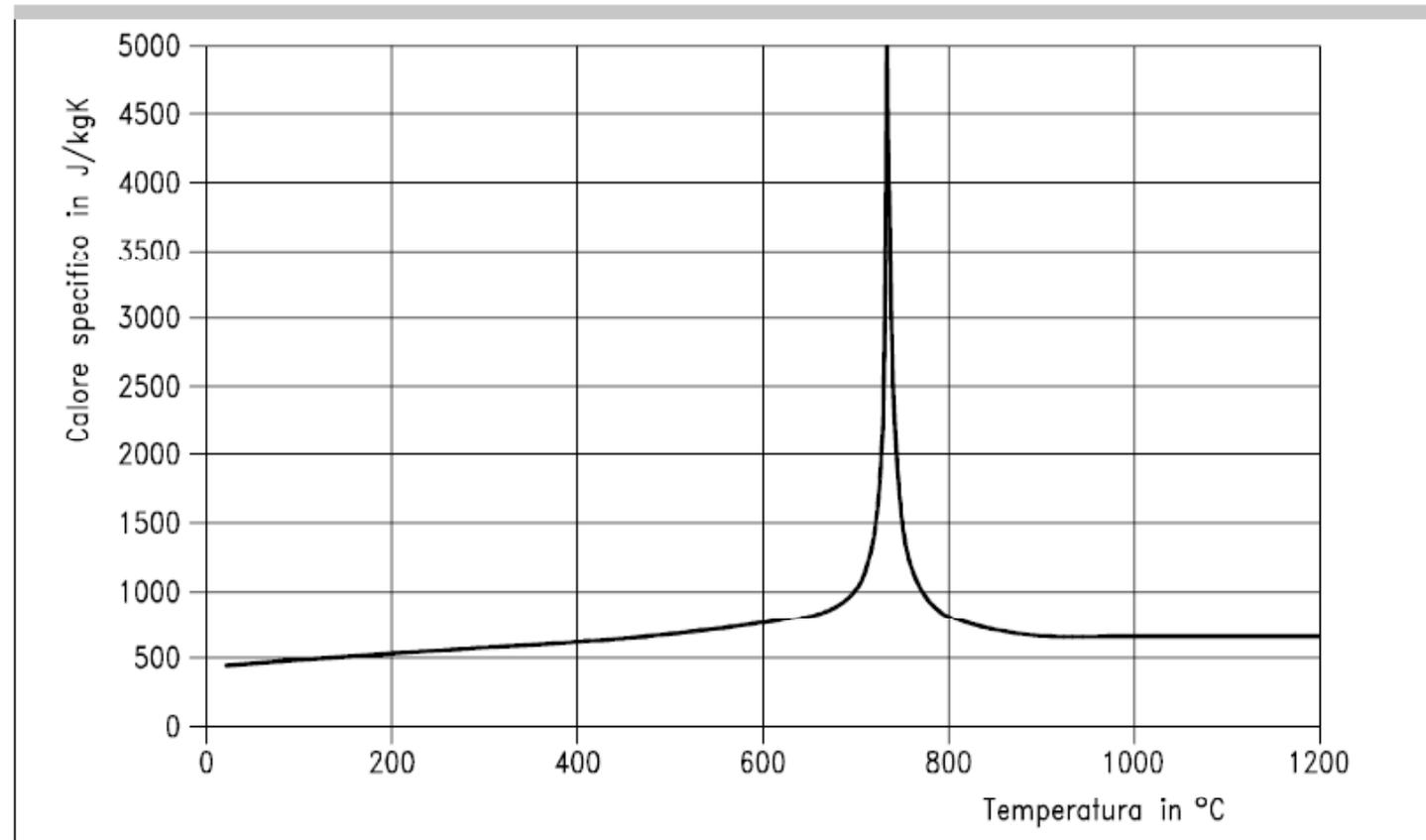
EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Proprietà termiche dell'acciaio – Calore specifico c_a

Nei modelli di calcolo semplificati il calore specifico non dipende dalla temperatura dell'acciaio:

$$c_a = 600 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$



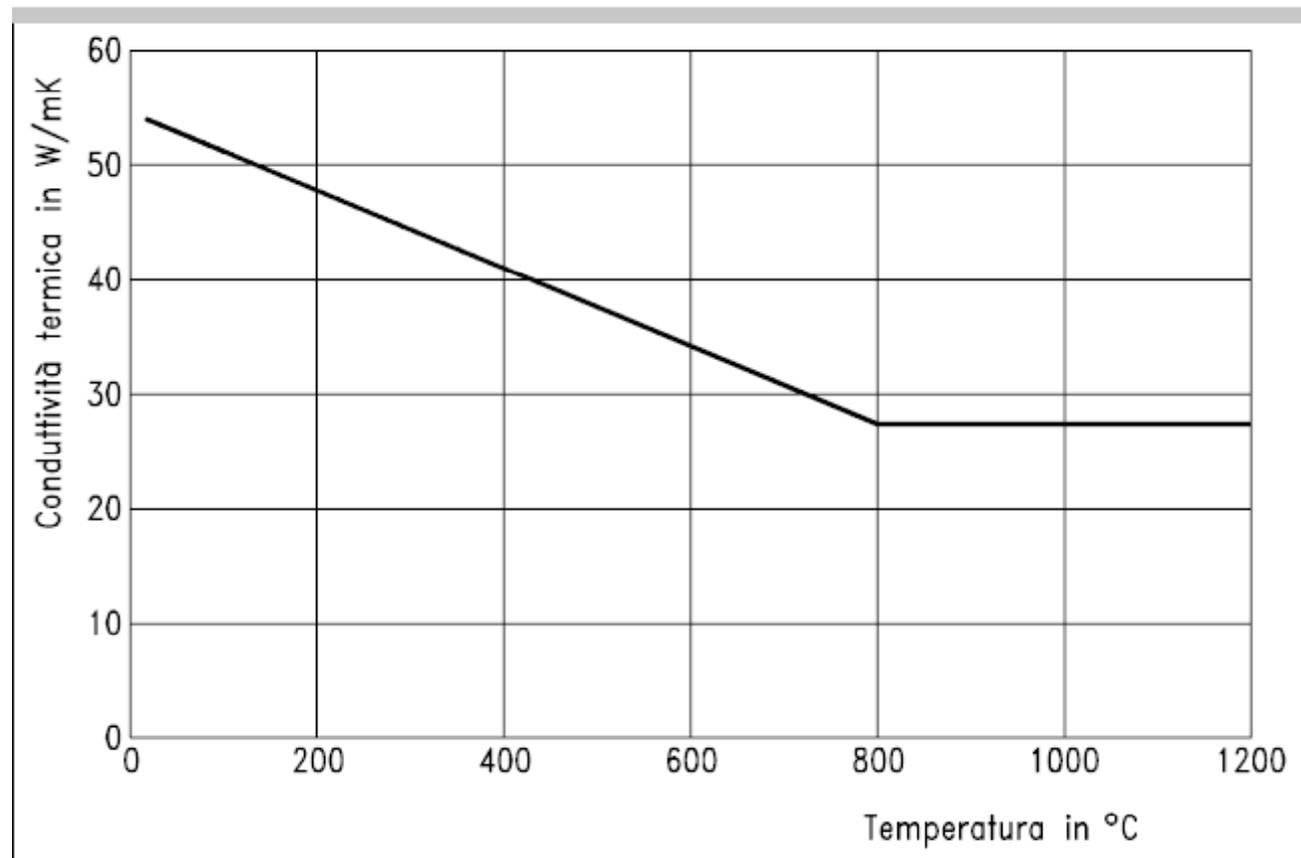
EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Proprietà termiche dell'acciaio – Conduttività termica λ_a

Nei modelli di calcolo semplificati la conduttività termica non dipende dalla temperatura dell'acciaio:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m}\cdot\text{k}$$



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Richiami di calcolo plastico a rottura

Un criterio per valutare la capacità portante residua di una struttura in acciaio sottoposta ad incendio è il **calcolo plastico a rottura**.

In base a tale metodo il sistema (o una parte di esso) raggiunge lo **stato limite di collasso** se si formano $n+1$ plasticizzazioni (per una struttura n volte iperstatica).

Ciò se si escludano meccanismi locali prima del raggiungimento del meccanismo globale.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Richiami di calcolo plastico a rottura

Nella teoria classica del calcolo a rottura, i carichi di esercizio si amplificano con un moltiplicatore dei carichi; si attinge prima **lo stato limite di collasso** in una o più sezioni della struttura (*per flessione, taglio, sforzo normale ...*); se la struttura è iperstatica e non si è verificato nessun meccanismo globale, è possibile far crescere ulteriormente i carichi che verranno ripartiti tra le zone non ancora plasticizzate.

Al pervenire di un meccanismo si ha il crollo, in corrispondenza del quale il moltiplicatore dei carichi prende il nome di “**moltiplicatore di collasso**”.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Richiami di calcolo plastico a rottura

Le strutture sottoposte ad incendio, non subiscono incrementi di carico nell'incendio, ma diminuiscono la propria resistenza nel tempo.

Le *prime plasticizzazioni* si verificano in quelle sezioni in cui la capacità portante alla temperatura raggiunta, eguaglia le sollecitazioni dovute ai carichi agenti, mentre il *collasso* si verifica quando il numero di sezioni collassate è pari al numero di iperstaticità più uno (per il meccanismo globale).

La teoria del calcolo a rottura può essere adattata per le strutture sottoposte ad incendio, assumendo che:

“il moltiplicatore di collasso non caratterizza la crescita dei carichi fino al crollo, ma il decremento di resistenza della struttura”.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Richiami di calcolo plastico a rottura

Se $R_{fi,d,0}$ è la resistenza di calcolo della sezione a “freddo” ed $E_{fi,d}$ l’effetto dei carichi di progetto, si definisce μ_0 il **coefficiente di utilizzazione della sezione**:

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

La crisi della sezione si verificherà quando l’effetto dei carichi $E_{fi,d}$ eguaglierà la resistenza della sezione alla temperatura θ raggiunta durante l’incendio:

$$E_{fi,d} = R_{fi,d,\theta}$$

cioè:

$$\mu_0 = R_{fi,d,\theta} / R_{fi,d,0}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Richiami di calcolo plastico a rottura

Si può esprimere la resistenza a “freddo” e quella a “caldo” in funzione delle tensioni di snervamento f_y e $f_{y,\theta}$ mediante un coefficiente funzione della sezione e del tipo di collasso ipotizzato (*nel caso della flessione è il guadagno plastico Z*):

$$\mu_0 = f_{y,\theta} \cdot Z / f_y \cdot Z = f_{y,\theta} / f_y$$

Poiché la tensione di snervamento a “caldo” può esprimersi in funzione di un coefficiente di riduzione della tensione di snervamento a freddo:

$$f_{y,\theta} = k \cdot f_y$$

si ottiene:

$$k = \mu_0$$

il **coefficiente di riduzione della tensione di snervamento a caldo** è pari, nel caso specifico, al **coefficiente di utilizzazione della sezione**.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Coefficiente di riduzione della tensione di snervamento (k)

Il coefficiente di riduzione della tensione di snervamento (k) con la temperatura (θ) viene espresso in funzione della temperatura con una funzione che approssima i valori tabellati negli Eurocodici:

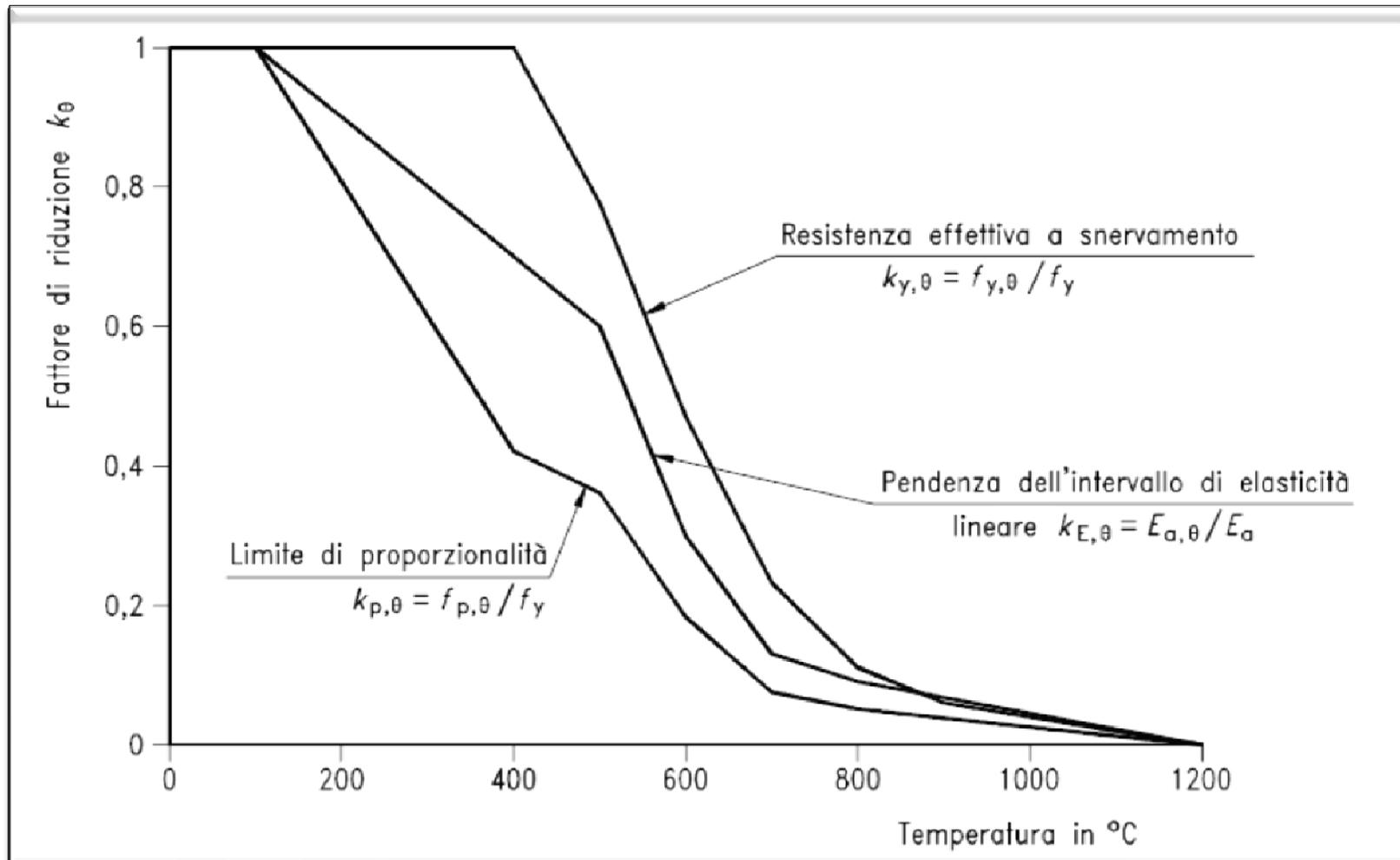
Temperatura dell'acciaio θ_a	Fattori di riduzione alla temperatura θ_a relativi ai valori di f_y o E_a a 20 °C		
	Fattore di riduzione per la resistenza effettiva a snervamento (relativo a f_y) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fattore di riduzione per il limite di proporzionalità (relativo a f_y) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fattore di riduzione per la pendenza dell'intervallo di elasticità lineare (relativo a E_a) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,037 5	0,067 5
1 000 °C	0,040	0,025 0	0,045 0
1 100 °C	0,020	0,012 5	0,022 5
1 200 °C	0,000	0,000 0	0,000 0

Nota - Per i valori intermedi della temperatura dell'acciaio può essere utilizzata l'interpolazione lineare.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Coefficiente di riduzione della tensione di snervamento (k)



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

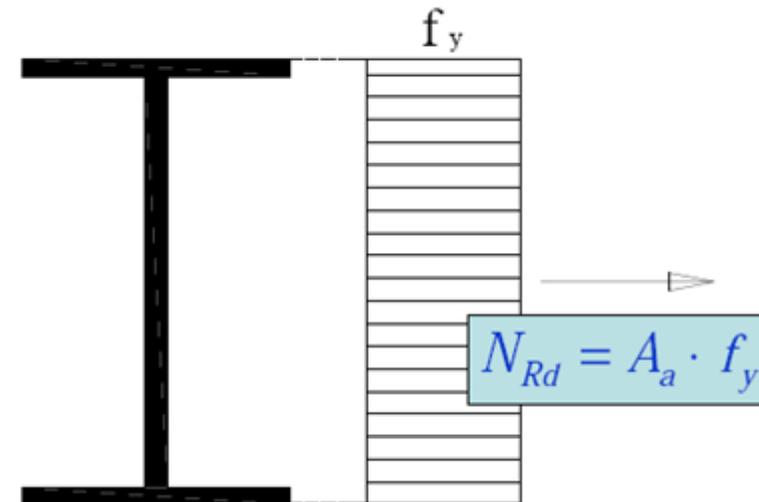
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Elementi in trazione

La resistenza di progetto $N_{fi,\theta,Rd}$ dell'elemento a temperatura uniforme θ_a è:

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

$$N_{fi,\theta,Rd} \geq E_{fi,d}$$



N_{Rd} resistenza a “freddo”

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

$\gamma_{M,fi} = 1,0$ coefficiente parziale di sicurezza a “caldo”

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

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Elementi compressi di classe 1,2 e 3

La resistenza di progetto $N_{b,fi,\theta,Rd}$ dell'elemento a temperatura uniforme θ_a è:

$$N_{b, fi, \theta, Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y, \theta} \cdot f_y / \gamma_{M, fi}$$

$$N_{b, fi, \theta, Rd} \geq E_{fi, d}$$

- χ_{fi} coefficiente di riduzione per instabilità flessionale in condizioni d'incendio
 $\gamma_{M, fi} = 1,0$ coefficiente parziale di sicurezza a "caldo" dell'acciaio
 $k_{y, \theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura θ
 I momento d'inerzia
 L_0 lunghezza di libera inflessione

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2]$$

$$\alpha = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

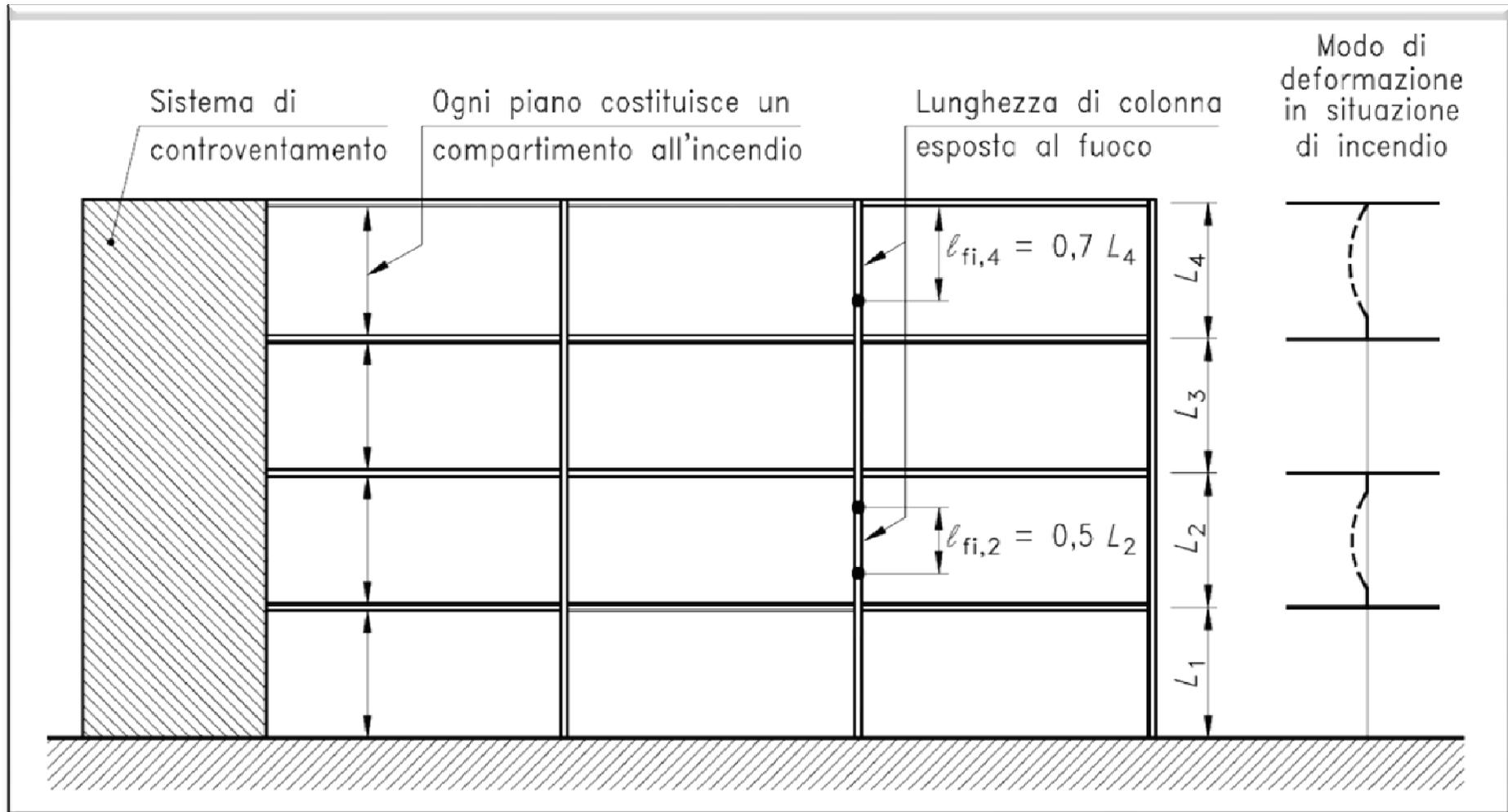
$$\bar{\lambda}_{\theta} = \sqrt{\frac{N_{pl, \theta}}{N_{cr, \theta}}} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y, \theta}}{k_{E, \theta}}}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_0^2}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

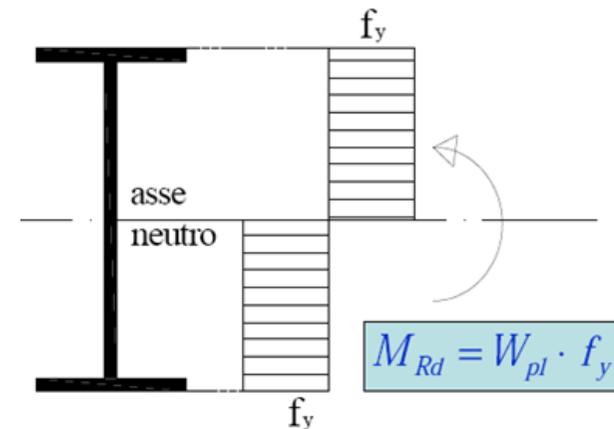
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Elementi inflessi di classe 1 e 2

La resistenza di progetto $M_{fi,\theta,Rd}$ dell'elemento a temperatura uniforme θ_a è:

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

$$M_{fi,\theta,Rd} \geq E_{fi,d}$$



- $\gamma_{M,fi} = 1,0$ coefficiente parziale di sicurezza a “caldo” dell'acciaio
- $\gamma_{M,0}$ coefficiente parziale di sicurezza a “freddo” dell'acciaio
- $k_{y,\theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura θ
- M_{rd} momento plastico resistente a “freddo”

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

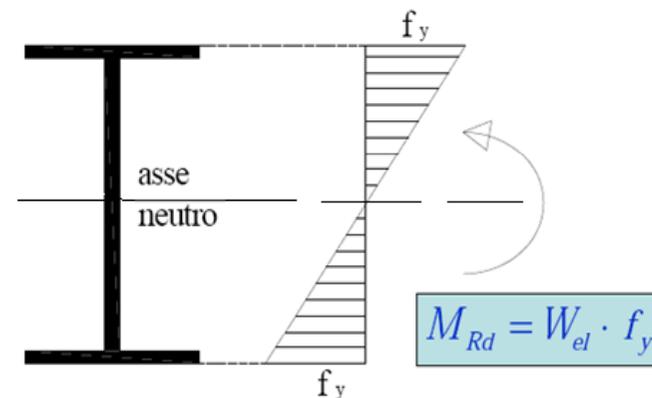
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Elementi inflessi di classe 3

La resistenza di progetto $M_{fi,\theta,Rd}$ dell'elemento a temperatura uniforme θ_a è:

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

$$M_{fi,\theta,Rd} \geq E_{fi,d}$$



- $\gamma_{M,fi} = 1,0$ coefficiente parziale di sicurezza a "caldo" dell'acciaio
 $\gamma_{M,0}$ coefficiente parziale di sicurezza a "freddo" dell'acciaio
 $k_{y,\theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura θ
 M_{rd} momento al limite elastico resistente a "freddo"

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Taglio per elementi di classe 1 o 2

La resistenza a taglio $V_{fi,\theta,Rd}$ per sezioni di classe 1 e 2 dell'elemento a temperatura uniforme θ_a è:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} \cdot V_{Rd} \left[\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi} \right]$$

$$V_{Rd} = h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \quad V_{fi,t,Rd} \geq E_{fi,d}$$

- $\gamma_{M,fi} = 1,0$ coefficiente parziale di sicurezza a “caldo” dell'acciaio
 $\gamma_{M,0}$ coefficiente parziale di sicurezza a “freddo” dell'acciaio
 $k_{y,\theta,web}$ fattore di riduzione della temperatura dell'anima alla temperatura θ
 Θ_{web} temperatura dell'anima della sezione
 V_{rd} resistenza a taglio a “freddo” (per il solo contributo dell'anima di spessore t_w e altezza h_w)
-

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza – Flessione composta

Nel caso della presso-flessione si utilizzano criteri di verifica simili al caso a temperatura ambiente, introducendo le caratteristiche meccaniche a “caldo”:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot K_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot K_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della temperatura - Metodo della temperatura critica

Si definisce **temperatura critica** la temperatura raggiunta dall'incendio per cui l'effetto dei carichi $E_{fi,d}$ eguaglia la resistenza della sezione dell'elemento strutturale con distribuzione uniforme di temperatura:

$$E_{fi,d} = R_{fi,d,\theta_{crit}}$$

La temperatura critica deve essere superiore alla temperatura raggiunta dall'elemento strutturale durante l'incendio:

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

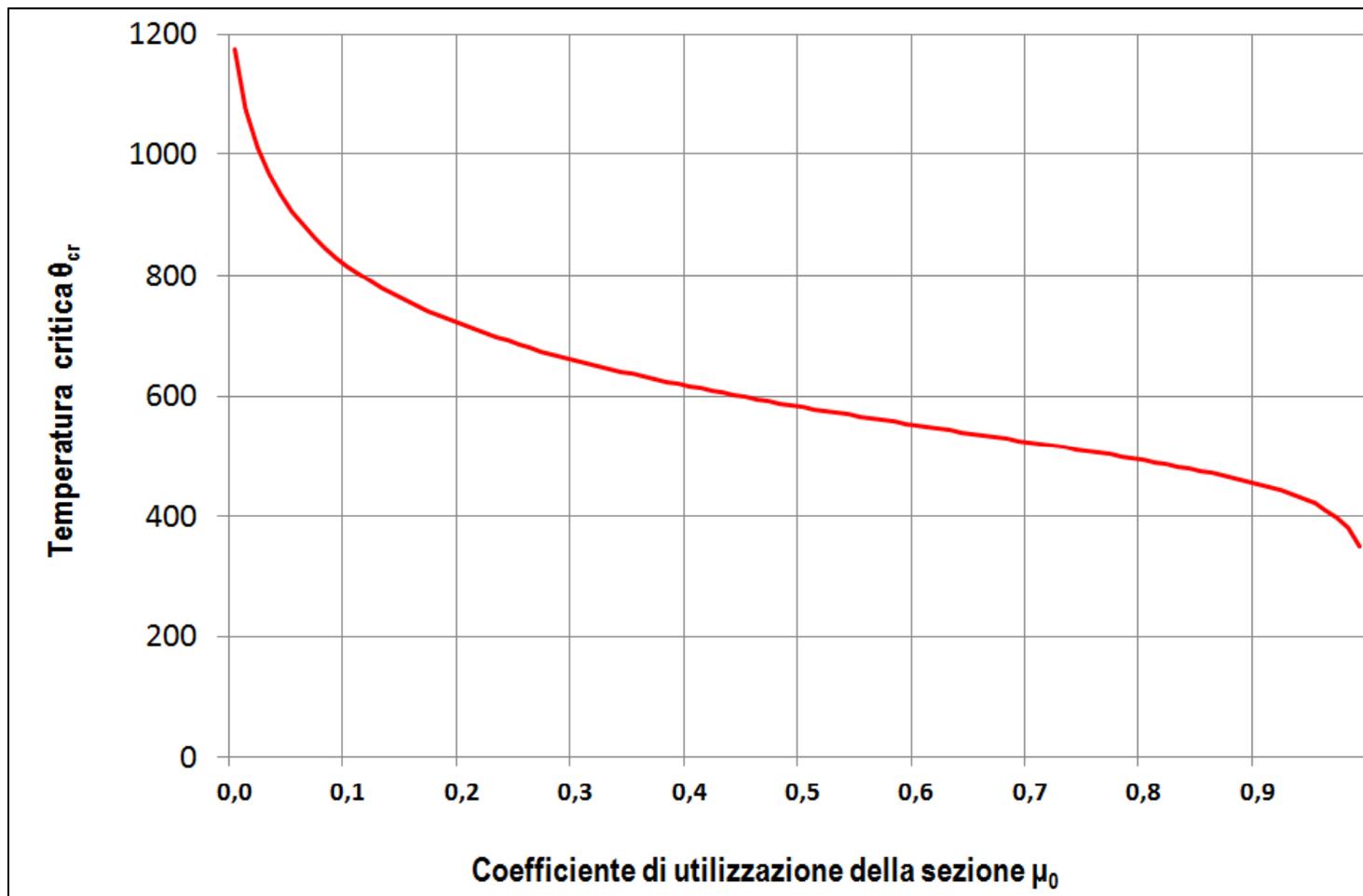
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Il metodo non è applicabile ad elementi strutturali sensibili a fenomeni di instabilità dell'equilibrio.

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della temperatura - Metodo della temperatura critica



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

NOMOGRAMMA

Metodo grafico per il dimensionamento degli elementi in acciaio

Il metodo analitico può essere attuato attraverso il ricorso a grafici.

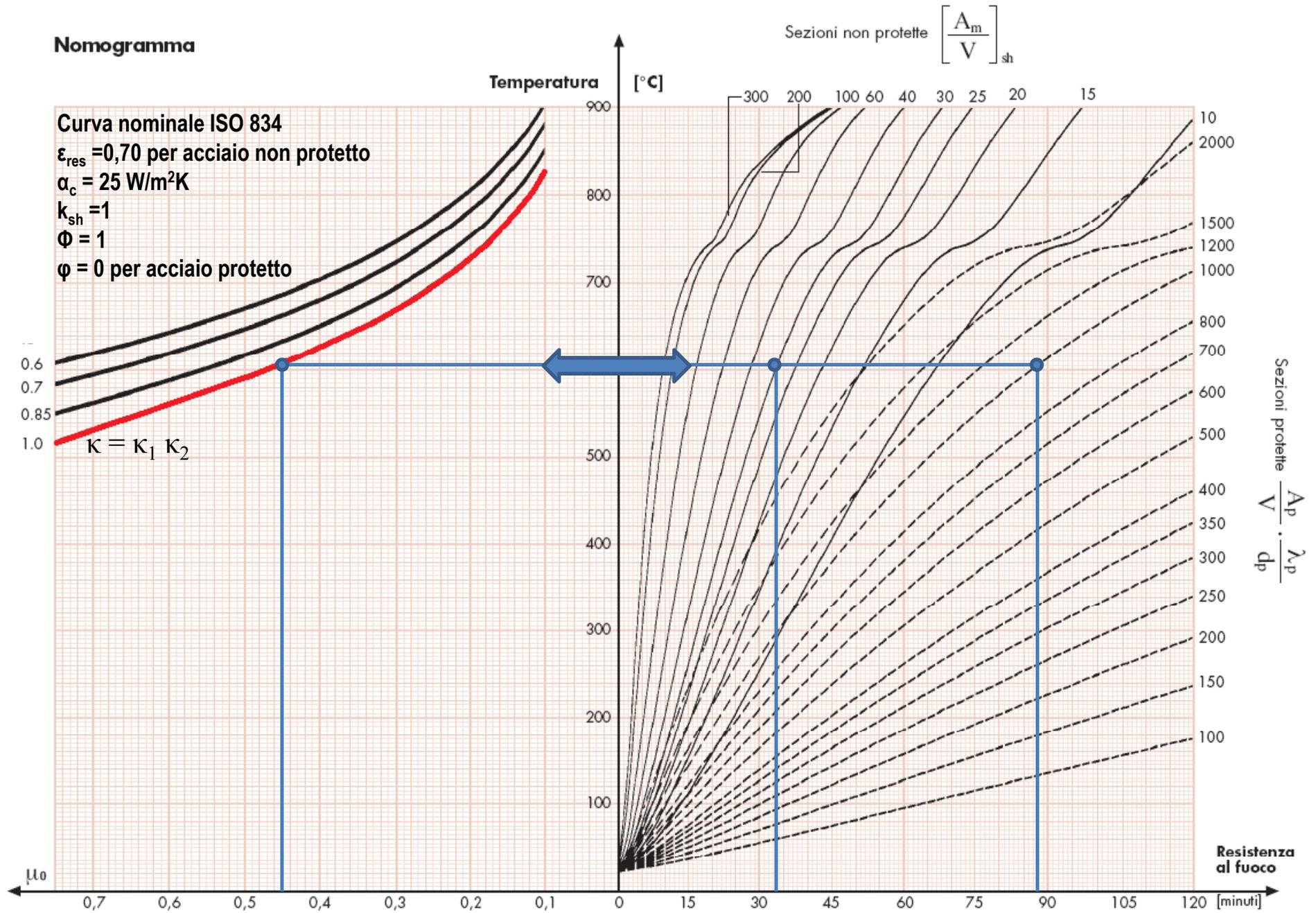
Il procedimento è valido per elementi sottoposti a trazione pura, flessione pura o compressione pura.

Non è applicabile ad elementi strutturali soggetti a sollecitazioni composte e a fenomeni di svergolamento.

Le **ipotesi** di base sono:

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

Nomogramma



κ_1 : fattore per distribuzione non uniforme di temperatura sulla sezione trasversale
 κ_2 : fattore per distribuzione non uniforme di temperatura lungo l'elemento strutturale

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

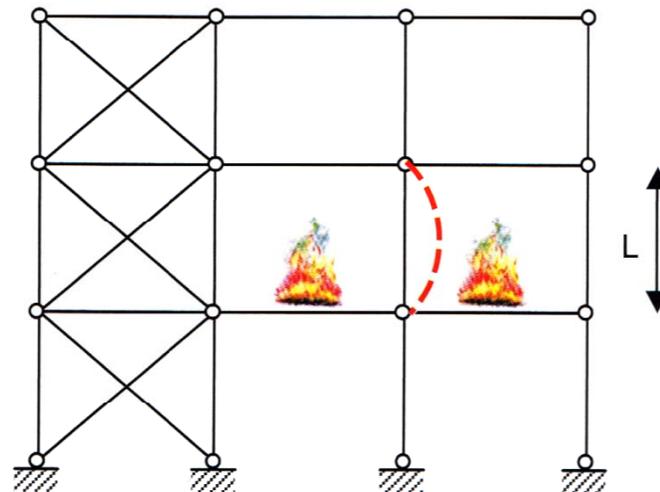
Esempio applicativo

Verifica di una colonna compressa esposta su quattro lati

Si segue l'approccio prescrittivo applicando il metodo semplificato dell'Eurocodice EN 1993-1-2 e modellando l'incendio con la curva standard ISO 834.

La struttura si trova all'interno di un'autorimessa multipiano con resistenza al fuoco richiesta R90.

Azione di progetto per la combinazione dei carichi prevista $N_{d,fi} = 500$ kN:



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

altezza colonna (L) = 3 m;

profilato: HEA 200;

area (A) = 5380 mm²;

perimetro (p) = 1136,1 mm;

inerzia nel piano debole (I_z) = 13360000 mm⁴;

altezza sezione (H) = 190 mm;

larghezza sezione (B) = 200 mm;

spessore ali (t_f) = 10 mm;

spessore anima (t_w) = 6,5 mm;

raggio raccordi (r) = 18 mm;

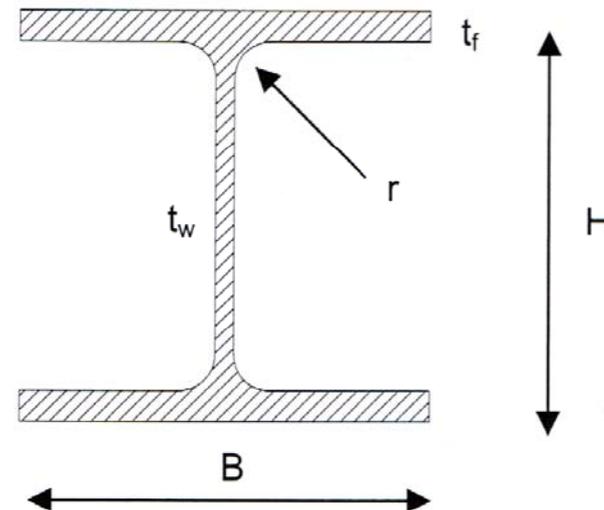
materiale: acciaio S355 con tensione di snervamento (f_y) pari 355 N/mm²;

modulo di Young (E) = 210000 N/mm²;

esposizione della colonna all'incendio standard su 4 lati.

Fattore di sezione del profilato non protetto: $p/A = 211 \text{ m}^{-1}$

$$\text{Coefficiente } \epsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,692$$



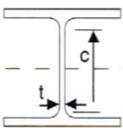
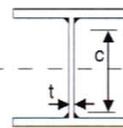
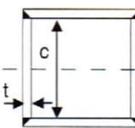
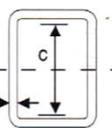
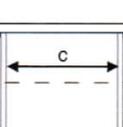
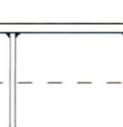
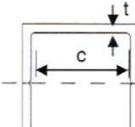
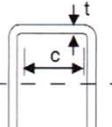
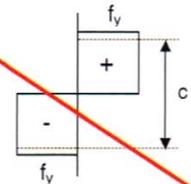
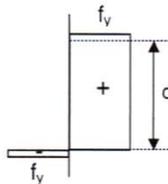
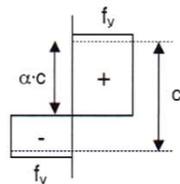
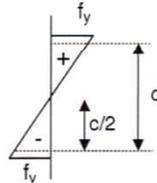
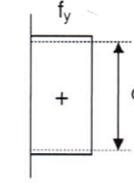
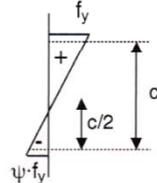
9 ε = 6,22;	10 ε = 6,92;	14 ε = 9,68;
33 ε = 22,82;	38 ε = 26,28;	42 ε = 29,05

1- Classificazione della sezione

Anima interna

$$c = H - 2(t_f + r) = 190 - 2(10 + 18) = 134 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t_w} = \frac{134}{6,5} = 20,6 < 33 \varepsilon \rightarrow \text{classe 1}$$

PARTI INTERNE COMPRESSE			
			
			Asse di inflessione
			
			Asse di inflessione
CLASSE	PARTI INFLESSE	PARTI COMPRESSE	PARTI PRESSOINFLESSE
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
1	$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$	$\text{se } \alpha > 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{se } \alpha \leq 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$	$\text{se } \alpha > 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{se } \alpha \leq 0,5: \frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
3	$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon$	$\text{se } \psi > -1: \frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ $\text{se } \psi \leq -1: \frac{c}{t} \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$

1- Classificazione della sezione

Flange esterne

$$c = \frac{B}{2} - r = \frac{200}{2} - 18 = 82 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t_f} = \frac{82}{10} = 8,2 < 14 \epsilon \rightarrow \text{classe 3}$$

La sezione è di classe 3

FLANGE ESTERNE			
CLASSE	PARTI COMPRESSE	PARTI PRESSOINFLESSE	
		ESTREMITÀ COMPRESSA	ESTREMITÀ TESA

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo $N_{b,\bar{f},\theta,R,d} = \chi_{\bar{f}} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,\bar{f}}}$

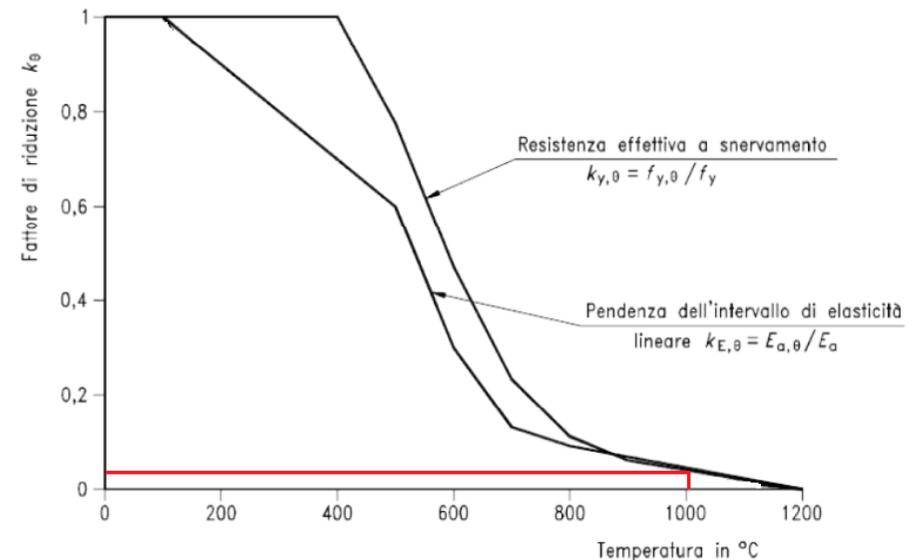
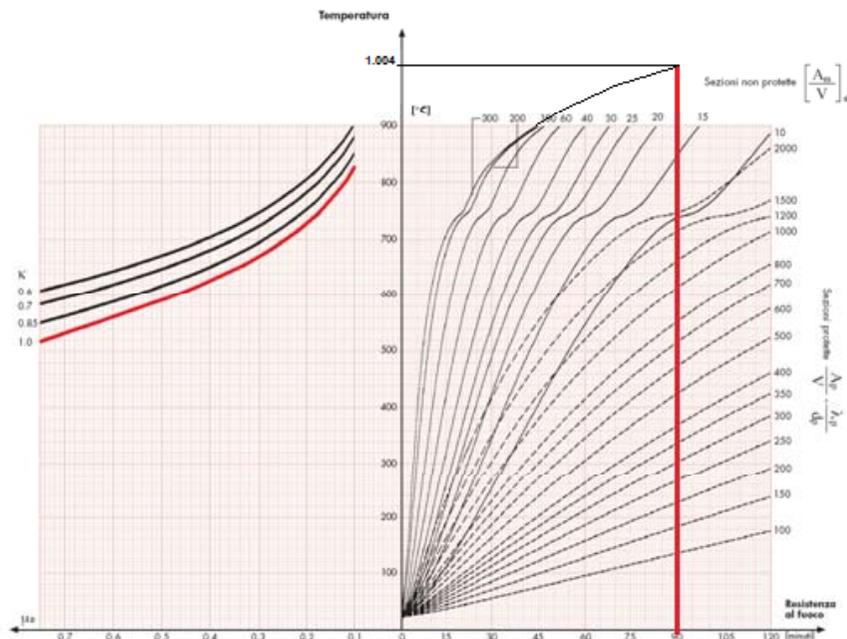
Temperatura raggiunta nel compartimento dopo 90 minuti di incendio nominale standard ISO 834:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot 90 + 1) = 1.006^\circ\text{C}$$

Temperatura raggiunta dall'elemento dopo 90 minuti di incendio nominale standard ISO 834: $\theta_a = 1.004^\circ\text{C}$

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

$$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y} = 0,04 \quad k_{E,\theta} = \frac{E_\theta}{E} = 0,045$$



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5380 \cdot 355}{3077000}} = 0,788 \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}} \cdot \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,788 \sqrt{\frac{0,04}{0,045}} = 0,743$$

$$\alpha_\theta = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529 \quad \eta_\theta = \alpha_\theta \cdot \bar{\lambda}_\theta = 0,529 \cdot 0,743 = 0,393$$

$$\Phi_\theta = 0,5[1 + \eta_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] = 0,5(1 + 0,393 + 0,743^2) = 0,972$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_\theta + \sqrt{\Phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,972 + \sqrt{0,972^2 - 0,743^2}} = 0,625$$

$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 0,625 \cdot 5380 \cdot \frac{0,04 \cdot 355}{1,0} = 47,7 \text{ kN} < N_{d,fi} = 500 \text{ kN}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo – 2° iterazione

Posto $N_{b,fi,\theta,R,d} = N_{d,fi} = 500 \text{ kN}$ e χ_{fi} pari al valore trovato:

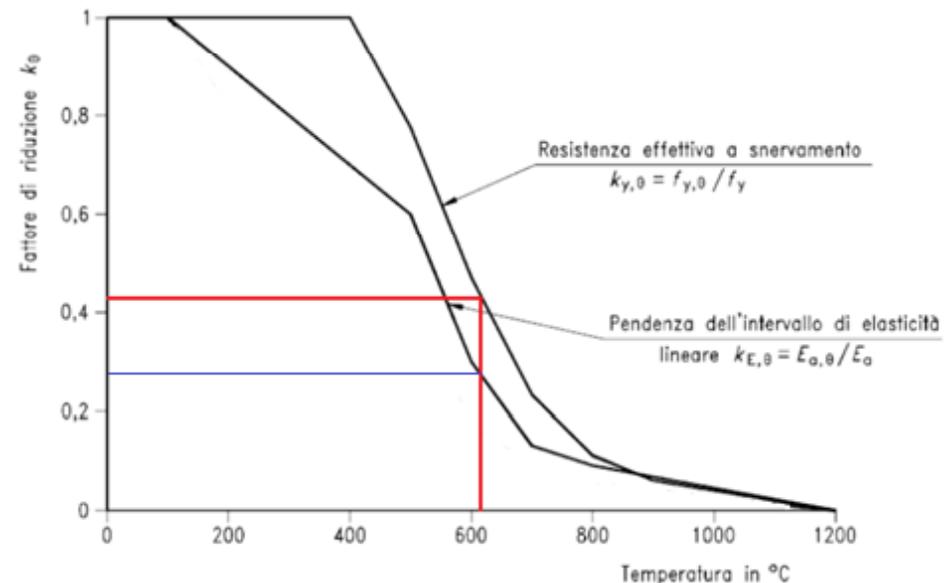
$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} = \frac{1}{0,972 + \sqrt{0,972^2 - 0,743^2}} = 0,625$$

si ricava il nuovo valore compatibile di $k_{y,\theta}$:

$$\chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 500 \text{ kN} \quad 0,625 \cdot 5380 \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot 355}{1,0} = 500 \text{ kN} \quad k_{y,\theta} = 0,42$$

cui corrisponde una temperatura di circa 620°C,
e $k_{E,\theta} = 0,27$:

Si ricalcolano tutti i valori.



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo – 2° iterazione

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5380 \cdot 355}{3077000}} = 0,788 \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}} \cdot \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,788 \sqrt{\frac{0,42}{0,27}} = 0,983$$

$$\alpha_\theta = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529 \quad \eta_\theta = \alpha_\theta \cdot \bar{\lambda}_\theta = 0,529 \cdot 0,983 = 0,520$$

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

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_\theta + \sqrt{\Phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{1,243 + \sqrt{1,243^2 - 0,983^2}} = 0,499$$

$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 0,499 \cdot 5380 \cdot \frac{0,42 \cdot 355}{1,0} = 400 \text{ kN} < 500 \text{ kN}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo – 3° iterazione

Posto $N_{b,fi,\theta,R,d} = N_{d,fi} = 500 \text{ kN}$ e χ_{fi} pari al valore trovato:

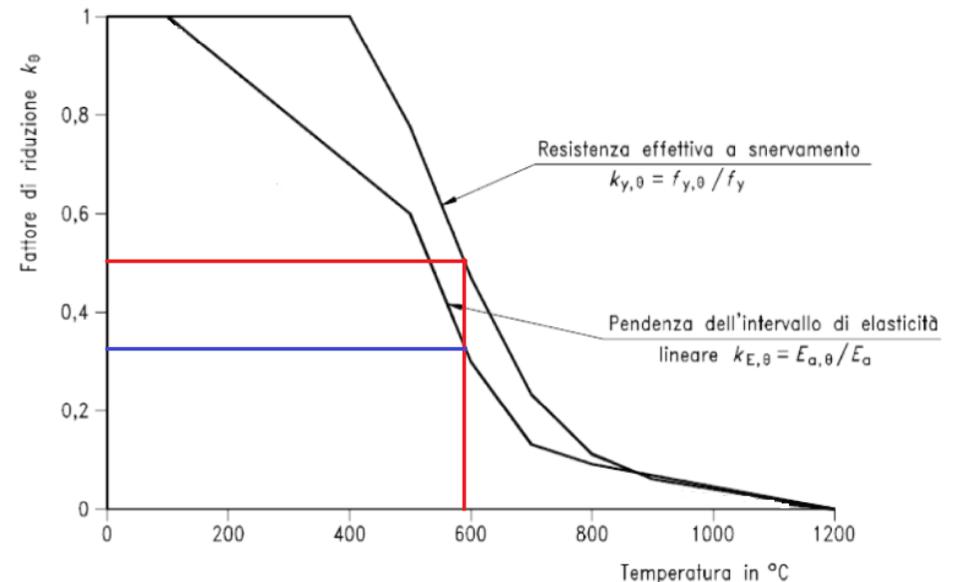
$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_{\theta} + \sqrt{\Phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} = \frac{1}{1,243 + \sqrt{1,243^2 - 0,983^2}} = 0,499$$

si ricava il nuovo valore compatibile di $k_{y,\theta}$:

$$\chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 500 \text{ kN} \quad 0,499 \cdot 5380 \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot 355}{1,0} = 500 \text{ kN} \quad k_{y,\theta} = 0,52$$

cui corrisponde una temperatura di circa 580°C ,
e $k_{E,\theta} = 0,36$:

Si ricalcolano tutti i valori.



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della resistenza al carico critico a caldo – 3° iterazione

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5380 \cdot 355}{3077000}} = 0,788 \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{A \cdot f_y \cdot k_{y,\theta}}{N_{cr} \cdot k_{E,\theta}}} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = 0,788 \cdot \sqrt{\frac{0,52}{0,36}} = 0,947$$

$$\alpha_\theta = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,65 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,529 \quad \eta_\theta = \alpha_\theta \cdot \bar{\lambda}_\theta = 0,529 \cdot 0,947 = 0,501$$

$$\Phi_\theta = 0,5[1 + \eta_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] = 0,5(1 + 0,501 + 0,947^2) = 1,199$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\Phi_\theta + \sqrt{\Phi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{1,199 + \sqrt{1,199^2 - 0,947^2}} = 0,517$$

$$N_{b,fi,\theta,R,d} = \chi_{fi} \cdot A \cdot \frac{k_{y,\theta} \cdot f_y}{\gamma_{m,fi}} = 0,517 \cdot 5380 \cdot \frac{0,52 \cdot 355}{1,0} = 513 \text{ kN} > N_{d,fi} = 500 \text{ kN}$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

3- Dimensionamento del rivestimento protettivo

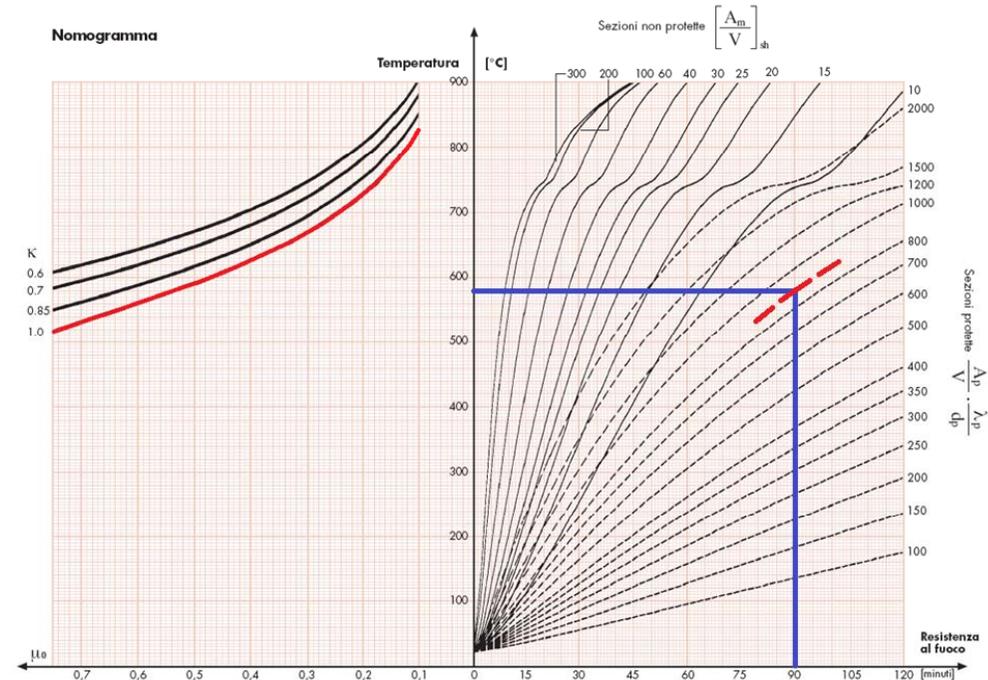
La verifica di resistenza è positiva con una temperatura nell'elemento pari a 580°C.
 A questo punto è necessario dimensionare lo spessore del rivestimento protettivo necessario per resistere ad un'esposizione all'incendio standard di 90 minuti.

Si tratta di determinare il fattore di sezione per elementi protetti compatibile con la temperatura calcolata. Fissate la conducibilità termica del protettivo λ_p e il suo perimetro interno A_p , dovrà essere:

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \leq 900$$

cioè:

$$d_p \geq \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{900}$$



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

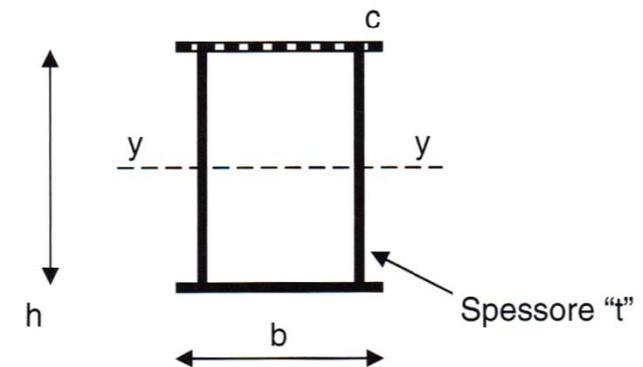
Verifica di una trave inflessa esposta su quattro lati

Si segue l'approccio prescrittivo applicando il metodo semplificato della temperatura critica dell'Eurocodice EN 1993-1-2 e modellando l'incendio con la curva standard ISO 834.

La resistenza al fuoco richiesta è R30.

acciaio (S355)

- tensione di snervamento (f_y) 355 N/mm²
- modulo di elasticità (E) 210000 N/mm²
- modulo di taglio (G) 81000 N/mm²
- larghezza complessiva (b) 450 mm
- altezza complessiva (h) 700 mm
- spessore (t) 25 mm
- sporgenza ala (c) 40 mm
- area del profilato (A) 27500 mm²
- momento statico di mezza sezione rispetto all'asse y (S_y) 6437500 mm²
- luce (L) 35,0 m



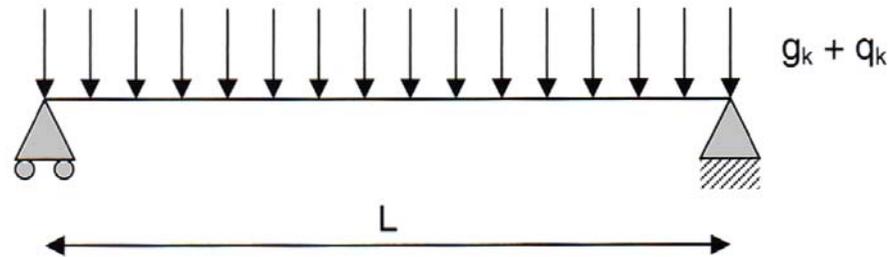
$$\text{Coefficiente } \varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,692$$

$$\frac{A_m}{V} \cong \frac{1}{t} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ m}^{-1}$$

$$9 \varepsilon = 6,22; \quad 10 \varepsilon = 6,92; \quad 14 \varepsilon = 9,68; \\ 33 \varepsilon = 22,82; \quad 38 \varepsilon = 26,28; \quad 42 \varepsilon = 29,05; \quad 72 \varepsilon = 49,82$$

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI



Azioni

- carico uniformemente distribuito permanente (g_k) 8,0 kN/m
- carico da neve uniformemente distribuito (q_k) 12,0 kN/m

Combinazione di carico $\gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_k$

$$\gamma_{GA} = 1,0$$

$$\psi_{1,1} = 0,2$$

$$\psi_{2,1} = 0,0$$

Azione di progetto a “freddo”

$$M_{f,d} = \frac{(1,0 \cdot g_k + 0,2 \cdot q_k) \cdot L^2}{8} = \frac{(1,0 \cdot 8,0 + 0,2 \cdot 12,0) \cdot 35^2}{8} = 1592,5 \text{ kNm}$$

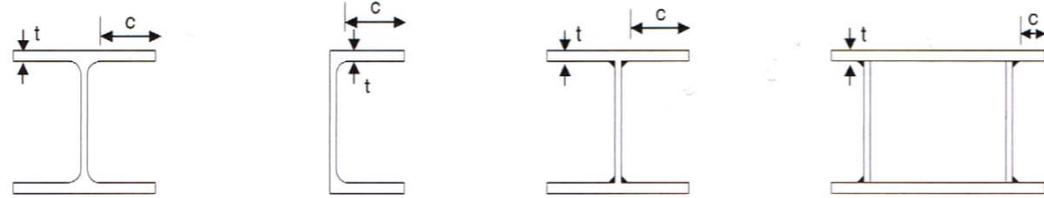
PARTI INTERNE COMPRESSE			
CLASSE	PARTI INFLESSE	PARTI COMPRESSE	PARTI PRESSOINFLESSE
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
1	$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$	se $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ se $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$	se $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ se $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
3	$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon$	se $\psi > -1$: $\frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ se $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$

1- Classificazione della sezione anima interna

$$c = h - 2t = 700 - 2 \cdot 25 = 650 \text{ mm}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{650}{25} = 26 < 72 \varepsilon \rightarrow \text{classe 1}$$

FLANGE ESTERNE



CLASSE	PARTI COMPRESSE	PARTI PRESSOINFLESSE	
		ESTREMITÀ COMPRESSA	ESTREMITÀ TESA
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
1	$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	$\frac{c}{t} \leq 10\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$\frac{c}{t} \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI NELLA PORZIONE DI SEZIONE (compressione positiva)			
3	$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 21\varepsilon\sqrt{K_\sigma}$	

1- Classificazione della sezione flange esterne

$c = 40 \text{ mm}$

$\frac{c}{t} = \frac{40}{25} = 1,6 < 9 \varepsilon \rightarrow \text{classe 1}$

La sezione è di classe 1

EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

2- Calcolo della temperatura nell'elemento

Temperatura raggiunta nel compartimento dopo 30 minuti di incendio nominale standard ISO 834:

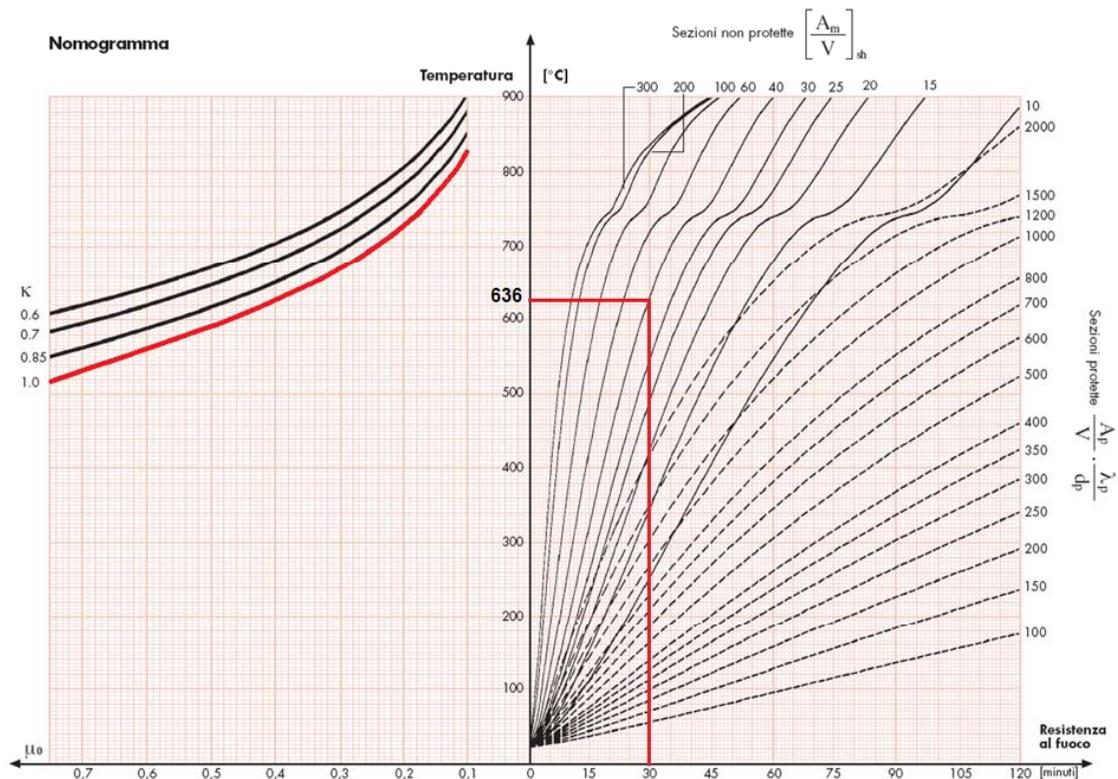
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot 30 + 1) = 842^\circ\text{C}$$

Temperatura raggiunta nell'elemento dopo 30 minuti di incendio nominale standard ISO 834

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

$$\frac{A_m}{V} \cong \frac{1}{t} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ m}^{-1}$$

$$\theta_a = 636^\circ\text{C}$$



EUROCODICE 3 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI ACCIAIO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

3- Calcolo della temperatura critica dell'elemento

coefficiente di utilizzazione $\mu_0 = \frac{M_{f,d}}{M_{f,0,r,d}} = \frac{M_{f,d}}{k_{y,\theta} \frac{\gamma_{m,0}}{\gamma_{m,f}} M_{r,d}}$

S momento statico di metà sezione rispetto all'asse $y = 6437500 \text{ mm}^2$

$k_{y,\theta}$ coefficiente di riduzione della tensione di snervamento alla temperatura θ di 20°C pari a 1,0

$$M_{r,d} = 2 \cdot S \cdot f_y = 2 \cdot 6437500 \cdot 355 = 4570,6 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$\mu_0 = \frac{M_{f,d}}{M_{f,0,r,d}} = \frac{1592,5}{4570,6} = 0,35$$

$$\theta_{a, cr} = 39,19 \ln \left(\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 = \theta_{cr} = 640^\circ\text{C} > \theta_{\max} = 636^\circ\text{C}$$

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

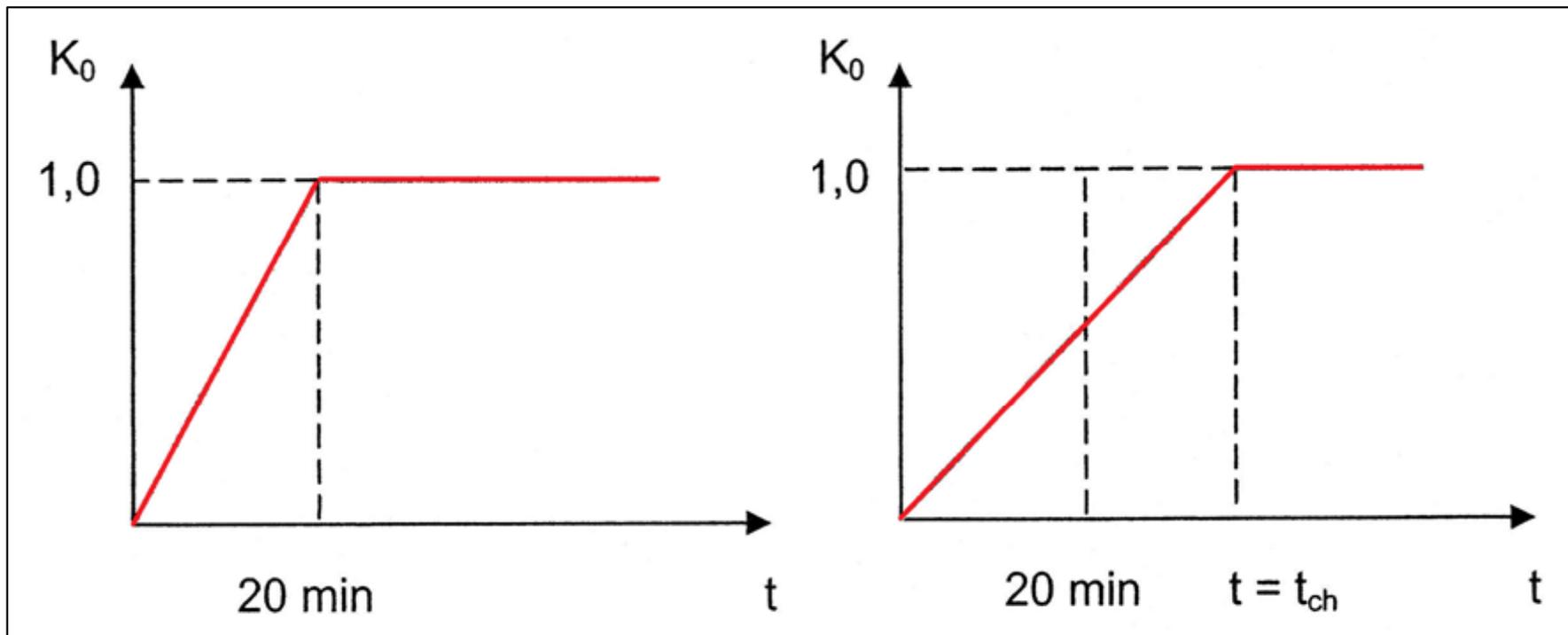
Metodo della sezione ridotta

Determinazione k_0

Legno non protetto

Legno protetto – tempo di esposizione < 20 minuti

Legno protetto – tempo di esposizione > 20 minuti



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

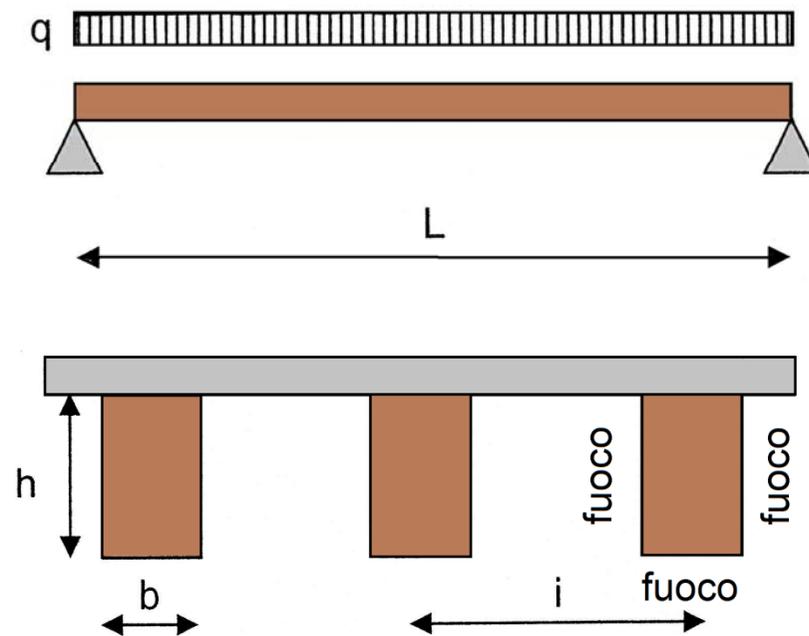
Esempio applicativo

Verifica di una trave esposta su tre lati

Si segue l'approccio prescrittivo applicando il metodo semplificato dell'Eurocodice EN 1995-1-2 della sezione ridotta e modellando l'incendio con la curva standard ISO 834.

La struttura si trova all'interno di un edificio scolastico (categoria di sovraccarico C1), di altezza antincendio inferiore a 24 m e con resistenza al fuoco richiesta R60.

luce trave (L): 5,0 m
interasse travi (i): 0,5 m
sezione rettangolare (bxh): 0,15 x 0,2 mxm



peso proprio (G_k) 1,5 kN/m²
sovraccarico accidentale (Q_k) 2,0 kN/m²
esposizione al fuoco: 3 lati

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

carico distribuito: $q = G_k \cdot i + 0,7 \cdot Q_k \cdot i = 1,5 \cdot 0,5 + 0,7 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 1,45 \text{ kN/m}$

momento flettente: $M_d = q \cdot L^2/8 = 1,45 \cdot 5,0^2/8 = 4,53 \text{ kN/m}$

resistenza caratteristica a flessione dell'abete (f_k) = 24 N/mm²

resistenza di progetto in condizioni d'incendio:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{20} / \gamma_{M,fi} = k_{mod,fi} \cdot (k_{fi} \cdot f_k) / \gamma_{M,fi} = 1,0 \cdot (1,25 \cdot 24) / 1,0 = 30,0 \text{ N/mm}^2$$

momento resistente minimo per la stabilità della trave:

$$W_{amm} = M_d / f_{d,fi} = 4.530.000 / 30 = 151.000 \text{ mm}^3$$

massima tensione a "freddo":

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b \cdot h^2 / 6) = 4.530.000 / (150 \cdot 200^2 / 6) = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

Verifica della sezione dopo un'esposizione di 90 minuti al fuoco

spessore nominale di legno carbonizzato dopo 90 minuti:

$$d_{\text{char},n}(t) = \beta_n \cdot t = 0,70 \cdot 90 = 63,0 \text{ mm}$$

spessore effettivo di legno carbonizzato:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0 = 63,0 + 1,0 \cdot 7,0 = 70,0 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = 150,0 - 2 \cdot 70,0 = 10,0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = 200,0 - 70,0 = 130,0 \text{ mm}$$

massima tensione dopo 90 minuti:

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2 / 6) = 4.530.000 / (10 \cdot 130^2 / 6) = 146,2 \text{ N/mm}^2 > f_{d,fi} = 30 \text{ N/mm}^2$$

La sezione non risulta verificata (R90).

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

Verifica della sezione dopo un'esposizione di 60 minuti al fuoco

spessore nominale di legno carbonizzato dopo 60 minuti:

$$d_{\text{char},n}(t) = \beta_n \cdot t = 0,70 \cdot 60 = 42,0 \text{ mm}$$

spessore effettivo di legno carbonizzato:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0 = 42,0 + 1,0 \cdot 7,0 = 49,0 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = 150,0 - 2 \cdot 49,0 = 52,0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = 200,0 - 49,0 = 151,0 \text{ mm}$$

massima tensione dopo 60 minuti:

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2 / 6) = 6 \cdot 4.530.000 / (52,0 \cdot 151,0^2 / 6) = 22,3 \text{ N/mm}^2 < f_{d,fi} = 30 \text{ N/mm}^2$$

La sezione risulta verificata (R60).

EUROCODICE 5 – Parte 1-2

STRUTTURE IN LEGNO



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Le strutture di legno manifestano a “freddo” un funzionamento strutturale concettualmente riconducibile a quello delle strutture di acciaio, grazie ad un comportamento affine sia a trazione che in compressione.

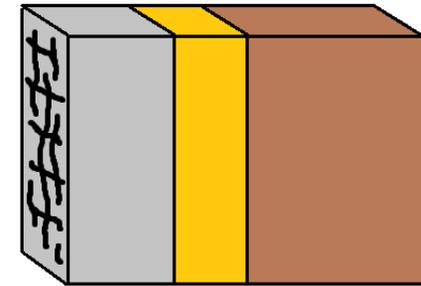
Esistono tuttavia alcuni aspetti peculiari del legno che lo differenziano dall'acciaio già a temperatura normale:

- resistenza variabile all'interno dell'elemento;
 - proprietà meccaniche differenti a seconda delle direzioni considerate (parallelamente e perpendicolarmente alle fibre);
 - resistenza e duttilità differenti in trazione e in compressione;
 - tensione di rottura funzione anche dalle dimensioni del campione;
 - resistenza che si riduce sotto carichi di lunga durata.
-

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

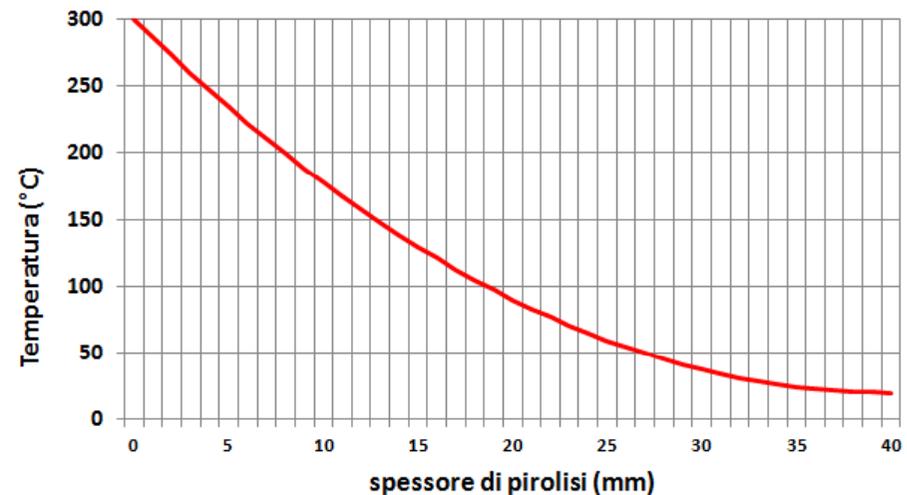
Il legno è un materiale organico combustibile che partecipa alla combustione perdendo massa dalla superficie esposta al fuoco verso l'interno, con velocità dipendente dalla specie legnosa e dalle condizioni igroscopiche.



Al di sotto dello strato carbonizzato si individua una zona di "pirolisi" di spessore variabile tra 20 e 40 mm.

Allo strato di legno carbonizzato non si associa alcuna caratteristica meccanica, per quello di pirolisi si ipotizza una progressiva ripresa delle caratteristiche meccaniche man mano che si riduce la temperatura dai 300°C al bordo di carbonizzazione sino alla temperatura del legno integro.

Andamento delle temperature nello strato di pirolisi



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Per semplicità ed a favore di sicurezza, si assume che:

- una porzione ridotta dello strato di pirolisi non sia in grado di offrire alcuna resistenza meccanica, come lo strato di legno carbonizzato,
- la restante parte dello strato di pirolisi mantenga inalterate le proprie caratteristiche meccaniche iniziali, come lo strato di legno integro.

Le **strutture** di legno manifestano un buon comportamento in caso di incendio:

1. la velocità di carbonizzazione è costante nel tempo e relativamente bassa (inferiore al mm/min, in quanto lo strato carbonizzato superficiale riduce l'afflusso di ossigeno agli strati sottostanti.)
 2. gli strati di legno sottostanti lo strato di pirolisi manifestano un modesto aumento di temperatura (*per la ridotta conducibilità termica del legno, l'elevato calore specifico e il contenuto di umidità*) e quindi mantengono inalterati le proprie caratteristiche meccaniche.
-

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

La **perdita della capacità portante** di un elemento strutturale di legno è associabile alla riduzione della sezione e, in misura trascurabile, alla riduzione delle caratteristiche meccaniche conseguenti all'aumento della temperatura.

Solo in casi estremi è necessario ricorrere a sistemi protettivi.

L'Eurocodice EN 1995-1-2 si applica al legname solido oppure incollato e ai pannelli a base di legno incollati o meccanicamente connessi tra loro.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Valori di progetto delle proprietà meccaniche a caldo

In caso d'incendio, la resistenza e la deformabilità del legno e del collegamento è pari al frattile 20% della popolazione dei valori di riferimento, per tenere conto della bassa probabilità di accadimento di un incendio.

Il 20° percentile è pari al 5° percentile moltiplicato per il coefficiente k_{fi} :

			k_{fi}
Legno massiccio	Segato		1,25
Legno lamellare	Incollaggio di lamelle dal segato		1,15
Pannelli a base di legno	Incollaggio di tavole		1,15
Legno multilaminare (<i>Laminated Veneer Lumber</i>)	Pannelli di piallacci sfogliati ed incollati con fibre parallele		1,10

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Valori di progetto delle proprietà meccaniche a caldo

I valori di progetto della resistenza meccanica e della rigidezza $f_{d,fi}$ ed $S_{d,fi}$ sono:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} f_{20} / \gamma_{M,fi}$$
$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} S_{20} / \gamma_{M,fi}$$

con:

f_{20} , S_{20} valori del frattile 20% delle grandezze in esame a temperatura normale;
 $k_{mod,fi}$ coefficiente di riduzione delle proprietà del materiale in caso d'incendio;
 $\gamma_{M,fi}$ coefficiente parziale di sicurezza del legno in caso di incendio (1,0).

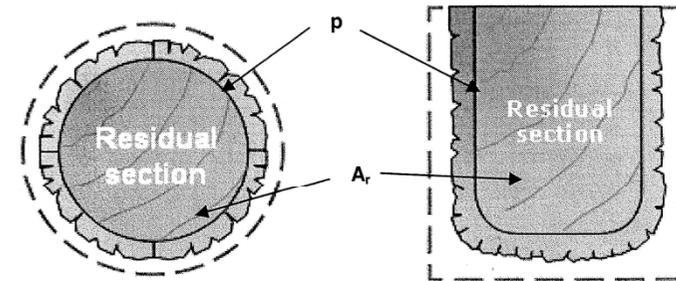
Per sezioni rettangolari esposte al fuoco su 3 o 4 lati o sezioni circolari esposte lungo il perimetro per tempi di esposizione superiori a 20 minuti, indicati con p e A_r il perimetro e l'area della sezione residua dopo l'esposizione all'incendio (parte della sezione al di sotto della linea di carbonizzazione), le espressioni di $k_{mod,fi}$ sono definite per alcuni casi particolari.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Valori di progetto delle proprietà meccaniche a caldo

Per sezioni rettangolari esposte al fuoco su 3 o 4 lati o sezioni circolari esposte lungo il perimetro per tempi di esposizione superiori a 20 minuti:



$k_{\text{mod,fi}}$	$=1,0 - 1/200 p/A_r$	resistenza a flessione
$k_{\text{mod,fi}}$	$=1,0 - 1/125 p/A_r$	resistenza a compressione
$k_{\text{mod,fi}}$	$=1,0 - 1/330 p/A_r$	resistenza a trazione e modulo di Elasticità.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Verifiche nel dominio della resistenza

Per la durata richiesta di esposizione al fuoco t :

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

con:

$E_{d,fi}$ effetto di progetto delle azioni, inclusi gli effetti delle dilatazioni e deformazioni termiche, determinato per l'istante $t = 0$

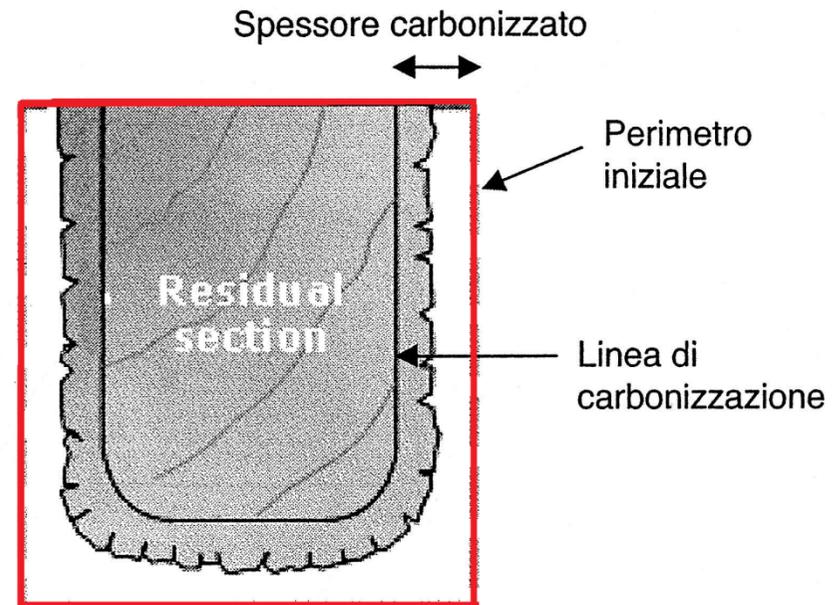
$R_{d,t,fi}$ resistenza di progetto nella situazione di incendio.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione β

E' la variazione nel tempo (mm/min) della distanza tra la superficie esterna dell'elemento prima dell'inizio della carbonizzazione e la superficie di carbonizzazione stessa (assunta in corrispondenza dell'isoterma a 300°C).



sezione residua: sezione dell'elemento originale diminuita della profondità di carbonizzazione.

sezione efficace: sezione ottenuta dalla sezione residua rimuovendo parti di sezione per le quali si assume resistenza e rigidità zero.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture non protette – Azione termica della curva nominale standard

Procedura esatta ad “avanzamento monodimensionale”

L'incremento nel tempo (t) dello spessore di legno carbonizzato durante l'incendio è:

$$d_{\text{char},0}(t) = \beta_0 \cdot t$$

con β_0 velocità monodimensionale di carbonizzazione.

Procedura approssimata ad “avanzamento nominale”

L'incremento nel tempo (t) dello spessore di legno carbonizzato durante l'incendio è:

$$d_{\text{char},n}(t) = \beta_n \cdot t$$

con β_n velocità nominale di carbonizzazione $> \beta_0$.

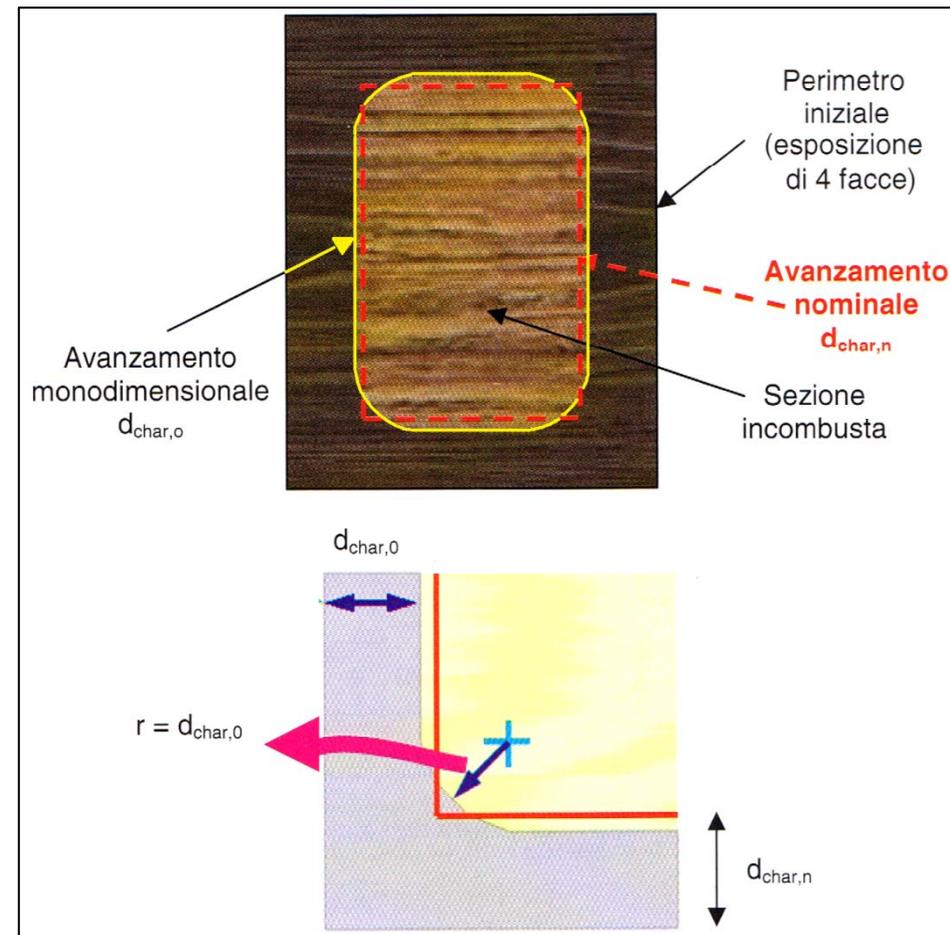
EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture non protette

La scelta della modalità monodimensionale o nominale deriva dalla dimensione minima della sezione trasversale residua b_{\min} valutata con:

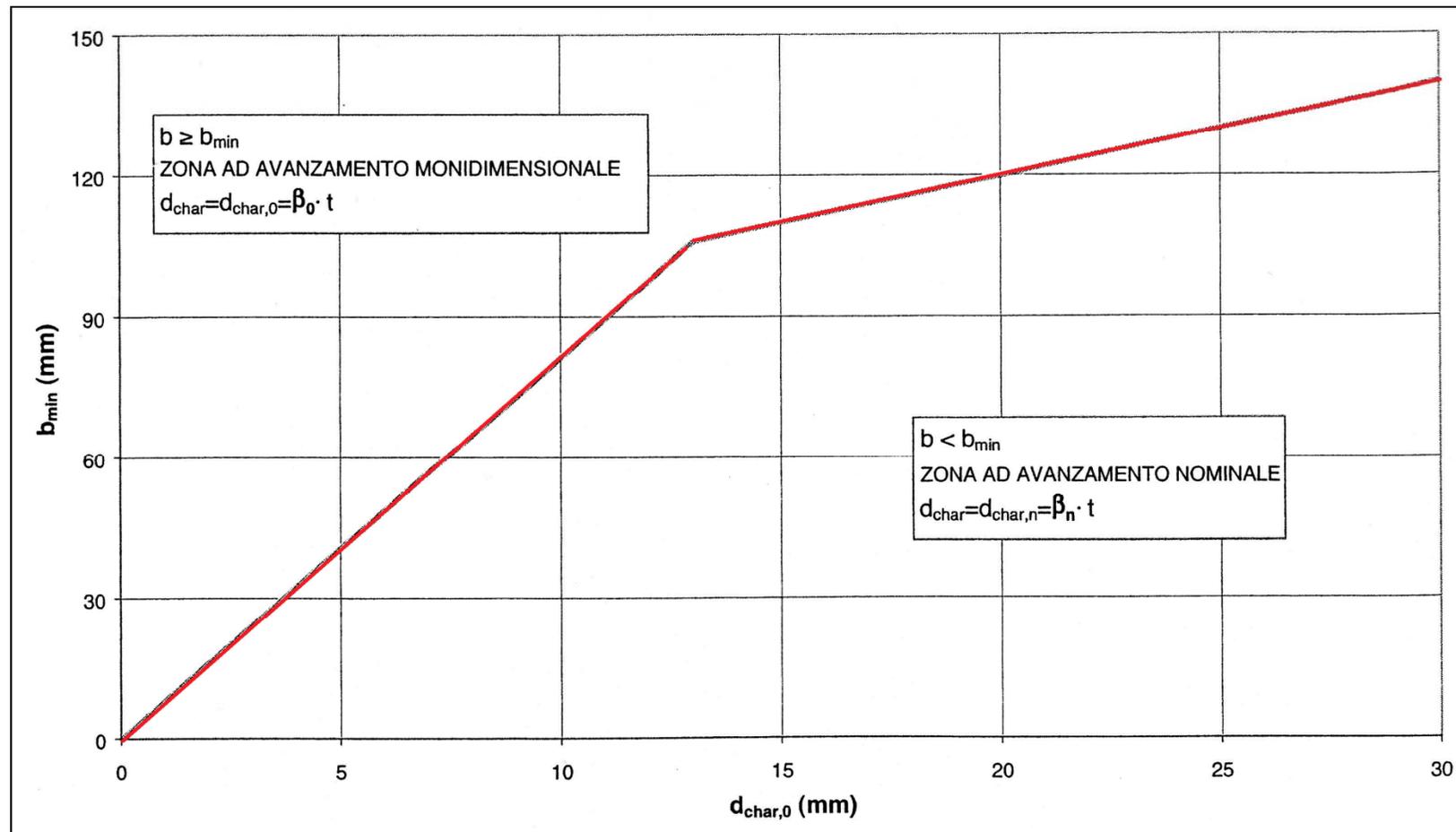
$$b_{\min} = \begin{cases} 2 \cdot d_{\text{char},0} + 80 & \text{per } d_{\text{char},0} \geq 13 \text{ mm} \\ 8,15 \cdot d_{\text{char},0} & \text{per } d_{\text{char},0} < 13 \text{ mm} \end{cases}$$



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture non protette



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

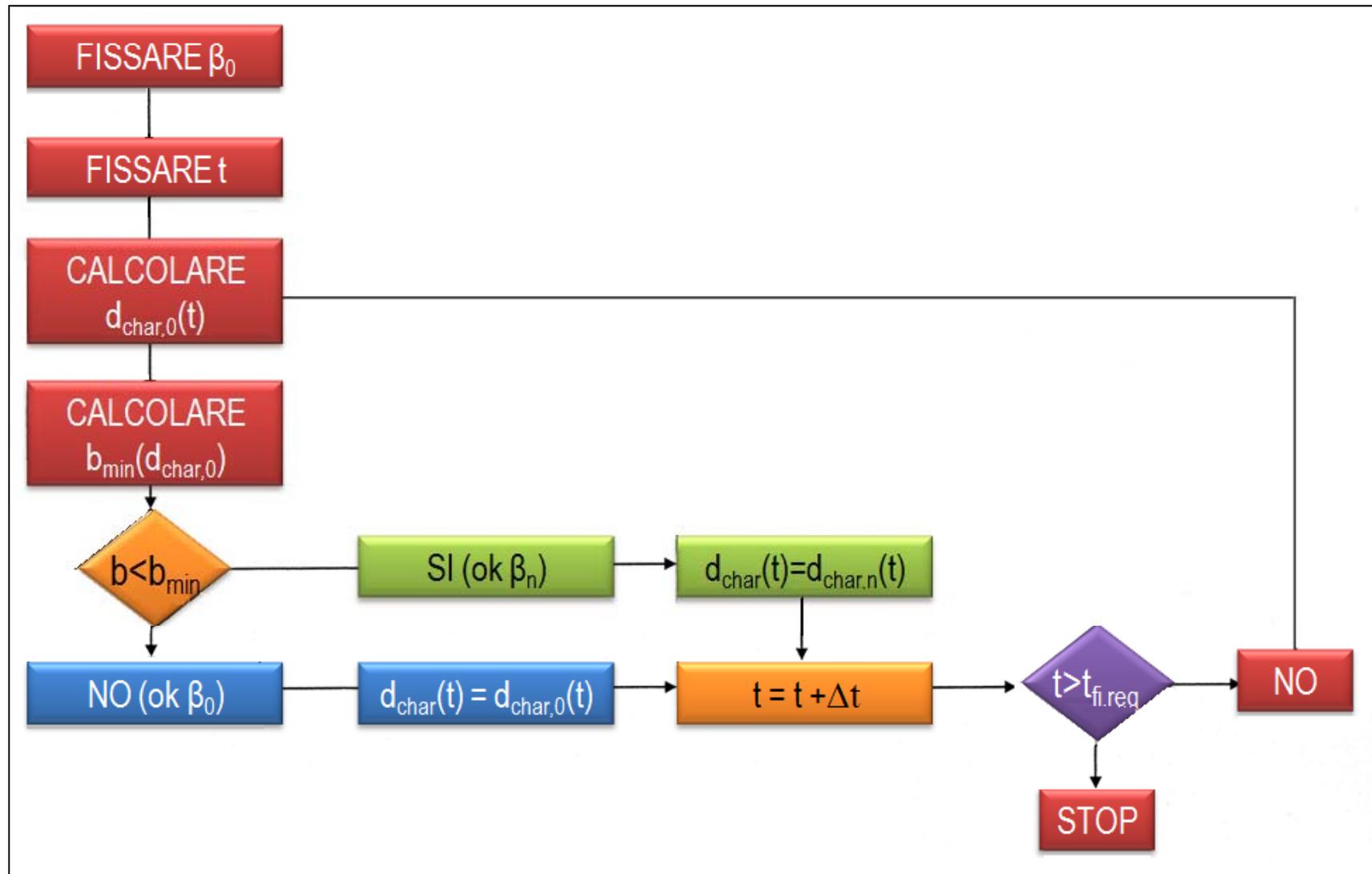
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture non protette

Tipologia		β_0 (mm/min)	β_n (mm/min)
a) Legno di conifera e legno di faggio	lamellare incollato con valore caratteristico della densità non inferiore a 290 kg/m ³	0,65	0,70
	massiccio con valore caratteristico della densità non inferiore a 290 kg/m ³	0,65	0,70
b) Legno duro (quercia, mogano, noce)	massiccio o lamellare incollato con valore caratteristico della densità pari a 290 kg/m ³	0,65	0,70
	massiccio o lamellare incollato con valore caratteristico della densità non inferiore a 450 kg/m ³	0,50	0,55
c) LVL	con valore caratteristico della densità non inferiore a 480 kg/m ³	0,65	0,70
d) Pannelli (con densità di 450 kg/m ³ e spessore 20 mm)	in legno massiccio	0,90	-
	in compensato	1,00	-
	altri pannelli lignei	0,90	-
e) Pannelli (di altra densità e spessore)	ρ_k = valore caratteristico della densità (kg/m ³) h_p = spessore del pannello (mm)	$\beta_{0,p,t} = \beta_0 \sqrt{\frac{450}{\rho_k} \cdot \frac{20}{h_p}}$	

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

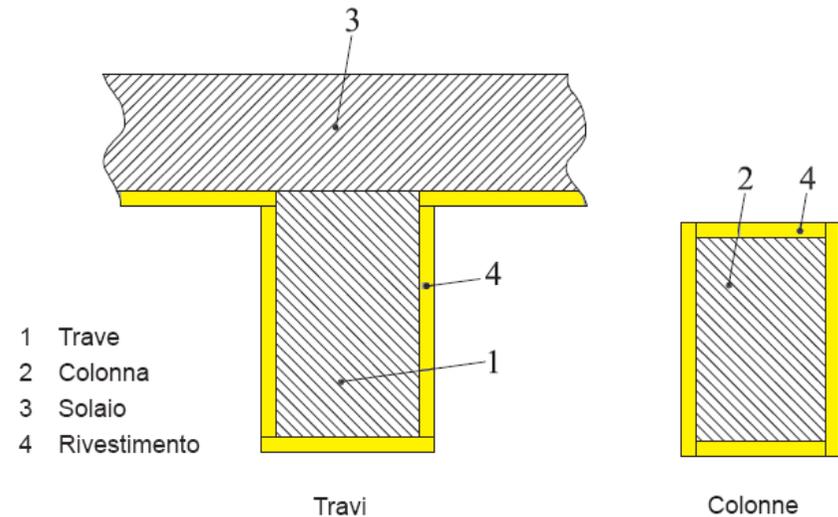
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI



EUROCODICE 5 – Parte 1-2

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture protette



Nel caso in cui l'elemento di legno sia protetto da un rivestimento:

- la carbonizzazione del legno inizia con un ritardo t_{ch} ;
- dopo un determinato intervallo di tempo t_f si verifica il collasso del rivestimento protettivo;
- l'inizio della carbonizzazione del legno può avvenire prima del collasso del rivestimento protettivo ($t_{ch} < t_f$), ma l'avanzamento della linea di carbonizzazione risulta rallentato;
- dopo il collasso del rivestimento protettivo, la velocità di carbonizzazione raggiunge valori superiori a quelli di norma, ma fino all'istante t_a in cui lo spessore di materiale carbonizzato dell'elemento protetto eguaglia lo spessore che risulterebbe carbonizzato se lo stesso non fosse protetto (e comunque dopo i 25 mm di avanzamento);
- dopo l'intervallo di tempo t_a la velocità di carbonizzazione del legno assume i valori del legno non protetto.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per strutture protette

La determinazione del contributo offerto alla resistenza al fuoco da parte di un protettivo riguarda i seguenti **parametri**:

- t_{ch} istante di inizio della carbonizzazione del legno protetto;
- t_f istante del collasso del protettivo;
- t_a istante in cui la velocità di carbonizzazione risulta "indisturbata";
- β_2 la velocità di carbonizzazione nell'intervallo di tempo compreso fra t_{ch} e t_f ;
- β_3 la velocità di carbonizzazione nell'intervallo di tempo compreso fra t_f e t_a .

Per un numero ristretto di rivestimenti protettivi, l'Eurocodice fornisce una serie di espressioni conservative. Per gli altri, inclusi *rivestimenti intumescenti e impregnanti*, occorrono specifiche indagini sperimentali descritte da norme di prova armonizzate tipo ENV 13381-7.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Istante di inizio carbonizzazione del legno protetto t_{ch}

Protettivo	Espressione di t_{ch} (min)	Note
Uno o più strati di pannelli in legno	$t_{ch} = h_p / \beta_0$	h_p spessore complessivo del pannello (in mm) β_0 velocità di carbonizzazione (in mm/min)
Lastra singola in gesso di tipo A, F o H secondo la norma EN 520 (se poste ad una distanza dai collegamenti < 2 mm)	$t_{ch} = 2,8 h_p - 14$	h_p spessore complessivo del pannello in (mm)
Lastra singola in gesso di tipo A, F o H secondo la norma EN 520 (se poste ad una distanza dai collegamenti > 2 mm)	$t_{ch} = 2,8 h_p - 23$	h_p spessore complessivo del pannello in (mm)
Doppia lastra in gesso di tipo A o H	$t_{ch} = 2,8 h_p - 14$	h_p spessore del pannello esterno incrementato del 50% dello spessore del pannello interno (in mm)
Doppia lastra in gesso di tipo A o H	$t_{ch} = 2,8 h_p - 14$	h_p spessore del pannello esterno incrementato del 80% dello spessore del pannello interno (in mm)
Protettivi a base di lana di vetro o di roccia applicati a travi o colonne	$t_{ch} = 0,07 (h_{ins} - 20) \sqrt{\rho_{ins}}$	h_{ins} spessore del materiale isolante (in mm) ρ_{ins} densità dell'isolante (in kg/m ³)

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Istante di collasso del protettivo t_f

$$t_f = t_{ch} = h_p / \beta_0 \quad \text{per rivestimenti in legno}$$

$$t_f = t_{ch} = 2,8 h_p - 14 \quad \text{per rivestimenti in gesso tipo A o H}$$

Istante in cui la velocità di carbonizzazione è uguale a quella del legno non protetto t_a

E' necessario controllare se:

- *lo spessore di carbonizzazione supera 25 mm,*
- *lo spessore carbonizzato è uguale a quello che si avrebbe per materiale non protetto.*

In entrambi i casi, dopo il raggiungimento di uno dei due limiti, la velocità di carbonizzazione è pari a quella dell'essenza non protetta.

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Velocità di carbonizzazione per $t_{ch} \leq t \leq t_a$

$$\beta_2 = \begin{cases} k_2 \cdot \beta_0 \\ k_2 \cdot \beta_n \end{cases} \quad \text{per } t_{ch} \leq t \leq t_f \text{ e } k_2 \leq 1$$

$k_2 = 1 - 0,018 \cdot h_p$ per lastre di gesso di tipo F

$$k_2 = \begin{cases} 1 & \text{per } h_{is} = 20 \text{ mm} \\ 1 - 0,4 \cdot (h_{is} - 20)/25 & \text{per } 20 \text{ mm} \leq h_{is} \leq 45 \text{ mm} \\ 0,6 & \text{per } h_{is} > 45 \text{ mm} \end{cases}$$

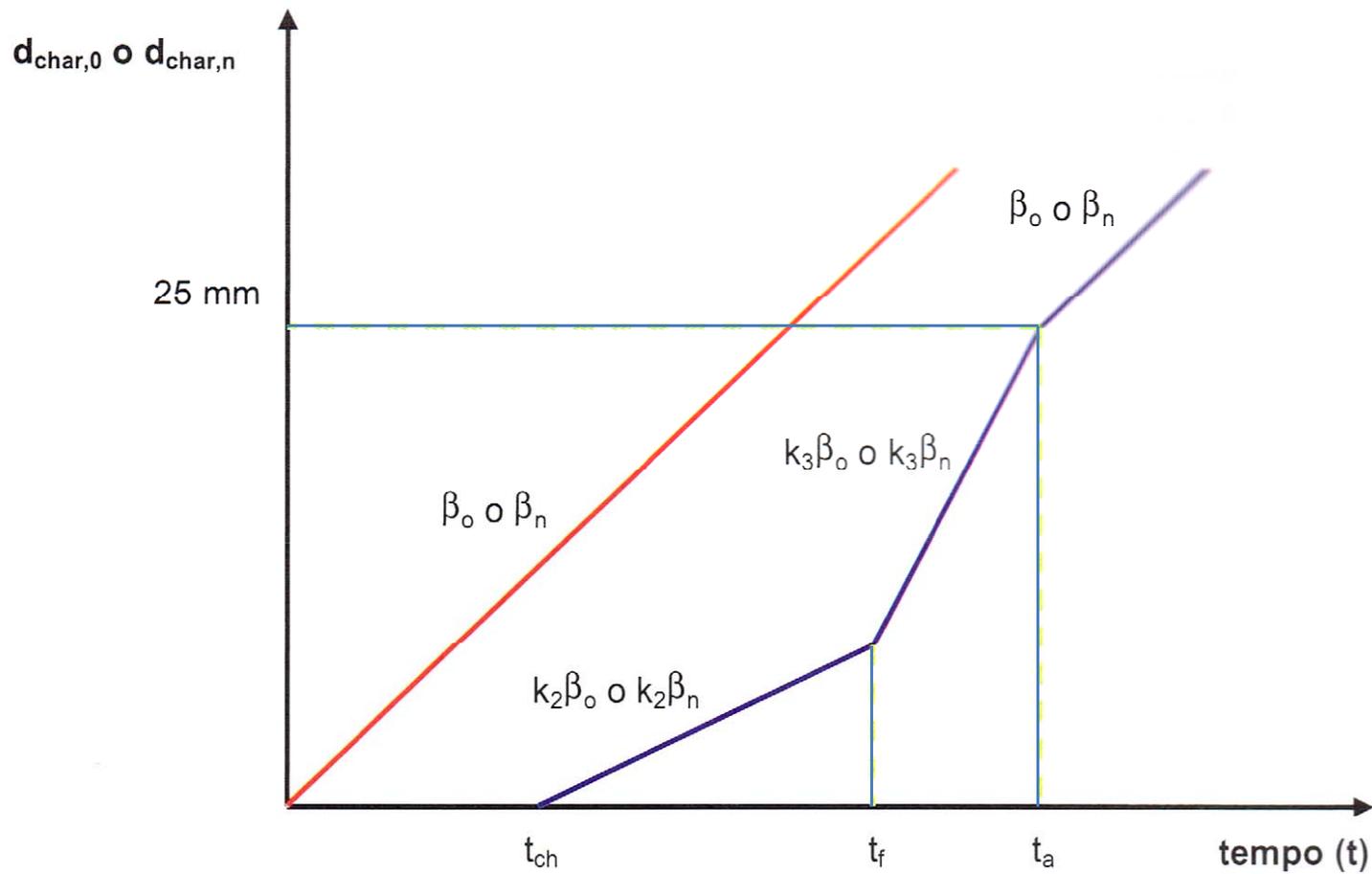
per lana di vetro o di roccia entro i 1.000°C
e con h_{is} lo spessore dell'isolante (in mm)

$$\beta_3 = \begin{cases} k_3 \cdot \beta_0 \\ k_3 \cdot \beta_n \end{cases} \quad \text{per } t_f \leq t \leq t_a \text{ e } k_3 = 2$$

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

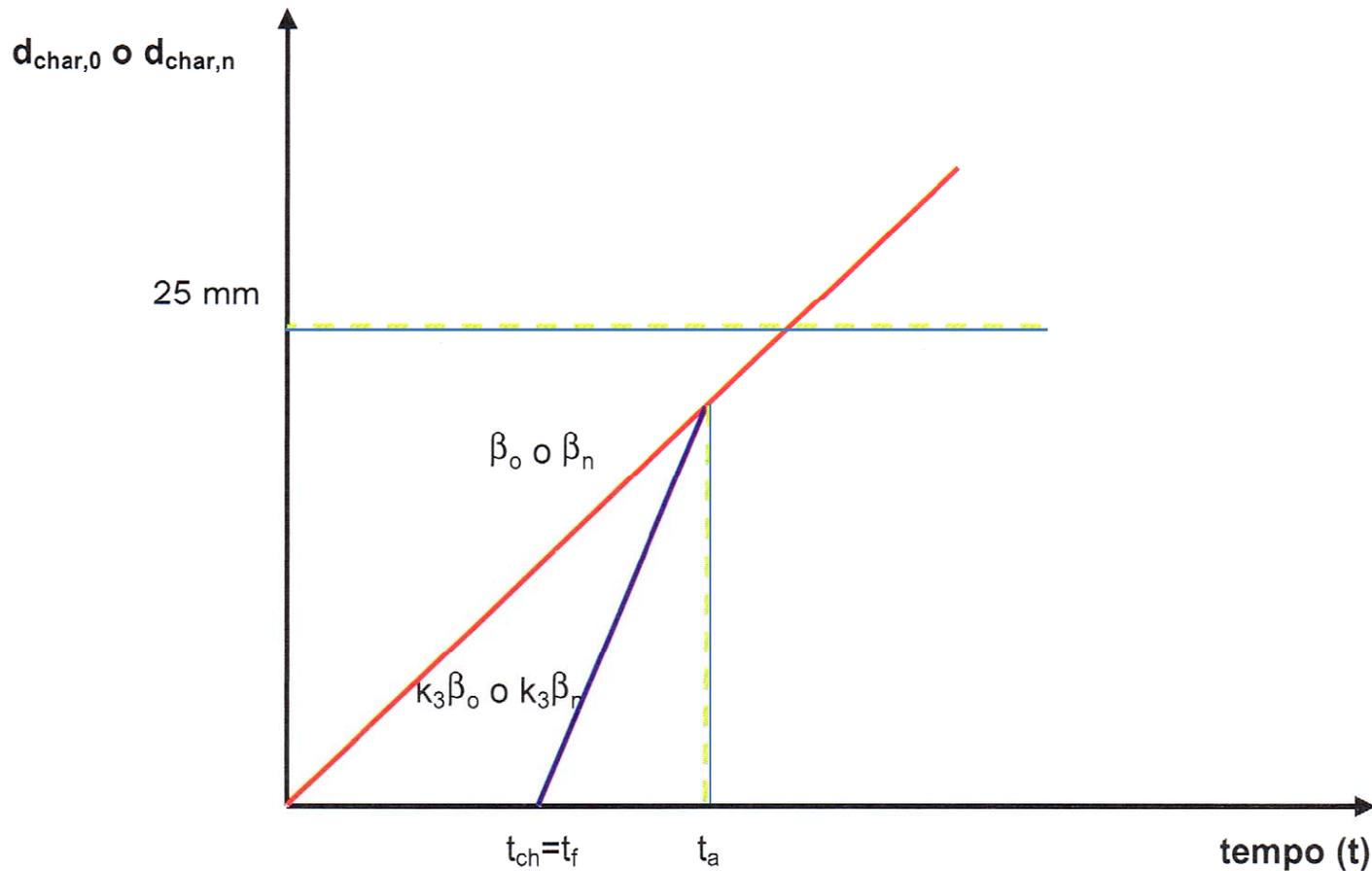
1 Velocità di carbonizzazione per $t_{ch} \leq t_f$



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

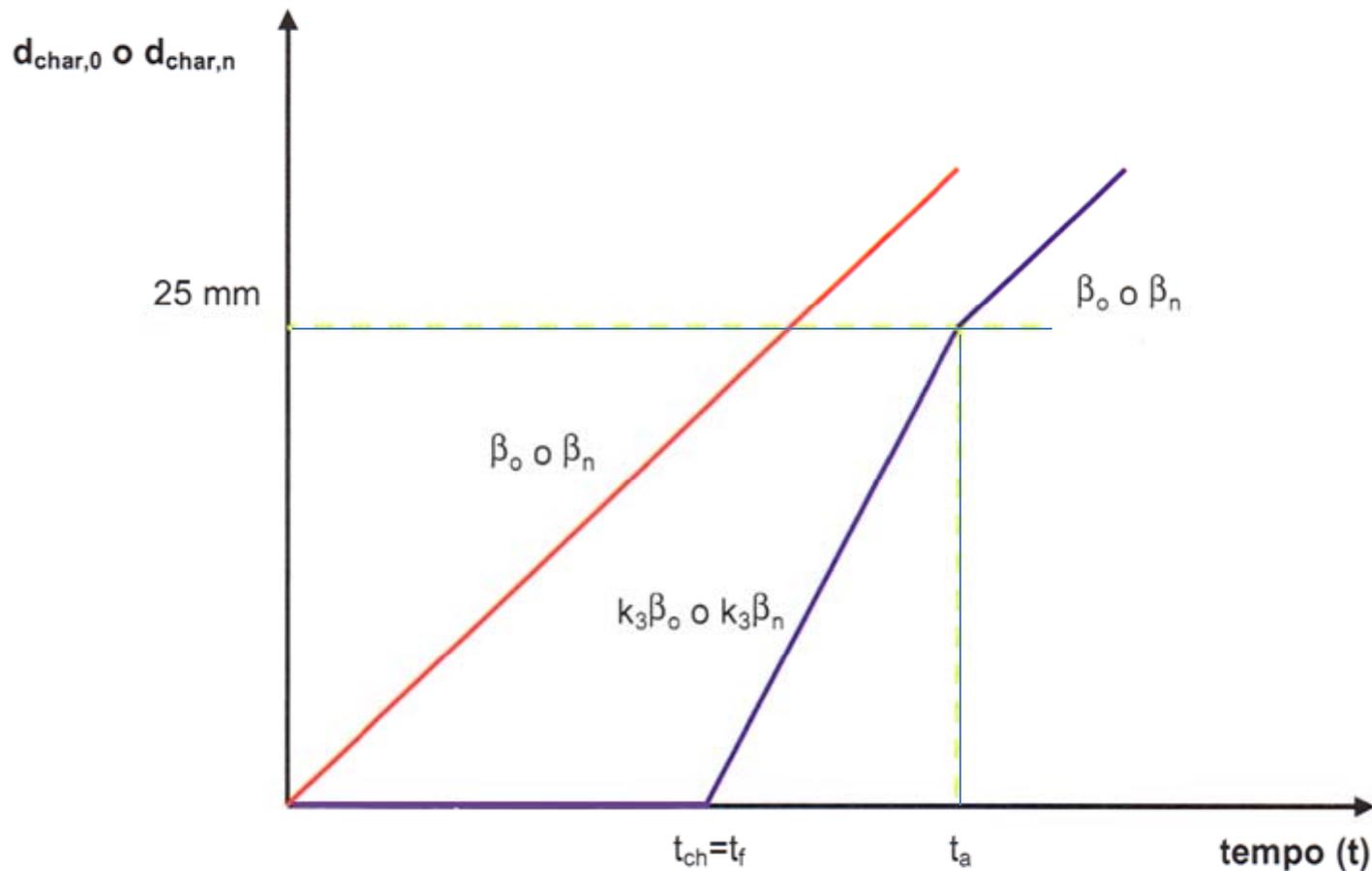
2 Velocità di carbonizzazione per $t_{ch} = t_f$ e $t_a < t_a(25\text{mm})$



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

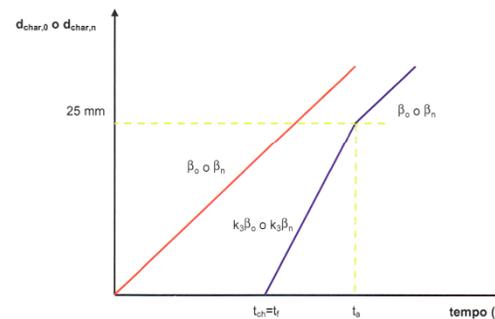
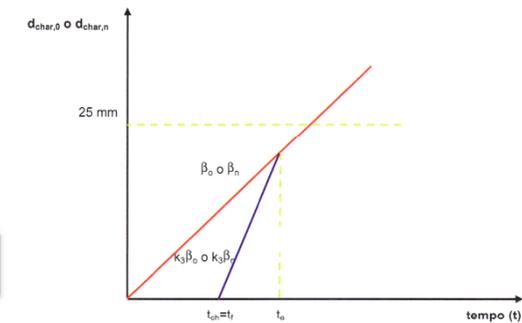
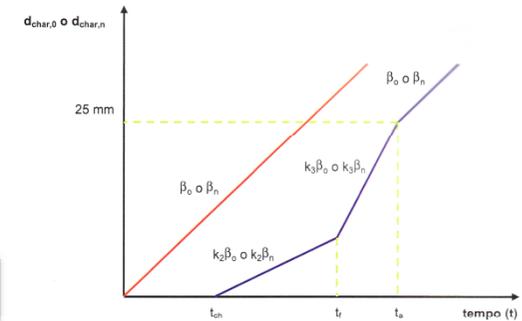
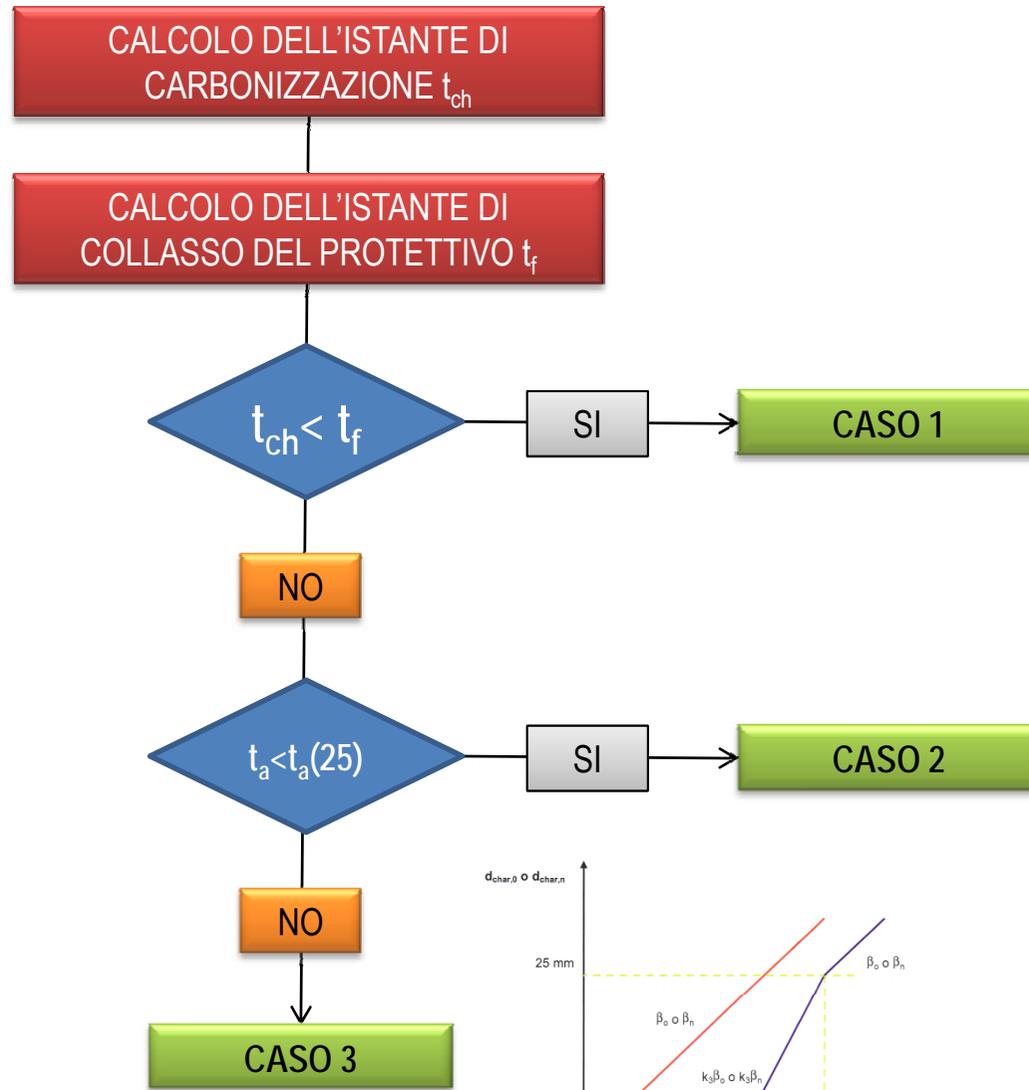
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

3 Velocità di carbonizzazione per $t_{ch} = t_f$ e $t_a = t_a(25\text{mm})$



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

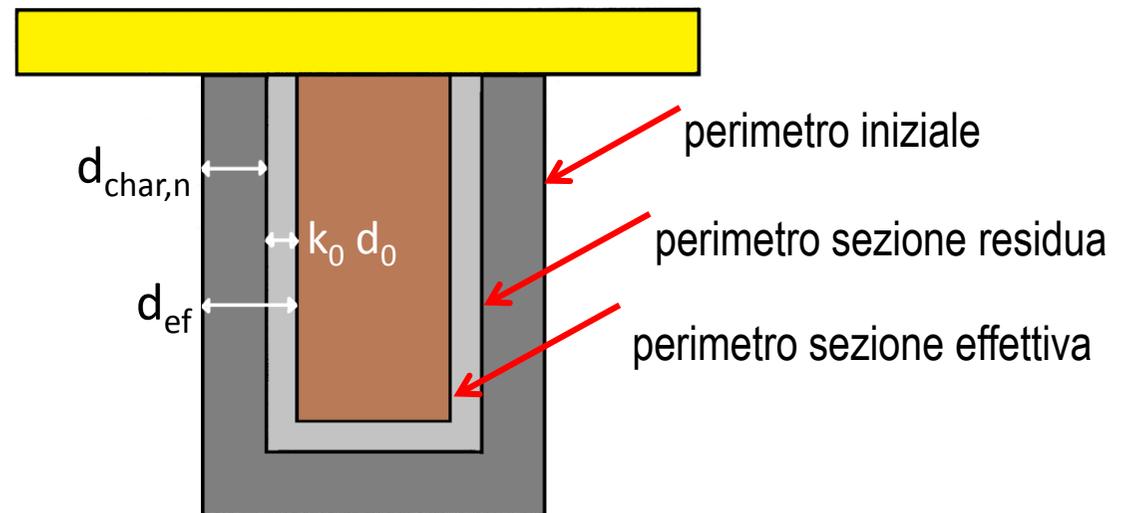
Metodo della sezione ridotta

Si determina in modo approssimato la sezione ridotta "effettiva" di un elemento in legno sottoposto a incendio e si effettuano le verifiche strutturali sulla sezione, ipotizzando che le proprietà meccaniche rimangano costanti rispetto a quelle a "freddo".

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

$$d_{char,n} = \beta_n \cdot t$$

$$d_0 = 7 \text{ mm}$$



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

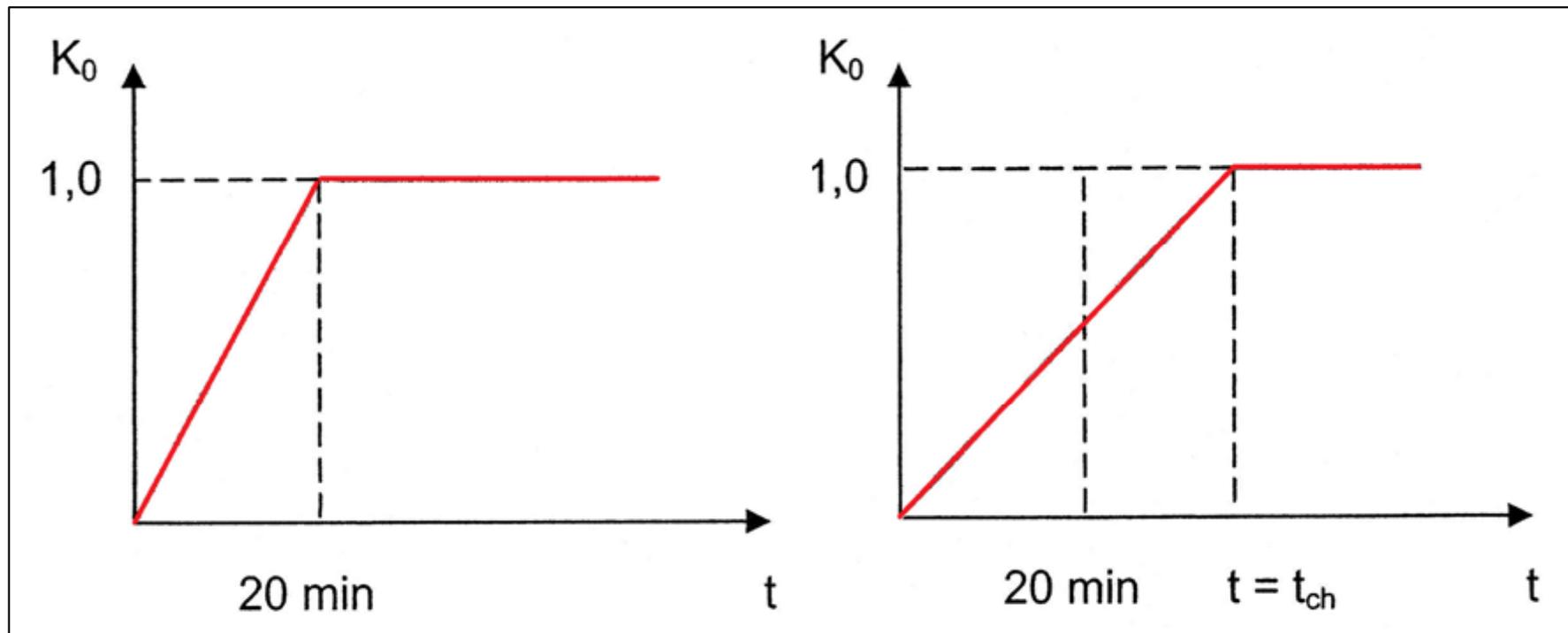
Metodo della sezione ridotta

Determinazione k_0

Legno non protetto

Legno protetto – tempo di esposizione < 20 minuti

Legno protetto – tempo di esposizione > 20 minuti



EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

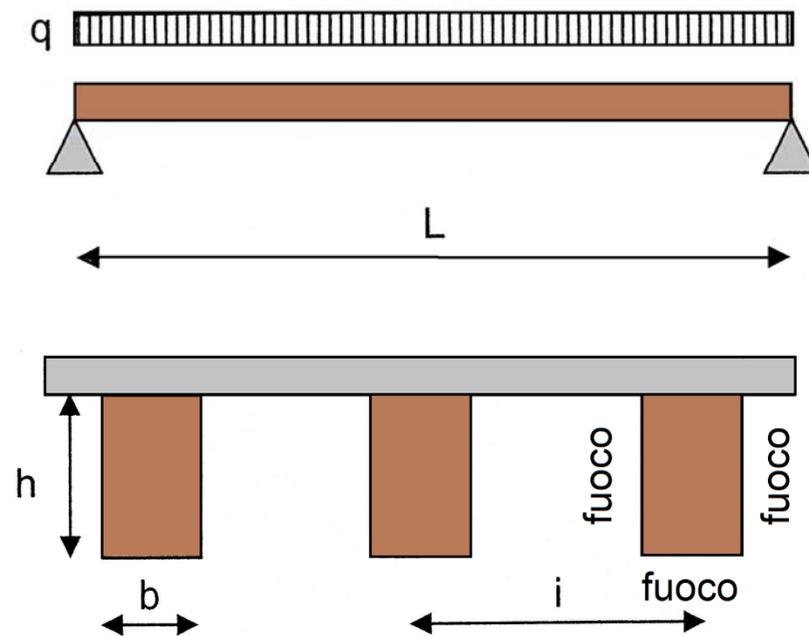
METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

Verifica di una trave esposta su tre lati

Si segue l'approccio prescrittivo applicando il metodo semplificato dell'Eurocodice EN 1995-1-2 della sezione ridotta e modellando l'incendio con la curva standard ISO 834.

La struttura si trova all'interno di un edificio scolastico (categoria di sovraccarico C1), di altezza antincendio inferiore a 24 m e con resistenza al fuoco richiesta R60.



luce trave (L):	5,0 m
interasse travi (i):	0,5 m
sezione rettangolare ($b \times h$):	0,15 x 0,2 mxm

peso proprio (G_k)	1,5 kN/m ²
sovraccarico accidentale (Q_k)	2,0 kN/m ²
esposizione al fuoco:	3 lati

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

carico distribuito: $q = G_k \cdot i + 0,7 \cdot Q_k \cdot i = 1,5 \cdot 0,5 + 0,7 \cdot 2,0 \cdot 0,5 = 1,45 \text{ kN/m}$

momento flettente: $M_d = q \cdot L^2/8 = 1,45 \cdot 5,0^2/8 = 4,53 \text{ kN/m}$

resistenza caratteristica a flessione dell'abete (f_k) = 24 N/mm²

resistenza di progetto in condizioni d'incendio:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \cdot f_{20} / \gamma_{M,fi} = k_{mod,fi} \cdot (k_{fi} \cdot f_k) / \gamma_{M,fi} = 1,0 \cdot (1,25 \cdot 24) / 1,0 = 30,0 \text{ N/mm}^2$$

momento resistente minimo per la stabilità della trave:

$$w_{amm} = M_d / f_{d,fi} = 4.530.000 / 30 = 151.000 \text{ mm}^3$$

massima tensione a "freddo":

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b \cdot h^2 / 6) = 4.530.000 / (150 \cdot 200^2 / 6) = 4,5 \text{ N/mm}^2$$

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

Verifica della sezione dopo un'esposizione di 90 minuti al fuoco

spessore nominale di legno carbonizzato dopo 90 minuti:

$$d_{\text{char},n}(t) = \beta_n \cdot t = 0,70 \cdot 90 = 63,0 \text{ mm}$$

spessore effettivo di legno carbonizzato:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0 = 63,0 + 1,0 \cdot 7,0 = 70,0 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = 150,0 - 2 \cdot 70,0 = 10,0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = 200,0 - 70,0 = 130,0 \text{ mm}$$

massima tensione dopo 90 minuti:

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2 / 6) = 4.530.000 / (10 \cdot 130^2 / 6) = 146,2 \text{ N/mm}^2 > f_{d,fi} = 30 \text{ N/mm}^2$$

La sezione non risulta verificata (R90).

EUROCODICE 5 – Parte 1-2 – STRUTTURE DI LEGNO

METODI DI CALCOLO SEMPLIFICATI

Esempio applicativo

Verifica della sezione dopo un'esposizione di 60 minuti al fuoco

spessore nominale di legno carbonizzato dopo 60 minuti:

$$d_{\text{char},n}(t) = \beta_n \cdot t = 0,70 \cdot 60 = 42,0 \text{ mm}$$

spessore effettivo di legno carbonizzato:

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 \cdot d_0 = 42,0 + 1,0 \cdot 7,0 = 49,0 \text{ mm}$$

$$b_{\text{ef}} = 150,0 - 2 \cdot 49,0 = 52,0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = 200,0 - 49,0 = 151,0 \text{ mm}$$

massima tensione dopo 60 minuti:

$$\sigma_{d,i} = M_d / (b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2 / 6) = 6 \cdot 4.530.000 / (52,0 \cdot 151,0^2 / 6) = 22,3 \text{ N/mm}^2 < f_{d,fi} = 30 \text{ N/mm}^2$$

La sezione risulta verificata (R60).
