



43° CORSO I. A.

FIRE RESISTANCE OF WOODEN STRUCTURES

**43° CORSO ISPETTORI ANTINCENDI
INTERNATIONAL FIRE-FIGHTERS' WORKSHOP
FIRE SERVICE COLLEGE**

Moreton in Marsh-UK
30th September – 2th October 2003

I.A. Antonio Giulio Durante



43° CORSO I. A.

**43° CORSO ISPETTORI ANTINCENDI
INTERNATIONAL FIRE-FIGHTERS' WORKSHOP
FIRE SERVICE COLLEGE**

ATTI DEL CONVEGNO

30 Settembre – 2 Ottobre 2003



**RESISTENZA AL FUOCO DELLE STRUTTURE
LIGNEE**

I.A. Antonio Giulio DURANTE

INDICE

<i>Elementi costruttivi del legno</i>	2
Generalità sul materiale	2
Combustione del legno	2
Resistenza al fuoco	7
Definizione	7
Requisito	7
Metodo di valutazione	9
Metodo sperimentale	9
Metodo tabellare	9
Metodo analitico	9
UNI-CNVVF 9504	11
Metodo di calcolo UNI 9504	12
ENV 1995-1-1	13
Unioni non protette, realizzate con elementi laterali in legno	16
Unioni non protette, realizzate con piastre di acciaio	17
Unioni protette	17
Bibliografia	19

Elementi costruttivi del legno

Generalità sul materiale

Il legno è un materiale organico di origine vegetale composto principalmente da:

carbonio	50%
idrogeno	6%
ossigeno	42%
azoto	0,2%
altri componenti	in piccolissima percentuale

Dal punto di vista chimico il legno secco è formato da:

cellulosa	50%	con potere calorifico 3800÷4000 kcal/kg
lignina	18÷30%	6000 kcal/kg
emicellulose	10÷20%	
cere, oli e resine		alti poteri calorifici

Il potere calorifico medio è pari circa a 3700 kcal/kg (3700÷4000 secondo la circ.91/61) con valori maggiori nelle conifere, rispetto alle latifoglie per la maggior presenza di resine e lignina.

Presenta caratteristiche generali di anisotropia e disomogeneità molto marcate.

E' un materiale igroscopico: in una stanza in condizioni di equilibrio a 24°C di temperatura, e 64% di umidità relativa il legno contiene circa il 12% in peso di acqua. Il contenuto di acqua influenza quasi tutte le caratteristiche e le proprietà del legno.

Combustione del legno

In presenza di una fonte di calore la superficie libera dell'elemento di legno si riscalda provocando:

- evaporazione dell'acqua interna;
- serie di reazioni chimiche interne che spezzano le molecole organiche in molecole più semplici in grado di liberarsi dalla superficie del materiale;
- liberazione di idrogeno e di altri idrocarburi leggeri combustibili che si accendono per autocombustione o per effetto di una fiamma.

A questo punto la superficie del legno si carbonizza, fessurandosi fino al limite della zona soggetta a pirolisi, mentre gli strati interni del legno, che hanno temperature rapidamente decrescenti, conservano intatte le loro caratteristiche fisiche e meccaniche sino a quando non sono raggiunte dal fronte di carbonizzazione.

La velocità di penetrazione della carbonizzazione, in senso ortogonale alla superficie esposta, è poi sostanzialmente costante, e ciò consente di stimare, nel tempo, la riduzione dimensionale dell'elemento considerato.

Tale velocità dipende poi dalla specie legnosa considerata, ma si assesta entro un range abbastanza limitato di valori aventi come limite superiore, salvo casi particolari 1 mm al minuto.

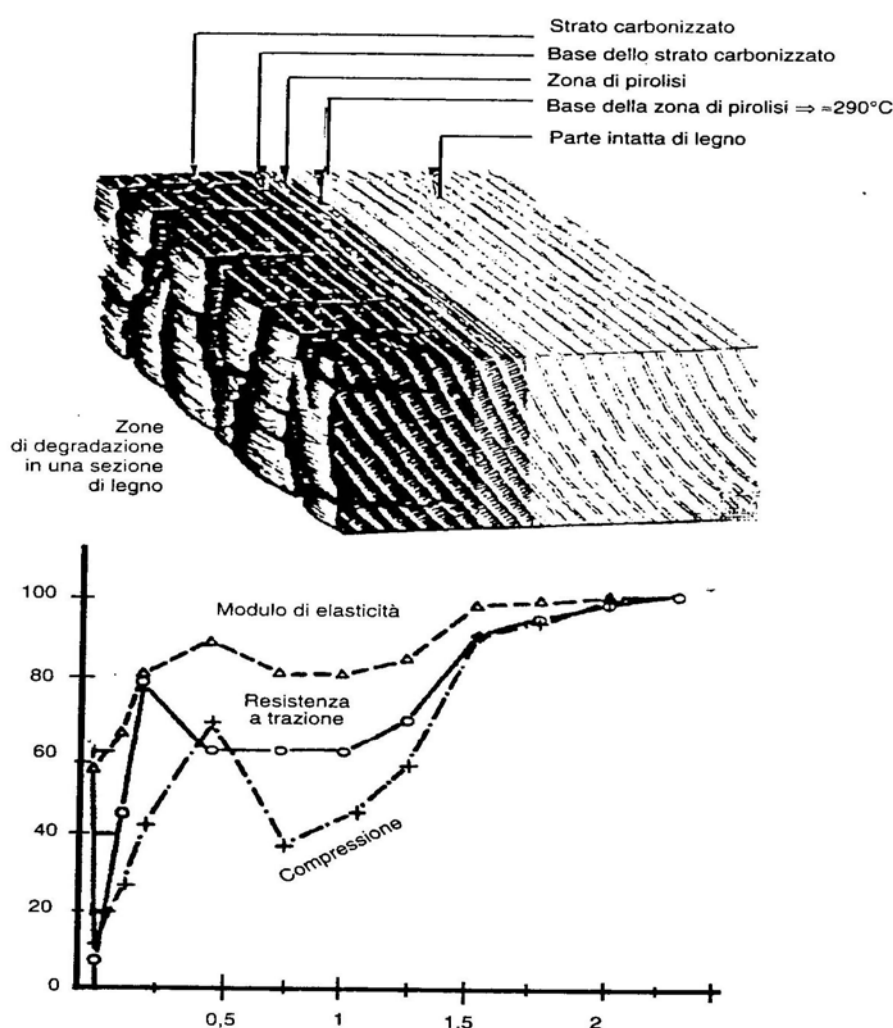
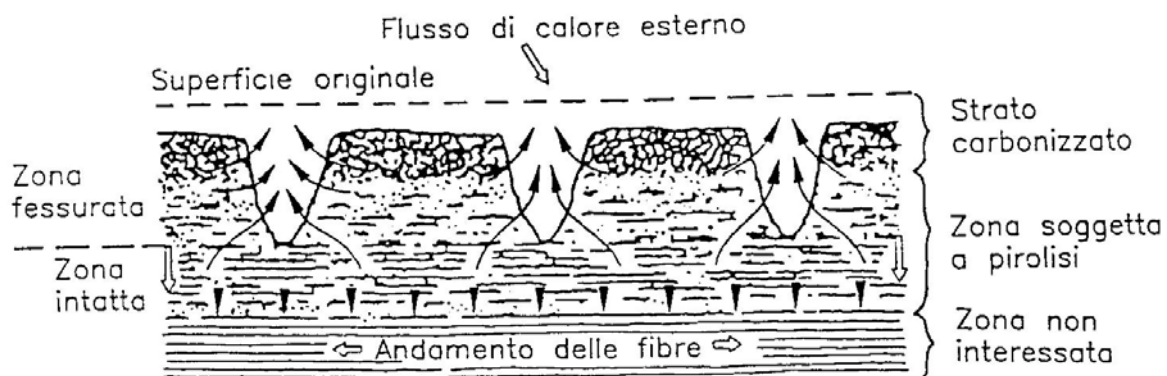
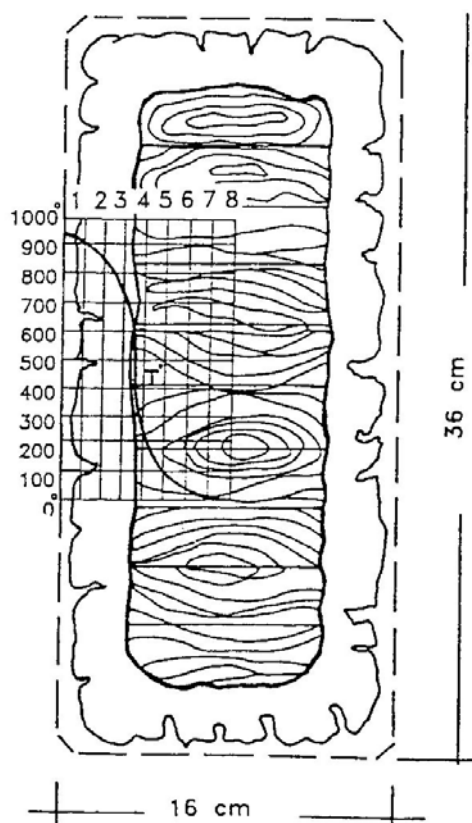


Fig. 1 - E. L. SCHAFFER, C. M. MARX, D.A. BENDER, F. E. WOESTE, Res. Pap. FLP 467, USDA Forest Service, Forest Product Lab., Madison (1986). Modulo di elasticità, resistenza a trazione e resistenza a compressione in funzione della distanza (in pollici) al di sotto dello strato carbonizzato. I risultati dell'indagine si riferiscono a durate di esposizione al fuoco maggiori di 20 minuti. I valori sono espressi in percentuale rispetto a quelli misurati a 25°C e sono riferiti ad una umidità iniziale del legno pari al 12%.



Le frecce bianche mostrano la probabile direzione di flusso dei gas infiammabili



VELOCITA' DI PENETRAZIONE DELLA CARBONIZZAZIONE			
Specie legnosa	Penetrazione (mm/minuto)		
	Dopo 10'	dopo 20'	dopo 30'
abete rosso	0.68	0.78	0.70
castagno	0.92	0.64	0.78
douglas	0.75	0.70	0.63
larice	0.62	0.58	0.61
pino silvestre	0.53	0.50	0.52
faggio	0.72	0.77	0.69

Nota: Da studi e ricerche condotte dal C.N.R. – Istituto per la tecnologia del legno, di S. Michele all'Adige (TN)

CARICHI DI ROTTURA (N/cm ²)				
Specie legnosa	Trazione	compress.	flessione	taglio
Abete rosso	8135	3820	7250	588
Abete bianco	7850	3725	6670	490
Castagno	9300	4900	9800	833
Pioppo euram.	6400	3330	5880	343
Pioppo nero	7850	3920	7350	392
Ontano nero	8300	3920	7350	441
Larice	8800	4900	9810	833

Nota: I valori sopra riportati sono le medie ottenute all'Istituto per la tecnologia del legno del C.N.R. su diverse migliaia di prove effettuate su provette normalizzate secondo i fascicoli UNI, a umidità normale del 12% e temperatura di 20°C, prive di difetti.

CARICHI AMMISSIBILI (N/cm ²)				
Specie legnosa	Trazione	compres.	flessione	taglio
Abete rosso	600+1100	600+1100	700+1100	70+90
Abete bianco, pini, castagno	600+1100	700+1100	750+1150	60+100
Pioppo, ontano	450+900	600+1000	650+1050	40+60
Larice, quercia	700+1200	750+1200	850+1300	90+110
Nota: Il range di valore per i carichi su esposti è dovuto alla qualità della specie legnosa con valori decrescenti passando dalla I alla III categoria di legno.				

Resistenza al fuoco

Definizione

La definizione di resistenza al fuoco secondo la ISO Guide 52, ripresa dal documento interpretativo, è la seguente:

Capacità di un elemento, di una struttura, di conservare per un determinato periodo di tempo, la stabilità (R), la tenuta (E) e/o l'isolamento termico (I) specificati nella prova standard di resistenza al fuoco.

La prova standard di resistenza al fuoco consiste nel sottoporre il campione nel forno ad un processo di riscaldamento che segue la curva standard temperatura – tempo.

Requisito

Il grado di resistenza al fuoco da garantire alle strutture, ove previsto, può essere:

- prescritto direttamente in minuti da specifiche norme di prevenzioni incendi;
- valutato attraverso il metodo fissato dalla Circolare M.I. n.91/61. Tale metodo, nel caso del legno, è stato “corretto” per tenere conto dell'effettivo contributo del legno strutturale all'incendio generalizzato.

In base al D.M. 6/3/84 il tempo di resistenza al fuoco richiesto ai singoli elementi della struttura portante e/o di separazione (t_R) è espresso dalla seguente relazione:

$$t_R = C$$

con: $C = k^\circ(q_i + q^*)$ classe del locale considerato

$$q_i = \frac{\sum g_i \cdot h_i}{4400 \cdot A}$$

carico di incendio tradizionale

$$q^* = 12.5 \cdot \frac{S_s}{A}$$

incremento del carico di incendio dovuto alla struttura in legno

dove:

k	coefficiente di riduzione del carico di incendio
g_i	peso del materiale combustibile iesimo (kg)
h_i	potere calorifico superiore (kcal/kg)
4400	potere calorifico superiore del legno standard (kcal/kg)
A	superficie in pianta del locale (m ²)
S_s	superficie della struttura esposta all'incendio (m ²)

Infatti considerazioni sperimentali hanno permesso di stabilire che il contributo della struttura combustibile al carico di incendio, deve essere limitato ad un solo strato di circa 2.5 cm di spessore che corrisponde a porre:

$$\frac{V_L \cdot \rho_L \cdot h_L}{4400 \cdot A} = \frac{0.025 \cdot S_s \cdot 600 \cdot 3700}{4400 \cdot A} \cong 12.5 \frac{S_s}{A}$$

dove:

V_L	è il volume del legno che partecipa alla combustione
ρ_L	è la massa volumica media del legno
h_L	è il potere calorifico medio del legno

Metodo di valutazione

La resistenza al fuoco degli elementi strutturali in legno può essere determinata con il metodo sperimentale, tabellare o analitico (D.M. 4/5/98).

Metodo sperimentale

Consiste nel sottoporre l'elemento da testare, in una fornace di caratteristiche predefinite, al programma termico (curva temperatura-tempo) indicato dalla Circolare M.I. n.91/61 o dalla norma ISO 834.

Gli stessi elementi, sottoposti ai carichi ammissibili, vengono valutati in relazione ai tempi di perdita di stabilità (criterio della rottura fragile) e, per gli elementi costruttivi con funzione separante, anche di tenuta ai fumi, ai gas caldi e alle fiamme e di isolamento termico sulla faccia non esposta al fuoco.

Metodo tabellare

Consiste nel valutare la resistenza al fuoco di un elemento attraverso il semplice confronto con apposite tabelle.

I rivestimenti protettivi, indicati nella Circolare M.I. n.91/61, sono applicabili dal 1983 (Circolare M.I. n.25 del 1/8/83) anche a protezione di elementi lignei.

I controsoffitti testati a protezione di strutture metalliche o cementizie sono ritenuti idonei anche per il legno del sistema struttura-controsoffitto, se di resistenza al fuoco certificata non inferiore a 45 minuti primi. (Lettera Circolare M.I. n.23752 del 7/12/87).

Metodo analitico

Il D.M. 8/3/85 e il D.M. 6/3/86 definiscono una procedura di verifica analitica degli elementi strutturali fondata sul principio della "sezione residua".

Poiché la velocità di penetrazione della carbonizzazione è relativamente costante nel tempo, e la parte di legno non ancora intaccata conserva pressoché inalterate le proprie caratteristiche meccaniche, la verifica "a caldo" viene ricondotta ad una normale verifica "a freddo", ma su una sezione ridotta in proporzione diretta al tempo di esposizione all'incendio.

La riduzione di sezione si calcola considerando una velocità di penetrazione della carbonizzazione e moltiplicandola per il tempo (min.) di esposizione all'incendio. Il D.M. 8/3/85 fornisce indipendentemente dalla specie legnosa e dalla durata dell'incendio, i valori di velocità di penetrazione della carbonizzazione di seguito elencati:

Travi estradosso e laterali	0.8 mm/min
Travi intradosso	1.0 mm/min
Pilastrì	0.7 mm/min
Altre strutture orizzontali	1.1 mm/min

Al tempo "t" desiderato si verifica quindi la resistenza della sezione residua nelle stesse condizioni di carico previste in progetto, ma con i valori di resistenza specifica del materiale "a rottura".

In merito ai valori di resistenza allo stato limite di collasso di elementi strutturali di legno, il Ministero dell'Interno si è espresso, con la Lettera Circolare n.20689/4122/54 del 26/11/1990 punto (b, ritenendo accettabile, in condizioni di collasso per flessione, la resistenza limite di 3500N/cm^2 prescindendo dalla specie legnosa.

E' questo un valore particolarmente alto (circa la metà del carico di rottura dell'abete rosso) che non tiene conto dei seguenti fattori:

- la sensibile distribuzione di valori di resistenza e rottura in relazione alle diverse specie legnose (da 5880 N/cm^2 del pioppo euroamericano a 9810 N/cm^2 del larice);
- la forte dispersione dei valori di resistenza a rottura intorno al valore medio per le alte disomogeneità del legno nell'ambito della stessa specie legnosa (si registrano scostamenti pari a $\pm 20\%$);
- il forte scadimento del valore della resistenza a rottura per la presenza di difetti del legno (nodi, deviazioni della fibra, alterazioni di funghi, insetti, etc.);
- la riduzione della resistenza a rottura per l'aumento di umidità (ad ogni 1% di umidità in più del 12%, valore di prova, si registra una riduzione del 2% del carico di rottura per flessione); a totale saturazione delle pareti cellulari (umidità pari a $\sim 30\div 32\%$ del peso del legno anidro) la resistenza può scendere verso la metà del valore ad umidità normale;
- il decremento di resistenza ancorché modesto (stimabile intorno al 10% del valore a temperatura ambiente), dovuto all'aumento di temperatura.

UNI-CNVVF 9504

Propone il calcolo analitico della resistenze al fuoco degli elementi costruttivi di legno con la seguente procedura (metodo della sezione efficace ridotta) basata sulla:

- determinazione della velocità di carbonizzazione;
 - determinazione della sezione efficace resistente;
 - verifica della capacità portante allo stato limite ultimo di collasso della sezione efficace ridotta più sollecitata.
- Definisce la combinazione di carichi in condizione di incendio:

$$F_d = G_k + Q_{1k} + 0.7 Q_{2k,j}$$

dove:

F_d è il valore dell'azione di calcolo;

G_k è il valore caratteristico delle azioni permanenti;

Q_{1k} è il valore caratteristico delle azioni variabili di lunga durata;

$Q_{2k,j}$ è il valore caratteristico di una delle seguenti azioni variabili di breve durata, con $j = 1$ vento, 2 neve, 3 altre azioni rare.

E' ammesso non tenere conto delle azioni sismiche e di quelle di natura dinamica, ragionevolmente non presenti durante l'incendio.

- Definisce per la velocità di carbonizzazione i seguenti valori:

$\beta_0 = 0.9$ mm/minuto per il legno massiccio

$\beta_0 = 0.7$ mm/minuto per il legno lamellare

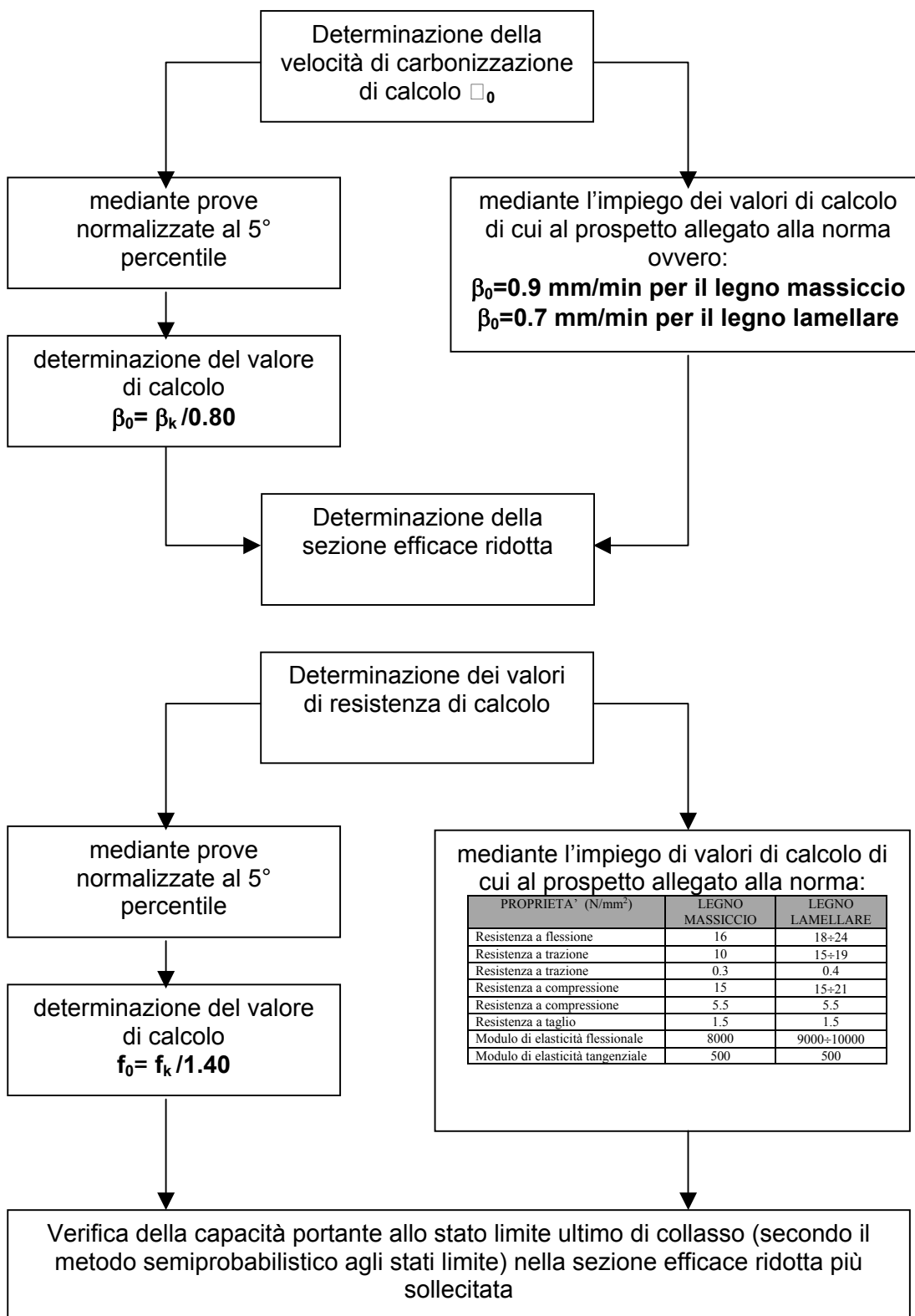
prescindendo dal tipo di specie legnosa e della direzione di avanzamento dello strato di processo.

- Definisce i valori dei carichi di rottura di calcolo prescindendo dalla specie legnosa.

PROPRIETA' (N/mm ²)	LEGNO MASSICCIO	LEGNO LAMELLARE
Resistenza a flessione	16	18÷24
Resistenza a trazione	10	15÷19
Resistenza a trazione	0.3	0.4
Resistenza a compressione	15	15÷21
Resistenza a compressione	5.5	5.5
Resistenza a taglio	1.5	1.5
Modulo di elasticità flessionale	8000	9000÷10000
Modulo di elasticità tangenziale	500	500

Tali valori sono mediamente (circa 1,5 volte) più alti dei valori ammissibili.

Metodo di calcolo UNI 9504



ENV 1995-1-1

La presente Normativa sostituisce la UNI 9504 per quanto riguarda la progettazione delle strutture lignee, pertanto attualmente è l'unica che ha vigore come Norma cogente.

Propone 3 metodi di calcolo differenti:

1) metodo semplificato della sezione trasversale efficace, secondo cui la capacità portante viene calcolata per la sezione efficace sotto l'ipotesi che le proprietà di resistenza e rigidezza non vengano ridotte dall'incendio. Invece, la perdita di resistenza e rigidezza viene compensata adottando una profondità di carbonizzazione maggiorata d_{eff} . Pertanto i passi da seguire sono:

calcolare la d_{eff} in modo da determinare la sezione efficace (vedere figura 3)

$$d_{eff} = d_{char} + k_0 \times d_0$$

con

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

$d_{char} = \beta_0 * t$ (t: tempo espresso in minuti; β_0 : velocità di carbonizzazione e vale **1,0** mm/min per il compensato e **0,9** mm/min per i pannelli a base di legno per massa volumica di 450 kg/mc e spessore di 20 mm, invece per il legname lamellare o massiccio consultare prospetto 3.1 eurocodice 95 1-2;

$k_0 \leq 1,0$ secondo il prospetto 4.1

		B0 (mm/min)
Conifere	Legno massiccio con massa volumica caratteristica > 290 kg/m3 e dimensione minima di 35 mm	0,8
	Legno lamellare incollato con massa volumica > 290 kg/m3	0,7
	Pannelli di legno con massa volumica di 450 kg/m3 e dimensione 20mm	0,9
Latifoglie, legno massiccio o lamellare	Incollato con massa volumica > 450 kg/m3 o quercia	0,5
	Incollato con massa volumica > 290 kg/m3	0,7

Prospetto 3.1 eurocodice 95 1-2:

Superfici non protette	$t_{fi,req} < 20\text{min}$	$K_0 = \frac{t_{fi,req}}{20}$
	$t_{fi,req} > 20\text{min}$	$K_0 = 1,0$
Superfici protette con pannelli di legno	$t_{fi,req} - t_{pr} < 20\text{min}$	$K_0 = \frac{t_{fi,req} - t_{pr}}{20}$
	$t_{fi,req} - t_{pr} > 20\text{min}$	$K_0 = 1,0$
Superfici protette con pannelli di gesso	$t_{fi,req} - t_{pr} < 10\text{min}$	$K_0 = \frac{t_{fi,req} - t_{pr}}{10}$
	$t_{fi,req} - t_{pr} > 20\text{min}$	$K_0 = 1,0$

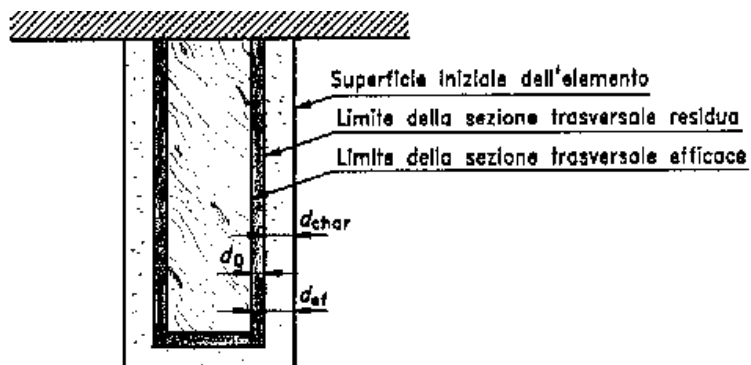
Prospetto 4.1 eurocodice 95 1-2:

con:

$t_{fi,req}$ è il tempo di resistenza al fuoco richiesto per l'esposizione all'incendio normalizzato;

t_{pr} è il tempo di rottura del rivestimento protettivo usato.

Figura 3:



2) metodo della resistenza e rigidezza ridotte, secondo cui la capacità portante a flessione, compressione e trazione viene calcolata per la sezione trasversale residua, tenendo conto della diminuzione delle proprietà di resistenza e rigidezza del legno.

La sezione trasversale residua dell'elemento è determinata riducendo la sez. trasvers. iniziale, in base alla profondità di carbonizzazione, senza tenere conto del raggio dello spigolo:

$$d_{char} = \beta_0 * t \text{ (dove i simboli hanno lo stesso significato dato in precedenza)}$$

Per il legname di conifere la resistenza di progetto $f_{d,fi}$ ed il modulo di elasticità di progetto $E_{d,fi}$ della sezione trasversale residua è ricavata in accordo alle equazioni [2.1]-[2-3] dell'ero codice 95 1-2

$$f_{t1,d} = k_{mod,fi} k_{fi} \frac{f_k}{\gamma_{M,fi}}$$

$$E_{t1,d} = k_{mod,fi} k_{fi} \frac{E_{k,05}}{\gamma_{M,fi}}$$

con:

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

$$k_{fi} = \boxed{1,15} \quad \text{per legno lamellare incollato e pannelli a base legno;}$$

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

dove $k_{mod,fi}$ deve essere ricavato come segue:

per la resistenza a flessione $k_{mod,fi} = 1,0 - 1/200 (p/A_r)$;

per la resistenza a compressione $k_{mod,fi} = 1,0 - 1/125 (p/A_r)$;

per la resistenza a trazione $k_{mod,fi} = 1,0 - 1/330 (p/A_r)$.

dove

p è il perimetro della sezione trasversale residua esposta al fuoco, in metri;

A_r è l'area della sezione trasversale residua, in metri quadrati.

3) metodi generali di calcolo, secondo cui deve essere preso in considerazione il livello di temperatura e umidità in ciascun punto della sezione **trasversale residua**, associando a tali valori le proprietà di resistenza e rigidezza del materiale variabili con la temperatura.

La normativa definisce la combinazione di carichi in condizione di incendio :

$$F_d = \gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

con:

G_k	valore caratteristico delle azioni permanenti
$Q_{k,1}$	valore caratteristico dell'azione variabile considerata come principale
$Q_{k,i}$	valori caratteristici delle altre azioni variabili
$\gamma_{GA} = 1.0$	coefficiente parziale di sicurezza per le azioni permanenti in situazioni eccezionali
$\psi_{1,1}, \psi_{2,i}$	coefficienti di combinazione delle azioni

Permette di valutare il contributo della resistenza al fuoco offerto da rivestimenti protettivi in legno e altri materiali (paragrafo 3-2 eurocodice 1995 parte 1-2);

Propone metodi di valutazione della resistenza al fuoco dei collegamenti tra elementi costruttivi realizzati con unioni metalliche o lignee.

Le regole che saranno elencate, sono valide per unioni sottoposte a carico laterale e trasmesse simmetricamente.

Inoltre l'eurocodice distingue le unioni in:

{	NON Protette	{	Con elementi laterali in legno;
			Con piastre esterne in acciaio;
{	Protette		

Unioni non protette,realizzate con elementi laterali in legno

Per soddisfare ad una R 15 basta applicare le condizioni della ENV 1995 1-1, punto 6;

Per una resistenza al fuoco maggiore di R 15 è opportuno che lo spessore e le distanze dai bordi e dall'estremità siano aumentate di a_{fi} calcolata come segue (vedere figura 4):

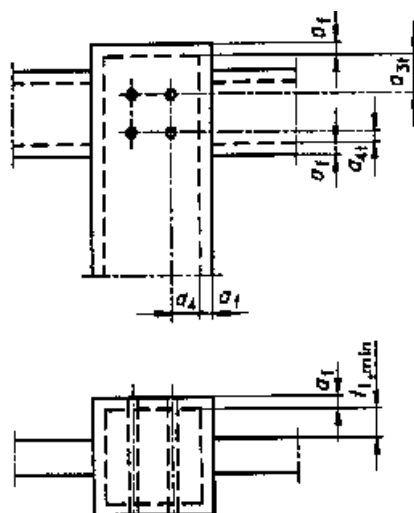
$$a_{fi} = \beta_0 (t_{fi,req} - 15)$$

dove:

β_0 è la velocità di carbonizz. Secondo il prospetto 3.1;

$t_{fi,req}$ è la resistenza al fuoco prescritta, espressa in minuti.

Figura 4:



dove i valori t_1 , a_3 , a_4 devono soddisfare dei requisiti minimi imposti dall'eurocodice ai passi (3),(4) e (5) del paragrafo 4.5.2.

Unioni non protette, realizzate con piastre di acciaio

Per le piastre esterne e non protette, che siano esposte direttamente su un solo lato, la resistenza al fuoco R 30 viene soddisfatta per uno spessore minimo della piastra pari a 6 mm se il rapporto fra carico e capacità portante nella progettazione a temperatura normale non supera il valore $\eta_{30} = 0,45$.

Unioni protette

Le unioni sono considerate protette se gli elementi meccanici per giunzioni sono ricoperti con tasselli protettivi oppure con legno oppure con pannelli a base di legno aventi spessore minimo a_{fi} come definito in precedenza (vedere figura 5).

Per l'ancoraggio di tavole protettive, la distanza dal bordo degli elementi meccanici per giunzione è opportuno che sia almeno uguale ad a_{fi} come definito in precedenza.

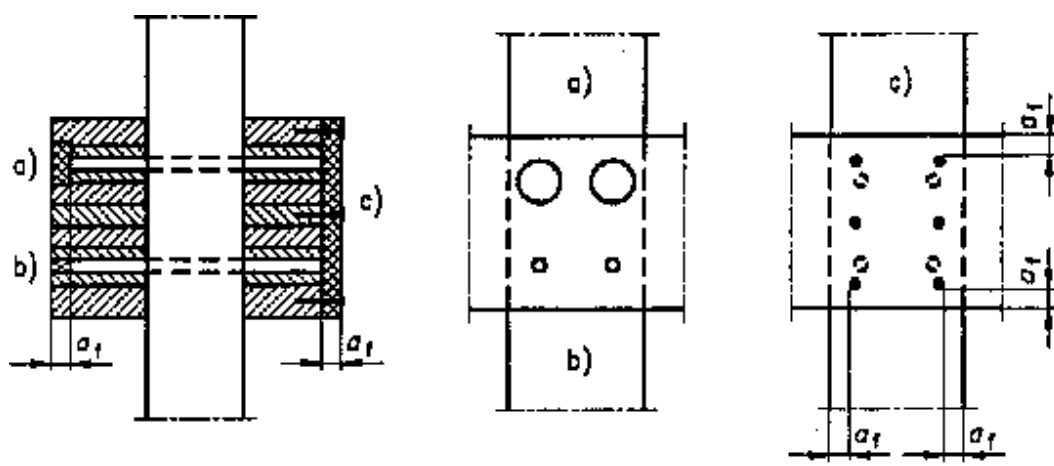
Le distanze di estremità e di bordo devono rispettare i limiti imposti in precedenza.

La profondità di penetrazione dei chiodi per l'ancoraggio di pannelli protettivi è opportuno sia almeno pari a $6d$ con almeno un chiodo ogni $0,015 \text{ m}^2$ di superficie protetta.

Le piastre di acciaio utilizzate come elementi laterali e centrali possono essere considerate protette se sono completamente rivestite con legname avente spessore minimo a_{fi} . I bordi delle piastre di acciaio è opportuno siano protetti nello stesso modo.

Le unioni protette che osservano le condizioni della ENV 1995-1-1, punto 6, sono considerate in grado di soddisfare la caratteristica R 60.

Figura 5:



Ci sono, inoltre, delle regole supplementari per le unioni in Appendice B dell'eurocodice 1995 parte 1-2 a seconda che si hanno:

- unioni con chiodi non protetti;
- unioni con bulloni non protetti;
- unioni con spinotti non protetti;
- connettori;
- unioni con piastre di acciaio.

Pertanto a seconda del tipo di unione, si applica una delle procedure esplicitate nel codice.

Bibliografia

UNI 9504

EUROCODICE UNI UNV1995-1-1

EUROCODICE UNI UNV1995-1-2

DISPENSA DEL CENTRO STUDI ESPERIENZE – Lab. Scienze delle Costruzioni – dott.
ing. Mauro Caciolai.