

**Ing. Marco Lauriola**

## *Progettare la sicurezza. La sicurezza al fuoco.*

### Premessa

È noto che il legno è un materiale combustibile, questo però non significa che le strutture di legno non possiedano resistenza al fuoco e che siano più vulnerabili rispetto alle strutture di acciaio o di calcestruzzo armato specie se precompresso.

Incendi anche recenti di edifici importanti o di pregio nei quali erano presenti strutture lignee (Teatro La Fenice a Venezia, Cappella della Sindone a Torino, ecc.) se valutati senza senso critico possono portare alla erronea conclusione che strutture di legno e sicurezza sono difficilmente compatibili tra loro, alimentando così la convinzione che dove c'è legno c'è rischio di incendio. Bisogna tenere presente, invece, che raramente le strutture di legno contribuiscono in modo sostanziale ad alimentare un incendio ma anzi ne subiscono più spesso le conseguenze, manifestando al riguardo un comportamento almeno non peggiore se non addirittura migliore rispetto a strutture realizzate con altri materiali.

Il legno brucia lentamente, la carbonizzazione procede dall'esterno verso l'interno della sezione, il legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata; la rottura meccanica dell'elemento avviene quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante, pertanto la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per *riduzione della sezione* e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche. Il processo di carbonizzazione può portare alla rottura dell'elemento strutturale in un tempo compreso fra alcuni minuti primi e alcune ore, ciò in dipendenza della specie legnosa ma soprattutto delle dimensioni originarie della sezione; infatti, a parità di condizioni, una riduzione di alcuni centimetri è determinante per portare a rottura elementi di piccola sezione (ad esempio i travicelli e l'orditura minuta in genere) mentre è poco influente nel caso di travi di grossa sezione.

Per contro gli elementi strutturali di acciaio non bruciano ma il materiale subisce un rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura; ad esempio la C. M. Int. n°91 14/09/61 "*Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile*" dice che un elemento strutturale di acciaio non protetto ha una resistenza al fuoco di 15 minuti indipendentemente dalle sue dimensioni e dallo stato di sollecitazione; per conferire resistenza al fuoco superiore ai 15 minuti è necessario che gli elementi strutturali metallici siano protetti con particolari vernici o con rivestimenti.

Nelle costruzioni di calcestruzzo armato la resistenza al fuoco è determinata dallo spessore del rivestimento delle armature metalliche (copriferro ed eventuale rivestimento) essendo queste ultime sensibili alla temperatura, pertanto valgono le considerazioni fatte per le strutture di acciaio.

Nelle strutture di legno i punti deboli sono le unioni che presentano elementi metallici a vista come scarpe, piastre, ecc.; queste, se non protette, sono le prime a cedere durante l'incendio.

### Definizioni

I requisiti richiesti per un elemento da costruzione, sia strutturale o no, riguardano la resistenza al fuoco e la reazione al fuoco.

Secondo il D. M. Int. 30/11/83 "*Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi*", la resistenza al fuoco è così definita:

*attitudine di un elemento da costruzione a conservare in tutto o in parte : la stabilità <R>, la tenuta <E>, l'isolamento <I>, così definiti:*

*R stabilità: attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;*

*E tenuta: attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre - se sottoposto all'azione del fuoco su un lato - fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto;*

*I isolamento termico: attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.*

Il requisito di resistenza al fuoco per le strutture è limitato alla sola stabilità R; esso corrisponde al tempo che trascorre dall'inizio dell'incendio al crollo della struttura ed è espresso in minuti primi.

La reazione al fuoco è definita sempre dal D. M. Int. 30/11/83 come *il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto. In relazione a ciò i materiali sono assegnati (C. M. Int. n°12 del 17/05/80) alle classi 0, 1, 2, 3, 4, 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione; quelli di classe 0 sono non combustibili.*

Il legno ed i prodotti a base di legno hanno reazione al fuoco 3 o 4.

Il requisito di reazione al fuoco generalmente è richiesto per i soli elementi non strutturali, ad esempio il D. M. Int 19/8/96 "*Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo*" richiede alle strutture il requisito di resistenza al fuoco *prescindendo dal tipo di materiale impiegato nella realizzazione degli elementi medesimi (calcestruzzo, laterizi, acciaio, legno massiccio, legno lamellare, elementi compositi, ecc.),* mentre per i materiali (da intendersi materiali non strutturali quali rivestimenti, elementi separanti, ecc.) il requisito di reazione al fuoco.

#### Valutazione della resistenza al fuoco

La resistenza al fuoco di un elemento strutturale di legno può essere valutata in due modi: con il metodo sperimentale e con quello analitico.

Il metodo sperimentale prevede le prove in forno "*su elementi di caratteristiche equivalenti agli elementi di effettivo impiego nella costruzione dello stesso tipo e dimensioni e soggetti agli stessi carichi di progetto*" e "*sottoposti a prova sotto il carico per essi ammissibile*" (C. M. Int. n°91 14/09/61 "*Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile*").

Il metodo analitico si basa su valori di calcolo noti; tali valori sono la velocità di carbonizzazione e la resistenza meccanica, essendo il calcolo da eseguirsi allo stato limite ultimo di collasso.

Nel calcolo analitico della resistenza al fuoco le ipotesi di base sono (per ENV 1995-1-2 le ipotesi sono leggermente diverse):

- la carbonizzazione procede perpendicolarmente alle superfici esposte con velocità costante;
- il legno conserva inalterate le proprie caratteristiche di resistenza e rigidità nella parte non ancora combusta;
- la valutazione della capacità portante viene fatta sulla sezione resistente residua trascurando l'arrotondamento degli spigoli.

Il calcolo viene eseguito allo stato limite ultimo di collasso utilizzando quindi le tensioni di rottura.

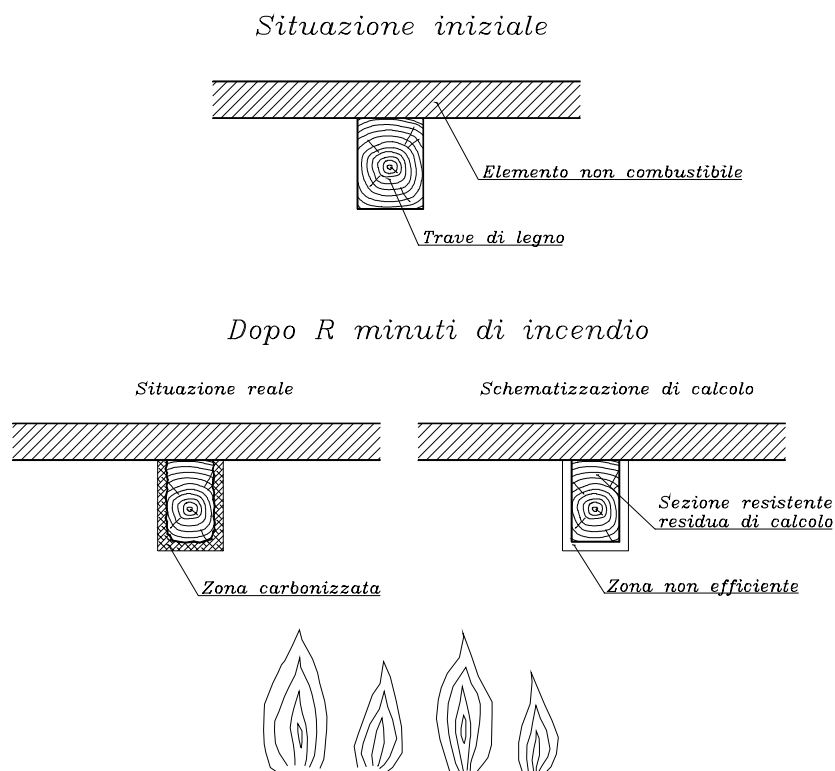


Figura 1: schematizzazione per il calcolo della resistenza al fuoco.

I valori da assumersi nel calcolo analitico si possono ricavare dai seguenti documenti:

- dalla legge (lettera circolare M. Int. 26/11/90 “Resistenza al fuoco di strutture portanti in legno” per la resistenza meccanica e D. M. Int. 8/3/85 “Direttive sulle misure più urgenti ed essenziali di prevenzione incendi per il rilascio del nulla osta provvisorio” per la velocità di carbonizzazione) che però non fornisce indicazioni circa la combinazione di carico da assumersi e che peraltro non fa distinzione fra le specie legnose e le classi di qualità meccanica;
- dalla norma UNI 9504 “Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno” che però non è legge, la quale fornisce valori cautelativi rispetto alle leggi sopra citate;
- dalla norma UNI ENV 1995-1-2 “Eurocodice 5 - progettazione di strutture di legno - parte 1-2 progettazione strutturale contro l'incendio” che è il miglior documento dal punto di vista scientifico, anch'esso non è legge ma una norma sperimentale; questo documento fornisce tre metodi di calcolo, il primo dei quali (metodo della sezione efficace) è il più semplice ma anche il più cautelativo;
- dal Manuale di Ingegneria Civile ESAC-Zanichelli-Cremonese al capitolo XI “Strutture di Legno” (a cura del Prof. Ario Ceccotti).

Come già detto, i metodi sopra citati non fanno riferimento ad eventuali protezioni presenti sul legno (rivestimenti, vernici, ecc.), ma al legno nudo.

Esistono però un paio di riferimenti normativi in merito:

- la lettera circolare M. Int. 7/12/87 dice che a protezione delle strutture di legno possono essere utilizzati controsoffitti, purché classificati per conferire alle strutture in acciaio una resistenza al fuoco uguale o superiore a 45' ..., in tal caso la resistenza al fuoco delle strutture sarà incrementata di un numero di minuti corrispondenti ai risultati delle prove riportati nel relativo certificato (del controsoffitto).

- la già citata lettera circolare M. Int. 26/11/90 dice che è ammesso *il rivestimento di strutture portanti in legno con elementi di legno naturale, non classificato e lasciato a vista ai fini del raggiungimento delle prescritte caratteristiche di resistenza al fuoco ... Se la sezione (residua) è costituita dalla sola trave iniziale, in quanto l'incendio ha carbonizzato l'intero rivestimento e parte della trave, non occorre particolare cura nell'applicazione del rivestimento, in quanto non è indispensabile la sua collaborazione meccanica.* Al solito il calcolo della resistenza al fuoco si effettua assumendo una velocità di carbonizzazione costante anche nel rivestimento.

Esistono in commercio prodotti vernicianti igniritardanti per legno (cioè che ritardano l'ignizione) che possono essere omologati, secondo il D. M. Int. 6/3/92, in classi di reazione al fuoco ma non di resistenza al fuoco. Generalmente tali vernici sono omologate in classe 1 o superiore, in realtà questi prodotti conferiscono anche resistenza al fuoco in quanto abbassano la velocità di penetrazione della carbonizzazione (fino a dimezzarla) e ritardano l'ignizione; ciononostante non possono essere omologati per legge come vernici per conferire resistenza al fuoco per mancanza di normativa in materia. È però possibile determinare la resistenza al fuoco di un elemento strutturale trattato con vernici igniritardanti utilizzando il metodo sperimentale.

L'acciaio utilizzato nelle unioni se non protetto è vulnerabile all'incendio. Valide indicazioni sulla resistenza al fuoco delle unioni le troviamo solo nell' UNI ENV 1995-1-2.

Per quanto riguarda le unioni legno-legno ed acciaio-legno che fanno uso di elementi metallici di collegamento (piastre, chiodi, spinotti, bulloni, anelli, ecc.) si fa distinzione fra unioni non protette (cioè con piastre metalliche ed estremità dei mezzi di unione esposti al fuoco) ed unioni protette (cioè dove le piastre metalliche sono completamente ricoperte da legno e le estremità dei mezzi di unione sono incassate e protette da tasselli oppure protette da tavole).

Nel caso delle unioni non protette se gli elementi metallici di collegamento sono inseriti nel legno rispettando le distanze minime dai bordi prescritte per il calcolo a freddo, allora l'unione ha  $R=15$ ; per classi di resistenza superiori bisogna incrementare le distanze dai bordi e lo spessore dei legni proporzionalmente ai minuti di resistenza al fuoco richiesta eccedenti i 15; la norma inoltre prescrive una limitazione sulla capacità portante per giunzioni con  $R \geq 30$  che di fatto porta ad un sovradimensionamento dell'unione rispetto al calcolo a freddo; qualora vi siano piastre metalliche esposte al fuoco per garantire  $R=30$  è necessario che queste abbiano uno spessore di almeno 6mm ed il carico su di esse venga fortemente limitato rispetto alla corrispondente.

Se l'unione è protetta allora le protezioni (che possono essere di legno o materiali a base di legno incollate o opportunamente chiodate al giunto) devono avere spessore proporzionale ai minuti di resistenza al fuoco richiesta eccedenti i 15.

#### La resistenza al fuoco richiesta

La resistenza al fuoco delle strutture deve essere confrontata con *la classe dell'edificio* che è la resistenza al fuoco richiesta espressa in minuti primi (che può avere i valori 15, 30, 45, 60, 90, 120 e 180); nel caso degli edifici contenenti strutture di legno nella determinazione del carico di incendio bisogna tener conto anche della presenza delle strutture di legno le quali si sommano agli altri materiali combustibili non strutturali.

Il carico di incendio totale dei locali a struttura portante di legno viene così determinato (D.M. 6/3/86 "Calcolo del carico di incendio per locali aventi strutture portanti in legno"):

$$q = Q + 12,5 \times \frac{S}{A}$$

dove:

q    carico di incendio totale;

- Q carico di incendio dei materiali combustibili contenuti nel locale, escluse le strutture portanti di legno ( $\text{kg/m}^2$ ) calcolato nella maniera classica;  
 S è la superficie esposta al fuoco delle strutture portanti di legno ( $\text{m}^2$ );  
 A è la superficie orizzontale del locale.

Per quanto riguarda gli edifici per civili abitazioni il D. M. Int. 16/05/1987 n°246 "*Norme di sicurezza antincendi per gli edifici di civile abitazione*" fornisce i criteri di sicurezza antincendi per gli edifici con altezza di gronda superiore ai 12m, non essendo richiesto alcun criterio per gli edifici di altezza inferiore.

### Esempio di calcolo

Trave di solaio in semplice appoggio, l'estradosso è protetto dal fuoco pertanto la carbonizzazione avviene solo sull'intradosso e sui lati.

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

1) metodo proposto dalla legge:

Per quanto concerne i carichi da assumere nel calcolo, le leggi in materia di prevenzione incendi rimandano al D. M. LL PP 16/1/96 "*Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi*", in questo documento ed in quelli ad esso collegati non viene indicata la combinazione di carico da assumere nei calcoli, pertanto si assume cautelativamente che oltre al carico permanente sia presente sulla struttura tutto il carico accidentale.

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

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} = \frac{1,75 \times 5^2}{8} = 5,47 \text{ kNm} = 5.470.000 \text{ kNmm}$$

La velocità di carbonizzazione è (D. M. Int. 8/3/85):

- travi, estradosso e laterali  $V_{\text{car}} = 0,8 \text{ mm/min}$
- travi, intradosso  $V_{\text{car}} = 1,1 \text{ mm/min}$

dopo  $R=60$  minuti la sezione sarà:

$$b_{\text{ef}} = b - 2 \times V_{\text{car}} \times R = 150 - 2 \times 0,8 \times 60 = 54 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = h - V_{\text{car}} \times R = 200 - 1,1 \times 60 = 134 \text{ mm}$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{b_{\text{ef}} \times h_{\text{ef}}^2}{6} = 161.604 \text{ mm}^2$$

La resistenza ultima del legno è (lettera circolare M. Int. 26/11/90):

$$\sigma_u = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{5.470.000}{161.604} = 33,8 < 35 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verificato}$$

pertanto la trave ha una resistenza al fuoco  $R = 60$  minuti.

2) UNI9504:

Il carico di esercizio si somma al carico permanente senza alcuna riduzione; se sulla struttura agiscono anche carichi di breve durata (vento e neve) questi devono essere sommati moltiplicati per 0,7.

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

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} = \frac{1,75 \times 5^2}{8} = 5,47 \text{ kNm} = 5.470.000 \text{ kNmm}$$

La velocità di carbonizzazione per il legno massiccio è  $V_{car}=0,9$  mm/min senza distinzione in funzione dell'orientazione della superficie esposta.

dopo  $R=40$  minuti la sezione sarà:

$$b_{ef} = b - 2 \times V_{car} \times R = 150 - 2 \times 0,9 \times 40 = 78 \text{ mm}$$

$$h_{ef} = h - V_{car} \times R = 200 - 0,9 \times 40 = 164 \text{ mm}$$

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} \times h_{ef}^2}{6} = 349.648 \text{ mm}^2$$

Ipotizzando che il legno sia abete di classe S8 secondo UNI 8198 la resistenza ultima a flessione è:

$$\sigma_u = 16 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{5.470.000}{349.648} = 15,6 < 16 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verificato}$$

pertanto la trave ha una resistenza al fuoco  $R = 30$  minuti non essendo previste classi intermedie fra 30 e 45.

3) UNI ENV 1995-1-2 (metodo della sezione efficace):

Il carico di esercizio deve essere moltiplicato per 0,5 e sommato al carico permanente; eventuali altri carichi devono essere sommati previa moltiplicazione con un opportuno coefficiente riduttivo.

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

Il momento sollecitante è pertanto:

$$M_{max} = \frac{q \times l^2}{8} = \frac{1,25 \times 5^2}{8} = 3,91 \text{ kNm} = 3.910.000 \text{ kNmm}$$

L'EC5 nella parte 1-2 prevede tre metodi per il calcolo della resistenza al fuoco. In questo esempio il calcolo verrà effettuato secondo il primo metodo detto "*metodo della sezione efficace*" che è anche il più semplice da utilizzare.

La velocità di carbonizzazione per legno di conifera con massa volumica caratteristica  $\geq 290 \text{ kg/m}^3$  e dimensioni superiori a 35 mm è  $V_{car}=0,8$  mm/min senza distinzione in funzione dell'orientazione della superficie esposta; alla carbonizzazione ricavata in funzione del tempo  $R$  va aggiunta una quantità fissa che per legno con superfici non protette è  $d_0=7$ mm.

Dopo  $R=61$  minuti la sezione sarà:

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

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

$$W_{ef} = \frac{b_{ef} \times h_{ef}^2}{6} = 133.079 \text{ mm}^2$$

Per il legno massiccio di abete di classe C24 secondo UNI EN 338 (equivalente alla S8 secondo UNI 8198) la resistenza ultima a flessione è:

$$f_{m,fi,d} = k_{mod,fi} \times k_{fi} \times \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,fi}}$$

dove:

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

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

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

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

Si ha pertanto:

$$f_{m,fi,d} = 1,0 \times 1,25 \times \frac{24}{1,0} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{3.910.000}{133.079} = 29,4 < 30 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verificato}$$

pertanto la trave ha una resistenza al fuoco  $R = 60$  minuti non essendo previste classi intermedie fra 60 e 90.

4) Manuale di Ingegneria Civile:

Il carico di esercizio deve essere moltiplicato per 0,2 e sommato al carico permanente; eventuali altri carichi devono essere sommati previa moltiplicazione con un opportuno coefficiente riduttivo.

$$q = (G+Q)_{xi} = (1,5+0,2 \times 2,0) \times 0,5 = 0,95 \text{ kN/m}$$

$$M_{\max} = \frac{q \times l^2}{8} = \frac{0,95 \times 5^2}{8} = 2,97 \text{ kNm} = 2.970.000 \text{ kNmm}$$

La velocità di carbonizzazione per il legno massiccio è  $V_{\text{car}}=0,8$  mm/min senza distinzione in funzione dell'orientazione della superficie esposta.

dopo  $R=67$  minuti la sezione sarà:

$$b_{\text{ef}} = b - 2 \times V_{\text{car}} \times R = 150 - 2 \times 0,8 \times 67 = 42,8 \text{ mm}$$

$$h_{\text{ef}} = h - V_{\text{car}} \times R = 200 - 0,8 \times 67 = 146,4 \text{ mm}$$

$$W_{\text{ef}} = \frac{b_{\text{ef}} \times h_{\text{ef}}^2}{6} = 152.888 \text{ mm}^2$$

Ipotizzando che il legno sia abete di 2ª categoria secondo Giordano (equivalente alla classe S8 secondo UNI 8198) la resistenza ultima a flessione si ricava moltiplicando la tensione ammissibile pari a  $9 \text{ N/mm}^2$  per 2,25:

$$\sigma_u = 2,25 \times 9 = 20,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = \frac{5.470.000}{349.648} = 19,4 < 20,3 \text{ N/mm}^2 \quad \text{verificato}$$

pertanto la trave ha una resistenza al fuoco  $R = 60$  minuti non essendo previste classi intermedie fra 60 e 90.

### Conclusioni

Attualmente in Italia non ci sono indicazioni chiare sul calcolo della resistenza la fuoco delle strutture di legno, esaminando criticamente i vari metodi disponibili si può dire che:

- la legge fornisce indicazioni sommarie ed opinabili: velocità di carbonizzazione non dipendente dalle caratteristiche fisiche e dalla specie legnosa, resistenza a rottura del legno non dipendente dalla specie legnosa e dalla classe di qualità ed in ogni caso piuttosto elevata, combinazione di carico penalizzante, assenza di indicazioni relative ai giunti;
- anche la UNI 9504 fornisce indicazioni sommarie ed opinabili: velocità di carbonizzazione non dipendente dalle caratteristiche fisiche e dalla specie legnosa ma con la sola distinzione massiccio-lamellare, resistenza a rottura del legno piuttosto bassa, combinazione di carico penalizzante, assenza di indicazioni relative ai giunti; è generalmente accettato nelle pratiche di prevenzione incendi anche se non ha valore di legge;
- L'Eurocodice 5 UNI ENV 1995-1-2 è il documento più completo ed affidabile, fornisce metodi di calcolo piuttosto laboriosi ma non ha valore di legge;
- Le indicazioni contenute nel Manuale di Ingegneria Civile ESAC-Zanichelli-Cremonese sono affidabili e di facile applicazione, mancano indicazioni sul calcolo dei giunti.

I quattro metodi proposti forniscono risultati molto diversi fra loro, in particolare la UNI 9504 fornisce risultati eccessivamente cautelativi.

Dall'esame della normativa antincendio si evince che non esiste alcun divieto all'utilizzo del legno per le strutture portanti; per le nuove strutture la possibilità di aumentare la resistenza al fuoco semplicemente aumentando la sezione o proteggendo l'elemento strutturale con legno o altri materiali consente di usare con fiducia il legno anche negli edifici soggetti a prevenzione incendi.

#### Foto

Foto 1:

Un solaio di legno a seguito di un incendio, sotto lo strato carbonizzato il legno conserva inalterate le sue caratteristiche di resistenza e di rigidità.

Foto 2:

A seguito di un incendio gli elementi metallici hanno ceduto piegandosi sugli elementi di legno, questi ultimi hanno ridotto la propria sezione (la riduzione di sezione è evidenziata dalla sporgenza dei chiodi che presumibilmente prima dell'incendio erano completamente infissi nel legno) ma hanno resistito all'incendio. (foto tratta da Glulam - W. A. Chugg, Benn, London, 1964).

Disegno 1:

Schematizzazione di calcolo.