

Bruno Zan



Dario Flaccovio Editore



CD ALLEGATO

CALCOLO E VERIFICA DELLE STRUTTURE DI LEGNO

Travi, solai, pareti, collegamenti e resistenza al fuoco



Verifiche di resistenza e di stabilità, stati limite di esercizio ✓
Pannelli a tavole incrociate tipo Xlam ✓
Collegamenti - Resistenza al fuoco ✓
In allegato CD con fogli di calcolo in .xls ✓

Bruno Zan

Calcolo e verifica delle strutture di legno

TRAVI - SOLAI - PARETI - COLLEGAMENTI E RESISTENZA AL FUOCO



Dario Flaccovio Editore

Bruno Zan

CALCOLO E VERIFICA DELLE STRUTTURE DI LEGNO

ISBN 9788857904528

© 2015 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: maggio 2015

Zan, Bruno <1952->

Calcolo e verifica delle strutture in legno : travi, solai, pareti,
collegamenti e resistenza al fuoco / Bruno Zan. - Palermo : D. Flaccovio, 2015.

ISBN 978-88-579-0452-8

1. Strutture in legno.

624.184 CDD-22

SBN PAL0279343

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, maggio 2015

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Prefazione di Franco Laner

Introduzione

1. Legno strutturale

1.1. Costruzioni di legno	pag.	21
1.2. Legno massiccio	»	22
1.3. Legno lamellare incollato	»	25
1.4. Pannelli a tavole incrociate – tipo XLAM.....	»	28
1.5. Collegamenti tra gli elementi in legno	»	30
1.6. Foglio di calcolo A1	»	30
1.7. Foglio di calcolo A2	»	31

2. Verifiche delle strutture di legno

2.1. Valutazione della sicurezza	»	33
2.2. Classi di durata del carico.....	»	34
2.3. Classi di servizio	»	35
2.4. Proprietà meccaniche di calcolo	»	36
2.5. Proprietà di deformazioni	»	38
2.6. Foglio di calcolo A3	»	38
2.7. Azioni e loro combinazioni	»	40
2.8. Foglio di calcolo A4	»	43
2.9. Verifiche agli stati limite di esercizio.....	»	44
2.9.1. Verifiche delle deformazioni.....	»	44
2.9.2. Verifiche delle vibrazioni.....	»	45
2.10. Verifiche agli stati limite ultimi	»	45

2.10.1. Verifiche di resistenza	»	46
2.10.2. Verifiche di stabilità.....	»	48
2.10.3. Verifiche al fuoco.....	»	48

3. Stati limite di esercizio

3.1. Deformazioni istantanea e finale	»	51
3.2. Deformazione per flessione e taglio	»	53
3.3. Vibrazioni.....	»	55
3.4. Foglio di calcolo B1	»	56
3.4.1. Foglio di calcolo B1 – Parte prima	»	57
3.4.2. Foglio di calcolo B2 – Parte seconda.....	»	58
3.4.3. Foglio di calcolo B2 – Parte terza	»	59

4. Verifiche di resistenza

4.1. Trazione	»	61
4.1.1. Trazione parallela alle fibre	»	61
4.1.2. Trazione perpendicolare alle fibre	»	63
4.2. Compressione	»	64
4.2.1. Compressione parallela alla fibratura.....	»	64
4.2.2. Compressione perpendicolare alla fibratura.....	»	65
4.3. Foglio di calcolo B2	»	67
4.3.1. Foglio di calcolo B2 – Parte prima	»	68
4.3.2. Foglio di calcolo B2 – Parte seconda.....	»	69
4.4. Flessione	»	71
4.4.1. Flessione deviata	»	72
4.5. Foglio di calcolo B2	»	74
4.5.1. Foglio di calcolo B2 – Parte prima	»	75
4.5.2. Foglio di calcolo B2 – Parte seconda.....	»	75
4.6. Tensoflessione	»	76
4.7. Pressoflessione	»	77
4.8. Foglio di calcolo B2	»	78

4.8.1.	Foglio di calcolo B2		
	Parte prima.	»	78
4.8.2.	Foglio di calcolo B2		
	Parte seconda.	»	79
4.9.	Taglio	»	80
4.10.	Foglio di calcolo B3	»	82
4.10.1.	Foglio di calcolo B3 – Parte prima	»	83
4.10.2.	Foglio di calcolo B3 – Parte seconda	»	84
4.10.3.	Foglio di calcolo B3 – Parte terza	»	85
4.11.	Foglio di calcolo B4	»	86
4.11.1.	Foglio di calcolo B4 – Parte prima	»	87
4.11.2.	Foglio di calcolo B4 – Parte seconda	»	88
4.11.3.	Foglio di calcolo B4 – Parte terza	»	89
4.11.4.	Foglio di calcolo B4 – Parte quarta	»	90

5. Altre verifiche di resistenza

5.1.	Torsione	»	93
5.2.	Foglio di calcolo C1	»	95
5.2.1.	Foglio di calcolo C1 – Parte prima	»	95
5.2.2.	Foglio di calcolo C1 – Parte seconda	»	96
5.3.	Compressione inclinata rispetto alla fibratura	»	97
5.4.	Foglio di calcolo C2	»	98
5.4.1.	Foglio di calcolo C2 – Parte prima	»	99
5.4.2.	Foglio di calcolo C2 – Parte seconda	»	99
5.5.	Travi con intagli o rastremazioni agli appoggi	»	100
5.6.	Foglio di calcolo C3	»	102
5.6.1.	Foglio di calcolo C3 – Parte prima	»	103
5.6.2.	Foglio di calcolo C3 – Parte seconda	»	103
5.6.3.	Foglio di calcolo C3 – Parte terza	»	104
5.7.	Trave a semplice rastremazione	»	105
5.8.	Foglio di calcolo C4	»	108
5.8.1.	Foglio di calcolo C4 – Parte prima	»	108
5.8.2.	Foglio di calcolo C4 – Parte seconda	»	110

5.8.3.	Foglio di calcolo C4 – Parte terza	»	111
5.9.	Trave a doppia rastremazione.....	»	112
5.10.	Foglio di calcolo C5	»	115
5.10.1.	Foglio di calcolo C4 – Parte prima	»	115
5.10.2.	Foglio di calcolo C5 – Parte seconda.....	»	116
5.10.3.	Foglio di calcolo C5 – Parte terza	»	116
5.10.4.	Foglio di calcolo C5 – Parte quarta	»	117

6. Verifiche di stabilità

6.1.	Instabilità di colonna	»	119
6.2.	Verifica all'instabilità di colonna	»	122
6.3.	Foglio di calcolo D1	»	123
6.3.1.	Foglio di calcolo D1 – Parte prima	»	123
6.3.2.	Foglio di calcolo D1 – Parte seconda.....	»	125
6.4.	Instabilità di trave.....	»	126
6.5.	Verifica all'instabilità di trave.....	»	128
6.6.	Ritegni torsionali	»	130
6.7.	Foglio di calcolo D2	»	130
6.7.1.	Foglio di calcolo D2 – Parte prima	»	131
6.7.2.	Foglio di calcolo D2 – Parte seconda.....	»	132
6.7.3.	Foglio di calcolo D2 – Parte terza	»	133
6.8.	Verifica all'instabilità per travi pressoinflesse	»	134
6.9.	Foglio di calcolo D3	»	135
6.9.1.	Foglio di calcolo D3 – Parte prima	»	135
6.9.2.	Foglio di calcolo D3 – Parte seconda.....	»	136

7. Pannelli di tavole incrociate tipo XLAM

7.1.	Pannelli portanti di solaio	»	139
7.2.	Flessione nei pannelli di solaio.....	»	140
7.2.1.	Verifica di resistenza a flessione.....	»	142
7.2.2.	Effetto piastra	»	143
7.3.	Taglio nei pannelli di solaio	»	145

7.3.1.	Verifica di resistenza a taglio nel verso della fibratura	»	147
7.3.2.	Verifica di resistenza a taglio ortogonale alla fibratura (<i>rolling shear</i>).....	»	148
7.4.	Foglio di calcolo E1	»	149
7.4.1.	Foglio di calcolo E1 – Parte prima	»	149
7.4.2.	Foglio di calcolo E1 – Parte seconda	»	149
7.4.3.	Foglio di calcolo E1 – Parte terza	»	150
7.4.4.	Foglio di calcolo E1 – Parte quarta	»	151
7.5.	Deformazione dei pannelli di solaio	»	153
7.5.1.	Verifica delle deformazioni nello stato di esercizio	»	154
7.6.	Foglio di calcolo E2	»	155
7.6.1.	Foglio di calcolo E2 – Parte prima	»	155
7.6.2.	Foglio di calcolo E2 – Parte seconda	»	156
7.6.3.	Foglio di calcolo E2 – Parte terza	»	156
7.6.4.	Foglio di calcolo E2 – Parte quarta	»	156
7.7.	Pannelli portanti di parete.....	»	158
7.8.	Effetto lastra	»	159
7.8.1.	Forze di taglio nel piano della lastra	»	159
7.8.2.	Forze assiali nel piano della lastra	»	160
7.9.	Taglio nei pannelli di parete	»	161
7.10.	Forze assiali nei pannelli di parete	»	164
7.11.	Foglio di calcolo E3	»	165
7.11.1.	Foglio di calcolo E3 – Parte prima	»	165
7.11.2.	Foglio di calcolo E3 – Parte seconda	»	166
7.11.3.	Foglio di calcolo E3 – Parte terza	»	166
7.11.4.	Foglio di calcolo E3 – Parte quarta	»	167
7.12.	Stabilità dei pannelli di parete	»	168
7.13.	Foglio di calcolo E4	»	170
7.13.1.	Foglio di calcolo E4 – Parte prima	»	170
7.13.2.	Foglio di calcolo E4 – Parte seconda	»	170
7.13.3.	Foglio di calcolo E4 – Parte terza	»	171
7.13.4.	Foglio di calcolo E4 – Parte quarta	»	172

8. Collegamenti

8.1.	Tipologie dei collegamenti tra elementi in legno	»	173
8.1.1.	Unioni tradizionali	»	173
8.1.2.	Unioni meccaniche	»	173
8.2.	Verifica delle unioni tradizionali	»	174
8.2.1.	Unione a dente semplice	»	175
8.2.2.	Unione a dente arretrato	»	176
8.2.3.	Unione a dente doppio	»	177
8.3.	Foglio di calcolo F1	»	178
8.3.1.	Foglio di calcolo F1 – Parte prima	»	178
8.3.2.	Foglio di calcolo F1 – Parte seconda	»	179
8.3.3.	Foglio di calcolo F1 – Parte terza	»	180
8.3.4.	Foglio di calcolo F1 – Parte quarta	»	181
8.3.5.	Foglio di calcolo F1 – Parte quinta	»	182
8.4.	Unioni meccaniche con connettori a gambo cilindrico	»	183
8.4.1.	Chiodi	»	183
8.4.2.	Spinotti	»	183
8.4.3.	Bulloni	»	183
8.4.4.	Viti	»	184
8.4.5.	Unioni per sollecitazioni taglienti	»	184
8.4.6.	Resistenza a taglio per un connettore	»	185
8.4.7.	Resistenza a rifollamento	»	186
8.4.8.	Resistenza a snervamento	»	187
8.4.9.	Resistenza all'estrazione	»	188
8.5.	Verifica delle unioni meccaniche legno-legno a taglio	»	188
8.6.	Foglio di calcolo F2	»	192
8.6.1.	Foglio di calcolo F2 – Parte prima	»	192
8.6.2.	Foglio di calcolo F2 – Parte seconda	»	192
8.6.3.	Foglio di calcolo F2 – Parte terza	»	194
8.7.	Verifica delle unioni meccaniche acciaio-legno a taglio	»	195
8.8.	Foglio di calcolo F3	»	198
8.8.1.	Foglio di calcolo F3 – Parte prima	»	198
8.8.2.	Foglio di calcolo F3 – Parte seconda	»	199

8.8.3.	Foglio di calcolo F3 – Parte terza	»	199
8.8.4.	Foglio di calcolo F3 – Parte quarta	»	200

9. Resistenza al fuoco

9.1.	Introduzione	»	203
9.2.	Resistenza meccanica al fuoco	»	204
9.3.	Metodo della sezione efficace	»	205
9.4.	Verifica alla resistenza.....	»	207
9.5.	Foglio di calcolo G1	»	208
9.5.1.	Foglio di calcolo G1 – Parte prima	»	208
9.5.2.	Foglio di calcolo G1 – Parte seconda.....	»	209
9.5.3.	Foglio di calcolo G1 – Parte terza	»	211
9.6.	Foglio di calcolo G2	»	212
9.6.1.	Foglio di calcolo G2 – Parte prima	»	213
9.6.2.	Foglio di calcolo G2 – Parte seconda.....	»	213
9.6.3.	Foglio di calcolo G2 – Parte terza	»	215
9.6.4.	Foglio di calcolo G2 – Parte quarta	»	215
9.7.	Verifica di stabilità	»	215
9.8.	Foglio di calcolo G3	»	216
9.8.1.	Foglio di calcolo G3 – Parte prima	»	216
9.8.2.	Foglio di calcolo G3 – Parte seconda.....	»	218
9.8.3.	Foglio di calcolo G3 – Parte terza	»	218
9.8.4.	Foglio di calcolo G3 – Parte quarta	»	219
9.9.	Resistenza al fuoco dei collegamenti	»	219

Prefazione

L'oggetto dell'e-mail con la quale l'amico e collega Bruno Zan mi ha invitato a un breve testo di prefazione al suo ultimo libro *Le costruzioni di legno* era perlomeno strano: «*Un nuovo libro sul legno. Serviva?*». La domanda mi è parsa ovviamente pleonastica.

Effettivamente la produzione scientifica nel settore strutturale del legno, specie dopo il primo luglio del 2009, data d'entrata in vigore delle NTC 2008, che legittima il legno, massiccio e ricomposto, come materiale strutturale anche in Italia, è cospicua e disponibile.

Rispondo però alla domanda, dopo aver letto il libro: forse un libro sul calcolo del legno non era necessariamente impellente, ma serviva questo libro sulla cultura del calcolo delle strutture di legno.

Oltre al carattere dell'ingegnere strutturista, il libro denuncia un forte intento pedagogico-scientifico dell'autore: non intende solo fornire gli strumenti di calcolo, ma insegnare a rapportarsi con le peculiari caratteristiche del legno.

C'è il chiaro proposito di trasferire la sua conoscenza ad altri e agevolare, con chiarezza magistrale, l'apprendimento e la conduzione delle verifiche di sicurezza delle strutture lignee.

Trovo in questo intento tutta la consapevolezza di chi ha la fortuna di insegnare: nel momento in cui si trasferisce ad altri il risultato di studi, esperienze e ricerca, a volte faticosi, ci si sente arricchiti, ma soprattutto si arricchisce chi la conoscenza riceve! Nulla a che vedere con l'utilità economica a cui tutto oggi sembra far riferimento fino a giudicare "utile" solo ciò che produce danaro, economia appunto. Questo libro offre un'utilità aggiuntiva alla manualistica del calcolo, quella della conoscenza culturale delle problematiche del legno.

Il compito delle verifiche di sicurezza delle strutture di legno non è facile. I parametri in gioco, date la variabilità e la dispersione delle caratteristiche fisico-mecchaniche di questo materiale organico, impongono un supplemento di attenzioni rispetto ai tradizionali materiali inorganici, che meno risentono delle condizioni ambientali e al contorno e diventano non solo input di calcolo, ma condizionano, per così dire, lo stato d'animo dello strutturista, che si articola nei conseguenziali

step dei fogli di calcolo, proposti nei vari capitoli di verifica. Trovo i fogli di calcolo allegati al testo uno straordinario strumento per i professionisti che si confrontano col calcolo del legno.

Ineccepibile, poi, è l'attenzione ai temi specifici del legno strutturale, come il controllo delle deformazioni, specie differite, e ai temi dell'instabilità per la snellezza che le membrature lignee hanno in sé.

È convinzione che col calcolo non si progetta, bensì si verifica la bontà di un'intuizione costruttiva. Questo libro smentisce tale convinzione: oltre che per le verifiche di sicurezza è anche un testo utile per il progetto col legno.

Arch. Franco Laner

Prof. ordinario di Tecnologia dell'Architettura

Venezia, dicembre 2014

Introduzione

L'idea di scrivere questo testo è nata in occasione della richiesta fattami dalla Fondazione Ingegneri Veneziani di tenere un corso di aggiornamento professionale sulle strutture di legno.

Alcune significative esperienze professionali, le competenze acquisite durante 35 anni di insegnamento della Tecnica delle Costruzioni all'Università di Architettura IUAV di Venezia e le precedenti esperienze editoriali con Dario Flaccovio mi sono state di grande aiuto per individuare e sintetizzare le mille problematiche legate al mondo delle strutture di legno.

Il progetto e la verifica delle strutture di legno sono regolamentati dalle normative tecniche di riferimento; come per ogni altro materiale strutturale (acciaio, calcestruzzo armato, muratura, ecc.) le norme individuano un insieme di procedure, coefficienti correttivi, criteri e coefficienti parziali di sicurezza per utilizzare nel calcolo il modello elastico e, in alcuni casi, i diversi modelli elasto-plastici.

Compito della norma è definire il modello di calcolo più adeguato alle verifiche strutturali e deformative dei materiali.

Per l'acciaio il compito è semplice, poiché si tratta di un materiale che bene risponde alle ipotesi di comportamento del modello elastico.

Per il calcestruzzo armato il compito è più complicato, per la presenza di due materiali che assieme, ma con diverse caratteristiche deformative, si impegnano nel compito strutturale.

Per la muratura l'adattamento alla norma è ulteriormente complicato da un materiale non omogeneo e confezionato spesso in modo approssimativo.

Per le strutture di legno il compito sembrerebbe impossibile perché le proprietà e le caratteristiche del legno sono estremamente variabili e condizionate dalla natura e dall'ambiente durante la crescita della pianta, dalle lavorazioni, i tagli e il deposito fuori opera, dalle situazioni ambientali durante l'impiego, e anche dalle condizioni d'uso nei riguardi della durata di applicazione dei carichi.

Il primo compito della norma è, quindi, quello di individuare, regolamentare e definire il legno che può e deve essere utilizzato nell'ambito delle costruzioni e classificarlo come legno strutturale.

Le prove di laboratorio definiscono il comportamento del cosiddetto *legno netto*, cioè confezionato in provini di piccole dimensioni e privi di quegli elementi fisiologici della pianta (nodi, deviazione della fibratura, fessurazioni, ecc.) che sempre sono presenti nei componenti costruttivi in dimensione di normale utilizzo. Tali elementi sono considerati, dal punto di vista strutturale, come “difetti” che modificano e influenzano fortemente le caratteristiche del legno strutturale e intervengono nella classificazione secondo la resistenza.

In questo testo non verranno trattate le problematiche legate alla classificazione del legno per l'utilizzo nell'ambito delle costruzioni e neppure i difetti, le aggressioni, le alterazioni e il degrado che spesso interessano il legno e ne modificano le caratteristiche. Queste conoscenze sono comunque importanti e devono appartenere al bagaglio culturale di ogni tecnico che si avventura nel difficile e insidioso campo della progettazione strutturale con il legno. A questo proposito, lascio i lettori allo studio del volume *Tecnica delle costruzioni in legno* del prof. Guglielmo Giordano.

Verranno trattati, invece, i vari modelli di calcolo utilizzabili per le diverse verifiche con le tre tipologie di legno strutturale (legno massiccio, legno lamellare, pannelli a tavole incrociate e incollate) secondo le classificazioni definite dalle norme.

Le attuali norme italiane che consentono l'uso del legno come materiale da costruzione nel rispetto dei criteri di sicurezza adottati sono: il Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, *Norme tecniche per le costruzioni*, e la Circolare 2 febbraio 2009 n. 617, *Istruzioni per l'applicazione del D.M. 14/01/2008*. Queste norme sono affiancate da un insieme di norme UNI EN e CNR che meglio definiscono le qualità richieste al legno strutturale. Per quanto riguarda le verifiche e il dimensionamento degli elementi strutturali nel testo si è fatto riferimento alle prescrizioni contenute nel documento Nicole che sono in gran parte confluite nelle *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo delle strutture in legno*, CNR DT 206/2007. Questo quadro normativo nazionale è sufficientemente definito nei criteri di verifica ai fini della sicurezza delle costruzioni in legno. Altri documenti normativi come le UNI EN 1995-1-2 (Eurocodice) e le norme tedesche DIN 1052:2008-12 contengono e trattano specifiche problematiche non affrontate dalla norma italiana.

Le norme nazionali, europee e tedesche si differenziano spesso nei valori dei singoli coefficienti ma non nei principi base delle verifiche. L'utilizzo contemporaneo di diverse norme dovrà pertanto essere valutato con opportune cautele al fine del rispetto dei criteri di sicurezza complessivi previsti dalla normativa nazionale. Nel testo e nelle esemplificazioni trattate si utilizzeranno i coefficienti definiti dalle norme tecniche nazionali NTC 2008.

L'allegato file *calcolo delle strutture di legno.xsl* contiene numerosi fogli di calcolo in ambiente Excel per eseguire le procedure di verifica illustrate nel testo. In particolare il file contiene i seguenti fogli di calcolo per le verifiche:

Foglio	Descrizione
Indice	Indice dei fogli di calcolo
A1	Classi di resistenza del legno massiccio
A2	Classi di resistenza del legno lamellare
A3	Coefficienti k_{mod} e k_{def} Coefficienti di sicurezza parziale dei materiali γ_M
A4	Coefficienti ψ di combinazione dei carichi variabili Coefficienti di sicurezza dei carichi γ_G e γ_Q
B1	SLE – Deformazione per trave rettilinea rettangolare
B2	SLU – Resistenza a presso e tenso-flessione
B3	SLU – Resistenza per trave rettilinea rettangolare
B4	SLU e SLE – Verifiche solaio con travi a sezione rettangolare
C1	Verifica torsione e taglio sezione rettangolare
C2	Verifica a compressione: formula di Hankinson
C3	Verifica intaglio travi agli appoggi
C4	Trave a semplice rastrematura
C5	Trave a doppia rastrematura
D1	Instabilità di colonna per carico di punta
D2	Instabilità flesso-torsionale di trave
D3	Instabilità asta presso-inflessa
E1	Pannelli di solaio tipo XLAM: verifiche a resistenza SLU
E2	Pannelli di solaio tipo XLAM: verifica a deformazione SLE
E3	Pannelli parete tipo XLAM: verifica a resistenza SLU
E4	Pannelli parete tipo XLAM: verifica stabilità per presso-flessione
F1	Unioni tradizionali
F2	Unioni meccaniche legno-legno a taglio
F3	Unione meccaniche acciaio-legno a taglio
G1	Esposizione al fuoco: resistenze e carbonizzazione
G2	Esposizione al fuoco: resistenza a flessione e taglio
G3	Esposizione al fuoco: verifica instabilità asta presso-inflessa

Nei capitoli successivi, i paragrafi intitolati *Fogli di calcolo* riportano e illustrano le procedure del calcolo per ciascuna verifica affrontata.

Nei primi 4 fogli (A1, A2, A3 e A4) sono memorizzati tutti i coefficienti e dati necessari a condurre le verifiche esposte nei fogli successivi.

In particolare, il foglio A1 contiene i profili delle classi di resistenza per il legno massiccio, il foglio A2 contiene i profili delle classi di resistenza per il legno lamellare.

Il foglio A3 contiene tre tabelle di dati: la prima riguarda i coefficienti di resistenza del legno in relazione alla classe di servizio in cui opera la struttura e alla durata dei vari carichi applicati; la seconda riguarda il coefficiente di deformazione a lungo termine per tipo di legno nelle diverse classi di servizio; la terza riguarda i coefficienti parziali di sicurezza del materiale nelle diverse verifiche.

Nel foglio A4 sono riportate due tabelle di dati: la prima riguarda i coefficienti di combinazione dei carichi variabili in funzione delle categorie di appartenenza; la seconda riguarda i coefficienti di sicurezza parziali per le azioni nella verifica allo stato limite ultimo.

I ventidue fogli di calcolo successivi sviluppano ciascuno una o più tipologie di verifica e sono raggruppati in sei categorie:

- fogli B: riportano le verifiche allo stato limite ultimo di resistenza e le verifiche allo stato limite elastico di deformazione per varie strutture con sollecitazioni;
- fogli C: riportano le verifiche di resistenza per situazioni particolari;
- fogli D: riportano le verifiche di stabilità per gli elementi strutturali;
- fogli E: riportano le verifiche per i pannelli tipo XLAM;
- fogli F: riportano le verifiche per le unioni tradizionali e meccaniche;
- fogli G: riportano le verifiche per l'esposizione al fuoco.

La figura 1 mostra la prima parte comune a quasi tutti i fogli di calcolo. In testa è riportato il titolo del foglio di calcolo che sintetizza il tipo di verifica che viene sviluppata nel foglio stesso.

S.L.U. VERIFICHE DI RESISTENZA -TRAVE A SEZIONE RETTANGOLARE		
1	ESEMPIO	foglio B3
2	LEGNO MASSICCIO	M
3	Classe di resistenza	C22
4	Classe di servizio	1
5	coefficiente di sicurezza	$\gamma_M = 1,5$
6	resistenza caratteristica a flessione	$f_{m,k} = 22$ [MPa]
7	resistenza caratteristica a taglio	$f_{v,k} = 2,4$ [MPa]

Figura 1. Schermata del foglio di calcolo per la definizione del tipo di legno

Nei fogli, le caselle evidenziate in giallo con il testo in rosso (nelle figure delle schermate riportate nel testo hanno il fondo grigio) sono dedicate all’inserimento dei dati che, in alcuni casi, sono selezionabili dai menu a tendina collegati alla

casella stessa. Le caselle non evidenziate riportano invece i vari dati di elaborazione e non sono modificabili.

Per facilitare la lettura e l'analisi delle operazioni eseguite dai fogli di calcolo, questi sono stati suddivisi in varie parti e tutte le righe del foglio sono state numerate (numeri a sinistra), in modo da poter descrivere le operazioni eseguite in ciascuna riga.

Nei vari paragrafi, per ciascuna parte di foglio di calcolo, è riportata la completa descrizione delle varie righe utilizzando tabelle di analisi come la seguente:

Analisi del foglio di calcolo B3 – Parte prima

Riga	Dati da inserire	Descrizione – Foglio di calcolo B1 – Parte prima
1	X	Inserire il titolo della struttura da verificare
2	X	Scegliere il tipo di legno M = massiccio o L = lamellare Utilizzare le scelte previste nel menu a tendina
3	X	Scegliere la classe di resistenza del legno tra quelle riportate nel menu a tendina per il tipo di legno scelto
4	X	Scegliere la classe di servizio in cui opera l'elemento strutturale. Utilizzare le scelte previste dal menu a tendina
5		Valore del coefficiente di sicurezza parziale γ_M per il materiale secondo la tabella del foglio A3
6		Valore della resistenza a flessione in funzione della classe di legno scelta e secondo i profili di resistenza riportati nei fogli A1/A2
7		Valore della resistenza a taglio in funzione della classe di legno scelta e secondo i profili di resistenza riportati nei fogli A1/A2

1. Legno strutturale

1.1. Costruzioni di legno

Il materiale legno presenta un'ottima efficienza strutturale se paragonato ad altri materiali da costruzione. Un semplice parametro, per individuare l'efficienza in termini di resistenza, è il rapporto tra la resistenza del materiale f (ad esempio la resistenza a compressione) e la sua massa volumica ρ . Un altro criterio, per definire l'efficienza in termini di stabilità e deformazione, è il rapporto tra il modulo elastico E e la resistenza a compressione f .

Nella tabella 1.1 si riportano, per diversi materiali, i valori dei due rapporti che in qualche modo definiscono l'efficienza in ambito delle costruzioni.

Tabella 1.1. Efficienza statica dei materiali da costruzione

Materiale	f/ρ	E/f
Legno netto	~ 180	~ 147
Legno massiccio (C24)	~ 63	~ 480
Legno lamellare (GL36)	~ 70	~ 400
Acciaio	~ 55	~ 480
Calcestruzzo	~ 10	~ 1200

Valori alti del rapporto f/ρ indicano una buona efficienza in termini di resistenza. I valori in tabella mostrano che l'efficienza del legno in termini di resistenza è paragonabile a quella dell'acciaio ed è sei volte superiore a quella del calcestruzzo. Perciò utilizzando il legno è possibile alleggerire di molto le strutture, con grandi vantaggi per esempio in ambito sismico.

Valori bassi del rapporto E/f indicano una propensione all'eccessiva deformabilità con conseguenti problemi di stabilità. I valori in tabella mostrano che il legno ha le stesse problematiche dell'acciaio e pertanto le strutture di legno dovranno sempre essere controllate nei riguardi delle deformazioni e della stabilità.

Le costruzioni di legno, al contrario dell'opinione comunemente diffusa e a differenza di altri materiali, hanno un ottimo comportamento nei confronti del fuoco.

Il legno è un materiale combustibile, questo però non significa che le strutture di legno non possiedano resistenza al fuoco e che siano più vulnerabili rispetto alle strutture in acciaio o in calcestruzzo armato specie se precompresso. Il legno brucia molto lentamente e con velocità nota, creando una superficie di carbonizzazione al di sotto della quale il materiale rimane efficiente. A differenza dell'acciaio, dove il fuoco determina una repentina perdita di resistenza del materiale e quindi crolli molto veloci e totali, il crollo della struttura in legno avviene per riduzione della sezione resistente in modo lento e controllato.

Per le costruzioni di legno, il calcolo delle strutture è regolamentato dalla norma nazionale: D.M. 14.01.2008 *Norme Tecniche per le Costruzioni 2008*, comunemente indicata con NTC 2008. Nel capitolo 4.4, *Costruzioni civili e industriali in legno*, sono indicati i principi fondamentali, i metodi di verifica e le grandezze di riferimento per il controllo e l'utilizzo di strutture portanti in legno strutturale realizzate con elementi in legno massiccio (segato, squadrato oppure tondo) o con prodotti confezionali come legno lamellare incollato e pannelli a base di legno. Le strutture possono essere realizzate assemblando elementi strutturali con adesivi o con mezzi di unione meccanici.

La norma può essere usata anche per le verifiche di strutture in legno esistenti purché si provveda a una corretta valutazione delle caratteristiche del legno e degli eventuali stati di degrado.

Il materiale legno utilizzato nelle strutture deve rispondere ai requisiti indicati nel capitolo 11.7, *Materiali prodotti a base di legno*, delle norme NTC 2008 e tutto il legno impiegato deve essere classificato secondo la resistenza, prima della sua messa in opera.

La valutazione della sicurezza nelle costruzioni, secondo la NTC 2008, deve essere condotta seguendo i principi fondamentali illustrati nel capitolo 2, *Sicurezza e prestazioni attese*. Infine, come già detto, per alcuni aspetti non trattati nella NTC 2008 si può far riferimento alle norme UNI EN 1995-1-2, *Eurocodice – Progettazione di strutture di legno*, e alle specifiche tecniche riportate nelle CNR DT 206/2007, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo delle strutture in legno*.

1.2. Legno massiccio

Gli elementi strutturali di legno massiccio a sezione rettangolare devono essere classificati secondo la resistenza sulla base di specifiche normative conformi alla norma UNI EN 14081.

Agli elementi in legno strutturale viene assegnato un profilo resistente con specifiche caratteristiche fisico-meccaniche mediante classificazione “a vista” o “a macchina”.

CLASSIFICAZIONE “A VISTA”

L’assegnazione di una classe di resistenza di appartenenza di elementi lignei di sezione rettangolare è eseguita “a vista” in funzione dei difetti (numero e qualità dei nodi, ampiezza degli anelli di accrescimento, inclinazione della fibratura, fessurazioni radiali da ritiro, separazione in senso longitudinale delle fibre, cipollature-fessurazioni tra anelli contigui, svergolamento, attacchi da funghi e insetti, ecc.).

CLASSIFICAZIONE “A MACCHINA”

L’assegnazione di una classe di resistenza di appartenenza di elementi lignei di sezione rettangolare è eseguita “a macchina” in funzione della densità ρ e del modulo elastico E , usando le relazioni tra i parametri per determinare le resistenze f .

La classificazione garantisce all’elemento prestazioni meccaniche minime statisticamente definite senza la necessità di ulteriori prove sperimentali o verifiche, attraverso l’assegnazione di un profilo resistente, che raggruppa le proprietà fisico-meccaniche pertinenti, e che definisce la classe di resistenza del materiale. Nella norma europea UNI EN 338 vengono definite le classi di resistenza e i profili resistenti unificati a livello europeo.

Per legnami di provenienza italiana, la norma UNI 11035/1-2 fornisce le regole di classificazione e una serie di profili di resistenza, che possono essere attribuiti a ogni categoria in relazione alla specie legnosa e alla provenienza geografica.

Per legnami di provenienza non italiana, la norma UNI EN 1912 fornisce le tabelle di attribuzione alle classi di resistenza previste dalla norma UNI EN 338, in base alla specie, alla provenienza e alla classificazione secondo la normativa del Paese di provenienza.

Per tipi di legnami non inclusi in normative vigenti, è possibile definire la classe di resistenza sulla base di prove sperimentali in accordo con la norma UNI EN 384.

Per le travi uso Fiume e uso Trieste la norma UNI 11035/3 fornisce le regole di classificazione. Le travi uso Fiume sono a sezione quadrata o rettangolare ottenuta da un tronco mediante squadratura meccanica, continua e parallela dal calcio alla punta su quattro facce a spessore costante con smussi e contenente il midollo. Le travi uso Trieste sono a sezione quadrata o rettangolare ottenuta da tronco mediante squadratura meccanica, continua dal calcio alla punta su quattro facce seguendo la rastremazione del tronco, con smussi e contenente il midollo. I prodotti di legno massiccio tipo bilama e trilama sono classificati con le classi di resistenza UNI EN 338.

Le proprietà meccaniche del legno massiccio sono determinate a partire dal valore caratteristico del modulo di rottura a flessione $f_{m,k}$ e dal valore medio del modulo elastico parallelo alle fibre $E_{0,mean}$ (valori definiti in fase di classificazione). Nella tabella 1.2 si riportano le relazioni tra le proprietà meccaniche del legno massiccio definite dalla norma UNI EN 338.

Tabella 1.2. Relazioni tra le proprietà meccaniche del legno massiccio

Proprietà		Relazioni
Flessione (valore di riferimento)		$f_{m,k}$ (N/mm ²)
Trazione	Parallela alla fibratura	$f_{t,0,k} = 0,6 \cdot f_{m,k}$
	Perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k} = \min(0,6; 0,015 \cdot f_{m,k})$
Compressione parallela alla fibratura		$f_{c,0,k} = 5 \cdot f_{m,k} \cdot 0,45$
Taglio		$f_{v,k} = \min(3,8; 0,2 \cdot f_{m,k} \cdot 0,2)$
Moduli elastici		$E_{o,k} = 0,67 \cdot E_{0,mean}$
		$E_{90,mean} = E_{0,mean} / 30$
		$G_{mean} = E_{0,mean} / 16$

Nella tabella 1.3 sono riportati i profili resistenti (valori delle resistenze e moduli elastici caratteristici) per le varie classi di resistenza per legno di conifera e di pioppo, secondo la norma UNI EN 338.

Tabella 1.3. Classi di resistenza per legno di conifera e di pioppo (secondo UNI EN 338)

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze (MPa)													
Flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Taglio	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Modulo elastico (GPa)													
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica (kg/m ³)													
Massa volumica caratteristica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volumica media	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Schermata 1.2. Foglio di calcolo A2. Classi di resistenza del legno lamellare

LEGNO LAMELLARE										foglio A2
CLASSI DI RESISTENZA		GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL32h	GL32c	GL36h	GL36c	
Resistenza [MPa]										
flessione $f_{m,k}$		24	24	28	28	32	32	36	36	
trazione parallela alla fibratura $f_{t,0,k}$		16,5	14	19,5	16,5	22,5	19,5	26	22,5	
trazione perpendicolare alla fibratura $f_{t,90,k}$		0,4	0,35	0,45	0,4	0,5	0,45	0,6	0,5	
compressione parallela alla fibratura $f_{c,0,k}$		24	21	26,5	24	29	26,5	31	29	
compressione perpendicolare alla fibratura $f_{c,90,k}$		2,7	2,4	3	2,7	3,3	3	3,6	3,3	
taglio $f_{v,k}$		2,7	2,2	3,2	2,7	3,8	3,2	4,3	3,8	
Modulo elastico [Gpa]										
modulo elastico medio parallelo alle fibre $E_{0,mean}$		11,6	11,6	12,6	12,6	13,7	13,7	14,7	14,7	
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre $E_{0,05}$		9,4	9,4	10,2	10,2	11,1	11,1	11,9	11,9	
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre $E_{90,mean}$		0,39	0,32	0,42	0,39	0,46	0,42	0,49	0,46	
modulo di taglio medio G_{mean}		0,72	0,59	0,78	0,72	0,85	0,78	0,91	0,85	
Massa volumetrica [kg/m³]										
massa volumetrica caratteristica ρ_k		380	350	410	380	430	410	450	430	

Tabella 1.8. Analisi del foglio A2

Riga	Descrizione del foglio di calcolo A2
1	Tabella fornita dalla normativa per definire i profili di resistenza delle classi di legno lamellare
2	Definizioni delle varie classi di resistenza. Le classi di legno lamellare incollato omogeneo sono caratterizzate dal pedice h , mentre, quelle di legno lamellare incollato combinato dal pedice c
3	Inizio sezione per le resistenze caratteristiche in MPa
4	Valori della resistenza a flessione per le varie classi $-f_{m,k}$
5	Valori della resistenza a trazione con direzione parallela alla direzione della fibratura del legno $-f_{t,0,k}$
6	Valori della resistenza a trazione con direzione perpendicolare alla direzione della fibratura del legno $-f_{t,90,k}$
7	Valori della resistenza a compressione con direzione parallela alla direzione della fibratura del legno $-f_{c,0,k}$
8	Valori della resistenza a compressione con direzione perpendicolare alla direzione della fibratura del legno $-f_{c,90,k}$
9	Valori della resistenza a taglio per le varie classi $-f_{v,k}$
10	Inizio sezione per i moduli elastici in GPa
11	Valori del modulo elastico medio per sollecitazioni con direzione parallela alla fibratura del legno $-E_{0,mean}$
12	Valori del modulo elastico caratteristico per sollecitazioni con direzione parallela alla fibratura del legno $-E_{0,05}$
13	Valori del modulo elastico medio per sollecitazioni con direzione perpendicolare alla fibratura del legno $-E_{90,mean}$
14	Valori del modulo elastico medio per sollecitazioni di taglio $-G_{mean}$
15	Inizio sezione per le masse volumetriche in kg/m³
16	Valori della massa volumetrica caratteristica $-\rho_k$

2. Verifiche delle strutture di legno

2.1. Valutazione della sicurezza

La valutazione della sicurezza per le strutture è condotta secondo il metodo degli stati limite, utilizzando i principi fondamentali e i coefficienti di sicurezza riportati nel capitolo 2 delle NTC 2008.

I requisiti richiesti di resistenza, funzionalità e robustezza si garantiscono verificando gli stati limite ultimi e gli stati limite di esercizio della struttura, dei singoli componenti strutturali e dei collegamenti.

Le strutture di legno sono di tipo leggero, questo aspetto è un vantaggio perché le forze inerziali sono ridotte, ma il coefficiente di sicurezza globale viene penalizzato. Si considerino ad esempio due travi con lo stesso schema statico: la prima di tipo pesante in calcestruzzo, la seconda di tipo leggero in legno.

Per la struttura pesante il carico permanente, dovuto al peso dei solai in laterocemento e al peso della trave, potrebbe essere $G = 4000 \text{ kg/m}$, mentre il carico variabile viene fissato in 900 kg/m e il carico di verifica allo stato limite ultimo risulta $F_d = 1,3 \cdot 4000 + 1,5 \cdot 900 = 6550 \text{ kg/m}$.

Per la struttura leggera il carico permanente, dovuto al peso dei solai in legno e al peso della trave, potrebbe essere $G = 640 \text{ kg/m}$, mentre il carico variabile viene fissato anche in questo caso in 900 kg/m e il carico di verifica allo stato limite ultimo risulta $F_d = 1,3 \cdot 640 + 1,5 \cdot 900 = 2182 \text{ kg/m}$.

Per la struttura pesante il carico variabile pari 900 kg/m dovrebbe aumentare, per raggiungere la rottura, fino a 2550 kg/m ($q = 6550 - 4000 = 2550 \text{ kg/m}$), cioè dovrebbe aumentare di 2,83 volte ($v = 2550/900 = 2,83$).

Per la struttura leggera, invece, il carico variabile di 900 kg/m dovrebbe aumentare fino a 1542 kg/m ($q = 2182 - 640 = 1542 \text{ kg/m}$), cioè dovrebbe aumentare di 1,71 volte ($v = 1542/900 = 1,71$).

Soprattutto per le grandi coperture è abbastanza frequente che il sovraccarico dovuto alla neve possa raggiungere valori elevati nell'eventualità di forti precipitazioni nevose con salti termici che provocano il progressivo congelamento del manto nevoso. In questi casi le coperture pesanti hanno maggior margine di sicurezza potendo assorbire senza crolli incrementi del carico variabile più ampi.

Il controllo della sicurezza per le strutture leggere di grande luce dovrà perciò considerare attentamente la valutazione dei carichi e le possibilità di incremento. L'analisi delle strutture di legno può essere effettuata nell'ambito del comportamento elastico lineare adottando i valori appropriati del modulo elastico e per le unioni la rigidezza, in funzione dello stato limite e del tipo di verifica considerata. Nel caso di utilizzo di unioni di adeguata duttilità è possibile l'uso di metodi di analisi non lineare.

Le strutture di legno, caratterizzate da diverso comportamento reologico, devono essere verificate per gli stati limite ultimi e di esercizio, con riferimento alle condizioni iniziali e finali (a tempo infinito).

Le azioni caratteristiche sono definite in accordo con le indicazioni del capitolo 3, *Azioni sulle costruzioni*, e del capitolo 5, *Ponti*, della norma NTC 2008, mentre, le azioni di calcolo si devono determinare secondo quanto indicato nel capitolo 2, *Sicurezza e prestazioni attese*. Le azioni devono essere cumulate in modo da determinare le condizioni di carico più gravose ai fini delle singole verifiche, tenendo conto della probabilità ridotta d'intervento simultaneo di tutte le azioni con i rispettivi valori più sfavorevoli.

Il comportamento del legno è fortemente influenzato dal tempo di applicazione del carico e dall'umidità dell'ambiente. Pertanto, a ciascuna azione di calcolo bisogna assegnare una classe di durata del carico (permanente, di lunga durata, di media durata, di breve durata o istantaneo) e alla struttura bisogna assegnare una classe di servizio che definisce l'umidità dell'ambiente in cui essa opera (classi di servizio 1, 2 o 3).

I valori di calcolo per le proprietà del materiale si assegnano quindi, a partire dai valori caratteristici, con riferimento alle classi di servizio e alle classi di durata del carico.

2.2. Classi di durata del carico

A ciascuna azione di calcolo deve essere assegnata una delle classi di durata del carico previste nella NTC 2008 e riportate nella tabella 2.1.

Tabella 2.1. Classi di durata del carico

Classe di durata del carico	Durata del carico
Permanente	Più di 10 anni
Lunga durata	6 mesi-10 anni
Media durata	1 settimana-6 mesi
Breve durata	Meno di 1 settimana
Istantaneo	-

AZIONI ECCEZIONALI (A)

Tra le azioni eccezionali che possono interessare la struttura possono essere individuate l'incendio, l'esplosione e gli urti.

AZIONI SISMICHE (E)

Azioni derivanti dai terremoti.

Per le azioni elementari la norma definisce i valori caratteristici (caratterizzati dal pedice k) come valore corrispondente a un frattile pari al 95% della popolazione dei massimi.

Le azioni variabili (Q) sono classificate in categorie in funzione dell'utilizzo delle strutture e, a queste, si aggiungono le azioni del vento, della neve e delle variazioni termiche.

Le combinazioni delle azioni compongono le azioni che agiscono contemporaneamente. Nelle combinazioni viene definita l'azione variabile dominante Q_{k1} , alla quale si sommano eventuali altre azioni variabili che possono agire contemporaneamente all'azione dominante. Nella definizione delle combinazioni, le azioni variabili Q_k vengono composte utilizzando i coefficienti di combinazione ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , a seconda del tipo di azione variabile e del tipo di verifica da eseguire. I valori dei coefficienti di combinazione sono definiti nella tabella 2.5.I delle NTC 2008 e sono riportati nel foglio di calcolo A4. Con riferimento alla durata dell'azione variabile si definiscono i seguenti tipi di azioni:

- azione quasi permanente: $\psi_2 \cdot Q_k$
- azione frequente: $\psi_1 \cdot Q_k$
- azione rara: $\psi_0 \cdot Q_k$

Si possono così costruire, per le diverse categorie di azioni, le combinazioni da utilizzare nelle varie verifiche.

Nell'ipotesi di considerare una struttura con carichi permanenti strutturali G_1 e non strutturali G_2 e due azioni accidentali agenti Q_1 e Q_2 , le varie combinazioni delle azioni per le verifiche assumono le configurazioni di seguito descritte.

COMBINAZIONE FONDAMENTALE

Da impiegare nelle verifiche per gli stati limite ultimi (SLU):

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_Q \cdot (Q_{k1} + \psi_0 \cdot Q_{k2})$$

Per la verifica agli stati limite ultimi di resistenza le singole azioni sono individuate moltiplicando l'azione caratteristica per i coefficienti parziali di sicurezza (γ_G e γ_Q) forniti dalla norme NTC 2008 e riportati in tabella 2.6.

Tabella 2.6. Coefficienti parziali di sicurezza per i carichi

Carichi	Tipo	Coefficiente	Valore
Permanenti	Favorevoli	γ_{G1}	1,0
	Sfavorevoli		1,3
Permanenti non strutturali	Favorevoli	γ_{G2}	0,0
	Sfavorevoli		1,5
Variabili	Favorevoli	γ_Q	0,0
	Sfavorevoli		1,5

COMBINAZIONE FREQUENTE

Da impiegare nelle verifiche per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$F_d = G_1 + G_2 + \gamma_1 \cdot Q_{k1} + \psi_2 \cdot Q_{k2}$$

COMBINAZIONE RARA

Da impiegare nelle verifiche per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili e per gli effetti a breve termine:

$$F_d = G_1 + G_2 + Q_{k1} + \psi_0 \cdot Q_{k2}$$

COMBINAZIONE QUASI PERMANENTE

Da impiegare nelle verifiche per gli effetti a lungo termine:

$$F_d = G_1 + G_2 + \psi_2 \cdot Q_{k1} + \psi_2 \cdot Q_{k2}$$

COMBINAZIONE SISMICA

Da impiegare nelle verifiche agli stati limite ultimi e di esercizio connessi all’azione sismica (E):

$$F_d = E + G_1 + G_2 + \psi_2 \cdot Q_{k1} + \psi_2 \cdot Q_{k2}$$

COMBINAZIONE ECCEZIONALE

Da impiegare nelle verifiche agli stati limite ultimi per le azioni eccezionali (A_d), come ad esempio il fuoco:

$$F_d = A_d + G_1 + G_2 + \psi_2 \cdot Q_{k1} + \psi_2 \cdot Q_{k2}$$

dove

- G_1 valore caratteristico dei pesi della struttura
- G_2 valore caratteristico dei pesi permanenti non strutturali
- Q_{k1} valore caratteristico dell’azione variabile di base
- Q_{k2} valore caratteristico della seconda azione variabile
- E azione sismica
- A_d azione eccezionale
- γ_{G1} 1,3 (1,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)

γ_{G2}	1,5 (1,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)
γ_Q	1,5 (0,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)
ψ_0, ψ_1, ψ_2	coefficienti di combinazione dei carichi variabili da determinarsi sulla base di considerazioni statistiche, per tenere conto della probabilità ridotta di effetto simultaneo di tutte le azioni con rispettivi valori più sfavorevoli. In assenza di dati statistici sui carichi, si assumono i valori forniti dalla normativa (NTC 2008 – tabella 2.5.I) e riportati nel foglio di calcolo A4.

2.8. Foglio di calcolo A4

Nel foglio di calcolo A4 sono riportati i valori dei coefficienti di combinazione ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 e i valori dei coefficienti parziali di sicurezza γ_G e γ_Q per le varie verifiche esposte nei fogli successivi.

Va rilevato che per la categoria H (coperture e sottotetto) la norma indica per i coefficienti di combinazione valori nulli, intendendo che i valori dovranno essere scelti dal progettista in funzione della destinazione d'uso della copertura o del sottotetto in esame. Pertanto, nella tabella dei coefficienti di combinazione riportata nel foglio di calcolo A4, i valori dei coefficienti per la categoria H sono modificabili e le relative caselle sono evidenziate in giallo.

Analogamente a quanto detto per i coefficienti parziali di sicurezza per i materiali, anche per quelli delle azioni γ_G e γ_Q è possibile scegliere valori diversi da quelli previsti dalla NTC 2008 e nel foglio A4 le caselle dei coefficienti sono evidenziate in giallo.

Schermata 2.4. Foglio di calcolo A4. Coefficienti di combinazione dei carichi

coefficienti di combinazione dei carichi variabili					
COEFFICIENTI DI COMBINAZIONE			ψ_0	ψ_1	ψ_2
categorie delle azioni variabili :					
ambiente ad uso residenziale	Categoria	A	0,7	0,5	0,3
uffici	Categoria	B	0,7	0,5	0,3
ambienti suscettibili di affollamento	Categoria	C	0,7	0,7	0,6
ambiente ad uso commerciale	Categoria	D	0,7	0,7	0,6
biblioteche, archivi, magazzini e ambienti industriali	Categoria	E	1,0	0,9	0,8
rimesse e parcheggi per autoveicoli di peso ≤ 30 kN	Categoria	F	0,7	0,7	0,6
rimesse e parcheggi per autoveicoli di peso > 30 kN	Categoria	G	0,7	0,5	0,3
copertura e sottotetto	Categoria	H	0,0	0,0	0,0
vento	Categoria	V	0,6	0,2	0,0
neve per quote ≤ 1000 m s.l.m.	Categoria	N1	0,5	0,2	0,0
neve per quote > 1000 m s.l.m.	Categoria	N2	0,7	0,5	0,2

Schermata 2.5. Foglio di calcolo A4. Coefficienti parziali di sicurezza

coefficienti parziali per le azioni nelle verifiche allo stato limite di resistenza			
Carichi Permanenti strutturali (G1)	sfavorevoli	γ_{G1}	1,3
Carichi Permanenti non strutturali (G2)	sfavorevoli	γ_{G2}	1,5
Carichi Variabili (Q)	sfavorevoli	γ_Q	1,5

2.9. Verifiche agli stati limite di esercizio

Le verifiche agli stati limite devono essere eseguite per tutte le più gravose condizioni di carico che possono agire sulla struttura, valutando gli effetti delle varie combinazioni delle azioni.

Per gli stati limite di esercizio (SLE) la combinazione di carico per gli effetti a breve termine è quella rara:

$$F_d = G_1 + G_2 + Q_{k1} + \psi_0 \cdot Q_{k2}$$

mentre la combinazione di carico per gli effetti a lungo termine è quella quasi permanente:

$$F_d = G_1 + G_2 + \psi_2 \cdot Q_{k1} + \psi_2 \cdot Q_{k2}$$

dove

- G_1 valore caratteristico dei pesi della struttura
- G_2 valore caratteristico dei pesi permanenti non strutturali
- Q_{k1} valore caratteristico dell'azione variabile di base
- Q_{k2} valore caratteristico della seconda azione variabile
- ψ_0, ψ_2 coefficienti di combinazione dei carichi variabili.

Per le strutture di legno gli stati limite di esercizio (SLE) o di servizio sono rappresentati dalle situazioni limite della struttura che considerano:

- le limitazioni delle deformazioni
- le limitazioni delle vibrazioni.

2.9.1. Verifiche delle deformazioni

Le deformazioni di una struttura, dovute agli effetti delle azioni applicate, degli stati di coazione, delle variazioni di umidità e degli scorrimenti nelle unioni, devono essere contenute entro limiti accettabili, sia in relazione ai danni che possono essere indotti ai materiali di rivestimento, ai pavimenti, alle tramezzature e, più in generale, alle finiture, sia in relazione ai requisiti estetici e alla funzionalità dell'opera in condizioni di esercizio.

Per gli elementi in legno, i modesti valori di modulo elastico a taglio G , in rapporto a quelli del modulo elastico longitudinale E_0 , rendono necessario considerare nel calcolo della freccia elastica anche la deformabilità a taglio.

La deformazione globale di un elemento in legno, a causa delle sue caratteristiche reologiche, è caratterizzata da un andamento inizialmente elastico che subito diventa di tipo visco-elastico (*fluage*), causando sotto carico costante, un progredire della deformazione nel tempo. Inoltre, se l'ambiente è particolarmente umido, questi aspetti risultano amplificati.

Per le verifiche a deformazione è quindi necessario considerare la freccia istantanea dovuta ai carichi di breve durata, ma anche la freccia differita dovuta ai carichi prolungati nel tempo, soprattutto nei casi in cui tali carichi (pesi propri e permanenti, ma anche carico neve in alcune località di montagna) risultino percentualmente elevati rispetto al carico totale.

La deformazione finale sarà valutata come somma della deformazione istantanea, prodotta dalla combinazione rara dei carichi, e della deformazione a lungo termine calcolata con la combinazione dei carichi quasi permanenti.

Le deformazioni spesso assumono valori di freccia dell'ordine di alcuni centimetri, si dovranno perciò adottare limitazioni spesso più restrittive di quelle poste dalla norma (CNR DT 206/2007, paragrafo 6.4.3) per salvaguardare gli altri elementi e materiali che compongono la costruzione.

2.9.2. Verifiche delle vibrazioni

Nel progetto si devono considerare anche gli effetti prodotti da urti e vibrazioni al fine di ridurre il disagio degli utenti, in particolare per le strutture aperte al pubblico. Nel caso di solai, salvo esigenze specifiche, la frequenza naturale più bassa non dovrà essere inferiore a 6 Hz (CNR DT 206/2007, paragrafo 6.4.4).

Le vibrazioni per i solai in legno sono particolarmente insidiose in quanto la struttura è leggera ed elastica. Lo studio delle vibrazioni è particolarmente difficoltoso poiché la risposta dinamica è influenzata dalle caratteristiche degli elementi, dalle loro capacità di smorzamento, dalla forma dell'elemento in pianta, dal grado di vincolo alle estremità e dalla rigidità dei collegamenti tra le componenti. Nei casi in cui sia importante un controllo di questo fenomeno per la delicatezza degli elementi portati è necessario approfondire le indagini mediante prove dinamiche in sito allo scopo di evidenziare e quantificare i modi propri di vibrazione delle frequenze interessate.

2.10. Verifiche agli stati limite ultimi

Per gli stati limite ultimi la combinazione di carico da considerare è quella fondamentale:

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_Q \cdot (Q_{k1} + \psi_0 \cdot Q_{k2})$$

dove

G_1	valore caratteristico dei pesi della struttura
G_2	valore caratteristico dei pesi permanenti non strutturali
Q_{k1}	valore caratteristico dell'azione variabile di base
Q_{k2}	valore caratteristico della seconda azione variabile
γ_{G1}	1,3 (1,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)
γ_{G2}	1,5 (1,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)
γ_Q	1,5 (0,0 se il suo contributo aumenta la sicurezza)
ψ_0	coefficiente di combinazione dei carichi variabili.

Le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) per le strutture di legno sono:

- le verifiche di resistenza
- le verifiche di stabilità.

2.10.1. Verifiche di resistenza

A differenza dell'acciaio e del calcestruzzo armato le verifiche di resistenza per il legno si fanno con riferimento alle tensioni unitarie e non alle sollecitazioni sull'intera sezione. Per le verifiche di resistenza (SLU) le tensioni interne si possono calcolare nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e di una relazione lineare tra tensioni e deformazioni fino a rottura. Tale ipotesi di lavoro posta dalle norme (NTC 2008, paragrafo 4.4.8.1) semplifica molto l'aspetto numerico delle verifiche.

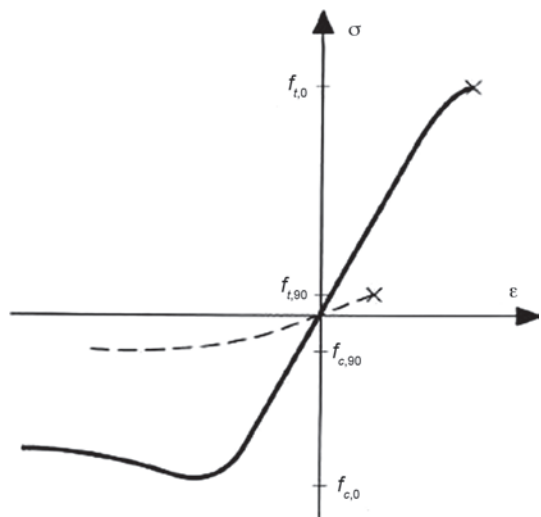


Figura 2.1
Prove a trazione su legno netto

Una prova a trazione-compressione, eseguita su un provino di legno netto parallelamente alle fibre, evidenzia che la rottura a trazione avviene con una tensione pari a 2 o 3 volte la rottura a compressione; inoltre, la rottura a trazione è di tipo fragile (sfilamento delle fibre) mentre la rottura a compressione avviene in modo duttile per instabilità delle fibre.

I difetti del legno strutturale e soprattutto i nodi e l'inclinazione delle fibre riducono drasticamente la resistenza a trazione e la rottura della sezione inflessa avviene dal lato delle trazioni senza poter sfruttare la duttilità del lato compresso.

Pertanto, nel modello di calcolo per la verifica alla resistenza delle strutture in legno è necessario individuare diverse resistenze a seconda del tipo di sollecitazione e, a causa dell'anisotropia del materiale, della direzione delle tensioni rispetto alla fibratura:

$f_{m,k}$	resistenza caratteristica a flessione
$f_{t,0,k}$	resistenza caratteristica a trazione parallela alla fibratura
$f_{t,90,k}$	resistenza caratteristica a trazione perpendicolare alla fibratura
$f_{c,0,k}$	resistenza caratteristica a compressione parallela alla fibratura
$f_{c,90,k}$	resistenza caratteristica a compressione perpendicolare alla fibratura
$f_{v,k}$	resistenza caratteristica a taglio.

Nei fogli di calcolo A1 e A2 sono riportati i valori delle resistenze caratteristiche per le varie classi di resistenza di legno massiccio e di legno lamellare.

Le resistenze di calcolo sono quelle definite con la relazione:

$$f_d = \frac{k_{mod} f_k}{\gamma_M}$$

dove

f_d	resistenza ultima di progetto
f_k	resistenza caratteristica suggerita dalla normativa
k_{mod}	coefficiente che considera la durata del carico e l'umidità
γ_M	coefficiente parziale di sicurezza del materiale (si veda la tabella 2.4.II).

Diversamente da altri materiali, per il legno le verifiche di resistenza sono condotte confrontando le tensioni di calcolo con le resistenze di calcolo nel rispetto della seguente relazione:

$$\frac{\sigma_d}{f_d} \leq 1$$

dove

σ_d	tensione di calcolo
f_d	resistenza di progetto.

Per la verifica a flessione di un elemento strutturale devono essere soddisfatte, per ogni sezione trasversale, entrambe le condizioni seguenti:

$$\frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,x,d}}{f_{m,x,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

per le quali si definiscono le grandezze:

- coefficiente di redistribuzione delle tensioni e della disomogeneità del materiale della sezione trasversale:

$$k_m \quad \begin{array}{l} 0,7 \text{ per sezioni trasversali rettangolari} \\ 1,0 \text{ per altre sezioni trasversali.} \end{array}$$

- resistenza di calcolo a flessione secondo l'asse x :

$$f_{m,x,d} = k_{\text{mod}} \frac{k_{h,x} f_{m,x,k}}{\gamma_M}$$

- resistenza di calcolo a flessione secondo l'asse y :

$$f_{m,y,d} = k_{\text{mod}} \frac{k_{h,y} f_{m,y,k}}{\gamma_M}$$

dove

$k_{h,x}, k_{h,y}$	sono i coefficienti di resistenza per l'altezza inflessa
$f_{m,x,k}, f_{m,y,k}$	sono le resistenze caratteristiche a flessione
k_{mod}	è il coefficiente che considera la durata del carico e l'umidità
γ_M	è il coefficiente parziale di sicurezza del materiale.

Le due condizioni di verifica per la flessione deviata individuano il dominio di resistenza sotto riportato, dove la parte di dominio oltre la linea rossa rappresenta il contributo alla resistenza per il coefficiente k_m di redistribuzione delle tensioni della sezione trasversale.

Per gli elementi inflessi deve essere inoltre verificata la stabilità allo svergolamento di trave (flessotorsionale), come illustrato nei capitoli successivi.