

promo_legno

Il legno e il fuoco

Massimo Del Senno, Maurizio Piazza



C Il legno e il fuoco

Scopo: conoscere il comportamento del legno al fuoco e le basi principali della protezione antincendio per le costruzioni di legno.

Indice

- 1 L'effetto del fuoco sul legno
- 2 I principi della protezione antincendio e la normativa vigente
- 3 La resistenza al fuoco delle strutture di legno
- 4 La resistenza al fuoco delle connessioni delle strutture di legno
- 5 Protezione contro il fuoco delle strutture e della costruzione di legno

Introduzione

Nel seguito si darà per scontata la conoscenza delle nozioni di base sulla produzione e sulla propagazione del calore, nonché della terminologia specifica alla quale si farà riferimento. Da un punto di vista del tutto generale, la resistenza al fuoco di una struttura sottoposta ad un determinato sistema di carichi viene definita come il tempo necessario, dall'inizio della sua esposizione all'incendio, perché si raggiunga una situazione di collasso, parziale o totale, della struttura medesima. La *situazione di collasso* deve essere considerata in senso lato, potendo comprendere l'instaurazione di meccanismi di reale collasso o il raggiungimento di stati ultimi di resistenza per la sezione più sollecitata o di stati ultimi di deformazione per l'intera struttura o per una sua parte.

In realtà per quanto riguarda le prestazioni richieste agli elementi costruttivi sottoposti ad azione di incendio, esse vanno oltre la capacità di conservare la stabilità meccanica ed implicano la possibilità di opporsi efficacemente alla propagazione del fuoco ed alla trasmissione del calore. Di conseguenza, la resistenza al fuoco viene definita usualmente mediante i criteri di *stabilità* al fuoco (R), di *tenuta* al fuoco (E) e di *isolamento termico* (I) come di seguito specificato:

- R la stabilità al fuoco esprime, per il generico elemento della costruzione portante o no, la capacità di conservare la propria resistenza meccanica in corrispondenza di un determinato incendio;
- E la tenuta al fuoco si riferisce all'attitudine di un elemento divisorio (ad esempio tra differenti compartimenti) sottoposto all'azione di un determinato incendio su un lato a non lasciare passare né a produrre fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto;
- I l'isolamento termico esprime infine la capacità dell'elemento divisorio a mantenere entro livelli prefissati la trasmissione del calore sul lato non esposto all'incendio; usualmente tali livelli sono assunti in corrispondenza della temperatura massima verificata sul lato non esposto (≤ 150 °C) per gli elementi strutturali in generale: per le chiusure mobili si fa riferimento all'incremento di temperatura rispetto alla temperatura ambiente prendendo in considerazione anche il valore medio (≤ 140 °C), e fissando limiti più ampi (≤ 180 °C) per quello massimo.

In tutta generalità dunque, la resistenza al fuoco può fare riferimento a livelli di protezione REI (elementi portanti e di compartimentazione), EI (elementi solo di compartimentazione) o semplicemente R (elementi solo portanti). È evidente che i simboli REI ed EI si riferiscono usualmente ad elementi di tamponamento o di partizione (eventualmente mobili, come porte e finestre); il simbolo R si riferisce unicamente ad elementi aventi funzioni portanti. Si può tuttavia notare che, ove non esistano elementi specificatamente a ciò dedicati, alle strutture portanti di solaio negli edifici civili viene normalmente richiesto un livello di protezione REI.

La resistenza al fuoco, così definita, non è quindi una caratteristica intrinseca dei materiali ma esprime la prestazione globale dell'elemento, strutturale o non strutturale, nei confronti dell'azione di incendio; dipende quindi, oltre che dalle proprietà fisiche e meccaniche del materiale, dai criteri costruttivi e dai dettagli realizzativi della struttura e quindi anche dalle scelte progettuali effettuate. Conseguentemente si dovranno adottare appropriati criteri di dimensionamento in relazione alle proprietà intrinseche dei singoli materiali utilizzati. Tali problematiche, già evidenti nei casi in cui il materiale presenti cosiddetta "reazione nulla" (sia cioè incapace di alimentare e diffondere il fuoco) nei confronti del fuoco (conglomerato cementizio, acciaio, alluminio), si evidenziano in modo ancora più complesso quando il materiale costituente l'elemento strutturale presenti invece una certa "reazione" al fuoco, come è appunto il caso del legno.

La resistenza al fuoco viene generalmente correlata, in modo convenzionale, al comportamento della struttura stessa durante l'esposizione ad un fuoco-modello rappresentato da un ambiente gassoso a temperatura T crescente, entro il quale s'ipotizza immersa la struttura o parte di essa. È ormai generalizzato, nel campo delle usuali strutture per l'ingegneria civile, il riferimento alla curva temperatura-tempo standard proposta nella Norma ISO 834 [17] ed adottata anche negli Eurocodici:

$$T_t = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

essendo t il tempo in minuti (misurato a partire dall'inizio dell'incendio) e T_t la corrispondente temperatura (°C).

La resistenza al fuoco, così definita, è quindi un parametro convenzionale, essendo evidentemente relativa non ad un fuoco reale, bensì alle condizioni che s'instaurano in un ambiente a caratteristiche standardizzate. Essa presenta tuttavia l'indubbio vantaggio di produrre risultati "omogenei" e direttamente confrontabili, anche per strutture diverse e diversamente sollecitate. È tuttavia da tempo in atto una interessante e nutrita attività di ricerca per individuare criteri di valutazione di una resistenza al fuoco più "realistica", cioè correlata ad incendi reali, o, almeno, per introdurre criteri di equivalenza tra la resistenza convenzionale sopra definita e la resistenza effettiva[12]. Giova comunque ricordare come, nel caso particolare della struttura lignea, il riferimento ad incendi reali anziché convenzionali costituisca, come si vedrà, problema abbastanza secondario.

È interessante ricordare ancora come la prova di esposizione dell'elemento strutturale al fuoco, che un tempo doveva necessariamente avere attuazione fisica in apposito forno, possa oggi essere attuata con metodologie numeriche, certamente più rapide ed economiche, che trovano nella tradizionale prova in forno i necessari elementi di taratura e

di controllo di affidabilità: tale possibilità, oltre che nelle proposte normative europee ([13], [14], [16]) è comune anche alle normative a suo tempo introdotte in sede nazionale ([19], [20], [21]).

L'iter di progetto della struttura nei confronti dell'evento "incendio" identifica due momenti fondamentali: la "richiesta" di resistenza al fuoco e la "prova" (o verifica) della struttura progettata al fine di accertare che essa risponda positivamente a quanto richiestole. Nel seguito non si tratterà la fase di valutazione della "richiesta" di resistenza, volendo invece approfondire la fase di "verifica" della stessa resistenza. Comunque è evidente che, nell'ambito della definizione convenzionale di resistenza al fuoco appena richiamata, la "richiesta" di resistenza al fuoco della struttura dovrà anch'essa adeguarsi a tale criterio. In genere, la resistenza convenzionale richiesta viene definita quantificando i parametri che caratterizzano i probabili incendi reali e la loro pericolosità, la possibilità di intervento per operazioni di spegnimento, le caratteristiche del fabbricato cui la struttura è destinata, l'importanza delle funzioni che nel fabbricato stesso si svolgono; tutto ciò va messo ovviamente in relazione a predeterminati criteri di sicurezza finale. Nel caso della struttura portante lignea, è poi necessario determinare il contributo all'incendio della medesima struttura e, conseguentemente, il suo apporto alla definizione della richiesta di resistenza. Ciò può essere facilmente ottenuto aumentando il valore del cosiddetto carico d'incendio del locale che presenta strutture portanti lignee, considerando, ad esempio, il contributo all'incendio di uno strato superficiale di legno di 2,5 cm: tale metodo è quello in vigore, attualmente, in Italia.

Quindi, considerando

- i criteri generali di verifica della resistenza al fuoco delle strutture;
- i diversi orientamenti progettuali che permettono di conferire alle stesse una predefinita resistenza nei confronti dell'incendio;
- i procedimenti, fisici ed analitici, che permettono di determinare la resistenza convenzionale al fuoco delle strutture lignee

si è visto come la resistenza al fuoco non sia una caratteristica intrinseca dei materiali ma come con essa si cerchi di definire una prestazione globale nei confronti dell'azione di incendio da parte dell'elemento strutturale (o dell'elemento non strutturale). Le proprietà fisiche e meccaniche del materiale influenzano tale prestazione, ma sono determinanti i criteri costruttivi e realizzativi della struttura e quindi anche le scelte progettuali effettuate.

L'iter di progetto della struttura nei confronti dell'evento incendio, che deve essere riguardato come una delle possibili azioni eccezionali sollecitanti la struttura, è oggi del tutto simile a quello svolto per la stessa struttura nelle situazioni di normale utilizzo. Ciò è stato reso possibile anche grazie alla presentazione delle normative nazionali UNI-VV.F nonché alle parti 1-2 degli EUROCODICI 2, 3 e 5, che hanno introdotto ufficialmente il procedimento analitico nella valutazione della capacità portante di strutture sottoposte ad incendio.

**La combustibilità del legno
giustifica davvero
la diffidenza verso il suo impiego
come materiale da costruzione ?**

Probabilmente i degradi dovuti agli **attacchi biologici** hanno complessivamente causato, nel corso del tempo, danni, non solo economici, **gravi quanto quelli causati dal fuoco.**



ma questi hanno causato conseguenze più pesanti in termini di vite umane, e, soprattutto, si sono manifestati in maniera drammatica



Una mentalità radicata nel nostro paese associa il rischi di incendio all'uso del legno, per cui esso, nei componenti edilizi è per lo più utilizzato, oltre che nell'arredamento, per le chiusure interne ed esterne, per la cui realizzazione costituisce, peraltro il materiale principe, e solo in alcune aree non è stato del tutto soppiantato come elemento strutturale nelle partizioni orizzontali e sub-orizzontali.

L'introduzione di nuove tecniche costruttive basate sulla disponibilità di nuovi materiali (in particolare le resine sintetiche) ha però riproposto il legno all'attenzione di progettisti e costruttori



Questo ha determinato un rinnovato interesse per lo studio di:

meccanismi di combustione del legno;

tecniche per ostacolare questi meccanismi, cioè per “migliorare” il comportamento al fuoco del legno;

I risultati di questi studi hanno orientato i sistemi di leggi e norme che regolano l'uso del legno nei vari settori dell'edilizia

Per quanto riguarda il primo punto consideriamo soprattutto:

Il meccanismo della combustione

L'evoluzione delle caratteristiche meccaniche del legno con la temperatura

Occorre prima spendere qualche parola sull'evento "incendio" la cui possibilità, in relazione alla combustibilità del legno, costituisce come si è detto il maggior freno all'impiego di questo materiale nell'edilizia, soprattutto abitativa.

È un fenomeno di combustione violenta ed incontrollabile che

- non è voluto né controllato dall'uomo
- avviene in luoghi e coinvolge combustibili ad esso non destinati
- è causato da un apporto di energia del tutto casuale.

Nell'ambiente della società industriale abbondano i materiali combustibili (idrocarburi, resine sintetiche, materiali cellulosici, tra cui il legno), i generatori di innesco (fenomeni termici, meccanici, elettrici) e il cosiddetto autoinnesco che avviene quando si raggiunge la temperatura di autocombustione del materiale (sensibilmente più elevata di quella di combustione).

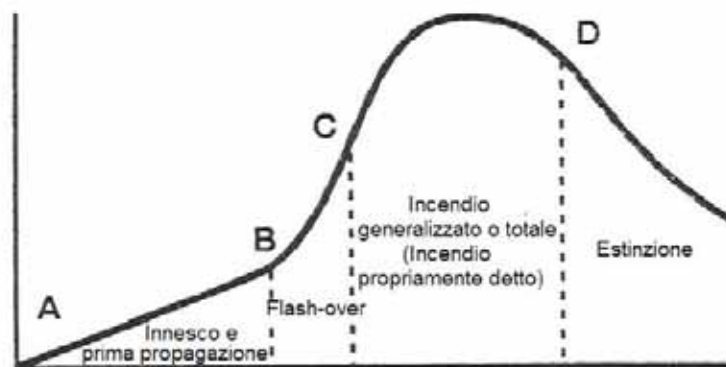
La combustione necessita di un'adeguata concentrazione di comburente nell'aria, generalmente l'ossigeno, variabile in funzione del tipo di combustibile, comunque non minore del 14%.

Le molecole di diverse sostanze (esplosivi, cellulosa) contengono una quantità di ossigeno sufficiente per bruciare senza apporti esterni e quindi anche in assenza d'aria.

L'incendio vero e proprio comporta lo sviluppo di fiamme (principale veicolo di propagazione); in esso si distinguono quattro fasi in funzione

- della temperatura nella zona interessata
- del trascorrere del tempo.

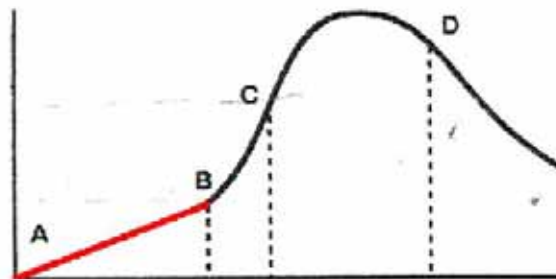
la curva di "incendio reale" è rappresentabile come di seguito



Nel tratto AB (innesco e propagazione):

La temperatura cresce lentamente, con andamento quasi lineare

- le sostanze infiammabili presenti sono coinvolte in percentuali limitate e piccole.
- Il forte assorbimento di calore da parte di muri, pareti e soffitti ancora freddi e l'evaporazione dell'umidità da tutti i materiali (anche non combustibili) presenti, rallentano il riscaldamento dell'ambiente.

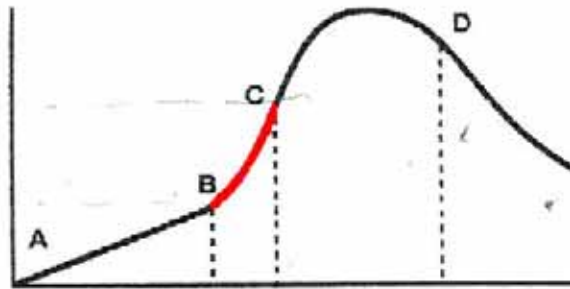


Nel tratto BC (Flash over):

La temperatura

-arriva a distillare prodotti combustibili: i gas prodotti formano con l'aria una miscela infiammabile, e il calore prodotto fino a questo momento porta la temperatura ambiente a livelli sufficienti all'innescio.

-cresce poi rapidamente raggiungendo, con andamento esponenziale, 500/600 °C in 5 / 25 minuti a seconda del combustibile e della quantità di comburente disponibile.

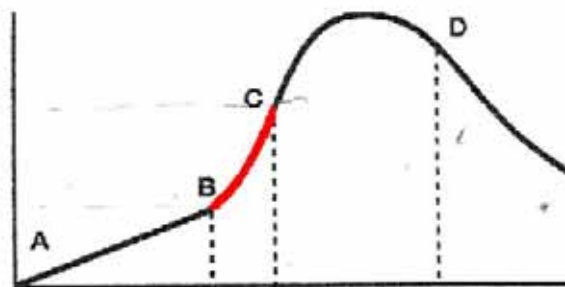


tratto BC (Flash over)

L'incendio coinvolge all'inizio i combustibili gassosi, poi si propaga sempre più velocemente a tutti i prodotti combustibili presenti.

La quantità di calore generata rende i fenomeni di dispersione quasi trascurabili e tutta l'umidità residua viene eliminata molto velocemente.

Il flash over è considerato il punto di passaggio fra la fase di combustione e di fiamma a quella di incendio: un tempo fa si parlava di "punto" di flash over e non di "fase", indicando in un certo senso un vero e proprio punto di non ritorno.

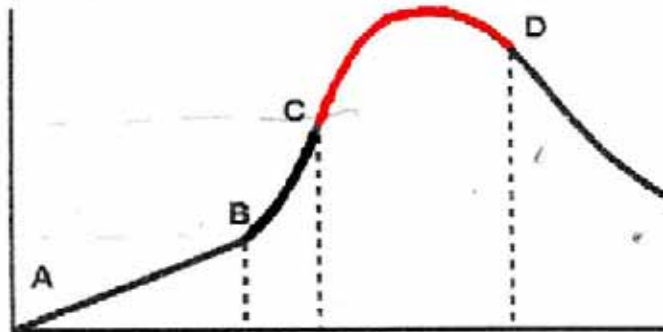


Nel tratto CD: incendio generalizzato o totale

-Si ha la combustione di tutto quanto è infiammabile: la temperatura, per la grande quantità di calore prodotta sale ulteriormente.

-La dispersione nell'ambiente è ormai limitata, mentre si ha una forte trasmissione di calore verso l'esterno per l'alta temperatura raggiunta dai divisori (pareti e soffitti).

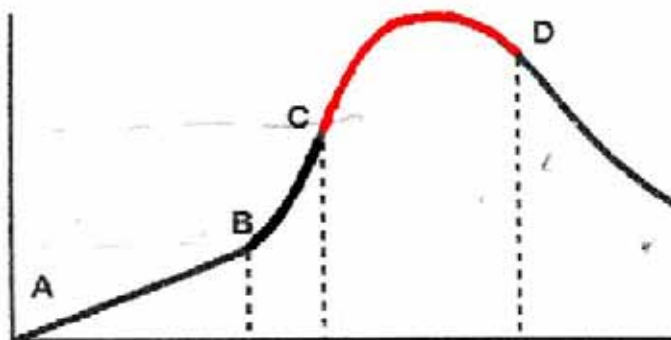
-La durata di questa fase è funzione della massa di combustibile presente e **soprattutto della disponibilità di comburente** che, a causa del coinvolgimento di grandi quantità di materiali, si esaurisce rapidamente.



tratto CD: incendio generalizzato o totale

Generalmente comporta il raggiungimento di temperature superiori anche molto a 900°C : l'incremento procede in modo costante fino al raggiungimento di un equilibrio termico fra ambiente interno, coinvolto nell'incendio, ed ambiente esterno.

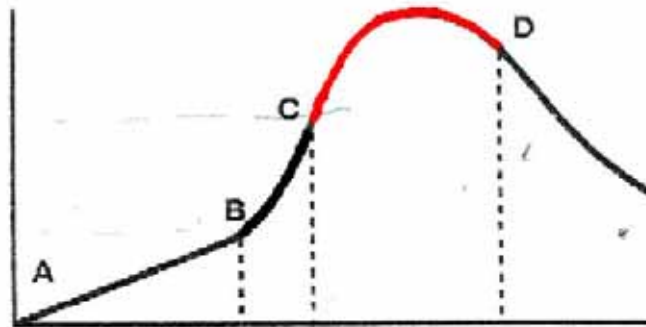
Fondamentale è sempre l'apporto di comburente dall'esterno che, da un lato, aiuta l'alimentazione della combustione, ma dall'altro, con l'ingresso di gas notevolmente più freddi rispetto all'ambiente coinvolto determina un raffreddamento



tratto CD: incendio generalizzato o totale

Questa fase comporta i maggiori rischi per

- possibile deterioramento o collasso delle strutture coinvolte,
- possibile trasmissione dell'incendio a zone limitrofe per fiamme che escono dalle aperture, produzione di scintille e parti incandescenti che trasportate dal vento possono attaccare nuovi combustibili e, soprattutto per le grandi quantità di gas infiammabili prodotte che fuoriuscendo dalla zona coinvolta in presenza di nuovo comburente si innescano immediatamente, con frequenti danni alle persone e propagazione anche a zone distanti dal focolaio iniziale.

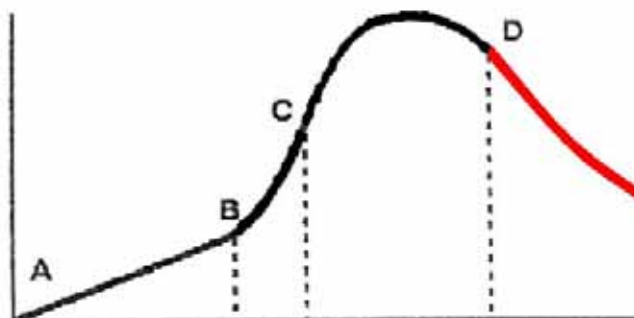


Nel tratto DE: raffreddamento o estinzione

il materiale combustibile comincia ad esaurirsi mentre assume importanza la dispersione (attraverso pareti ed aperture).

la temperatura comincia a regredire dapprima lentamente, poi sempre più velocemente fino a 200/300°C, più legata all'effetto radiante delle superficie calde che a nuove combustioni in atto.

La fase di raffreddamento finale (da 300°C fino a temperatura ambiente) è molto lenta e pericolosa: il materiale di superficie freddo maschera quello dove il fuoco "cova" e dove è possibile una nuova ignizione.



Il meccanismo della combustione del legno

può essere suddiviso in fasi in qualche modo associabili alle prime fasi dell'incendio;

si tratta di un ragionamento non rigoroso, ma mnemonicamente comodo.

Il meccanismo della combustione del legno

Parametri fondamentali

Potenziale energetico (calorifico): quantità di energia termica (calore) che si può sviluppare dalla combustione completa di un materiale,

quindi che può essere emessa nel corso di un incendio; dipende fondamentalmente dal potere calorifico del materiale.

Il potere calorifico del legno è relativamente costante, anche se variabile con la specie legnosa.

potere calorifico superiore (p. c. s.): energia prodotta dalla combustione completa dell'unità di massa di una sostanza anidra (la cui combustione non genera acqua come intermedio)

potere calorifico inferiore (p. c. i.), in esso si tiene conto dell'energia assorbita dall'acqua (sia contenuta nel legno non anidro sia prodotta dalla reazione) che rimane allo stato vapore.

Il meccanismo della combustione del legno

Nel calcolo del potenziale energetico reale del legno si deve tener conto di contenuto di sostanze incombustibili, la cui massa si sottrae dalla massa di legno in gioco;

la capacità termica dell'acqua presente per il riscaldamento fino a 100°C;

il calore di vaporizzazione dell'acqua;

il calore specifico del vapore da riscaldare fino alla temperatura dei gas emessi nell'atmosfera.

Dai dati in tabella si ha:

valore medio per il legno di latifolia (allo stato anidro) ~ 4270 kcal/kg, con un intervallo di circa 232 kcal/kg, da 4419 kcal/kg per l'Olmo a 4187 per il Faggio;

valore medio per il legno di conifera (allo stato anidro) ~ 4480 kcal/kg in questo caso l'intervallo è di circa 158 kcal/kg, da 4578 kcal/kg per l'Abete rosso a 4420 kcal/kg per il Larice.

Specie legnosa	Massa volumica g/cm ³	Potere calorifico (kcal /kg) all'umidità di		
		u = 0%	17,6-20,5%	33,3-38,9%
Olmo	0,65	4419	-	-
Acero	0,63	4306	-	2988
Ontano nero	0,51-0,53	4294	3462	2973
Pioppo nero	0,45	4281	-	3012
Ciliegio	0,61	4264	-	2973
Robinia	0,75	4258	3481	3043
Frassino	0,71	4255	3617	-
Rovere	0,69-0,74	4244	3418	2988
Cerro	0,75-0,81	4216	3445	3012
Carpino bianco	0,77	4209	-	3043
Faggio	0,66-0,72	4187	3421	2988
Abete rosso	0,38	4578	-	-
Pino silvestre	0,46	4438	3582	3028
Larice	0,60	4420		

Il meccanismo della combustione del legno

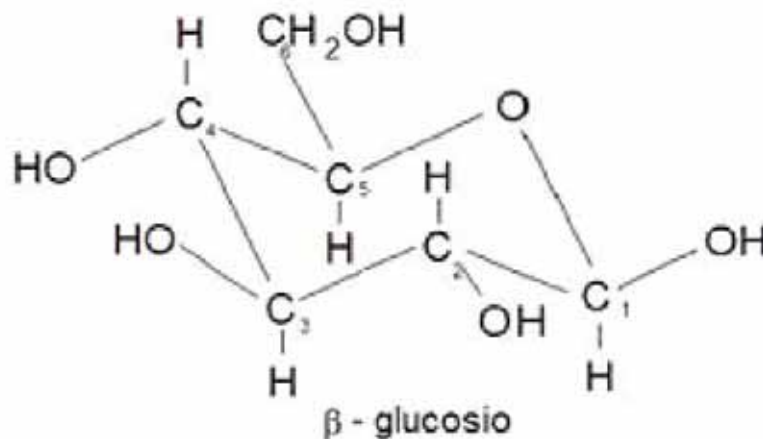
La combustione si ha per decomposizione termica delle sostanze che lo costituiscono: la maggior parte di esse è rappresentata da

Componenti del legno (% del peso secco)			
	Cellulosa	Emicellulose	Lignina
Conifere	40 - 44	15 - 35	18 - 25
Latifoglie	40 - 44	20 - 32	25 - 35

Emicellulose: zuccheri ad alto peso molecolare

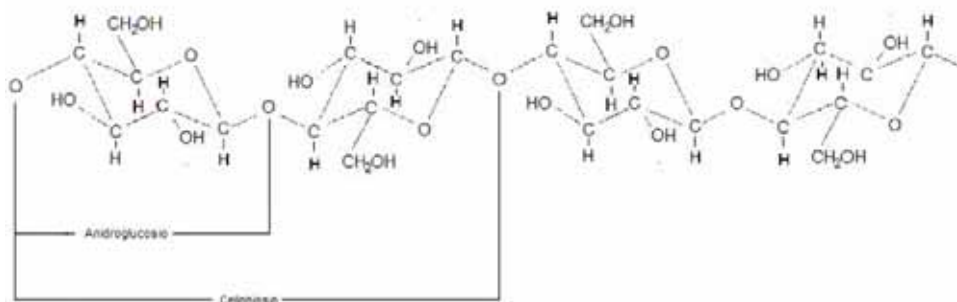
la pirolisi di queste sostanze governa il fenomeno nel suo complesso.

**Cellulosa
polimero del β -glucosio**



Cellulosa polimero del β -glucosio

due molecole di **glucosio** si collegano (con la produzione di una molecola d'acqua: condensazione) per dare una molecola di **cellobiosio**,
più molecole di cellobiosio si condensano per dare una molecola di **cellulosa**



Il meccanismo della combustione del legno

la demolizione termica della cellulosa ha come risultato iniziale una depolimerizzazione con elementi di **levoglucosano** che si staccano progressivamente dalla catena di cellulosa.

$C_6H_{10}O_5$: levoglucosano

Il levoglucosano è volatile ad alta temperatura e nelle normali condizioni di distillazione secca del legno **si degrada in sostanze più leggere (acido acetico, acetone, acqua).**

Il meccanismo della combustione del legno

Prodotti di decomposizione delle emicellulose

La presenza nel legno di latifoglia di zuccheri a cinque atomi di carbonio dà luogo alla formazione di furfurolo. Ai pentosani è inoltre da collegare l'elevata formazione di acetone nella pirolisi del legno di latifoglia.

Il meccanismo della combustione del legno

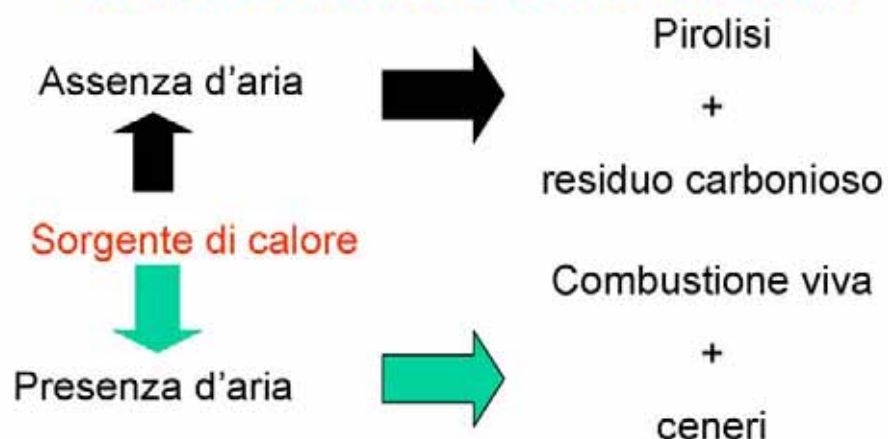
Pirolisi della lignina

la lignina si decompone dando origine ad eteri (sostanze caratterizzate dal gruppo -O-) fenolici caratterizzate da gruppi metossilici (-OCH₃) che possono dare origine a metanolo.

Il meccanismo della combustione del legno

Nel complesso la pirolisi, o **distillazione secca**,
dà origine a:
sostanze solubili in acqua (acido pirolegnoso)
catrame di legno (miscela di sostanze insolubili in acqua che si depositano al di sotto del pirolegnoso)
gas non condensabili già combustibili
un residuo solido, il carbone di legna.

Meccanismo della combustione



Esponendo il legno a una sorgente di calore si hanno evoluzioni diverse a seconda della presenza o assenza d'aria (disponibilità o meno di comburente)

Il meccanismo della combustione del legno

Combustione dei prodotti della pirolisi

Inizio della pirolisi

170°C

**Inizio degradamento
(plastificazione della lignina)**

120°C

Perdita d'acqua 100°C

Innesco 20°C

Il meccanismo della combustione del legno

In presenza di **ossigeno si ha l'ossidazione dei gas e del carbone che producono energia sufficiente a demolire le altre sostanze in composti combustibili.**

Il meccanismo della combustione del legno

PIROLISI ➡ NEGATIVO
COMBUSTIONE VIVA ➡ POSITIVO

Bilancio energetico

Il meccanismo della combustione del legno

La disponibilità di comburente e la diffusione di prodotti gassosi della pirolisi sono rese possibili anche al di sotto della superficie che istante per istante involuppa l'elemento esposto al fuoco, perché il procedere della combustione determina la formazione di carbone che, entro certi limiti, protegge la massa interna dall'attacco termico, ma per la sua morfologia (è profondamente fessurato, presentandosi a "cuscini" o a "scaglie di cocodrillo") consente un certo scambio di gas fra ambiente e superficie integra del combustibile.

Il meccanismo della combustione del legno

Alla base di queste alterazioni morfologiche stanno i fenomeni chimici di termodemolizione dei componenti del legno.

In particolare la comparsa di fessurazioni è legata al più rapido (nel senso che avviene a temperature più basse) degrado termico della cellulosa rispetto a quello della lignina.

Non a caso l'aspetto dello strato carbonizzato ricorda quello del legno attaccato dai funghi della carie bruna (che distruggono la cellulosa).

Il meccanismo della combustione del legno



Il meccanismo della combustione del legno

Per elementi con elevato rapporto volume/area è intuitivo che, anche se alla superficie è disponibile comburente e si giunge facilmente alla combustione viva, una parte importante del materiale è soggetto a pirolisi anche in fasi successive a quella iniziale, e non è esposta a fiamme e contribuisce alla loro formazione (quindi alla propagazione dell'incendio) solo se i prodotti gassosi della pirolisi riescono a raggiungere l'esterno.

Il meccanismo della combustione del legno

Oltre i 170 °C si cominciano ad avere fenomeni irreversibili, con alterazione della struttura della cellulosa e produzione di gas combustibili di pirolisi, disponibili per la produzione di fiamme e quindi per la propagazione dell'incendio.

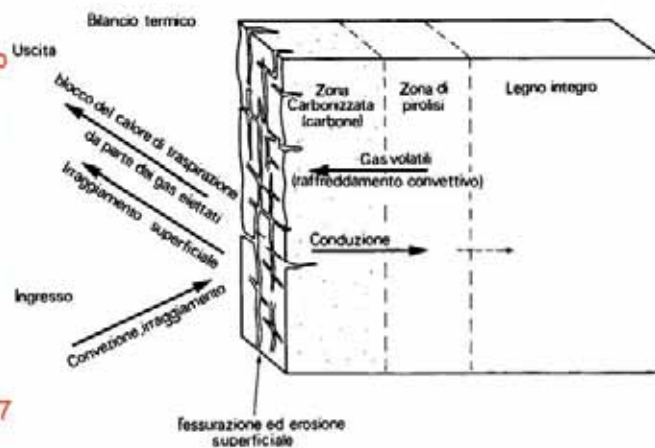
Si può ritenere che il raggiungimento dei 200 – 220 °C corrisponda all'ingresso nella fase di flash – over.

Il meccanismo della combustione del legno

Le sostanze volatili prodotte dalla combustione **si muovono verso l'esterno raffreddando il carbone**, ed è presente anche un contributo di riflessione.

Si raggiunge una situazione quasi stazionaria con **l'equilibrio fra perdita di materia in superficie e arretramento del legno integro**:

questo avviene a **0,6-0,7 mm/minuto**



Il meccanismo della combustione del legno

Il legno è un cattivo conduttore del calore

La propagazione del calore nel legno avviene per trasferimento di massa,

in pratica per **diffusione di gas caldi**

È soprattutto l'avanzamento di questi gas determina l'innalzamento della temperatura fino a valori che innescano la demolizione termica del legno, con l'insorgere della **carbonizzazione**.

Il meccanismo della combustione del legno

La struttura del carbone di legna riproduce a livello microscopico quella del legno di partenza

Oltre che dalle caratteristiche del legno impiegato la massa volumica del carbone dipende dalle condizioni in cui avviene la carbonizzazione.

La massa volumica del carbone delle conifere e di alcune latifoglie (per esempio Tiglio) può variare tra $0,2 \text{ g/cm}^3$ e $0,3 \text{ g/cm}^3$,

mentre dalle latifoglie si ottiene carbone con massa volumica in generale tra $0,3 \text{ g/cm}^3$ e $0,4 \text{ g/cm}^3$,

Solo con alcune specie (querce, betulle, frassini) si può ottenere carbone con massa volumica maggiore di $0,4 \text{ g/cm}^3$.

Il meccanismo della combustione del legno

Una ragione di questo è che lo strato di carbone scherma la massa sottostante dall'attacco termico.

La temperatura al di sotto dello strato carbonizzato si mantiene a valori prossimi a quelli dell'ambiente prima dell'innesco.

Il legno si può considerare integro

Il meccanismo della combustione del legno

La struttura del carbone di legna riproduce a livello microscopico quella del legno di partenza

Oltre che dalle caratteristiche del legno impiegato la massa volumica del carbone dipende dalle condizioni in cui avviene la carbonizzazione.

La massa volumica del carbone delle conifere e di alcune latifoglie (per esempio Tiglio) può variare tra $0,2 \text{ g/cm}^3$ e $0,3 \text{ g/cm}^3$,

mentre dalle latifoglie si ottiene carbone con massa volumica in generale tra $0,3 \text{ g/cm}^3$ e $0,4 \text{ g/cm}^3$,

Solo con alcune specie (querce, betulle, frassini) si può ottenere carbone con massa volumica maggiore di $0,4 \text{ g/cm}^3$.

Il meccanismo della combustione del legno

Piuttosto del potere calorifico del carbone di legna, praticamente doppio di quello del legno, che stava alla base del suo successo come combustibile (la letteratura riporta poteri calorifici superiori da 7200 a 7970 kcal/kg e poteri calorifici inferiori da 7090 a 7850 kcal/kg), interessa in questa sede confrontare con quelle del legno altre caratteristiche del carbone di legna, come riportate nella tabella sotto.

	Flusso termico	Massa volumica g/cm^3	Conducibilità termica $\text{W/m } ^\circ\text{C}$	Calore specifico medio C_{24-100} $\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$
Carbone	fibre	0,28	0,15	0,23
	⊥ fibre		0,10	
Legno (condizioni normali)	fibre	0,45	0,38	0,32 - 0,48
	⊥ fibre		0,15	

Il meccanismo della combustione del legno

La conducibilità termica del carbone è dell'ordine del 60 % di quella del legno perpendicolarmente alla fibratura, addirittura meno del 50 % in direzione parallela alle fibre.

La differenza di conducibilità perpendicolarmente alle fibre tra carbone e legno non è quindi marginale, ed è tale da compensare la minor capacità termica dello strato di carbone.

Nel carbone di legna si riscontra inoltre un aumento del calore specifico con la temperatura, che giustificherebbe, in qualche misura, la protezione fornita dallo strato carbonizzato, alla massa incombusta sottostante anche in fase di combustione con incandescenza.

Temperatura (°C)	435	561	728	925	1059	1197	1297
Calore specifico (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)	0,230	0,290	0,328	0,358	0,362	0,378	0,810

Obiettivi e, entro certi limiti, strumenti della protezione antincendio del legno e delle strutture lignee si possono considerare definiti dalla Direttiva Europea 89/106 “Prodotti da Costruzione”, nel quadro del requisito essenziale *Sicurezza in caso di incendio*

Le opere edilizie devono essere progettate e costruite in modo che, in caso di incendio,:

si possa assumere una **durata certa della capacità portante della costruzione;**

siano **limitate la generazione e la propagazione di fuoco e fumo** all'interno dell'opera;

sia **limitata la propagazione del fuoco alle opere vicine;**

gli occupanti possano abbandonare l'opera o possano essere soccorsi in altro modo;

sia considerata **la sicurezza delle squadre di soccorso.**

I principi di base comuni ai paesi dell'Unione riguardano:

pianificazione e progetto dell'opera, la sua esecuzione e l'appropriata manutenzione; le proprietà, prestazioni ed usi dei prodotti da costruzione

Il complesso di questi requisiti, in funzione anche della destinazione delle costruzioni, porta alla definizione di una

"Strategia per la sicurezza in caso di incendio"

Esaminando i possibili approcci alla verifica del requisito di sicurezza al fuoco:

–Determinazione di un requisito minimo di prestazioni (che in termini generali implica una relazione tra requisito per l'opera e caratteristiche del prodotto);

–Determinazione di un livello di prestazione al fuoco minimo per il prodotto (p. e. resistenza, reazione), con riferimento alle specifiche tecniche;

–Scelta dei livelli critici delle condizioni di esposizione delle persone all'interno o in prossimità dell'opera.

Si nota che solo il secondo è formalmente orientato sui materiali, mentre gli altri due riguardano le prestazioni del manufatto ("opera") con evidente maggiore coinvolgimento del progettista.

In questo ambito ricadono

- 1) Planimetria degli edifici - Prestazione delle strutture
- 2) Prodotti da costruzione
- 3) Servizi e installazioni
- 4) Installazioni per la sicurezza in caso di incendio in condizione di incendio

In questa trattazione sono decisamente più rilevanti i punti 1 e 2.

Fra le prestazioni il mantenimento della resistenza strutturale delle costruzioni è necessario per

- La sicurezza degli occupanti per il tempo in cui restano nell'edificio*
- La sicurezza dei soccorritori*
- La prevenzione di danni alle persone a causa del collasso dell'edificio*
- La possibilità dei prodotti utilizzati per ragioni di sicurezza di esplicitare le loro funzioni.*

ciò porta a definire la **misura convenzionale di resistenza al fuoco**, come un tempo la cui durata dipende dai dispositivi di legge, un funzione della destinazione del manufatto.

Protezione antincendio del legno - obiettivi e strumenti

La resistenza al fuoco della struttura si suppone che sia ottenuta tramite **la resistenza dei singoli elementi, che deve essere almeno pari a quella della struttura**

La resistenza al fuoco è dunque condizionata dal comportamento dei componenti, in questo giocano fattori legati ai materiali: dalla loro attitudine alla combustione (potenziale energetico, velocità di carbonizzazione) e a contribuire all'insorgere e al propagarsi di un incendio (soprattutto produzione di gas combustibili e quindi generazione di fiamme);

fattori legati alla concezione progettuale dei componenti (soprattutto il dimensionamento delle parti portanti e la protezione dei giunti).

Protezione antincendio del legno - obiettivi e strumenti

La possibilità di concorrere al soddisfacimento dei requisiti di sicurezza è valutata sulla base di parametri convenzionali che

- consentono di formulare ipotesi sul comportamento dei manufatti in cui tali materiali o componenti sono impiegati, quindi;
- forniscono criteri quantitativi per le fasi di progettazione;
- costituiscono elementi per quanto possibile oggettivi per il confronto fra le prestazioni dei manufatti.

Si definiscono di conseguenza :

la reazione al fuoco

Che riguarda il comportamento dei materiali

e la già ricordata

resistenza al fuoco

Che riguarda il comportamento dei manufatti

Quest'ultima si può definire come:

la capacità di un manufatto di svolgere le funzioni per cui è stato realizzato per un certo tempo dopo l'attacco del fuoco

La resistenza al fuoco viene, di conseguenza, convenzionalmente espressa in minuti.

Le funzioni da garantire sono diverse per gli elementi :

- **portanti**, la resistenza al fuoco riguarda esclusivamente la **stabilità (R)** cioè la capacità dell'elemento di conservare sotto l'azione del fuoco la propria resistenza meccanica;

- **compartimentanti**, nel qual caso la resistenza al fuoco esprime il grado di **tenuta al fuoco (E)**, cioè la capacità di un elemento sottoposto all'azione del fuoco su un lato di impedire il passaggio di fiamme, vapori o gas e fumi caldi sul lato non esposto;

- **con funzioni separative**, nel qual caso la resistenza al fuoco esprime il grado di **isolamento termico (I)**, cioè la capacità dell' elemento di impedire o comunque rallentare la trasmissione del calore dal lato esposto al lato non esposto al fuoco.

Reazione al fuoco è il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è esposto.

Essa dipende dall'**intensità e dalla durata dell'azione della sorgente di calore** alla quale il materiale è esposto.

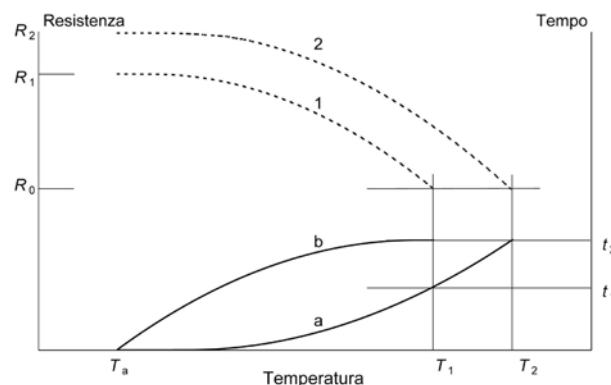
Al momento in Italia la materia è regolata dal **DM 48 del 26/06/84**, che stabilisce le prove ed i criteri di valutazione dei risultati, in base ai quali **i materiali si suddividono in 6 classi**: classe 0 per i materiali incombustibili, classe da 1 a 5 per i materiali combustibili come il legno.

Introdotta a grandi linee il concetto di resistenza al fuoco, come è possibile migliorare la resistenza al fuoco di una struttura? Esistono due possibili approcci risolutivi, che si possono considerare come limiti per individuare campi e modalità di intervento progettuale.

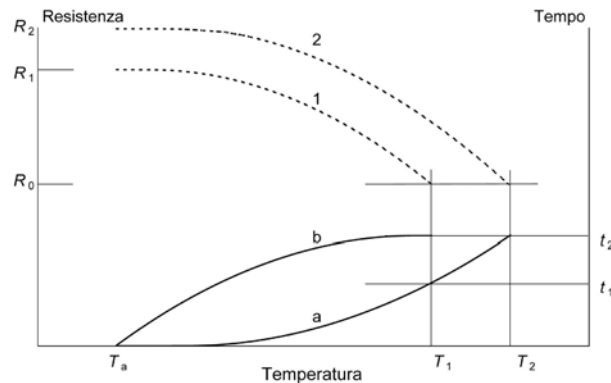
Consideriamo un elemento strutturale caratterizzato da un livello di resistenza R_1 relativo ad una particolare situazione di carico e legato alla situazione di collasso alla temperatura ambiente T_a tramite opportuni coefficienti di sicurezza.

Durante una prova al fuoco il degrado del livello di resistenza dell'elemento procede all'aumentare della temperatura T .

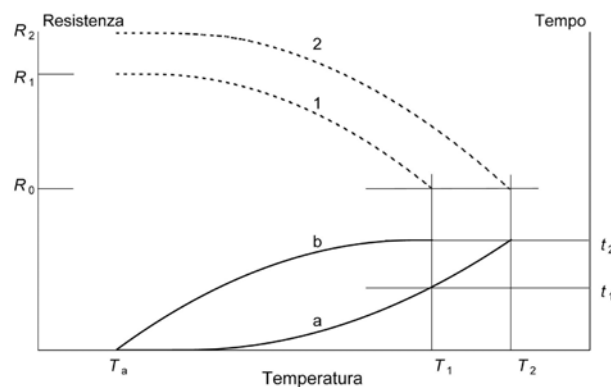
Il tempo t_1 che intercorre tra l'inizio dell'esposizione al fuoco (temperatura T_a) ed il raggiungimento del livello di temperatura limite T_1 , misura la resistenza al fuoco del componente strutturale considerato.



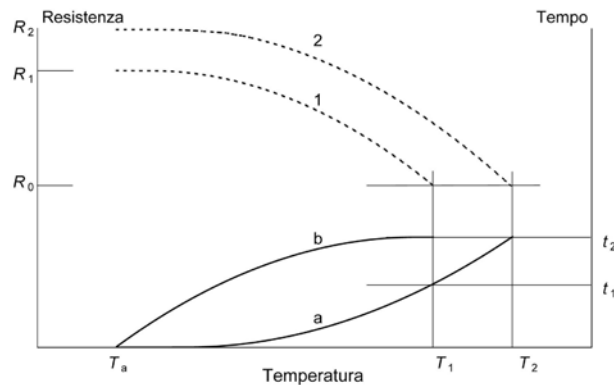
La curva 1 mostra il degrado del livello di resistenza all'aumentare della temperatura T dell'elemento durante una prova al fuoco. Procedendo la esposizione al fuoco si avrà collasso dell'elemento al raggiungimento di un livello di resistenza R_0 (relativo alla situazione di carico presente), corrispondente alla temperatura T_1 .



Il collasso si ha al raggiungimento di un livello di resistenza R_0 (relativo alla situazione di carico presente), corrispondente alla temperatura T_1 . La "legge di riscaldamento" del componente strutturale è rappresentata dalla curva a che correla la temperatura della struttura col tempo t di esposizione al particolare fuoco-modello.



Se si vuole una resistenza al fuoco $t_2 > t_1$, occorre "migliorare" il comportamento dell'elemento. Tipicamente si interviene modificando la curva di riscaldamento e non le caratteristiche di resistenza della struttura. Utilizzando protezioni isolanti si ritarda il riscaldamento, la cui legge è ora rappresentata dalla curva b: l'elemento raggiunge la temperatura limite T_1 dopo un tempo non inferiore alla richiesta resistenza t_2 .



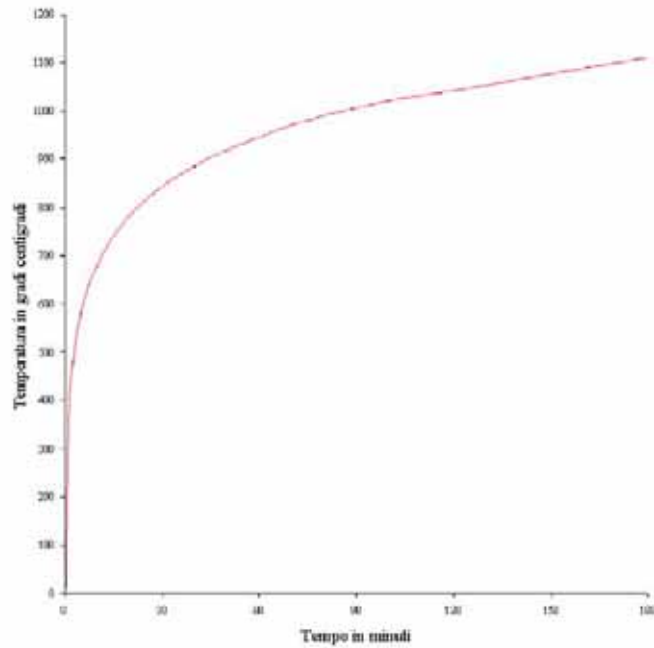
Se invece si considera la realizzazione di un elemento avente la medesima legge di riscaldamento (curva a), la stessa velocità di degrado strutturale, ma un livello di resistenza iniziale maggiore di quello del caso precedente. Il degrado strutturale è rappresentabile dalla curva 2: si avrà collasso al raggiungimento del livello limite di resistenza R_0 (relativo alle stesse azioni esterne), a una diversa temperatura T_2 , raggiunta al tempo t_2 , ottenendo quindi dalla struttura la resistenza al fuoco richiesta.

Col primo metodo si giunge alla realizzazione di una protezione in genere "strutturalmente passiva".

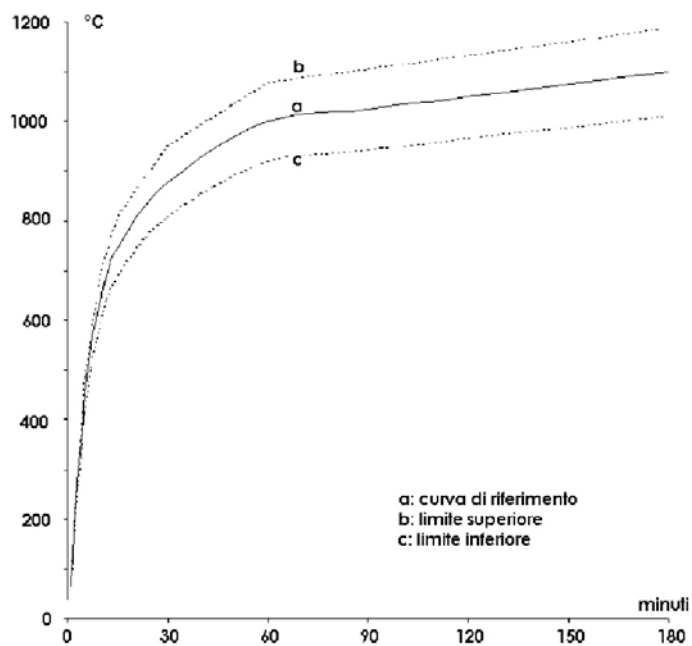
Il problema della resistenza al fuoco viene infatti quasi completamente scaricato sul materiale e sul tipo dell'isolamento.

Il secondo approccio richiede invece una più precisa individuazione delle leggi di degrado e di riscaldamento, e implica una accurata analisi dell'interazione "fuoco-struttura": esso riveste particolare interesse, in particolare, nel caso delle strutture lignee..

Dal punto di vista delle procedure di prova, la differenza più significativa è quella della **curva temperatura tempo**, che nelle Circolare 91 non è quella fissata dalla ISO 834,



ma una relazione empirica.



Per quanto riguarda i componenti strutturali dal punto di vista regolativo possiamo distinguere:

Elementi strutturali

(in acciaio, C. A., legno massiccio e lamellare ecc.)

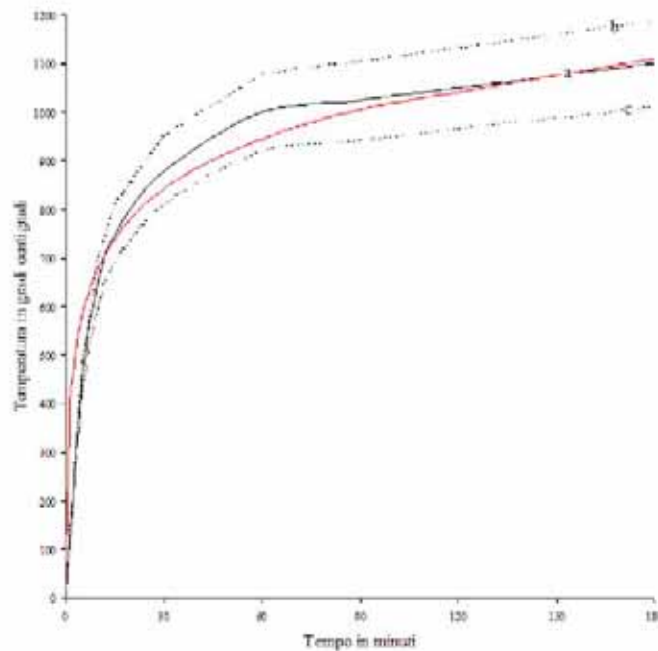
per i quali la classificazione ed i criteri di controllo sono fissati dalla **circolare 91 del 14 settembre 1961** (“Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile”), il cui campo di applicazione è stato esteso dalla Circolare 52 del 20 -11 - 1982 a calcestruzzo, acciaio, laterizio, legno massiccio, legno lamellare, elementi compositi ecc.

e inoltre

Chiusure mobili (porte)

per le quali la classificazione ed i criteri di controllo, sono, in base al Decreto Ministeriale del 21 giugno 2004, quelli specificati dalla norma UNI EN 1634 – 1 e, per quanto in essa richiamato, dalle norme UNI EN 1363-1 e UNI EN 1363-2. Fino all’entrata in vigore dell’obbligo della marcatura CE è comunque consentito eseguire le prove secondo la norma UNI 9723/FA1, come previsto dal Decreto Ministeriale del 14 Dicembre 1993.

Nei primi 10 minuti la ISO 834 è più severa, mentre da 10 a 120 lo è meno, per poi mantenersi all'incirca sugli stessi livelli. Comunque dopo i 10 minuti rientra sempre nelle tolleranze ammesse dalla circolare 91 (8%).



In alternativa alla circolare 91, la nuova normativa europea prevede il ricorso ad altri documenti che, una volta **ottenuto lo status di norme armonizzate**, dovranno **essere recepite per legge** dagli stati dell'Unione Europea

Il blocco delle EN 1365 riguarda gli elementi portanti:

EN 1365-1:1999 Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 1 - Pareti

EN 1365-2:1999 Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 2 – Solai e coperture

EN 1365-3:2000 Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 3 - Travi

EN 1365-4:1999 Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 4 - Colonne

prEN 1365-5: Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 5 – Balconi e passaggi pedonali

prEN 1365-6: Prove di Resistenza al fuoco per elementi portanti

Parte 6 – Scale

In alternativa alla circolare 91, la nuova normativa europea prevede il ricorso ad altri documenti che, una volta ottenuto lo status di norme armonizzate, dovranno essere recepite per legge dagli stati dell'Unione Europea

Il blocco delle EN 13381 riguarda il contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali (sistemi di protezione):

ENV 13381 – 1 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 1 Protezione a membrana – orizzontale

ENV 13381 – 2 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 2 Protezione a membrana - verticale

ENV 13381 – 3 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 3 Elementi in calcestruzzo

ENV 13381 – 4 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 4 Elementi in acciaio

ENV 13381 – 5 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 5 Elementi composti in lamiera grecata e soletta in cls

ENV 13381 – 6 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 6 – Colonne cave in acciaio riempite da cls

ENV 13381 – 7 Contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali Parte 7 Elementi in legno

EN 1363-1 par.11

EN 1363-2 par. 7 e 8

EN 13501-2 par. 5

Questi punti della nuova normativa preedono criteri di prestazione comuni alla circ. 91

I - R Capacita' portante

La capacita' portante R e' la abilita' di un elemento di costruzione di sopportare senza perdita di stabilita' strutturale, per un periodo di tempo una esposizione al fuoco, su una o plu' facce, sotto specifiche azioni meccaniche.

II - E tenuta

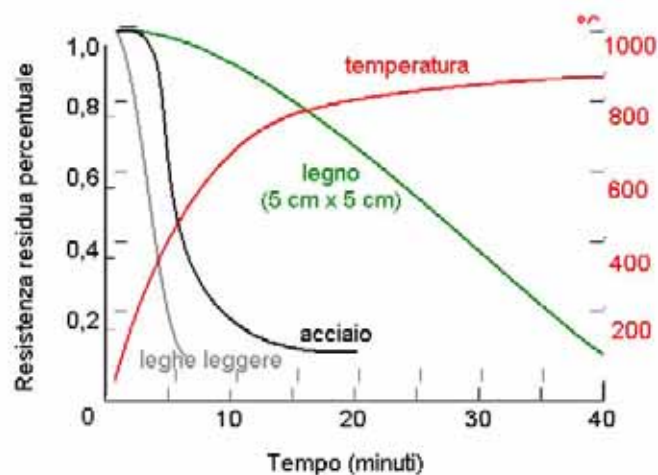
La tenuta E e' la abilita' di un elemento/prodotto di costruzione, con una funzione di compartimentazione, di sopportare una esposizione al fuoco, su una sola faccia, senza la propagazione dell'incendio sul lato non esposto per effetto del passaggio di fiamme e gas caldi.

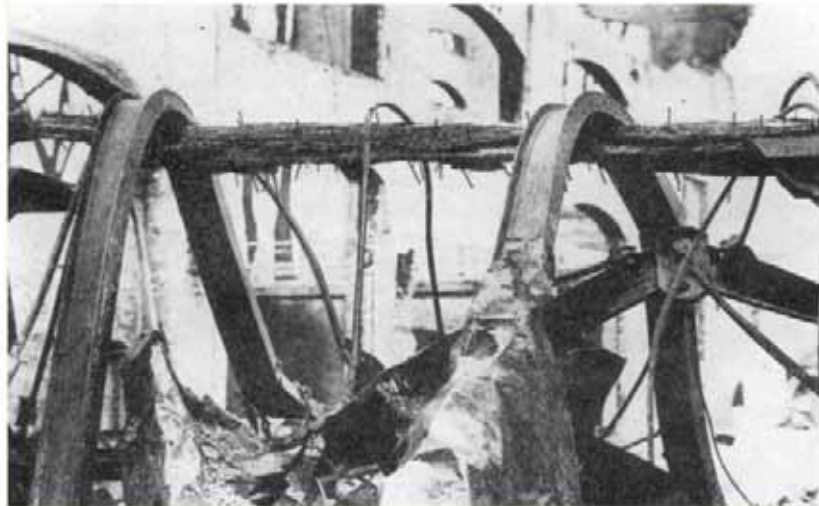
III - I Isolamento

L'isolamento I e' la abilita' di un prodotto/elemento di costruzione di sopportare una esposizione al fuoco su una sola faccia, senza propagazione dell'incendio per effetto di una rilevante trasmissione di calore dalla faccia esposta alla faccia non esposta.

**Premesso tutto questo,
perché scegliere
il legno
per realizzare elementi costruttivi,
sia strutturali che per partizioni,
quando è necessario
assicurare una data resistenza al fuoco ?**

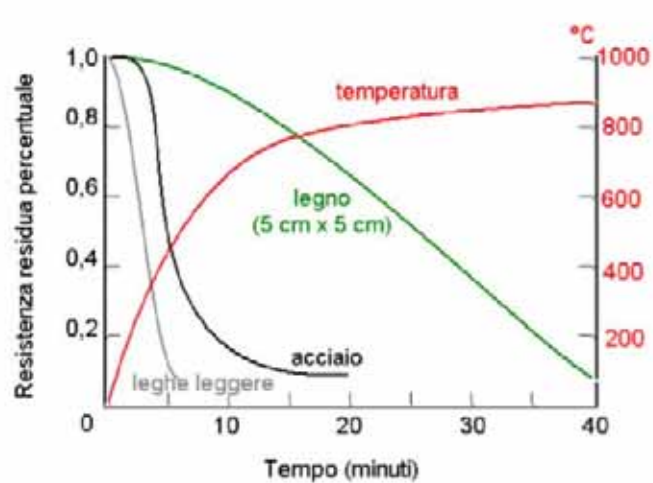
Confrontiamo l'evoluzione delle prestazioni meccaniche di alcuni materiali da costruzione esposti ad un incendio normalizzato con quelle del legno





E queste sono le possibili conseguenze

La ragione di questo comportamento apparentemente sorprendente sta nel fatto che la temperatura dei materiali metallici segue in tutta la massa dell'elemento, molto da vicino quella dell'ambiente, e le caratteristiche meccaniche decadono di conseguenza



A questo punto va ricordato che la temperatura del legno rimane invariata appena al di sotto della superficie che limita la zona interessata dalla combustione;

come già accennato

**I valori sperimentali si aggirano su 0,7
mm/minuto**

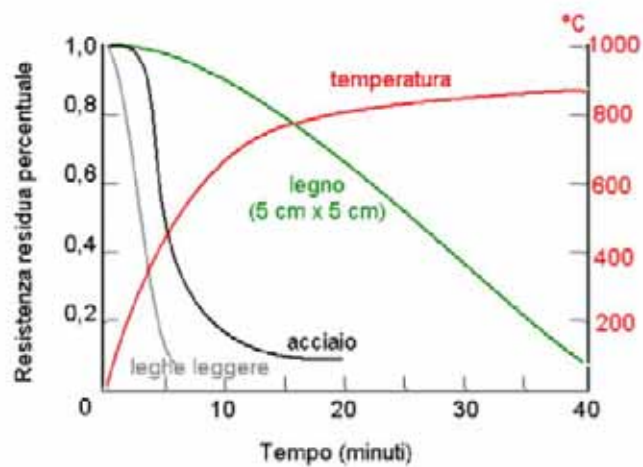
Quest'ultima considerazione consente di considerare **le caratteristiche della parte del legno non interessata dalla combustione** (quella al di là del fronte di carbonizzazione), **in particolare quelle meccaniche, praticamente costanti.**

Quindi, a differenza di quanto avviene nei materiali a conducibilità "metallica", la temperatura dell'elemento rimane costante su una sezione che varia in funzione della velocità di carbonizzazione.

Il comportamento meccanico di un elemento ligneo nel tempo è di conseguenza governato dall'evoluzione geometrica della sezione "integra"

La conoscenza dei fenomeni alla base di questa evoluzione (in sintesi della velocità di carbonizzazione) consente di prevedere con discreta approssimazione il tempo intercorrente dall'innesco dell'incendio al collasso, **almeno in determinati scenari.** In questi scenari, nella maggior parte dei casi la velocità di carbonizzazione è molto minore (di ordini di grandezza) della velocità di incremento della temperatura nei materiali metallici.

Da questo dipende il maggior tempo necessario a raggiungere il collasso sotto attacco termico in un manufatto ligneo



In realtà al di là del fronte di carbonizzazione, in uno strato di profondità limitata **la temperatura si porta a**

valori che pur non innescando la carbonizzazione alterano le proprietà del legno:

tenere conto o meno di questo fatto porta, come si vedrà, a

differenti provvedimenti normativi.

In ogni caso va ricordato che

Le caratteristiche meccaniche del legno **alle temperature correnti di impiego** non variano in maniera importante.

Tutto questo consente un approccio normativo semplificato, per il quale si utilizza la seguente terminologia:

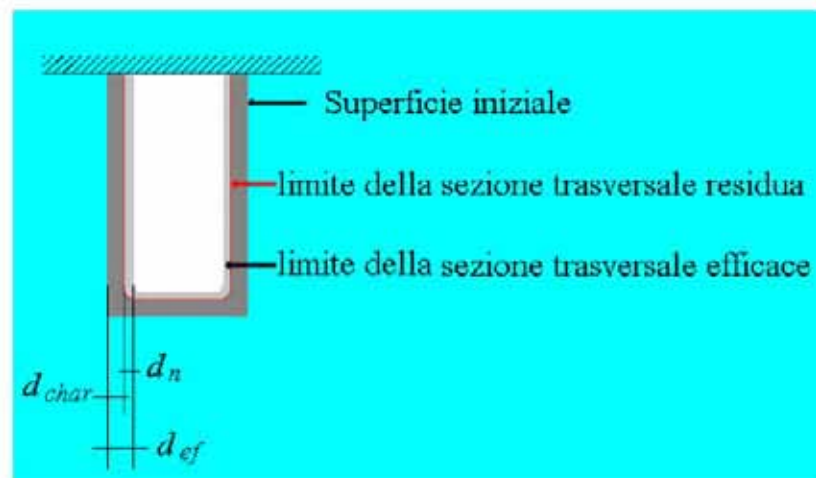
Incendio normalizzato: situazione in cui la relazione temperatura tempo è regolata dalla curva di riscaldamento teorica media (**EN 1363 - 6.1.1**)

$$T_t = 345 \log_{10} (8 t + 1) + 20$$

linea di carbonizzazione: confine tra strato carbonizzato e sezione trasversale residua ("integra");

sezione trasversale residua: sezione trasversale originaria ridotta dello strato carbonizzato.

Ciò si collega a quanto detto sul **meccanismo di degrado termico** del legno, che si può schematizzare come segue:



Norma UNI-VV.F. 9504 *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno*

riguarda singoli **elementi strutturali** (legno massiccio o lamellare) **sottoposti all'incendio normalizzato**, non protetti oppure trattati con prodotti ignifughi o protetti con idonei rivestimenti continui/aderenti

Norma UNI-VV.F. 9504 *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno*

prevede

la **valutazione della velocità di carbonizzazione**

la **determinazione di una sezione**

il **calcolo della capacità portante** (per rottura o per instabilità) allo **stato limite ultimo di collasso**, secondo il metodo semiprobabilistico agli stati limite **nella sezione efficace ridotta più sollecitata**

Norma Europea sperimentale UNI-ENV 1995-1-2:

prevede **tre diverse metodologie** di calcolo :

metodo della ***sezione efficace***;

metodo della ***resistenza e rigidezza ridotte***;

metodi generali di calcolo.

metodo della **sezione efficace**

prevede il calcolo di una **sezione efficace** ottenuta riducendo la sezione iniziale di una **profondità di carbonizzazione "effettiva"**

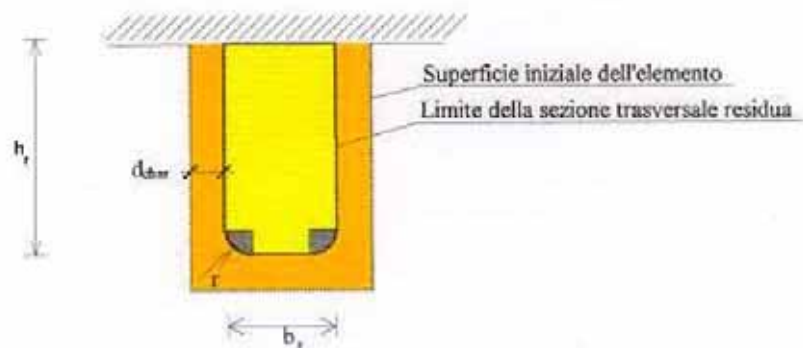


metodo della **resistenza e rigidezza ridotte** - (R.S.S.M.)

prevede il calcolo della **capacità portante a flessione, compressione e trazione** mediante l'applicazione di una **sezione trasversale ridotta** e la contemporanea **riduzione dei parametri di resistenza e rigidezza**.



La **sezione trasversale residua** dell'elemento può essere determinata tenendo conto o meno del cosiddetto **raggio allo spigolo**



Metodi generali di calcolo

la **capacità portante e la rigidità** della sezione si calcolano tenendo conto di:

profondità di carbonizzazione conformi all'appendice A della norma

profilo della temperatura nella sezione residua;

gradiente di umidità nella sezione residua

proprietà di resistenza e rigidità in funzione della temperatura e dell'umidità

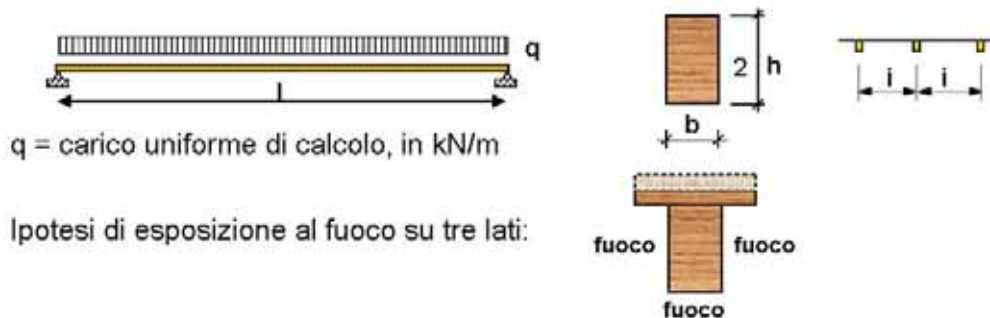
ESEMPI DI CALCOLO

Esempio n. *1

ESEMPIO N.°1: TRAVE DI SOLAIO IN SEMPLICE APPOGGIO

luce	interasse	base sezione	altezza sezione	carico permanente	carico di esercizio
5,00 m	0,5 m	150 mm	200 mm	$G = 1,5 \text{ kN/m}^2$	$Q = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Tipo di legno: massiccio, abete classe S8 secondo UNI8198 o C24 secondo EN338.

**Verifica al fuoco secondo UNI 9504**

Esempio n. *1

$$q = (G+Q) \cdot i = (1,5+2,0) \cdot 0,5 = 1,75 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{1,75 \cdot 5^2}{8} \cong 5,47 \text{ kNm} = 5470000 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{\text{car}} = 0,9 \text{ mm/min} \quad \text{velocità di carbonizzazione per legno massiccio}$$

Dopo una esposizione al fuoco di 45 minuti ($R = 45$) la sezione residua sarà:

$$b_{\text{ef}} = b - 2 \cdot \beta_{\text{car}} \cdot R = 150 - 2 \cdot 0,9 \cdot 45 = 69 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = h - 1 \cdot \beta_{\text{car}} \cdot R = 200 - 1 \cdot 0,9 \cdot 45 = 159,5 \text{ mm}$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2}{6} = 292563 \text{ mm}^3 \quad \text{modulo di resistenza flessionale}$$

$$\sigma_u = 16 \text{ N/mm}^2 \quad \text{resistenza caratteristica a flessione per legno di abete classe S8}$$

Verifica flessionale nella sezione di mezzeria:

Esempio n.°1

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_{ef}} = \frac{5470000}{292563} = 18,7 > 16 \text{ N/mm}^2 \text{ verifica violata}$$

La trave non raggiunge resistenza al fuoco R45; non essendo previste classi di resistenza intermedie fra 30 e 45, si passa a verificare la resistenza R30.

Procedendo in modo analogo a quanto fatto sopra, si ottengono i seguenti valori (**R = 30**):

$$b_{ef} = b - 2 \cdot \beta_{car} \cdot R = 150 - 2 \cdot 0,9 \cdot 30 = 96 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - 1 \cdot \beta_{car} \cdot R = 200 - 1 \cdot 0,9 \cdot 30 = 173 \text{ mm}$$

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} \cdot h_{ef}^2}{6} = 478864 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_{ef}} = \frac{5470000}{478864} = 11,4 < 16 \text{ N/mm}^2 \text{ verifica soddisfatta}$$

Si conclude quindi affermando che la trave ha una resistenza al fuoco **R = 30** minuti.

Verifica al fuoco secondo ENV 1995 1-2

Esempio n.°1

$$q = (G+0,5Q) \cdot i = (1,5+0,5 \cdot 2,0) \cdot 0,5 = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{1,25 \cdot 5^2}{8} \cong 3,91 \text{ kNm} = 3910000 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{car} = 0,8 \text{ mm/min} \text{ velocità di carbonizzazione per legno massiccio}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm} \text{ quota fissa di carbonizzazione da sommare a } \beta_{car} \cdot R$$

Dopo una esposizione al fuoco di 61 minuti (**R = 61**) la sezione residua sarà:

$$b_{ef} = b - 2(\beta_{car} \cdot R + d_0) = 150 - 2(0,8 \cdot 61 + 7) = 38,4 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - (\beta_{car} \cdot R + d_0) = 200 - (0,8 \cdot 61 + 7) = 144,2 \text{ mm}$$

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} \cdot h_{ef}^2}{6} = 133079 \text{ mm}^3 \text{ modulo di resistenza flessionale}$$

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} k_{fi} \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot 1,25 \cdot \frac{24}{1,0} = 30 \text{ N/mm}^2$$

Esempio n.°1

essendo:

$$k_{mod,fi} = 1,0$$

$$k_{fi} = 1,25 \quad \text{valore valido per legno massiccio}$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2 \quad \text{resistenza caratteristica a flessione per legno C24}$$

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

Verifica flessionale nella sezione di mezzeria:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W_{ef}} = \frac{3910000}{133079} = 29,4 < 30 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verifica soddisfatta}$$

Si conclude quindi affermando che la trave ha una resistenza al fuoco R = 60 minuti, non essendo previste classi intermedie fra 60 e 90.

LA RESISTENZA AL FUOCO DEI COLLEGAMENTI

Nelle strutture lignee è comune la presenza di collegamenti realizzati con mezzi meccanici, specialmente metallici: questi assumono particolare rilievo nelle realizzazioni in legno lamellare. Data la loro importanza per il comportamento statico complessivo della struttura nella valutazione della resistenza al fuoco occorrerà valutare anche la prestazione dei collegamenti sotto l'azione dell'incendio. Sono infatti spesso proprio i collegamenti realizzati tramite elementi metallici o le parti metalliche della struttura, i punti deboli di una struttura lignea esposta al fuoco. Gli elementi metallici infatti possono trasmettere il calore anche all'interno della massa lignea (nel caso del collegamento) oppure subire deformazioni termiche incompatibili con la statica globale della struttura (elementi di controvento, elementi tesi in genere, ecc.).

LA RESISTENZA AL FUOCO DEI COLLEGAMENTI

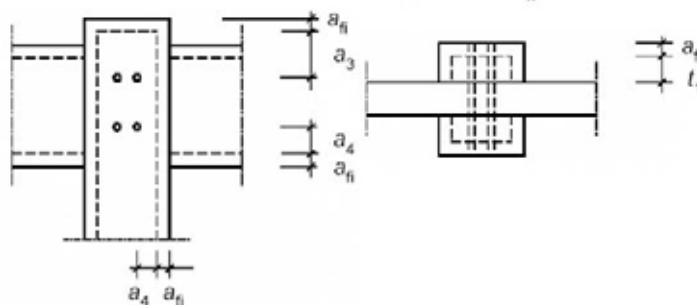
La normativa Europea considera le cosiddette **unioni non protette**, a comportamento statico globalmente simmetrico e conformi alla tabella riportata di seguito, come soddisfacenti alla classe di resistenza R 15.

Elementi di collegamento	$t_{fi,d}$ (min)	Condizione imposta
Chiodi	15	$d \geq 2,8$ mm
Viti	15	$d \geq 3,5$ mm
Bulloni	15	$t_1 \geq 45$ mm
Perni	20	$t_1 \geq 45$ mm
Altri tipi di connettori (secondo EN 912)	15	$t_1 \geq 45$ mm
$t_{fi,d}$	resistenza del collegamento	
t_1	spessore dell'elemento laterale	
d	diametro dell'elemento di collegamento	

LA RESISTENZA AL FUOCO DEI COLLEGAMENTI

In sede di progetto oltre al tempo garantito secondo la tabella, si fa riferimento al tempo richiesto di resistenza t_{req} per quanto riguarda lo spessore dell'elemento ligneo collegato e la distanza dai bordi del mezzo di collegamento (chiodo o spinotto) che deve garantire la prestazione, in condizioni ultime, al tempo richiesto.

Per resistenze richieste $t_{req} \leq 30$ minuti, e per collegamenti che adottino perni, chiodi o viti con teste non sporgenti può essere sufficiente aumentare gli spessori degli elementi lignei laterali, la loro larghezza e la distanza da ciascun bordo dei mezzi di unione della quantità a_{fi} :



LA RESISTENZA AL FUOCO DEI COLLEGAMENTI

a_{fi} è espressa da:

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - t_{fi,d})$$

β_n velocità teorica di carbonizzazione

k_{flux} coefficiente di aumento di flusso termico (~ 1,5)

LA RESISTENZA AL FUOCO DEI COLLEGAMENTI

Accanto a tale metodologia semplificata di verifica, può essere utilizzato un altro metodo di verifica che prevede il calcolo di un tempo di resistenza del collegamento in funzione di una capacità di resistenza ridotta.

PROTEZIONE DEL LEGNO DAL FUOCO.

Si utilizzano fondamentalmente:

sistemi di protezione passiva

e

trattamenti che agiscono direttamente sul processo di combustione del materiale.

I sistemi di protezione passiva consistono generalmente in **rivestimenti incombustibili e compatti che esplicano esclusivamente un'azione isolante**, in modo da proteggere il legno dall'azione del calore.

Trattamenti in grado di modificare alcuni aspetti del processo di combustione del legno

L'azione delle sostanze utilizzate si esplica generalmente secondo i seguenti meccanismi:

- svolgimento di **gas incombustibili che diluendo i gas infiammabili** derivanti dalla degradazione termica del legno **ne impediscono l'accensione**. P. e. i fosfati ammoniacali, riscaldati oltre determinate temperature si decompongono sviluppando gas, quali l'ammoniaca, che alterando la composizione della miscela combustibile/aria, rendono impossibile la propagazione di fiamma

I trattamenti superficiali si possono eseguire con

prodotti intumescenti

essenzialmente costituiti da

una **sostanza filmogena**, avente la funzione di garantire la necessaria adesione al supporto.

sostanze che, sotto l'azione del calore, **si degradano in un residuo incombustibile e acqua.**

Il residuo incombustibile è in genere una schiuma solidificata ("meringa")

prodotta da sostanze che, sotto l'azione del calore, si decompongono svolgendo gas inerti che diluiscono i gas infiammabili provenienti dalla degradazione del legno, impedendone l'accensione

fanno espandere il residuo formando la schiuma (intumescenza) che, solidificando, funge da isolante

L'azione delle sostanze utilizzate si esplica generalmente secondo i seguenti meccanismi:

-inibizione delle reazioni di ossidazione in fase gassosa mediante la neutralizzazione di radicali in grado di combinarsi rapidamente con l'ossigeno, tipo H·, OH· e altri, e liberazione di radicali inerti.

Esempio tipico di tali sostanze sono i derivati degli alogeni, in particolare composti del Br:



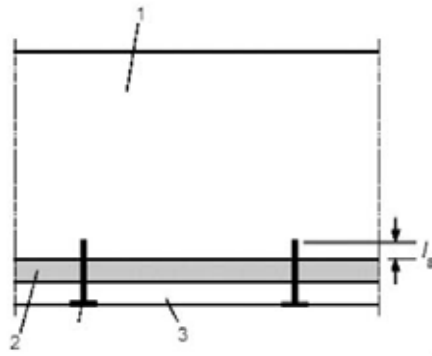
I trattamenti superficiali si possono eseguire con

prodotti non intumescenti

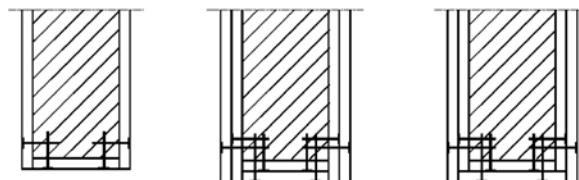
composti da **sostanze che sotto l'azione del calore liberano gas non infiammabili** o radicali in grado di bloccare le reazioni di ossidazione in fase gassosa **estinguendo in tale modo le fiamme**.

I sistemi di protezione passiva che fanno ricorso a pannelli richiedono, oltre ad una corretta progettazione (scelta e dimensionamento del pannello), anche una perfetta installazione per evitare che un montaggio errato o un fissaggio insufficiente compromettano l'efficacia della protezione.

Per i pannelli di legno o di cartongesso tipo A o H (secondo EN 520), è sufficiente affidarsi alle regole di installazione fornite con il prodotto. Invece per i pannelli di cartongesso tipo F (secondo EN 520), che possono aumentare in modo significativo la resistenza al fuoco, per l'elemento o collegamento protetto, è in genere richiesta una lunghezza minima di penetrazione $l_a \geq 10$ mm nella sezione residua.



È regola generale che il singolo pannello di protezione di spessore h_p , nel caso di schermatura a più strati, sia fissato direttamente al legno e non ad altri pannelli fermo restando il requisito di penetrazione minima. I giunti devono risultare sfalsati di almeno 60 mm, il passo dei fissaggi non deve superare 200 mm o $17 h_p$, quale che sia il minore, mentre la distanza dal bordo deve essere almeno uguale a 15 mm o $1,5 h_p$, quale che sia il maggiore, e non maggiore di $3h_p$.



Protezione dei collegamenti

Dato che le resistenze al fuoco adottate per i collegamenti in mancanza di più precise calcolazioni o verifiche sperimentali sono in genere ben inferiori a 30', i collegamenti costituiscono il punto debole per la resistenza al fuoco della struttura;

è quindi di importanza fondamentale la loro progettazione in funzione della resistenza richiesta e/o la progettazione della protezione da applicare ad essi.

Quando i collegamenti risultano protetti da pannelli di legno o di cartongesso tipo A o H (secondo EN 520), il ritardo t_{ch} nell'inizio della carbonizzazione del legno offerto dalla protezione (ovvero la resistenza richiesta alla protezione) si calcola tramite:

$$t_{ch} \geq t_{req} - 0,5t_{fi,d}$$

dove t_{req} e $t_{fi,d}$ sono la resistenza richiesta e la resistenza del collegamento non protetto.

Protezione dei collegamenti

Quando invece la protezione venga attuata mediante pannelli di cartongesso tipo F (secondo EN 520) la resistenza richiesta alla protezione è

$$t_{ch} \geq t_{req} - 1,2t_{fi,d}$$

e risulta sensibilmente minore.

La configurazione della protezione deve conservarsi almeno fino all'inizio della carbonizzazione del legno cioè fino a t_{ch} nel primo caso (pannelli tipo A o H), oppure fino al tempo richiesto di resistenza t_{req} (pannelli tipo F). Bisogna quindi che gli elementi di protezione e le relative modalità di vincolo rispettino alcuni requisiti minimi .

Protezione dei collegamenti

Teste dei bulloni o dei dadi

spessore della protezione $\geq a_{fi}$ (equazione indicata precedentemente).

Fissaggi delle protezioni (viti o chiodi)

distanza dal bordo $\geq a_{fi}$

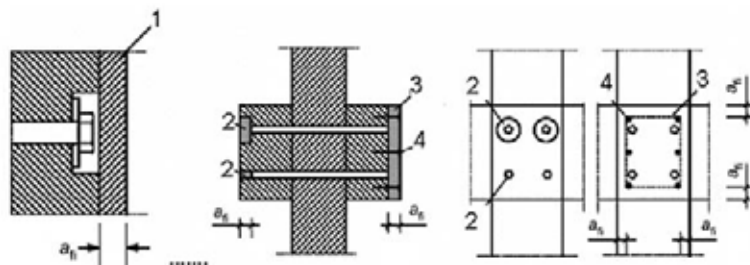
interasse ≤ 100 mm lungo i bordi

≤ 300 mm lontano da essi

Lunghezza di penetrazione di viti o chiodi nel legno non carbonizzato al tempo t_{req} .

≥ 6 volte il diametro (pannelli tipo A o H),

≥ 10 mm (pannelli tipo F)



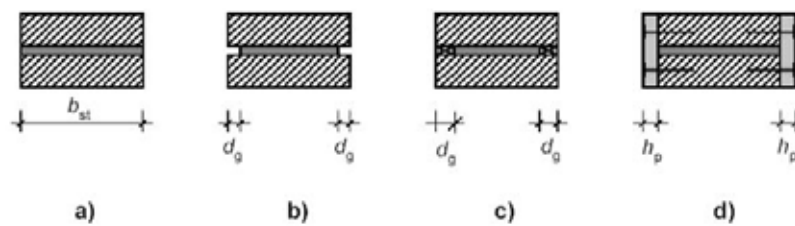
Esempi di protezioni delle teste dei bulloni (1), con tappi di legno incollati (2), con pannelli (3) fissati con differenti dispositivi (4)

Protezione dei collegamenti

Per i collegamenti realizzati con **piastre metalliche interne** di spessore ≥ 2 mm, con bordi non sporgenti dal legno e non protetti, le larghezze minima delle piastre sono riportate nella tabella seguente:

		b_{min} (mm)
Bordi non protetti	R 30	200
	R 60	280
Bordi non protetti (1 o 2 lati)	R 30	120
	R 60	280

Protezione dei collegamenti



Protezione dei bordi delle piastre metalliche interne delle connessioni: piastra non protetta (a), protetta in quanto rientrante (b), protetta da listelli incollati (c) o da pannelli (d)

Protezione dei collegamenti

La portanza di **piastre metalliche esterne** deve essere calcolata appoggiandosi all'Eurocodice 3 (EN 1993-1-2), considerando non esposta la superficie metallica a contatto del legno: la resistenza al fuoco di questi elementi è assai modesta in genere inferiore a 20 - 30 minuti, conviene quindi affidarsi a protezioni o di legno o di pannelli a base legno. In questo caso le piastre metalliche possono essere considerate protette se esse sono completamente coperte da legno con spessori minimi a_{fi} :

$$a_{fi} = \beta_n \cdot k_{flux} \cdot (t_{req} - 5)$$

assumendo per la piastra metallica una resistenza pari a 5 minuti

β_n velocità teorica di carbonizzazione

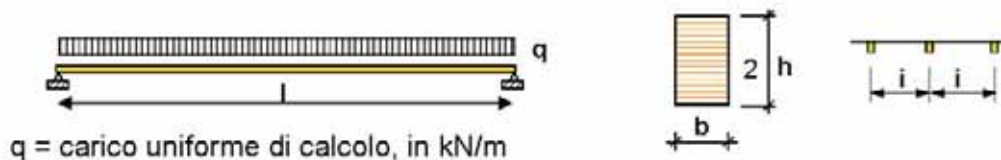
k_{flux} coefficiente di aumento di flusso termico (~ 1,5)

Esempio n.°2

ESEMPIO N.°2: TRAVETTO IN APPOGGIO SU TRAVE PRINCIPALE

luce	interasse	base sezione	altezza sezione	carico permanente	carico di esercizio
4,00 m	1,0 m	120 mm	196 mm	$G_k = 1,5 \text{ kN/m}^2$	$Q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Tipo di legno: lamellare, classe GL24 secondo EN1194.

**IPOTESI INIZIALE:** resistenza al fuoco non richiestaVerifica in assenza di fuoco secondo **ENV 1995 1-1**

Esempio n.°2

$$q = (1,4 \cdot G + 1,5 \cdot Q) \cdot i = (1,4 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 2,0) \cdot 1,0 = 5,1 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{5,10 \cdot 4^2}{8} = 10,20 \text{ kNm} = 10200000 \text{ Nmm}$$

$$V_{\max} = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{5,10 \cdot 4}{2} = 10,20 \text{ kN} = 10200 \text{ N}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = 768320 \text{ mm}^3 \quad A = b \cdot h = 23520 \text{ mm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 14,77 \text{ N/mm}^2 \quad f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 1,66 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{\text{mod}} = 0,8 \quad \text{per combinazione di carico di media durata (carico di esercizio Q)}$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2 \quad f_{v,k} = 2,70 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_M = 1,30$$

Verifica flessionale nella sezione di mezzera:

Esempio n.°2

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{10200000}{768320} = 13,28 < 14,77 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verifica soddisfatta}$$

Verifica di taglio nella sezione di appoggio:

$$\sigma = 1,5 \cdot \frac{V_{\max}}{A} = 1,5 \cdot \frac{10200}{23520} = 0,65 < 1,66 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verifica soddisfatta}$$

Verifiche di freccia (ipotesi di classe di servizio 1):

verifiche soddisfatte

$$f_{ist(Q_k)} = \frac{5 \cdot Q_k \cdot i \cdot l^4}{384 E J} + 1,2 \frac{Q_k \cdot i \cdot l^2}{8 G A} = 7,9 < 13,3 \text{ mm} = l/300 \quad f_{ist(G_k)} = 5,9 \text{ mm}$$

$$f_{fm} = f_{ist(G_k)} \cdot (1 + 0,60) + f_{ist(Q_k)} \cdot (1 + 0,25) = 19,4 < 20,0 \text{ mm} = l/200$$

$$G_k \rightarrow k_{\text{mod}} = 0,6 \rightarrow k_{\text{def}} = 0,6 \quad Q_k \rightarrow k_{\text{mod}} = 0,8 \rightarrow k_{\text{def}} = 0,25$$

$$E = 11600 \text{ N/mm}^2 \quad G = 720 \text{ N/mm}^2 \quad J = b h^3/12 = 75295360 \text{ mm}^4$$

Verifica del collegamento trave secondaria-trave principale:

Esempio n.°2

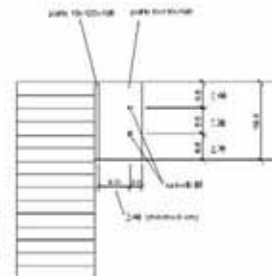
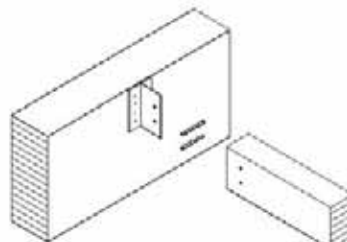
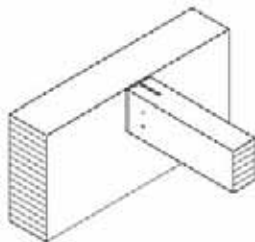
azione sollecitante: $V_d = 10200 \text{ N}$

ENV 1995 1-1 punto 6.2.2:

capacità portante: $R_d = 12196 \text{ N}$

"unione acciaio-legno con elemento d'acciaio centrale" (calcolata per 2 perni $\phi 8$ Fe360)

(perni lunghi 12 cm, come lo spessore del travetto)



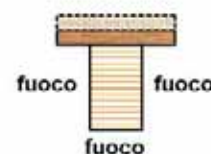
NUOVA IPOTESI: è richiesta resistenza al fuoco R60

Ipotesi di adeguamento progettuale:

$$b = 140 \text{ mm}$$

$$h = 230 \text{ mm}$$

(perni invariati: 2 $\phi 8$ acciaio Fe360, ancora lunghi 12 cm)



Verifica al fuoco secondo **ENV 1995 1-2**

Esempio n.°2

$$q = (G+0,5Q) \cdot i = (1,5+0,5 \cdot 2,0) \cdot 1,0 = 2,50 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{2,50 \cdot 4^2}{8} = 5,00 \text{ kNm} = 5000000 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{\text{car}} = 0,7 \text{ mm/min} \quad \text{velocità di carbonizzazione per legno lamellare}$$

$$d_0 = 7 \text{ mm} \quad \text{quota fissa di carbonizzazione da sommare a } \beta_{\text{car}} \cdot R$$

Dopo una esposizione al fuoco di 60 minuti ($R = 60$) la sezione residua sarà:

$$b_{\text{ef}} = b - 2(\beta_{\text{car}} \cdot R + d_0) = 140 - 2(0,7 \cdot 60 + 7) = 42,0 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = h - (\beta_{\text{car}} \cdot R + d_0) = 230 - (0,7 \cdot 60 + 7) = 181,0 \text{ mm}$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{b_{\text{ef}} \cdot h_{\text{ef}}^2}{6} = 229327 \text{ mm}^3 \quad \text{modulo di resistenza flessionale}$$

$$f_{m,fi,d} = k_{\text{mod},fi} k_{fi} \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}} = 1,0 \cdot 1,15 \cdot \frac{24}{1,0} = 27,6 \text{ N/mm}^2$$

Esempio n.°2

essendo:

$$k_{\text{mod},fi} = 1,0$$

$$k_{fi} = 1,15 \quad \text{valore valido per legno lamellare}$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2 \quad \text{resistenza caratteristica a flessione per legno GL24}$$

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

Verifica flessionale nella sezione di mezzera:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_{\text{ef}}} = \frac{5000000}{229327} = 21,8 < 27,6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verifica soddisfatta}$$

La verifica flessionale è soddisfatta; è necessario ora controllare il collegamento con la trave principale, il quale dovrà a sua volta garantire una resistenza al fuoco R60.

Verifica del collegamento trave secondaria-trave principale:

Esempio n.°2

1) Capacità portante del collegamento in assenza di fuoco

azione sollecitante: $V_d = 10200 \text{ N}$

ENV 1995 1-1 punto 6.2.2:

capacità portante: $R_d = 12196 \text{ N}$

"unione acciaio-legno con elemento d'acciaio centrale" (calcolata per 2 perni $\phi 8 \text{ Fe360}$)

Nota: R_d è la stessa del caso precedente in quanto si è supposto che i perni siano ancora lunghi 12 cm (ovvero presentano un gap nel legno di 1 cm per parte); a rigore V_d andrebbe aumentata a causa dell'incremento di peso della trave.

2) Valutazione della resistenza al fuoco dell'unione secondo ENV1995 1-2 Final draft 2001

Elementi presenti nell'unione	Resistenza	Commento
- perni non protetti	R20	resistenza minima da tabella 6.1 Le teste sono esposte al fuoco, nonostante il gap di 1 cm per parte, quindi l'unione è non protetta.
- nervatura nel travetto	R30	resistenza minima da tabella 6.2 Nervatura non protetta, in quanto il bordo inferiore è esposto al fuoco; spessore nervatura 8 mm, larghezza nervatura $\geq 120 \text{ mm}$.
- nervatura sulla trave principale	R<30	resistenza minima da tabella 6.2 Nervatura non protetta, con tre bordi esposti al fuoco; spessore nervatura 10 mm, larghezza nervatura $\geq 120 \text{ mm}$.

3) Un metodo per incrementare la resistenza al fuoco fino ad R60:

Esempio n.°2

aumento della sezione del travetto e utilizzo di tasselli protettivi

- Perni:**
- si aumentano le dimensioni del travetto e si modificano se necessario le posizioni dei perni, in funzione del parametro a_n
 - si lasciano invariate le lunghezze dei perni (le teste dovranno rimanere nascoste nel legno per un tratto $\geq a_n$) o si riducono, ricalcolando in tal caso la resistenza in assenza di fuoco
 - si proteggono i perni con dei tasselli di legno incollati, aventi profondità pari almeno ad a_n

$$a_n = \beta_n k_{t,ux} (t_{req} - t_{f,d}) = 42,0 \text{ mm}$$

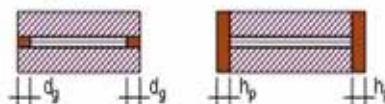
$\beta_n = 0,7 \text{ mm/min}$
 $k_{t,ux} = 1,5 \dots$
 $t_{req} = 60 \text{ min}$
 $t_{f,d} = 20 \text{ min}$



Nota: le distanze dei perni dai bordi e dalle estremità devono essere aumentate fino a a_n oltre i valori minimi richiesti in assenza di fuoco.

- Nervature:** - piastre con spessore $> 3 \text{ mm}$ e protette da tasselli incollati o da pannelli (o dal legno degli elementi strutturali collegati) hanno resistenza:

R 30 se $d_g > 10 \text{ mm}$ o $h_p > 10 \text{ mm}$
 R 60 se $d_g > 30 \text{ mm}$ o $h_p > 30 \text{ mm}$



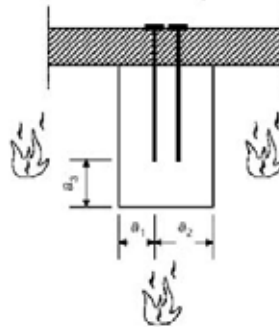
Protezione dei collegamenti

Sempre con riguardo alla protezione offerta dal legno ai collegamenti, può essere infine di un certo interesse il riferimento alla figura di seguito per quanto riguarda la resistenza delle viti impegnate assialmente. Nel caso in cui risulti:

$$a_2 \geq a_1 + 40; \quad a_3 \geq a_1 + 20; \quad a_1 \geq \beta \cdot t_{fi,d} + 28$$

con a_1, a_2, a_3 in millimetri (e $\beta = 1$ mm/min);

Possiamo ritenere completamente sufficiente la protezione offerta dal legno al collegamento.



Protezione dei collegamenti

La protezione del collegamento meccanico della struttura lignea si rivela quindi essenziale ai fini del raggiungimento di quelle notevoli prestazioni di resistenza al fuoco che l'elemento ligneo intrinsecamente può già fornire. Tali protezioni si possono raggiungere quindi mediante schermature, validissime soprattutto nei casi in cui il collegamento stesso non sia organizzabile all'interno del materiale ligneo o comunque per proteggere scarpe metalliche a vista.

Le situazioni presentate nelle figure si riferiscono a richieste R 60.

Proprio con riguardo all'attacco realizzato con la comunissima scarpetta metallica esistono soluzioni alternative a scomparsa di indubbia validità anche sotto l'aspetto estetico. Anche i collegamenti con barre metalliche incollate a scomparsa nel legno si prestano per ottenere collegamenti protetti dal legno.

Protezione dei collegamenti

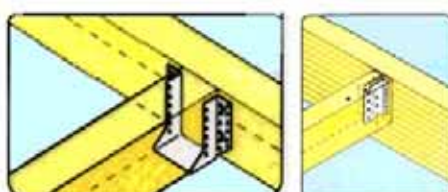


Protezione di una cerniera di estremità con lastre di silicato di calcio

Protezione dei collegamenti



Protezione dei collegamenti a scarpetta mediante lastre di silicato di calcio



Possibile alternativa ad un collegamento a vista



Dettagli esecutivi e struttura in opera di capriata in legno lamellare incollato R 60

**La combustibilità del legno,
in virtù della sua relativa prevedibilità e
della accettabile e nota lentezza di
propagazione del fenomeno,
non giustifica quindi
la diffidenza verso il suo impiego come
materiale da costruzione !**

Riferimenti

- [1] Baker D. S., Bullard G. E., *Fire Performance of Timber*, TRADA, Timber Research and Development Association, Stocking Lane, Hughenden Valley, High Wycombe, Buckinghamshire (UK), 2.nd edition, 1976.
- [2] Cont S., Piazza M., Zanon P., *Some Remarks on the Design of Timber Composite Structures Exposed to Fire*, International Conference 'Composite Construction - Conventional and Innovative', Innsbruck, Austria, 1997.
- [3] Fredlund B., *Modelling of Heat and Mass Transfer in Wood Structures during Fire*, Fire Safety Journal, 20, 1993.
- [4] König J., *Modelling the Effective Cross Section of Timber Frame Members Exposed to Fire*, International Council for Building Research Studies and Documentation, Oxford, 1991.
- [5] König J., *The Effect of Density on Charring and Loss of Bending Strength in Fire*, International Council for Building Research Studies and Documentation, Sweden, 1992.
- [6] Lyons J. W., *The Chemistry & Uses of Fire Retardants*, Wiley-Interscience, New York (U.S.), 1970.
- [7] Majamaa J. A., *Calculation Models of Fire Exposed Wooden Beams*, Proceedings 'International Timber Engineering Conference 1991', London, 1991.
- [8] Mikkola E., *Ignition and Charring Models for Wood Based Materials*, Proceedings 'International Timber Engineering Conference 1991', London, 1991.
- [9] Piazza M., Cont S., Del Senno M., *Charring rate slowing by means of fibreglass-reinforced coatings*, WCTE '98, World Conference on Timber Engineering, Losanna, 1998.
- [10] Piazza M., Turrini G., *Strutture in conglomerato cementizio armato ed incendio: verifiche di resistenza per sezioni in stato di sollecitazione normale*, L'Industria Italiana del Cemento, n. 660, novembre 1991.
- [11] EN 338, *Legno strutturale - Classi di resistenza*, Comitato Europeo di Normazione, 1995.
- [12] ENV 1991-2-2 (1995), *Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 2-2: Actions on structures exposed to fire*, European Committee for Standardisation, 1995; versione italiana UNI-ENV 1991-2-2, 1997.
- [13] ENV 1992-1-2 (1996), *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, European Committee for Standardisation, 1995, 1996; versione italiana UNI-ENV 1992-1-2, 1998.
- [14] ENV 1993-1-2 (1995), *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*, European Committee for Standardisation, 1995; versione italiana UNI-ENV 1993-1-2, 1998.
- [15] ENV 1995-1-1 (1993), *Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardisation, 1993; versione italiana UNI-ENV 1995-1-1, 1995.
- [16] ENV 1995-1-2 (1994), *Eurocode 5: Design of timber structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design*, European Committee for Standardisation, 1994; versione italiana UNI-ENV 1995-1-2, 1996.

- [17] International Organization for Standardization, *Fire Resistance Tests of Elements of Building Construction*, ISO Recommendation R834, (1968) 1975.
- [18] prEN 1194, *Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values*, Comitato Europeo di Normazione, rev. 1998.
- [19] UNI-VV.F. 9502, *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso*, 1989.
- [20] UNI-VV.F. 9503, *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio*, 1989.
- [21] UNI-VV.F. 9504, *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno*, 1989.