

speciale Informa 6

A cura del
Servizio Assistenza Tecnica
della Perlite Italiana S.r.l.

3° parte



LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI DI LEGNO



Speciale Informa 6 parte 3^a si rivolge principalmente a tecnici e professionisti che operano nell'ambito della prevenzione incendi, e si presenta come un facile testo esplicativo per descrivere la risposta al fuoco degli elementi costruttivi di legno e il corretto utilizzo dei protettivi, con particolare riferimento alle vernici intumescenti.

SOMMARIO

Introduzione - Il legno come materia prima.....	pag. 2
Comportamento al fuoco.....	pag. 2
Reazione al fuoco.....	pag. 4
Resistenza al fuoco.....	pag. 4
- Uni 9504 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno"	pag. 5
- UNI ENV 1-2 - Eurocodice 5	pag. 6
- Profondità della carbonizzazione.....	pag. 6
La sperimentazione di Perlite Italiana	pag. 8
- Analisi dei risultati sperimentali.....	pag. 11
Esempi di calcolo	pag. 14

IL LEGNO COME MATERIA PRIMA

Materiale organico di origine vegetale, il legno è dotato di una serie di caratteristiche intrinseche che ne hanno da sempre consentito una vasta gamma di utilizzi.

In particolare per la notevole disponibilità e la facilità di lavorazione, associata all'elevata resistenza meccanica (in rapporto alla massa) e all'aspetto estetico, è da sempre molto apprezzato quale materiale da costruzione (rivestimento o struttura).

Tuttavia, trattandosi per sua natura di un materiale altamente combustibile, è spesso ritenuto nelle costruzioni, un materiale pericoloso, soprattutto per le attività di interesse pubblico.

Pertanto l'utilizzo del legno quale materiale da costruzione non può prescindere dal considerare la possibilità che ha di ardere e bruciare, fino alla completa demolizione.

Tale proprietà, pur non essendo certamente una caratteristica positiva, è influenzata sia da fattori intrinseci legati alla sua natura, sia alle condizioni ambientali di utilizzo.

Il professionista, al fine di ottimizzare al meglio l'utilizzo del legno nelle costruzioni, deve conoscere:

- il comportamento al fuoco del materiale nelle varie fasi di un incendio dall'insacco alla completa evoluzione;
- la resistenza intrinseca all'azione distruttiva delle fiamme;
- i mezzi più adeguati per migliorarne le prestazioni in caso di incendio.

COMPORAMENTO AL FUOCO

Nell'ambito della prevenzione incendi intesa come tutela della vita umana e incolumità delle persone, e come conservazione e salvaguardia dei beni e dell'ambiente, due sono gli aspetti fondamentali da tenere in considerazione:

- la **reazione al fuoco** (che esprime il grado di partecipazione all'incendio);
- la **resistenza al fuoco** (attitudine di un elemento a conservare in tutto o in parte la resistenza meccanica R, la tenuta E e l'isolamento termico I).

Per quanto riguarda la reazione al fuoco sia il legno massiccio, sia il legno ricostituito sottoforma di pannelli di fibre e/o particelle, presenta un alto grado di partecipazione al fuoco. Normalmente secondo le classi previste dalla normativa italiana, il legno si colloca tra la classe 3 e la classe 5, in funzione del tipo di essenza.

Per la resistenza al fuoco invece tutto dipende dalla combustione del materiale, fenomeno chimico/fisico che non avviene istantaneamente, ma procede dalla superficie esposta al calore verso l'interno della massa, con una velocità ben definita o comunque prevedibile, la cosiddetta *velocità di carbonizzazione*.

Tale caratteristica dipende essenzialmente dalla specie legnosa considerata, oltre che dai fattori ambientali e dalla ventilazione.

Legno	Abete	Larice	Pino	Faggio	Frassino	Olmo	Noce	Pioppo
Peso specifico (kg/m ³)	560	620	530	740	750	700	700	490

Tabella 1 - Pesì specifici delle principali essenze

Nella tabella 2 alla pagina seguente sono riportate a titolo indicativo le velocità di carbonizzazione di alcune specie legnose, così come indicate nel prospetto 3.12 dell'EUROCODICE 5 "Progettazione di strutture di legno – Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio".

Tipo di essenza lignea	Velocità di carbonizzazione β_0 (mm / min)
a) Conifere	
- Legno massiccio con una massa volumica caratteristica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ ed una dimensione minima di 35 mm	0,8
- Legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
- Pannelli di legno con massa volumica caratteristica di 450 kg/m^3 ed una dimensione minima di 20 mm	0,9
b) Latifoglie, legno massiccio o legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ e quercia	0,5
c) Latifoglie, legno massiccio o legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7

Tabella 2 - Velocità di carbonizzazione di alcune specie legnose

Nel ricordare che non è propriamente il legno che brucia, ma i vapori di legno nella giusta concentrazione con l'ossigeno contenuto nell'aria, e che prima di bruciare deve perdere completamente l'acqua in esso contenuta sottoforma di umidità, nella sezione lignea in avanzato stato di combustione, si possono individuare 3 strati (figura 1):

- 1) ZONA CARBONIZZATA
- 2) ZONA ALTERATA
- 3) ZONA INALTERATA

- La **zona carbonizzata** è la parte più esterna direttamente investita dal calore che corrisponde allo stato di legno ormai completamente interessato dal processo di combustione;
- La **zona alterata** è un tratto intermedio di qualche millimetro di spessore che rappresenta il fronte di avanzamento del processo di combustione, caratterizzato da un progressivo aumento della temperatura fino ad oltre 300°C .
- Infine la **zona inalterata** è lo strato più interno della sezione non ancora interessata da fenomeni di degradazione termica, e soggetto solo ad aumento della temperatura fino a circa 100°C .



Figura 1

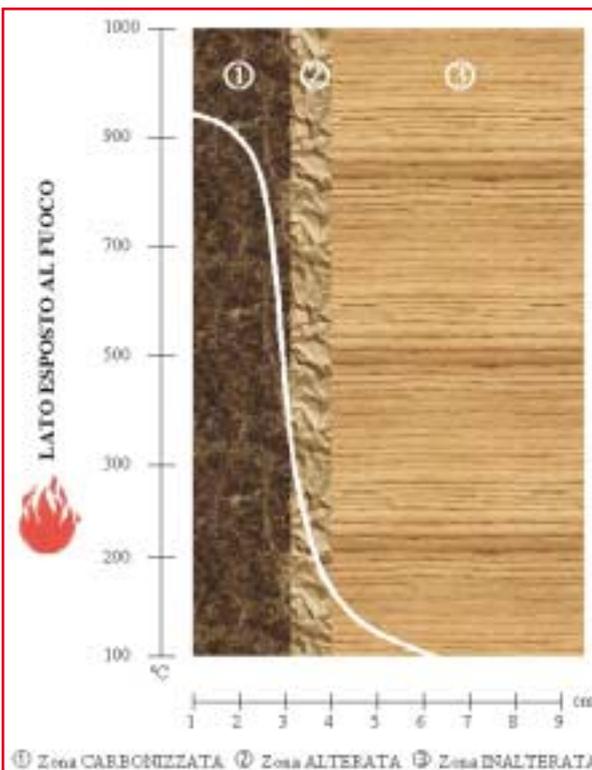


Figura 2 - Gradiente termico nella sezione lignea

Se nella zona carbonizzata le caratteristiche di resistenza meccanica del legno risultano completamente annullate, nella zona intermedia l'aumento della temperatura poco prima della vera e propria combustione, altera progressivamente tali caratteristiche senza però annullarle completamente.

Nella zona inalterata, le caratteristiche meccaniche della sezione possono considerarsi praticamente invariate, infatti la loro diminuzione causata dall'aumento di temperatura è compensata dalla riduzione dell'umidità.

L'analisi termica di una sezione lignea interessata dal fenomeno della carbonizzazione, evidenzia un gradiente termico molto elevato tra la zona carbonizzata e la zona inalterata, gradiente che risulta indipendente sia dall'aumento della temperatura della sorgente fuoco, sia dal tempo di esposizione (figura 2).

Infatti nell'ipotesi che non si verificano distacchi dello strato carbonizzato, il calore penetra e si diffonde nella massa legnosa in maniera molto lenta e con una velocità che, anche se non ancora completamente definita, diminuisce all'aumentare dello spessore carbonizzato.

REAZIONE AL FUOCO

In base al D.M. 30.11.83 il "grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto" è definito in funzione della propria natura chimica e delle effettive condizioni di messa in opera per l'utilizzazione.

Secondo il D.M. 26.06.84 "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi" i materiali sono assegnati alle classi 0, 1, 2, 3, 4 e 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione; quelli di classe "0" sono incombustibili.

Per tutti i materiali classificati ai fini della reazione al fuoco vige il regime di OMOLOGAZIONE "procedura tecnico-amministrativa con la quale viene provato il prototipo di materiale, certificata la sua classe di reazione al fuoco ed emesso da parte del Ministero dell'Interno il provvedimento di autorizzazione alla riproduzione del prototipo stesso, per l'utilizzazione nelle attività soggette alle norme di prevenzione incendi".

Per quanto riguarda i prodotti vernicianti ignifughi destinati ad essere applicati su materiali legnosi, ai sensi del D.M. 6.03.92 la loro classificazione ai fini della reazione al fuoco, deve essere fatta secondo le specifiche indicate nella norma UNI 9796/CN VVF/CCI. "Reazione al fuoco dei prodotti vernicianti ignifughi applicati su materiali legnosi. Metodi di prova e classificazione". Spetta al produttore l'obbligo di garantire la conformità del materiale venduto al prototipo omologato.

La dichiarazione di conformità deve contenere i dati relativi al *marchio di conformità* e il periodo di validità dell'efficacia del prodotto, periodo che non può essere superiore a 5 anni dal momento dell'applicazione.

Il *marchio di conformità* è l'indicazione permanente ed indelebile dei seguenti dati:

dicitura "prodotto verniciante ignifugo"; nome o altro segno distintivo; anno di produzione; classe di reazione al fuoco; estremi dell'atto di omologazione.

RESISTENZA AL FUOCO

In base al D.M. 30-11-93 perché un elemento da costruzione (componente o struttura) possa resistere all'azione del fuoco, deve conservare, secondo un programma termico prestabilito e per un tempo determinato, in tutto o in parte: la stabilità (R), la tenuta (E), l'isolamento termico (I).

- la *stabilità* è l'attitudine di un elemento strutturale a conservare la propria resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;

- la *tenuta* è l'attitudine di un elemento da costruzione a impedire il passaggio di fiamme, gas e vapori caldi sul lato non esposto al fuoco;

- l'*isolamento termico* è l'attitudine di un elemento a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.

Pertanto con il simbolo (REI) è identificato un elemento costruttivo che deve garantire tutti i requisiti della resistenza al fuoco; con il simbolo (RE) un elemento costruttivo che garantisca la resistenza meccanica e la tenuta; con il simbolo (R) un elemento costruttivo che garantisca la sola resistenza meccanica.

Il requisito di resistenza al fuoco da attribuire ad un determinato elemento da costruzione, non è stabilito in maniera univoca dalla normativa, se non per particolari attività per le quali esiste una specifica regolamentazione ministeriale.

In generale il requisito è stabilito in base al carico di incendio secondo le indicazioni della Circ. 91/61.

Per gli edifici con struttura portante in legno, il D.M. 6.03.86 impone di considerare nel calcolo del carico di incendio il contributo del legno eventualmente presente nel compartimento, secondo la relazione:

$$q = Q + 12.5 \frac{S}{A}$$

dove:

q = carico di incendio totale (kg/m²)

Q = Carico di incendio dei materiali combustibili contenuti nel locale, escluse le strutture portanti lignee (kg/m²)

S = superficie esposta al fuoco delle strutture portanti in legno (m²)

A = superficie orizzontale del locale (m²)

Il valore 12.5 che compare nella formula, consente di considerare come contributo all'incendio solo la parte superficiale del componente ligneo (crosta) dello spessore di 2,5 cm.

Le prestazioni di resistenza al fuoco possono essere valutate attraverso una metodologia sperimentale, oppure attraverso una trattazione analitica.

Per la valutazione di tipo sperimentale è necessario eseguire un test specifico normalizzato, presso un istituto autorizzato e riconosciuto dal Ministero dell'Interno.

In questo caso la classe di resistenza al fuoco ottenuta e riportata sul rapporto di prova sperimentale redatto dal laboratorio, è sempre riferita al solo campione testato, ed è altrettanto valida solo nelle condizioni del test o in situazioni più favorevoli.

La trattazione analitica è basata sui tradizionali criteri di verifica a freddo delle strutture e non può che fare riferimento al solo parametro " R " della resistenza al fuoco (capacità portante).

Nulla può essere verificato analiticamente per quanto concerne la tenuta (E) e l'isolamento termico (I). Ipotesi fondamentali per il suddetto calcolo sono:

- la carbonizzazione del legno sotto l'azione del fuoco procede perpendicolarmente alle superfici esposte dell'elemento, a velocità costante;
- il legno conserva inalterate le sue proprietà meccaniche nella parte non ancora raggiunta dalla carbonizzazione.

UNI 9504
"PROCEDIMENTO ANALITICO PER VALUTARE LA RESISTENZA AL FUOCO
DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI DI LEGNO "

Come già specificato in precedenza, limitatamente alla capacità portante (R), la norma UNI 9504 specifica una metodologia di calcolo per la valutazione analitica della resistenza al fuoco di singoli elementi di legno (massiccio o lamellare incollato), soggetti all'incendio normalizzato.

La norma può essere applicata sia nel caso di elementi non protetti sia nel caso di elementi trattati con adeguati prodotti ignifughi o rivestimenti aderenti.

Il calcolo prevede la determinazione sperimentale preventiva della velocità di penetrazione della carbonizzazione, la valutazione della sezione efficace ridotta dopo un certo periodo di esposizione al fuoco, e la verifica della capacità portante allo stato limite ultimo di collasso secondo il metodo semiprobabilistico agli stati limite nella sezione più sollecitata.

Nel caso specifico di elementi protetti la norma prevede la determinazione sperimentale dell'incidenza della protezione sulla velocità di carbonizzazione e/o sui tempi di ritardo della combustione.

Per quanto riguarda le azioni di calcolo (F_d) la norma prevede di considerare la somma dei seguenti contributi:

- azioni permanenti (G_k);
- azioni variabili di lunga durata (Q_{1k});
- una delle azioni variabili di breve durata ($Q_{2k,j}$) tra neve, vento ed altre azioni rare;

secondo la seguente combinazione:

$$F_d = G_k + Q_{1k} + 0,7 Q_{2k,j}$$

In assenza di precise indicazioni sperimentali sulle proprietà meccaniche del legno e sulla velocità della carbonizzazione, si possono assumere i valori di calcolo indicati in tabella 3, valori ripresi dalla norma UNI 9504 (punto - 8.2.2.).

Proprietà	Tipo di legno	
	Massiccio (N/mm ²)	Lamellare (N/mm ²)
Resistenza a flessione	16.0	da 18 a 24
Resistenza a trazione parallela	10.0	da 15 a 19
Resistenza a trazione perpendicolare	0.3	0.4
Resistenza a compressione parallela	15.0	da 15 a 21
Resistenza a compressione perpendicolare	5.5	5.5
Resistenza a taglio	1.5	1.5
Modulo di elasticità flessionale	8000	da 900 a 10000
Modulo di elasticità tangenziale	500	500
Velocità di penetrazione della carbonizzazione	0.9 mm / min	0.7 mm / min

Tabella 3

UNI ENV - 1 - 2
EUROCODICE 5 – Progettazione di strutture di legno
PARTE 1-2 : Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio

L'Eurocodice 5 è una norma europea sperimentale (ENV) approvata dal CEN come norma per applicazione provvisoria in tutti gli stati membri della Comunità. Il periodo di validità iniziale, prima della trasformazione in norma Europea vera e propria (EN), è di tre anni.

La norma fa parte del complesso di regolamenti europei conosciuti come "Eurocodici strutturali" e contiene gli elementi aggiuntivi necessari per far sì che le strutture lignee progettate in conformità a questo insieme di norme ed in particolare la ENV 1991-2-2 e la ENV 1995-1-1, possano soddisfare nel contempo i requisiti di resistenza al fuoco.

Nei metodi di valutazione (parag. 2.5) la norma propone ai progettisti tre differenti approcci per soddisfare le richieste di resistenza al fuoco delle strutture lignee da calcolare.

ANALISI STRUTTURALE GLOBALE

Tiene conto delle relative modalità di cedimento della struttura nel caso di esposizione all'incendio, delle proprietà e rigidezze del materiale in funzione della temperatura, e degli effetti dovuti alla dilatazione termica e alle deformazioni.

Per la prevista durata di esposizione al fuoco, si deve verificare che:

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

dove:

$E_{fi,d}$ = valore di calcolo delle azioni permanenti in caso di incendio

$R_{fi,d}$ = valore di calcolo della corrispondente resistenza in caso di incendio

E' concesso di trascurare la dilatazione del legno.

ANALISI DI PARTI DELLA STRUTTURA

In alternativa all'analisi strutturale globale può essere eseguita un'analisi di parti della struttura o di sotto-strutture. Le condizioni al contorno per questo tipo di analisi possono essere considerate indipendenti dal tempo durante tutta la durata dell'esposizione al fuoco. L'effetto delle azioni al contorno riferite alle condizioni iniziali (per es. forze e momenti interni) può essere ottenuto da un'analisi strutturale globale a temperatura ordinaria, utilizzando la seguente approssimazione:

$$E_{fi,d} = 0,6 E_d$$

E' concesso di trascurare la dilatazione del legno ma è opportuno considerare le dilatazioni termiche degli elementi di materiale diversi dal legno.

ANALISI DEGLI ELEMENTI

Consente l'analisi di singoli elementi strutturali assumendo che le condizioni iniziali al contorno, corrispondenti alle normali situazioni di servizio, siano valide per tutta la durata dell'incendio.

Per gli effetti delle azioni da assumere può essere utilizzata la stessa approssimazione della procedura descritta per l'analisi di parti della struttura. Anche in questo caso è concesso di trascurare la dilatazione del legno.

PROFONDITA' DELLA CARBONIZZAZIONE

Per l'esposizione all'incendio normalizzato la profondità di carbonizzazione deve essere calcolata secondo:

$$d_{char} = \beta_o t$$

dove:

β_o = velocità di carbonizzazione

Per legnami rientranti nelle classi di resistenza previste nei progetti di norma europea prEN 338 e prEN 1194, devono essere applicate le velocità di carbonizzazione indicate in tabella 2.

Per quanto riguarda il faggio le velocità sono le stesse del legno massiccio di conifere.

Per masse volumiche caratteristiche fra 290 e 450 kg/m³ di legno massiccio di latifoglie, possono essere ottenuti valori intermedi mediante interpolazione lineare.

Per legno massiccio di conifere, con una dimensione minima di 35 mm ed una massa volumica caratteristica minore di 290 kg/m³, la velocità di carbonizzazione deve essere moltiplicata per un coefficiente k_p determinato come:

$$k_p = \sqrt{\frac{290}{\rho_k}}$$

Per pannelli di legno diversi dal compensato (e conformi alle EN 309, EN 313-1, prEN 300 e prEN 316) ed i pannelli di legno, con massa volumica caratteristica di 450 kg/m³ e spessore di 20 mm, è opportuno che siano applicate le seguenti velocità di carbonizzazione di progetto:

$\beta_0 = 1,0$ mm/min per compensato;

$\beta_0 = 0,9$ mm/min per i pannelli a base di legno.

Per altre densità e spessori le velocità di carbonizzazione devono essere calcolate come:

$$d_{0,p,t} = \beta_{0,450,20} k_p k_t$$

dove:

$$k_p = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}}$$

$$k_p = \min \left\{ \sqrt{\frac{20}{t_p}}, 1,0 \right\}$$

ρ_k è in kg/m³ e t_p è in millimetri.

Per strati multipli strettamente sovrapposti, la velocità di carbonizzazione può essere assunta per lo spessore totale di tutti gli strati. Per strati singoli e multipli a stretto contatto con la superficie di un elemento ligneo, la velocità di carbonizzazione può essere assunta per lo spessore totale degli strati e dell'elemento ligneo.

La carbonizzazione deve essere considerata per tutte le superfici direttamente esposte all'incendio. Non è necessario considerare la carbonizzazione per superfici di elementi che sono protetti da altri elementi durante la durata di esposizione al fuoco, incluse le interfacce di elementi a stretto contatto se l'effetto di serraggio viene assicurato.

Non è necessario considerare la carbonizzazione per le superfici di elementi coperti da rivestimenti protettivi contro l'incendio in conformità a 3.2 quando:

$$t_{pr} \geq t_{fi,req}$$

dove:

t_{pr} è il tempo di cedimento di una tavola protettiva o di altro materiale protettivo, cioè la durata della protezione efficace contro la diretta esposizione all'incendio;

$t_{fi,req}$ è il tempo di resistenza al fuoco richiesto nel caso di esposizione ad incendio normalizzato.

LA SPERIMENTAZIONE DI PERLITE ITALIANA

Da quanto esposto nei paragrafi precedenti è evidente come la resistenza al fuoco di un elemento da costruzione realizzato in materiale ligneo, dipenda essenzialmente dalla velocità di carbonizzazione.

A tale proposito, sebbene il comportamento al fuoco del legno sia ben conosciuto, non si può dire lo stesso circa i benefici apportati dai rivestimenti protettivi, ed in particolare sul contributo apportato dagli stessi in termini di riduzione della velocità di penetrazione della carbonizzazione.

Ricordiamo che a parità di sezione lignea e di sollecitazione, quanto maggiore è la velocità di penetrazione della carbonizzazione, tanto minore sarà la resistenza meccanica dell'elemento in caso di incendio.

Inoltre, mentre la valutazione analitica o tabellare della resistenza al fuoco di un elemento NON PROTETTO, può ormai essere considerata indipendente da quella sperimentale, e conduce a risultati più conservativi rispetto a quelli ottenibili da test normalizzati, per la valutazione analitica della resistenza al fuoco di un elemento PROTETTO, è necessario utilizzare alcuni dati reperibili solo sperimentalmente.

L'adesione, la capacità isolante e il contributo alla riduzione della velocità di carbonizzazione di un determinato protettivo, sono caratteristiche che devono essere comprovate sperimentalmente, sottoponendo alcuni campioni di legno protetti ad uno specifico programma termico normalizzato (standard), in Europa la curva temperatura/tempo ISO 834.

Nell'ambito dei programmi di ricerca e sviluppo interni, il *Servizio di Assistenza Tecnica* della Perlite Italiana ha realizzato presso l'ISTITUTO GIORDANO di Bellaria una serie di prove sperimentali specificatamente studiate per verificare il contributo alla resistenza al fuoco delle strutture lignee del rivestimento protettivo intumescente CAFCO FIRECOAT LTR:

Rapporto di prova n° 148379/2231RF del 28-05-2001

Trave di legno caricata protetta con vernice intumescente
CAFCO FIRECOAT LTR (1000 gr/m²) - R120

Relazione di prova n° 148380 del 28-05-2001

Spezzoni di travi di legno non caricati protetti con quantitativi diversi di vernice intumescente
CAFCO FIRECOAT LTR (da 450 gr/m² a 1500 gr/m²)

I test, in accordo con le attuali normative vigenti in Italia, sono stati eseguiti secondo la curva di esposizione al fuoco prevista dalla Circ. 91/61 del Ministero dell'Interno – Direzione Generale dei Servizi Antincendi, al fine di valutare l'adesione al supporto del rivestimento durante tutta la durata di esposizione, e il contributo dello stesso alla riduzione della velocità di penetrazione della carbonizzazione.

CAFCO FIRECOAT LTR è una vernice ignifuga trasparente bicomponente di tipo intumescente a base acqua di densità media pari a circa 1,1 kg/litro. Per maggiori dettagli si rimanda direttamente alla scheda tecnica.

I campioni sottoposti a prova erano costituiti da:

- n° 1 trave di legno massiccio di abete, lunghezza 4500 mm, sezione nominale 200 x 300 mm e peso 26 kg/m circa, protetta con 1,00 kg/m² di vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR applicata in più mani successive su tutti i lati ad esclusione della superficie di estradosso;
- n° 4 spezzoni di travi di legno massiccio di abete, lunghezza 1000 mm ciascuno, protetti con quantitativi diversi di vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR applicata in più mani successive su tutti i lati ad esclusione della superficie di estradosso.

Le dimensioni degli spezzoni delle travi e le quantità di rivestimento applicato sono riportati nella tabella alla pagina seguente.

Spezzone di trave	Sezione nominale (mm)	Quantità CAFCO FIRECOAT LTR (gr/m ²)	Tempo di esposizione (min)
A	190 x 150	1500	120
B	190 x 150	800	120
C	320 x 150	450	120
D	320 x 150	1000	120

Tabella 4 - Spezzoni di travi e protettivo applicato

Per l'esecuzione della prova è stata utilizzata l'apparecchiatura dell'istituto in regola con le attuali disposizioni del Ministero, adeguatamente tarata e dotata di sistemi computerizzati di acquisizione e registrazione dati.

All'interno del campione caricato sono state predisposte n° 3 termocoppie disposte rispettivamente a circa 15 mm, 40 mm e 60 mm dal bordo inferiore teso della trave (figura 3), mentre negli spezzoni non caricati sono state applicate n° 34 termocoppie disposte a diverse distanze dal bordo inferiore della superficie laterale (figure 4 e 5).

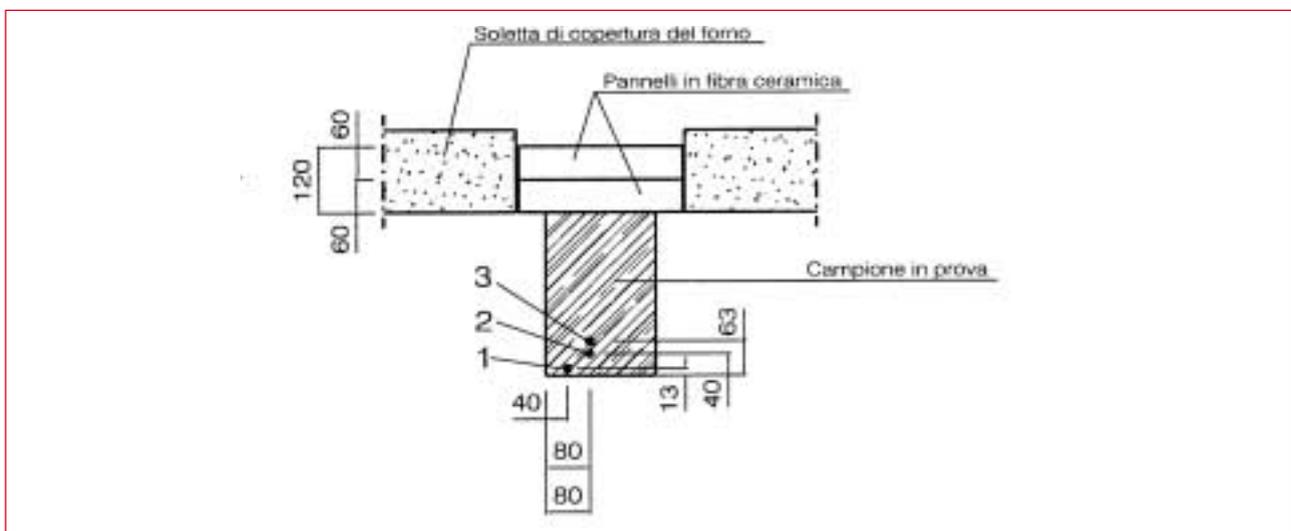


Figura 3 - Trave caricata, disposizione termocoppie

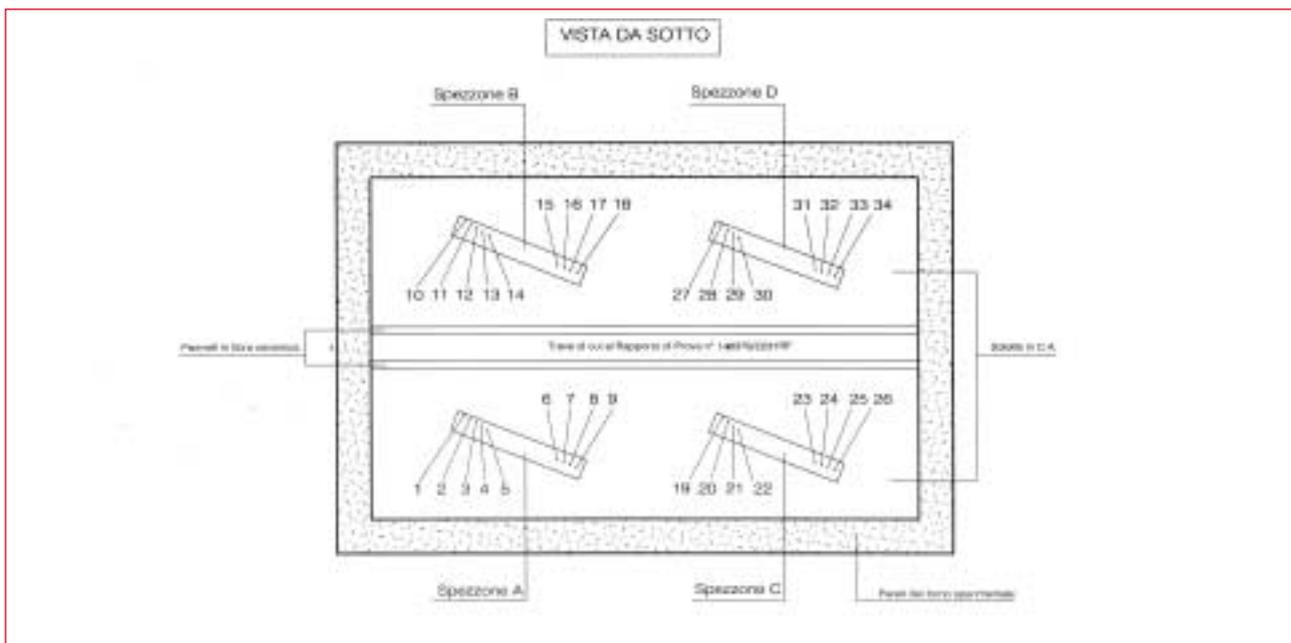
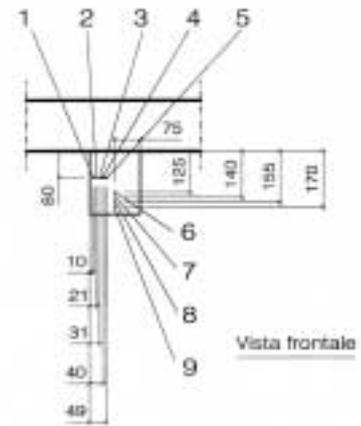
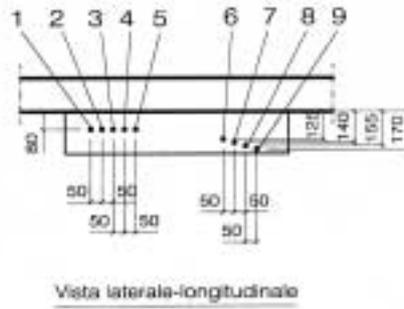


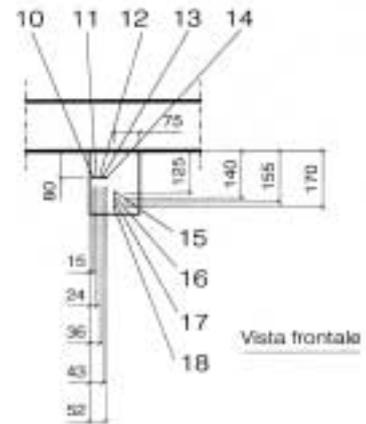
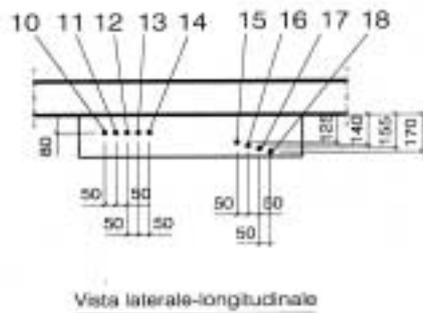
Figura 5 - Disposizione degli spezzoni non caricati nel forno di prova, termocoppie

Ciascuno spezzone era montato con l'estradosso in aderenza a solette in calcestruzzo, spessore 150 mm, a loro volta appoggiate sui rulli e sulla bocca del forno sperimentale.

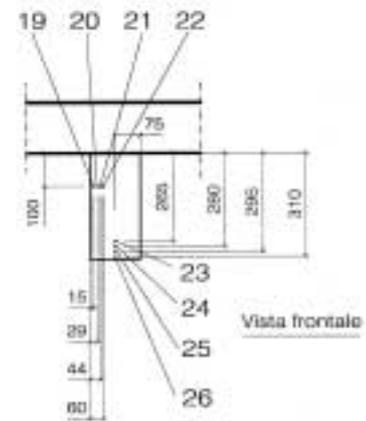
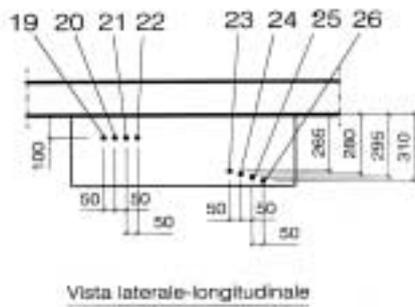
Spezzone A



Spezzone B



Spezzone C



Spezzone D

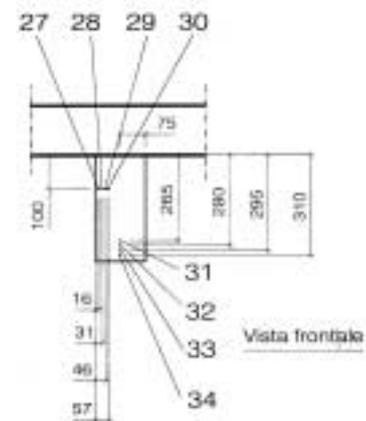
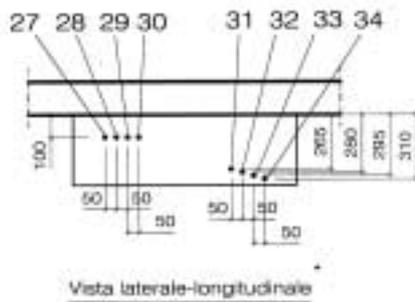


Figura 4 – Disposizione delle termocoppie negli spezzoni non caricati

ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

La sperimentazione eseguita ha consentito da un lato di ottenere una certificazione sperimentale su trave caricata fino a 120 minuti di esposizione, dall'altro di comprovare l'idoneità del rivestimento ad essere utilizzato quale protettivo su strutture di legno sia in termini di aderenza al supporto, sia in termini di riduzione della velocità di carbonizzazione.

Tutti i campioni testati, pur essendo trattati con quantitativi differenti di prodotto, hanno evidenziato la formazione di una schiuma isolante omogenea, sufficientemente compatta e tale da garantire l'aderenza al supporto per tutta la durata della prova.

Inoltre, assumendo il valore di 300 – 350°C quale limite critico di temperatura oltre il quale lo strato di legno può considerarsi completamente carbonizzato, indipendentemente dal quantitativo di prodotto applicato sui provini, il ritardo nell'innesco della carbonizzazione sul primo strato di legno risulta mediamente di circa 35 minuti e, più precisamente, variabile dai 28 ai 44 minuti.

L'analisi della notevole quantità di dati forniti dalle termocoppie inserite nei campioni ha consentito di verificare che:

- Il beneficio apportato dal rivestimento protettivo applicato sui singoli provini in termini generali di prestazione al fuoco, risulta più evidente per esposizioni di media durata (45 ÷ 60 minuti), mentre per periodi brevi (30 minuti) o molto lunghi (90 ÷ 120 minuti) l'effetto del protettivo è meno significativo. Il fenomeno è tanto più evidente quanto più piccole sono le dimensioni dell'elemento.
- Vista l'omogeneità dei risultati ottenuti, a parità di sezione lignea considerata, il contributo alla resistenza al fuoco di un generico elemento protetto risulta spesso non direttamente proporzionale al quantitativo di rivestimento applicato.
- Confrontando le temperature registrate dalle termocoppie disposte lungo i lati dei provini con quelle predisposte in corrispondenza del bordo inferiore, non si evidenziano particolari differenze tra le velocità di carbonizzazione.
Ciò conferma le ipotesi da più parti riportate nella letteratura tecnica specializzata, secondo le quali la velocità di penetrazione della carbonizzazione non dipende dalla posizione assunta dall'elemento in caso di incendio, ed è lecito assumere per le verifiche un unico valore di calcolo.

L'elaborazione del complesso dei dati sperimentali ottenuti ha consentito la costruzione di abachi che mettono in relazione la quantità di vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR applicato, con la velocità di carbonizzazione calcolata in funzione del tempo di esposizione.

A titolo esemplificativo nel grafico di figura 6 (alla pagina seguente) è riportata la variazione della velocità di carbonizzazione nel tempo, corrispondente al contributo isolante garantito dall'applicazione della vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR nel quantitativo medio variabile da 450 gr/m² a 1000 gr/m².

Vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR

Velocità di carbonizzazione - Tempo di esposizione



Figura 6

L'affidabilità del grafico è altresì comprovata dal risultato sperimentale ottenuto su trave caricata (sezione 20 x 30), protetta proprio con il quantitativo di 1000 gr/m² di vernice (R 120).

Infatti rispetto alla resistenza intrinseca della trave corrispondente a circa 75 minuti (con $\sigma_{max} = 40 \text{ kg/cm}^2$ e $\beta_0 = 0.8 \text{ mm/min}$), la velocità di carbonizzazione calcolata in base alla resistenza al fuoco ottenuta (120 minuti), risulta di circa 0.51 mm/min.

L'abaco in tabella 5 per gruppi di classi di resistenza al fuoco, è un utile strumento per la valutazione della resistenza al fuoco di elementi strutturali di legno da proteggere con CAFCO FIRECOAT LTR .

Nella tabella sono riportate, per i diversi consumi di vernice, le velocità di carbonizzazione da utilizzare nei calcoli analitici di resistenza al fuoco fino a 120 minuti di esposizione, corrispondenti al contributo garantito dall'applicazione della vernice intumescente CAFCO FIRECOAT LTR nei quantitativi variabili da 450 gr/m² a 1000 gr/m².

CLASSI DI RESISTENZA (R)	Velocità di carbonizzazione (mm/min.)	
	450 ÷ 650 gr/m ²	700 ÷ 1000 gr/m ²
fino a 30 minuti	0,35	—
tra 30 e 60 minuti	0,40	—
tra 60 e 90 minuti	—	0,46
tra 90 e 120 minuti	—	0,52

Tabella 5

Bassi consumi di vernice sono previsti per le basse resistenze (esposizioni al fuoco di breve e media durata 30 – 60 minuti), mentre per le alte resistenze (fino a 120 minuti) sono previsti i consumi maggiori fino a 1000 gr/m². L'utilizzo di quantitativi superiori a 1000 gr/m² potrebbero risultare inutili oltre che di difficile e costosa applicazione.

**ABACO PER UNA VALUTAZIONE INDICATIVA
DELLA CLASSE DI RESISTENZA AL FUOCO
STRUTTURE LIGNEE PROTETTE CON VERNICE INTUMESCENTE
CAFECO FIRECOAT LTR
ELEMENTI SEMPLICEMENTE INFLESSI CARICATI UNIFORMEMENTE**

Sezioni quadrate inflesse esposte su tre lati (cm x cm)							
Sollecitazione (kg/cm ²)	10 x 10	15 x 15	20 x 20	25 x 25	30 x 30	35 x 35	40 x 40
20	60	90	> 120	> 120	> 120	> 120	> 120
30	60	90	90	> 120	> 120	> 120	> 120
40	60	60	90	> 120	> 120	> 120	> 120
50	45	60	90	90	> 120	> 120	> 120
60	45	60	90	90	90	> 120	> 120
70	45	45	60	90	90	90	> 120
80	30	45	60	60	60	90	90
90	30	45	45	60	60	60	90
Sezioni rettangolari inflesse esposte su tre lati (cm x cm)							
Sollecitazione (kg/cm ²)	5 x 7	7 x 10	10 x 15	18 x 26	20 x 30	28 x 40	35 x 50
20	45	60	60	> 120	> 120	> 120	> 120
30	45	60	60	90	> 120	> 120	> 120
40	30	45	60	90	90	> 120	> 120
50	30	45	60	90	90	> 120	> 120
60	30	30	45	60	90	> 120	> 120
70	30	30	45	60	90	90	> 120
80	15	30	45	60	60	90	90
90	15	30	30	45	60	60	90

Resistenza al fuoco	Consumi indicativi
R 30 – R 45 – R 60	450 ÷ 650 gr/m ²
R 90 – R 120	700 ÷ 1000 gr/m ²

Per ogni sezione lignea indicata ed in funzione della sollecitazione prevista, l'abaco fornisce la massima classe di resistenza al fuoco ottenibile con applicazione della vernice intumescente CAFECO FIRECOAT LTR nella quantità indicativa variabile da 450 gr/m² a 650 gr/m² per le classi fino a 60 minuti, e da 700 gr/m² a 1000 gr/m² per le classi fino a 120 minuti.

ESEMPI DI CALCOLO

A) TRAVE ESPOSTA SU TRE LATI

Trave inflessa semplicemente appoggiata alle estremità di sezione rettangolare lignea di abete bianco (dimensioni 150 x 250 mm, peso specifico 560 kg/m³), caricata uniformemente su tutta la luce.

Carico totale al metro lineare $q = 350 \text{ kg}$

Luce netta $l = 5,00 \text{ m}$

Esposizione al fuoco su n° 3 lati.

Classe di resistenza al fuoco richiesta R 60

Sezione rettangolare 150 x 250 mm

Modulo di resistenza $W = 1563 \text{ cm}^3$

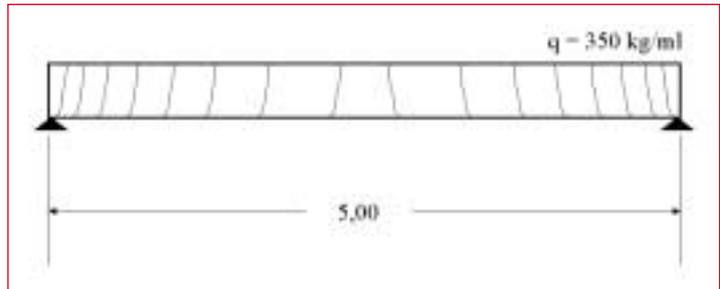


Figura 7 - Schema statico

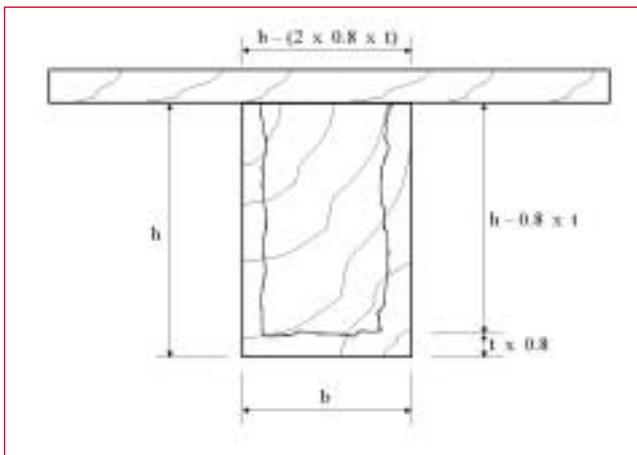


Figura 8 - Esposizione al fuoco - riduzione della sezione

b = base
 h = altezza
 t = tempo di esposizione
 0,8 = velocità di carbonizzazione
 legno di abete non protetto

Resistenza massima a flessione in caso di incendio UNI 9504 $\sigma_f = 160 \text{ kg/cm}^2$

Momento sollecitante massimo $M_{\max} = 1/8 * q * l^2 = 109.375 \text{ kg} * \text{cm}$

Tensione massima $\sigma = 70 \text{ kg/cm}^2$

	Trave non protetta	Trave protetta Cafco Firecoat LTR 450 - 650 gr/m ²
Velocità di carbonizzazione (mm/min)	0,8	0,4
Tempo di resistenza (minuti)	40	79
Sezione residua (mm)	86 x 218	86 x 218
Classe di resistenza (R)	30	60
Incremento di resistenza (min)	39	
Sezione lignea minima necessaria (mm)	180 x 280	
Spessore equivalente di legno (cm)	3,00	

Risultati delle analisi

B) CAPRIATA

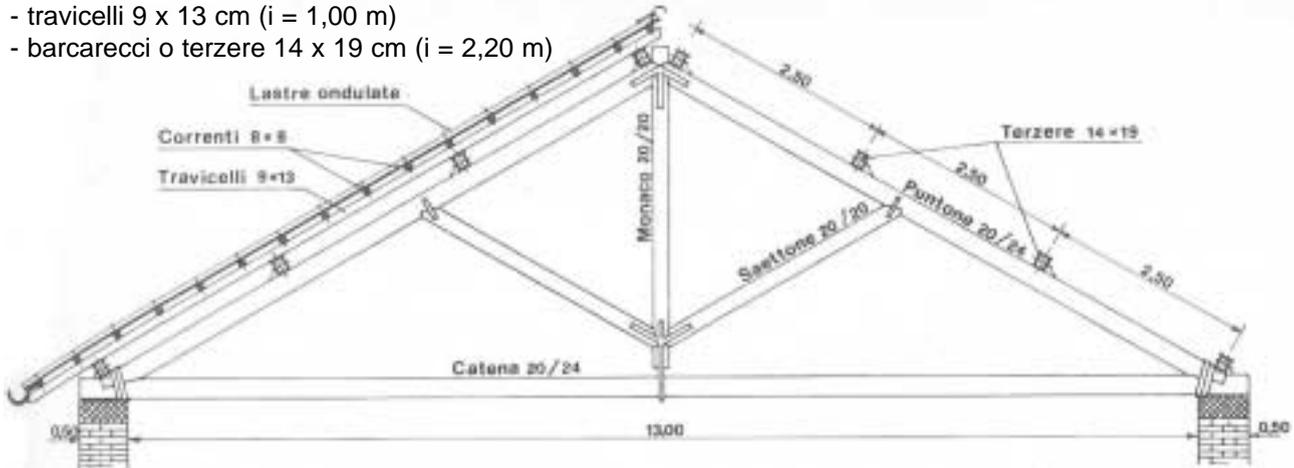
Capriata in legno massiccio di abete bianco (peso specifico 560 kg/m³) costituita da:

- Catene e puntoni di sezione rettangolare 20 x 24 cm;
- Monaco e saette di sezione quadrata 20 x 20 cm;

posta a sostegno di piccola orditura alla lombarda di copertura in lastre ondulate leggere (carico totale Q = 150 kg/m² circa – compreso il sovraccarico dovuto alla neve).

La piccola orditura è costituita da:

- correnti 8 x 8 cm (i = 0,50 m)
- travicelli 9 x 13 cm (i = 1,00 m)
- barcarecci o terzere 14 x 19 cm (i = 2,20 m)



Luca di calcolo capriata $l_c = 13,50$ m circa

Caratteristiche delle sezioni lignee					
		Catena	Puntone	Saette	Monaco
Base	b (cm)	20	20	20	20
Altezza	h (cm)	24	24	20	20
Modulo di resistenza	W (cm ³)	1.920	1.920	1.333	1.333
Peso specifico	ρ (kg/m ³)	600	600	600	600
s_{max} flessione	(kg/cm ²)	35	45		
s_{max} compressione	(kg/cm ²)		30	6,5	
s_{max} trazione	(kg/cm ²)	10			5,5
Momento sollecitante massimo	M_{max} (kg cm)=	67.200	86.400		
Sforzo normale di trazione max	N_{max} (kg)=	4.800			2.200
Sforzo normale di compressione max	P_{max} (kg)=		14.400	2.600	

Trave non protetta				
	Catena	Puntone	Saette	Monaco
Velocità di carbonizzazione (mm/min)	0,8	0,8	0,8	0,8
Tempo di resistenza (minuti)	51	35	98	96
Sezione residua (mm)	119 x 159	144 x 184	42 x 42	47 x 47
Classe di resistenza (R)	45	30	90	90

CLASSE DI RESISTENZA COMPLESSIVA DELLA CAPRIATA - R 30

Trave protetta con CAFCO FIRECOAT LTR 450 - 650 gr/m ²				
	Catena	Puntone	Saette	Monaco
Velocità di carbonizzazione (mm/min)	0,4	0,4	0,4	0,4
Tempo di resistenza (minuti)	101	70	> 120	> 120
Sezione residua (mm)	119 x 159	144 x 184	104 x 104	104 x 104
Classe di resistenza (R)	90	60	> 120	> 120

CLASSE DI RESISTENZA COMPLESSIVA DELLA CAPRIATA PROTETTA - R 60

Richiedete **Speciale Informa 6** dedicato alla valutazione della resistenza al fuoco di:

- elementi strutturali in acciaio (parte 1)
- elementi strutturali in conglomerato cementizio armato normale e precompresso (parte 2)
- elementi costruttivi di legno (parte 3)



Richiedete l'informazione completa delle soluzioni Caefco per la protezione passiva contro il fuoco e precisamente:

- Caefco intonaci e rivestimenti**
- Caefco Fire Barriers**
- Caefco prodotti vernicianti ignifughi**



Giugno 2002



Corsico (MI) 20094 - Alzaia Trento, 7 - tel. (02) 440.70.41 - fax (02) 440.18.61 - www.perlite.it - e-mail: assistenza.technica@perlite.it