



BRUNO ZAN

# LE STRUTTURE IN LEGNO CON EXCEL

CALCOLO DI TRAVI, PILASTRI, SOLAI E CAPRIATE  
VERIFICHE DI RESISTENZA, DEFORMAZIONE, INSTABILITÀ E AL FUOCO



**PRONTO  
GRAFILL**

Clicca e richiedi di essere contattato  
per informazioni e promozioni

**SOFTWARE INCLUSO**  
CON SISTEMA G-CLOUD



**GRAFILL**

Bruno Zan

## LE STRUTTURE IN LEGNO CON EXCEL

Ed. I (06-2025)

ISBN 13 978-88-277-0499-8

EAN 9 788827 704998

Collana **SOFTWARE**



**Licenza d'uso da leggere attentamente  
prima di attivare la WebApp o il Software incluso**

Usa un QR Code Reader  
oppure collegati al link <https://grafill.it/licenza>

**Per assistenza tecnica sui prodotti Grafill** aprire un ticket su <https://www.supporto.grafill.it>

L'assistenza è gratuita per 365 giorni dall'acquisto ed è limitata all'installazione e all'avvio del prodotto, a condizione che la configurazione hardware dell'utente rispetti i requisiti richiesti.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 - 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 - Fax 091/6823313 - Internet <http://www.grafill.it> - E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

**CONTATTI  
IMMEDIATI**



**Pronto GRAFILL**  
Tel. 091 6823069



**Chiamami**  
[chiamami.grafill.it](http://chiamami.grafill.it)



**Whatsapp**  
[grafill.it/whatsapp](http://grafill.it/whatsapp)



**Messenger**  
[grafill.it/messenger](http://grafill.it/messenger)



**Telegram**  
[grafill.it/telegram](http://grafill.it/telegram)

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. - Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.



**PRONTO  
GRAFILL**



**CLICCA per maggiori informazioni  
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

# SOMMARIO

|                                                                     |    |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|----|
| <b>PREMESSA</b> .....                                               | p. | 7  |
| <b>1. IL LEGNO</b> .....                                            | "  | 9  |
| 1.1. Introduzione .....                                             | "  | 9  |
| 1.2. Il legno strutturale .....                                     | "  | 10 |
| 1.3. Il legno massiccio .....                                       | "  | 10 |
| 1.4. Il legno lamellare .....                                       | "  | 13 |
| 1.5. I fogli di calcolo A1 e A2 .....                               | "  | 16 |
| <b>2. LE STRUTTURE DI LEGNO</b> .....                               | "  | 18 |
| 2.1. La sicurezza .....                                             | "  | 18 |
| 2.2. Il modello agli Stati Limite .....                             | "  | 18 |
| 2.3. Le azioni di carico .....                                      | "  | 19 |
| 2.3.1. I sovraccarichi di utilizzo .....                            | "  | 21 |
| 2.3.2. L'azione della neve .....                                    | "  | 22 |
| 2.3.3. L'azione del vento .....                                     | "  | 24 |
| 2.3.4. L'azione sismica .....                                       | "  | 26 |
| 2.4. La modellazione delle strutture .....                          | "  | 27 |
| 2.5. Solutore per travi continue (foglio di calcolo F1) .....       | "  | 29 |
| 2.6. Solutore per capriate triangolari (foglio di calcolo F2) ..... | "  | 32 |
| 2.7. L'analisi dei carichi .....                                    | "  | 35 |
| 2.8. Le combinazioni dei carichi .....                              | "  | 37 |
| 2.9. La durata del carico variabile .....                           | "  | 39 |
| 2.10. L'ambiente di servizio .....                                  | "  | 40 |
| 2.11. Le proprietà meccaniche del legno .....                       | "  | 42 |
| 2.12. Le deformazioni .....                                         | "  | 43 |
| 2.13. I fogli di calcolo A3 e A4 .....                              | "  | 44 |
| <b>3. LA VERIFICA DELLE STRUTTURE DI LEGNO</b> .....                | "  | 46 |
| 3.1. Le verifiche agli Stati Limite .....                           | "  | 46 |
| 3.2. Le verifiche di resistenza .....                               | "  | 47 |
| 3.3. Le verifiche all'instabilità .....                             | "  | 49 |

|      |                                                                                                         |    |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|
| 3.4. | Le verifiche al fuoco .....                                                                             | p. | 50  |
| 3.5. | La verifica degli spostamenti .....                                                                     | "  | 52  |
| 3.6. | La verifica alle vibrazioni .....                                                                       | "  | 55  |
| 3.7. | Il foglio Indice dell'applicazione STRUTTURE IN LEGNO.....                                              | "  | 56  |
| 4.   | <b>LE VERIFICHE DELLE SEZIONI</b> .....                                                                 | "  | 58  |
| 4.1. | Verifica di resistenza per compressione inclinata<br>(foglio di calcolo B1) .....                       | "  | 58  |
| 4.2. | Verifiche di resistenza per trazione,<br>compressione e flessione composta (foglio di calcolo B2) ..... | "  | 63  |
| 4.3. | Verifiche di resistenza per taglio e torsione<br>(foglio di calcolo B3) .....                           | "  | 74  |
| 4.4. | Verifiche di resistenza agli appoggi<br>per intaglio e schiacciamento (foglio di calcolo B4) .....      | "  | 79  |
| 5.   | <b>LE VERIFICHE DELLE TRAVI</b> .....                                                                   | "  | 86  |
| 5.1. | Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo<br>(foglio di calcolo C1) .....                        | "  | 86  |
| 5.2. | Verifiche degli spostamenti allo Stato Limite di Esercizio<br>(foglio di calcolo C2) .....              | "  | 94  |
| 6.   | <b>L'INSTABILITÀ DI TRAVI E PILASTRI</b> .....                                                          | "  | 102 |
| 6.1. | Instabilità di colonna .....                                                                            | "  | 102 |
| 6.2. | Instabilità di trave .....                                                                              | "  | 105 |
| 6.3. | Instabilità per pressoflessione .....                                                                   | "  | 109 |
| 6.4. | Verifica allo sbandamento per carico di punta<br>(foglio di calcolo D1) .....                           | "  | 110 |
| 6.5. | Verifica allo sbandamento flesso-torsionale della trave<br>(foglio di calcolo D2) .....                 | "  | 113 |
| 7.   | <b>L'ESPOSIZIONE AL FUOCO</b> .....                                                                     | "  | 118 |
| 7.1. | Verifiche di resistenza al fuoco e la sezione efficace<br>(foglio di calcolo E1) .....                  | "  | 118 |
| 7.2. | Verifiche di resistenza al fuoco per le travi<br>(foglio di calcolo E2) .....                           | "  | 123 |
| 7.3. | Verifica di stabilità al fuoco per aste pressoinflesse<br>(foglio di calcolo E3) .....                  | "  | 127 |
| 8.   | <b>ESEMPI DI CALCOLO</b> .....                                                                          | "  | 131 |
| 8.1. | Tetto a due falde .....                                                                                 | "  | 131 |
| 8.2. | Travetti di falda .....                                                                                 | "  | 134 |
| 8.3. | Puntoni di falda .....                                                                                  | "  | 136 |

|       |                                                                   |    |     |
|-------|-------------------------------------------------------------------|----|-----|
| 8.4.  | Trave di colmo.....                                               | p. | 138 |
| 8.5.  | Capriata.....                                                     | "  | 141 |
| 8.6.  | Verifica al fuoco .....                                           | "  | 147 |
| 8.7.  | Solaio a travi parallele .....                                    | "  | 155 |
| 9.    | <b>L'APPLICAZIONE "STRUTTURE IN LEGNO"</b> .....                  | "  | 167 |
| 9.1.  | Il foglio INDICE .....                                            | "  | 168 |
| 9.2.  | I fogli del gruppo A (Parametri di calcolo) .....                 | "  | 168 |
| 9.3.  | I fogli del gruppo B (Verifiche delle sezioni rettangolari) ..... | "  | 168 |
| 9.4.  | I fogli del gruppo C (Verifiche delle travi) .....                | "  | 169 |
| 9.5.  | I fogli del gruppo D (Instabilità di travi e pilastri) .....      | "  | 169 |
| 9.6.  | I fogli del gruppo E (Esposizione al fuoco) .....                 | "  | 169 |
| 9.7.  | I fogli del gruppo F (Travi continue e capriate) .....            | "  | 170 |
| 9.8.  | Lo Speciale Progettazione Strutturale .....                       | "  | 170 |
| 9.9.  | Requisiti hardware e software .....                               | "  | 170 |
| 9.10. | Installazione e attivazione .....                                 | "  | 171 |

## PREMESSA

Il legno è uno dei materiali da costruzione più antichi e affascinanti impiegato dall'uomo sin dai primordi per la realizzazione di abitazioni, ponti, macchine e strutture di vario genere. Oggi, grazie allo sviluppo delle tecnologie di lavorazione e alle sempre più avanzate conoscenze nel campo dell'ingegneria strutturale il legno si conferma una risorsa indispensabile nel settore delle costruzioni coniugando sostenibilità, resistenza e versatilità.

Questa pubblicazione nasce con l'intento di offrire un'analisi approfondita dell'impiego del legno nelle strutture, esplorando sia gli aspetti teorici che pratici replicabili con l'ausilio dell'applicazione **STRUTTURE IN LEGNO**, parte integrante della pubblicazione. L'applicazione inclusa **STRUTTURE IN LEGNO**, attraverso una pacchetto di fogli Excel, consente il calcolo e le verifiche di **pilastri, travi, solai e capriate** in diverse configurazioni di vincolo e carico, ai sensi delle NTC 2018.

Verranno trattate le proprietà meccaniche e reologiche del legno, influenzate dalle condizioni ambientali e dalla specie legnosa, le modalità di verifica delle sezioni e degli elementi strutturali, le normative vigenti e le metodologie di calcolo.

L'attenzione alle sfide attuali, come la durabilità, la resistenza al fuoco e la sostenibilità ambientale, arricchisce ulteriormente il contenuto, evidenziando come questo materiale possa rispondere efficacemente alle esigenze dell'architettura contemporanea.

In un'epoca in cui la ricerca di soluzioni costruttive ecocompatibili è sempre più centrale, il legno rappresenta una scelta strategica per un'edilizia innovativa e responsabile.

Questo testo vuole essere un contributo alla diffusione della cultura del legno strutturale, valorizzandone le straordinarie qualità e promuovendone il suo impiego consapevole e sicuro.

# IL LEGNO

## 1.1. Introduzione

La progettazione e la verifica delle strutture in legno sono disciplinate dalle normative tecniche di riferimento, le quali, analogamente a quanto avviene per altri materiali strutturali come acciaio, calcestruzzo armato e muratura, stabiliscono procedure, coefficienti correttivi e criteri di sicurezza. Le norme forniscono inoltre i coefficienti di sicurezza parziali necessari per l'applicazione del modello elastico nel calcolo strutturale e, in alcuni casi, per l'impiego di modelli elasto-plastici.

L'obiettivo della normativa è definire il **modello di calcolo** più idoneo per garantire la corretta verifica alla resistenza e alle deformazioni della struttura:

- per l'**acciaio**, il compito di definire un modello di calcolo è relativamente semplice, poiché questo materiale risponde in modo efficace alle ipotesi di comportamento del modello elastico;
- per il **calcestruzzo armato**, la questione si complica a causa della coesistenza di due materiali con caratteristiche deformative differenti, che devono collaborare per garantire le prestazioni strutturali;
- nel caso della **muratura**, l'adattamento alle norme diventa ancora più complesso, trattandosi di un materiale non omogeneo, spesso realizzato con una certa variabilità nelle modalità di confezionamento;
- per le **strutture in legno** il compito appare ancora più arduo poiché le proprietà e le caratteristiche di questo materiale sono estremamente variabili. Esse dipendono da numerosi fattori, tra cui la specie legnosa, le condizioni ambientali durante la crescita dell'albero, i processi di lavorazione e stagionatura, nonché le condizioni di impiego, che includono la durata e l'intensità dei carichi applicati nel tempo.

Il primo obiettivo della normativa relativa al legno è individuare, regolamentare e definire il materiale idoneo all'impiego nelle costruzioni, classificandolo come **legno strutturale**.

Le prove di laboratorio permettono di determinare il comportamento del c.d. "*legno netto*", ovvero campioni di piccole dimensioni privi degli elementi fisiologici tipici della pianta, come nodi, deviazioni della fibratura e fessurazioni. Tuttavia, questi elementi, sempre presenti nei componenti costruttivi di dimensioni reali, vengono considerati veri e propri *difetti* dal punto di vista strutturale, poiché influenzano significativamente le proprietà meccaniche del materiale e ne determinano la classificazione in base alla resistenza.

## LE STRUTTURE DI LEGNO

### 2.1. La sicurezza

La sicurezza nelle costruzioni in legno richiede un approccio integrato che consideri sia le proprietà del materiale che la corretta definizione del sistema strutturale. È fondamentale determinare con precisione le caratteristiche di resistenza e deformazione del legno, tenendo conto delle variazioni legate alla specie legnosa, all'umidità e ai trattamenti applicati. Allo stesso tempo, è necessario definire con attenzione lo schema statico della struttura per interpretarne al meglio il comportamento reale, assicurando una distribuzione equilibrata dei carichi attraverso gli elementi portanti.

L'analisi dei carichi deve comprendere sia le azioni permanenti che quelle variabili, come vento, neve e sisma, senza trascurare gli effetti a lungo termine.

Infine, il modello di verifica deve essere accurato e comprendere controlli sulla stabilità globale, sulla resistenza dei giunti e sul comportamento della struttura nel tempo, con particolare attenzione alla sicurezza antincendio e alla durabilità. Solo attraverso una progettazione attenta e conforme alle normative specifiche è possibile garantire costruzioni in legno sicure, efficienti e sostenibili.

Le NTC 2018 definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e la verifica delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità.

Esse forniscono quindi i criteri generali di sicurezza, precisano le azioni che devono essere utilizzate nel progetto, definiscono le caratteristiche dei materiali e, più in generale, trattano gli aspetti attinenti alla sicurezza strutturale delle opere.

### 2.2. Il modello agli Stati Limite

La valutazione della sicurezza e delle prestazioni di una struttura è condotta secondo il metodo degli Stati Limite, utilizzando i principi fondamentali e i coefficienti di sicurezza riportati nel Capitolo 2 "*Sicurezza e prestazioni attese*" delle NTC 2018.

I requisiti di resistenza, funzionalità e robustezza di una struttura si garantiscono attraverso la verifica degli Stati Limite Ultimi (SLU), che assicurano la capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, anche parziali, e degli Stati Limite di Esercizio (SLE), che garantiscono il mantenimento delle condizioni previste durante l'uso. Le strutture in legno, a causa del loro particolare comportamento reologico, devono essere verificate per



## LA VERIFICA DELLE STRUTTURE DI LEGNO

### 3.1. Le verifiche agli Stati Limite

Le verifiche allo stato limite per le strutture in legno si suddividono in Stati Limite Ultimi (SLU) e Stati Limite di Esercizio (SLE) in conformità con le NTC 2018.

#### Verifiche agli stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) garantiscono che la struttura mantenga la sua sicurezza, evitando il rischio di collasso dovuto alla rottura del legno o all'instabilità degli elementi sotto le azioni di progetto.

Queste verifiche includono:

#### – Verifiche di resistenza

- La verifica a flessione garantisce che la tensione massima di flessione nel legno non superi la resistenza a flessione prevista per il materiale nelle specifiche condizioni d'uso.
- La verifica a taglio garantisce che la tensione massima al taglio lungo la fibratura del legno non superi la resistenza al taglio prevista per il materiale nelle specifiche condizioni d'uso.
- La verifica a compressione riguarda in particolare gli elementi con compressioni che avvengono con angoli diversi dalla direzione della fibratura del legno.
- La verifica a trazione è necessaria per elementi tesi lungo la fibratura come tiranti o elementi di strutture reticolari.

#### – Verifiche di stabilità

- La verifica di stabilità a flessione riguardano le travi snelle soggette a instabilità flesso-torsionale.
- La verifica di stabilità a compressione riguarda i pilastri o le aste compresse soggette all'instabilità per carico di punta.

#### – Verifiche al fuoco

- Le verifiche delle strutture al fuoco riguardano la valutazione della resistenza e della stabilità delle strutture lignee residue dopo un determinato periodo di esposizione al fuoco.

## LE VERIFICHE DELLE SEZIONI

### 4.1. Verifica di resistenza per compressione inclinata (foglio di calcolo B1)

La verifica contenuta nel **foglio B1** si occupa della resistenza del legno soggetto a uno sforzo di compressione inclinato rispetto alla direzione della fibratura. In particolare, viene analizzato il comportamento del materiale quando la forza di compressione è applicata con un angolo  $\alpha$  rispetto alla direzione delle fibre, tenendo conto dell'anisotropia del legno e delle sue diverse resistenze meccaniche nelle direzioni parallela e perpendicolare alla fibratura (Figura 4.1). Questo tipo di sollecitazione è particolarmente comune nei sistemi di connessione delle strutture in legno, in particolare nei denti delle unioni tradizionali legno-legno, dove le forze di compressione non agiscono perfettamente parallele o perpendicolari alla fibratura, ma con un determinato angolo di inclinazione.

Le unioni a dente sono frequentemente utilizzate nelle connessioni di capriate, giunzioni tra travi principali e secondarie, nonché nei collegamenti tra elementi strutturali soggetti a forze inclinate. In queste situazioni, la resistenza dell'elemento ligneo dipende dalla combinazione delle tensioni di compressione parallele e perpendicolari alle fibre, richiedendo un'analisi accurata per garantire la sicurezza e la durabilità della struttura.

La corretta valutazione di queste sollecitazioni è fondamentale per evitare fenomeni di fessurazione o rottura anticipata, assicurando che la connessione sia in grado di trasmettere le forze senza compromettere la stabilità complessiva dell'elemento strutturale.

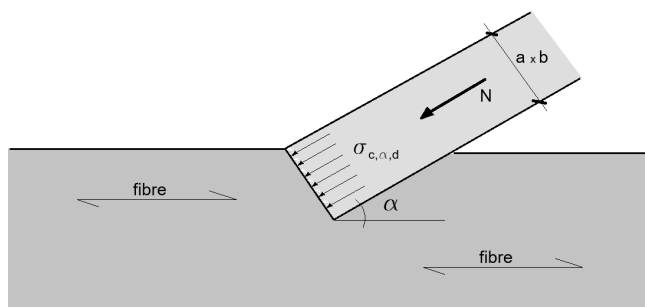


Figura 4.1. Sforzo di compressione inclinato rispetto le fibre

Il calcolo considera l'influenza dell'angolo di inclinazione sulla resistenza del legno, utilizzando il modello di verifica di Hankinson che combina le resistenze caratteristiche

## LE VERIFICHE DELLE TRAVI

### 5.1. Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo (foglio di calcolo C1)

Il **foglio C1** esegue le verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo (SLU) per una trave in legno ad una campata, considerando diverse configurazioni statiche. L'analisi è condotta tenendo conto sia di un carico distribuito sia di un carico concentrato, applicabile in qualsiasi sezione della trave.

#### Selezione dello schema statico

Il foglio consente di scegliere tra diverse configurazioni strutturali, tra cui:

- trave appoggiata;
- trave con doppio incastro;
- trave con incastro e appoggio;
- trave a mensola.

#### Definizione del carico distribuito

Il carico distribuito viene suddiviso in base alle sue caratteristiche, distinguendo tra:

- carichi permanenti strutturali ( $G_1$ );
- carichi permanenti non strutturali ( $G_2$ );
- carichi variabili ( $Q$ ).

Per il carico variabile  $Q$  va definita la durata del carico, al fine di individuare il coefficiente  $k_{mod}$  che influenza le resistenze del legno in base alle condizioni di utilizzo.

#### Definizione del carico concentrato

L'eventuale carico concentrato, nella sezione di ascissa  $a$ , viene classificato come:

- carico permanente non strutturale ( $P_{G2}$ );
- carico variabile ( $P_Q$ ).

Anche per il carico variabile  $P_Q$ , è possibile specificare la durata del carico, determinando così il valore corretto del coefficiente  $k_{mod}$  per adeguare la resistenza del materiale alle condizioni di esercizio.

#### Combinazione fondamentale dei carichi

Per le verifiche di resistenza agli Stati Limite Ultimi (SLU) il foglio di calcolo, a partire dalle condizioni di carico assegnate, determina automaticamente le combinazioni fonda-

## L'INSTABILITÀ DI TRAVI E PILASTRI

### 6.1. Instabilità di colonna

L'instabilità degli elementi compressi in legno, detta instabilità di colonna o instabilità per carico di punta, è un fenomeno che si manifesta quando un elemento strutturale soggetto a compressione perde la sua capacità portante a causa di deformazioni laterali di instabilità. Questo comportamento è influenzato dalla snellezza dell'elemento, dalle proprietà meccaniche del legno e dalle condizioni di vincolo che si oppongono allo sbandamento.

La snellezza, parametro fondamentale per valutare l'instabilità degli elementi compressi, è definita come il rapporto tra la lunghezza libera di inflessione  $L_0$  e il raggio d'inerzia  $i$  valutato sul piano di sbandamento. La snellezza dell'asta si esprime con la formula:

$$\lambda_{asta} = L_0 / i$$

Secondo la teoria di Eulero la condizione di equilibrio indifferente dell'asta deformata si ottiene quando il momento esterno che la deforma  $M_{est} = N \cdot \eta(x)$  è uguale al momento interno alla struttura  $M_{int} = E \cdot J \cdot \eta''(x)$ , che si oppone elasticamente alla deformazione. L'equazione differenziale di questo equilibrio indifferente risulta:

$$E \cdot J \cdot \eta''(x) = N \cdot \eta(x)$$

dove:

- $N$  è il carico assiale;
- $E$  è il modulo elastico del materiale;
- $J$  è il momento d'inerzia della sezione trasversale su piano che sbanda;
- $\eta(x)$  è la deformata dell'asta;
- $\eta''(x)$  è la derivata seconda della deformata.

La soluzione dell'equazione differenziale porta alla definizione del carico in equilibrio, detto critico  $N_{cr}$  e della corrispondente tensione critica  $\sigma_{cr}$  dell'asta. Tale tensione delinea il limite tra la condizione di equilibrio stabile  $N < N_{cr}$  e di equilibrio instabile  $N > N_{cr}$ . Lo sforzo di compressione critico detto carico di Eulero per l'asta risulta:

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

## L'ESPOSIZIONE AL FUOCO

### 7.1. Verifiche di resistenza al fuoco e la sezione efficace (foglio di calcolo E1)

Il **foglio E1** effettua la verifica della resistenza di una sezione di legno in condizioni di incendio a partire dalla definizione della situazione d'incendio, che viene stabilita indicando il tempo richiesto, espresso in minuti, di resistenza alle fiamme. Questo valore rappresenta il periodo durante il quale l'elemento deve conservare la capacità portante nonostante l'esposizione al fuoco.

L'individuazione della sezione residua di legno dopo l'esposizione al fuoco avviene utilizzando il metodo della sezione efficace come indicato nelle norme CNR DT 206-R1/2018.

#### Metodo della sezione efficace

Per valutare la resistenza meccanica al fuoco si considerano due aspetti fondamentali. Da un lato, la formazione di uno strato carbonioso che, pur non contribuendo alla stabilità dell'elemento, protegge la parte sottostante dall'attacco termico. Dall'altro, il raggiungimento, al di sotto di tale strato, di temperature che non causano la demolizione termica del materiale e non ne alterano le caratteristiche di resistenza mantenendole pari a quelle del materiale freddo. Il metodo di calcolo applicabile a un singolo elemento di legno prevede innanzitutto la valutazione della velocità di demolizione della sezione lignea dovuta alla carbonizzazione. Successivamente, si procede alla determinazione della sezione efficace, ottenuta riducendo la sezione originaria in funzione della resistenza richiesta e del tempo di esposizione al fuoco. Infine, si procede al calcolo della capacità portante considerando la possibile rottura o instabilità allo stato limite ultimo di collasso.

Nella Figura 7.1 sono rappresentati i diversi strati di carbonizzazione per una sezione di legno esposta al fuoco.

Le superfici degli elementi in legno esposti direttamente alle fiamme subiscono una riduzione della sezione iniziale e l'effettiva profondità di carbonizzazione risulta:

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

dove:

- $d_{ef}$  è la profondità della sezione depurata per ottenere la sezione trasversale efficace;
- $d_{char} = \beta_0 \cdot t$  è la profondità di carbonizzazione dopo l'esposizione al fuoco per un tempo pari a  $t$  minuti;
- $\beta_0$  è la velocità di carbonizzazione espressa in mm/min;

## ESEMPI DI CALCOLO

### 8.1. Tetto a due falde

Per illustrare il funzionamento del pacchetto dei fogli di calcolo allegati, viene eseguito il calcolo completo di un tetto a due falde con capriate triangolari simmetriche. Lo schema statico delle capriate con l'indicazione delle condizioni di carico previste è rappresentato in Figura 8.1

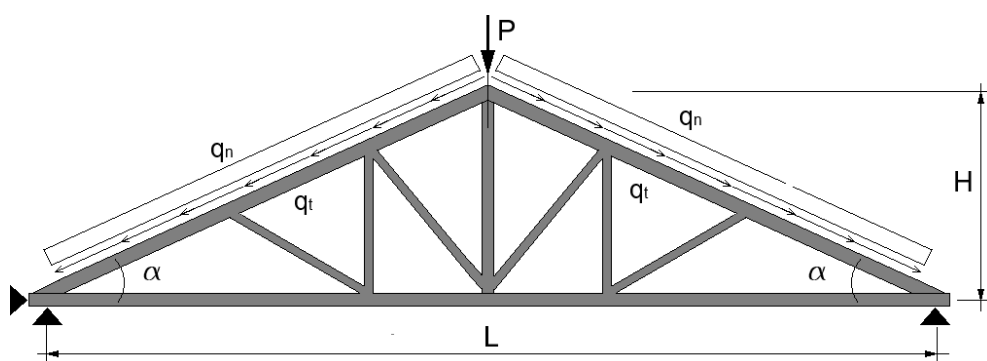


Figura 8.1. Capriata triangolare simmetrica

L'ordito strutturale del tetto è riportato in pianta nella Figura 8.2, dove sono indicate le dimensioni relative alla proiezione orizzontale e sono riconoscibili i principali elementi portanti della copertura, tra cui:

- le capriate triangolari;
- la trave di colmo;
- i puntoni di falda;
- i travetti inclinati.

Per ciascun componente strutturale viene condotta la verifica di resistenza allo Stato Limite Ultimo (SLU) in conformità alle prescrizioni delle NTC 2018.

Tali verifiche richiedono, in via preliminare:

- un'analisi accurata dei carichi agenti (permanenti, variabili, accidentali);
- l'individuazione dello schema statico per ogni elemento strutturale;
- il calcolo delle sollecitazioni interne (momenti flettenti, tagli, sforzi normali).

## L'APPLICAZIONE "STRUTTURE IN LEGNO"

L'applicazione **STRUTTURE IN LEGNO**, disponibile nella **WebApp inclusa** parte integrante della pubblicazione, attraverso una pacchetto di fogli Excel consente il calcolo e le verifiche di **pilastri, travi, solai e capriate** in diverse configurazioni di vincolo e carico, secondo le disposizioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018). Le verifiche, per sezioni rettangolari in legno massiccio o lamellare, sono condotte secondo il modello agli stati limite di resistenza, deformazione, vibrazione, instabilità per carico di punta e instabilità flessione-torsionale e verifiche della resistenza al fuoco. Alcuni fogli Excel sono dedicati ad aspetti specifici, come la compressione inclinata rispetto alla fibratura, lo schiacciamento agli appoggi, gli intagli, la torsione e la presso-flessione composta.

L'applicazione comprende, inoltre, due solutori agli elementi finiti: uno per travi continue fino a tre campate con configurazioni variabili di vincoli e carichi, e uno per capriate triangolari simmetriche secondo tre diverse configurazioni geometriche.

Per evitare errori nella scrittura dei dati e malfunzionamenti nelle procedure di verifica, i fogli di calcolo non vengono automaticamente salvati alla chiusura dell'applicazione. Di conseguenza, alla riapertura, l'applicazione si presenta nella configurazione iniziale, senza le verifiche eseguite in precedenza. Questo accorgimento garantisce che ogni utilizzo parta da una situazione controllata e priva di errori accumulati.

Per salvare le nuove verifiche è necessario utilizzare il tasto **[salva]** presente in ciascun foglio di calcolo. Questo comando apre automaticamente la finestra dell'editor di testi, consentendo la creazione di un file di testo che riporta tutti i dati delle verifiche eseguite. I file così generati vengono memorizzati nella stessa cartella che contiene il file Excel dei fogli di calcolo; per questo motivo è consigliabile predisporre una "*cartella di lavoro dedicata*", così da mantenere ordinati i file e facilitare la gestione dei dati. La registrazione delle verifiche su file di testo risulta molto utile per archiviare i calcoli, consentendo inoltre di inserirli, con eventuali piccole modifiche, in una relazione tecnica, facilitando la produzione della documentazione e la presentazione dei risultati ottenuti.

I dati delle verifiche possono essere salvati anche tramite il comando **[copia]**, disponibile in ciascun foglio di calcolo. Tale funzione trasferisce l'immagine del foglio attivo nel foglio denominato "copia". Aprendo quest'ultimo e cliccando con il tasto destro del mouse sull'immagine generata, è possibile copiarla e inserirla in altri documenti, come relazioni tecniche o tavole di progetto. Ogni volta che si attiva il comando **[copia]**, l'immagine presente nel foglio "copia" viene aggiornata con la versione più recente del foglio attivo.

## 9.1. Il foglio INDICE

I fogli di calcolo dell'applicazione **STRUTTURE IN LEGNO** sono organizzati in gruppi, ciascuno dei quali svolge specifiche funzioni di verifica e analisi delle strutture in legno.

| GRAFILL Editoria tecnica - <b>LE STRUTTURE IN LEGNO</b> - Bruno Zan<br>raccolta di fogli di calcolo per il progetto e le verifiche delle strutture in legno |                                                                                 | Foglio Indice                                              |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Fogli A: PARAMETRI di calcolo                                                                                                                               |                                                                                 | Fogli B: SEZIONI RETTANGOLARI                              |                                                                         |
| Foglio A1                                                                                                                                                   | Classi di resistenza del legno massiccio - UNI EN 338:2016                      | Foglio B1                                                  | Verifica di resistenza per Compressione Inclinata con la fibratura      |
| Foglio A2                                                                                                                                                   | Classi di resistenza del legno lamellare - UNI EN 14080:2013                    | Foglio B2                                                  | Verifiche di resistenza per Trazione, Compressione e Flessione composta |
| Foglio A3                                                                                                                                                   | Coefficienti $k_{mod} - k_{def}$ ; Coeff. $\gamma_M$ dei materiali - NTC 2018   | Foglio B3                                                  | Verifiche di resistenza per Taglio e Torsione                           |
| Foglio A4                                                                                                                                                   | Coefficienti $\psi$ di combinazione dei carichi ; Coeff. $\gamma_G$ dei carichi | Foglio B4                                                  | Verifiche di resistenza agli appoggi per Intaglio e Schiacciamento      |
| Fogli C: TRAVI                                                                                                                                              |                                                                                 | Fogli D: INSTABILITA' per TRAVI, PILASTRI e ASTE COMPRESSE |                                                                         |
| Foglio C1                                                                                                                                                   | Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo                                | Foglio D1                                                  | PILASTRI: Verifica allo sbandamento per carico di punta                 |
| Foglio C2                                                                                                                                                   | Verifiche di deformazione allo Stato Limite di Esercizio                        | Foglio D2                                                  | TRAVI: Verifica allo sbandamento flessione-torsionale                   |
| Fogli E: ESPOSIZIONE al FUOCO                                                                                                                               |                                                                                 | Fogli F: TRAVI CONTINUE e CAPRIATE                         |                                                                         |
| Foglio E1                                                                                                                                                   | Sezione Efficace e verifiche di resistenza                                      | Foglio F1                                                  | SOLUTORE per TRAVI CONTINUE                                             |
| Foglio E2                                                                                                                                                   | TRAVI: verifiche di resistenza a flessione e taglio                             | Foglio F2                                                  | SOLUTORE per CAPRIATE                                                   |
| Foglio E3                                                                                                                                                   | PILASTRI: verifica di resistenza e instabilita'                                 |                                                            |                                                                         |

## 9.2. I fogli del gruppo A (Parametri di calcolo)

**Foglio A1** [Classi di resistenza del legno massiccio – UNI EN 338:2016]

**Foglio A2** [Classi di resistenza del legno lamellare – UNI EN 14080:2013]

**Foglio A3** [Coefficienti  $k_{mod} - k_{def}$  ; Coeff.  $\gamma_M$  dei materiali – NTC 2018]

**Foglio A4** [Coefficienti  $\psi$  di combinazione dei carichi ; Coeff.  $\gamma_G$  dei carichi]

I fogli del gruppo A contengono i valori dei profili di resistenza per il legno massiccio e il legno lamellare, oltre ai coefficienti necessari per i modelli di verifica strutturale, come i coefficienti di resistenza e deformazione  $k_{mod}$  e  $k_{def}$  e i coefficienti parziali di sicurezza. Questi dati vengono utilizzati dai diversi fogli di calcolo per effettuare le verifiche.

## 9.3. I fogli del gruppo B (Verifiche delle sezioni rettangolari)

**Foglio B1** [Verifica di resistenza per compressione inclinata con la fibratura]

**Foglio B2** [Verifiche di resistenza per trazione, compressione e flessione composta]

**Foglio B3** [Verifica di resistenza per taglio e torsione]

**Foglio B4** [Verifica di resistenza agli appoggi per intaglio e schiacciamento]

I fogli del gruppo B permettono di eseguire le verifiche di resistenza per le sollecitazioni agenti su sezioni rettangolari, considerando un'ampia gamma di combinazione delle sollecitazioni. Oltre alle classiche verifiche di resistenza a flessione, taglio e torsione, questi fogli includono anche le verifiche specifiche per gli appoggi, come la valutazione



dell'intaglio della trave e lo schiacciamento della sezione di appoggio. Questo consente di analizzare in modo dettagliato il comportamento degli elementi strutturali in legno, garantendo un progetto sicuro e conforme alle normative tecniche vigenti.

#### 9.4. I fogli del gruppo C (Verifiche delle travi)

**Foglio C1** [Verifiche di resistenza allo Stato Limite Ultimo]

**Foglio C2** [Verifiche degli spostamenti allo Stato Limite di Esercizio]

I **fogli del gruppo C** sono dedicati alle verifiche di resistenza e di deformazione per le travi in legno, considerando una vasta gamma di configurazioni statiche di vincolo e condizioni di carico. Attraverso questi fogli è possibile analizzare il comportamento delle travi soggette a flessione e taglio, valutando sia la capacità portante sia gli spostamenti ammissibili in funzione della classe di servizio e della durata del carico. Le verifiche includono anche la stima degli effetti a lungo termine, come il *creep*, che può influenzare significativamente le prestazioni strutturali.

#### 9.5. I fogli del gruppo D (Instabilità di travi e pilastri)

**Foglio D1** [Verifica allo sbandamento per carico di punta]

**Foglio D2** [Verifica allo sbandamento flesso-torsionale della trave]

I **fogli del gruppo D** sono dedicati alla verifica dell'instabilità per travi e pilastri, determinando le condizioni critiche di instabilità secondo le normative vigenti. Il calcolo considera i parametri fondamentali come la snellezza dell'elemento, le condizioni di vincolo agli estremi e i coefficienti di riduzione della resistenza. Inoltre, include la verifica alla resistenza tenendo conto degli effetti della durata del carico attraverso l'applicazione del coefficiente  $k_{mod}$ . I fogli del gruppo D sono uno strumento essenziale per valutare la sicurezza strutturale di travi, pilastri e altri elementi soggetti a instabilità elastica.

#### 9.6. I fogli del gruppo E (Esposizione al fuoco)

**Foglio E1** [Verifiche di resistenza al fuoco e la sezione efficace]

**Foglio E2** [Verifiche di resistenza al fuoco per le travi]

**Foglio E3** [Verifica di stabilità al fuoco per aste pressoinflesse]

I **fogli del gruppo E** sono dedicati alla verifica della resistenza al fuoco di sezioni, travi e pilastri in legno, analizzando il comportamento strutturale degli elementi sottoposti a temperature elevate e il conseguente degrado delle loro proprietà meccaniche nel tempo. Questi fogli di calcolo permettono di determinare la profondità della carbonizzazione, il

ridimensionamento della sezione resistente e la capacità portante residua dell'elemento ligneo in base alla durata dell'incendio e alle condizioni di esposizione al fuoco. I fogli del gruppo E forniscono strumenti per valutare la sicurezza strutturale degli elementi esposti al fuoco e per progettare soluzioni di protezione passiva, garantendo il rispetto dei requisiti normativi e la durabilità delle strutture in condizioni di incendio.

### 9.7. I fogli del gruppo F (Travi continue e capriate)

**Foglio E1** [Solutore per travi continue]

**Foglio E2** [Solutore per capriate]

I **fogli del gruppo F** comprendono due programmi dedicati alla risoluzione di schemi statici. In particolare:

- il **foglio F1** esegue l'analisi strutturale delle travi continue, con una configurazione massima che prevede uno sbalzo all'estremo e fino a tre campate in continuità;
- il **foglio F2** è destinato alla risoluzione di capriate simmetriche triangolari in diverse configurazioni.

Nel **foglio F1**, il calcolo delle travi continue viene eseguito considerando, per ciascuna campata, un carico distribuito e un carico concentrato, anche con valori differenti. L'analisi restituisce le reazioni vincolari agli appoggi, i momenti flettenti massimi, i tagli agenti su ciascuna campata e le frecce massime associate.

Il **foglio F2** affronta invece il calcolo delle capriate, sottoposte a un carico uniforme distribuito sia in direzione normale che tangenziale alle travi di falda, oltre a un carico concentrato applicato al colmo. I risultati includono le reazioni agli appoggi e gli sforzi interni di compressione e flessione su tutte le aste della capriata.

### 9.8. Lo Speciale Progettazione Strutturale

Unitamente all'applicazione **STRUTTURE IN LEGNO**, la **WebApp inclusa** gestisce lo **Speciale Progettazione Strutturale** (a cura della redazione di [www.lavoripubblici.it](http://www.lavoripubblici.it)), una banca dati di normativa e giurisprudenza sempre aggiornata.

### 9.9. Requisiti hardware e software

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per gestire documenti PDF e Office;
- L'applicazione **STRUTTURE IN LEGNO** richiede la preinstallazione di:
  - una versione di MS Excel in grado di gestire le macro in VBA (l'applicazione è stata testata con MS Excel 2019);
  - un editore di testi (ad es. blocco note in dotazione con i PC).

### 9.10. Installazione e attivazione

- Collegarsi al seguente web link:

**[https://www.grafill.it/pass/0499\\_8.php](https://www.grafill.it/pass/0499_8.php)**

- Inserire i codici **[A]** e **[B]** presenti nell'ultima pagina del libro e cliccare **[Continua]**;
- Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su **www.grafill.it**;
- Cliccare sul pulsante **[G-CLOUD]**;
- Cliccare sul pulsante **[Vai alla WebApp]** a fianco del prodotto acquistato;
- Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**;
- Accedere alla WebApp cliccando la copertina esposta sullo scaffale **Le mie App**.

