



Dario Flaccovio Editore

Dario Curlante

PROGETTARE STRUTTURE IN LEGNO LAMELLARE

Aggiornato al nuovo EC5 - UNI EN 1995-1-1:2014

[Scheda sul sito >](#)



Nozioni introduttive per la progettazione ✓
Progettazione e verifiche agli Stati Limite - Progettazione dei dettagli costruttivi ✓
Analisi sismica e controventature - Resistenza al fuoco ✓
Normativa di riferimento ✓

Dario Curlante

Progettare strutture in legno lamellare

AGGIORNATO AL NUOVO EC5 – UNI EN 1995-1-1:2014



Dario Flaccovio Editore

Dario Curlante

PROGETTARE STRUTTURE IN LEGNO LAMELLARE

ISBN 9788857903736

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: ottobre 2014

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2014

RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento è per Dario Flaccovio, una persona che stimo! Grazie alla sua fiducia ho potuto cogliere l'occasione di poter pubblicare questo libro.

Il secondo ringraziamento è per l'azienda in cui ho potuto acquisire le conoscenze e maturare l'esperienza nel settore di eccellenza del legno lamellare del gruppo Rubner: la Rubner Holzbau Sud S.p.a. di Calitri. In questa azienda ho avuto il privilegio di incontrare i colleghi ideali ed in rappresentanza di tutti cito l'ing. Giorgio Bignotti (direttore generale), l'arch. Roberto DeSantis (direttore commerciale), il geom. Daniele Cubelli (direttore di produzione) e l'ing. Hanno Oberhuber (amministratore delegato della Rubner Holzbau S.p.a. di Bressanone). Il terzo ringraziamento è per la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e supportato: una per tutti cito la più piccola, la nipotina Lucia!

L'ultimo ringraziamento è per chi pazientemente ha revisionato il testo di questo libro: l'ing. arch. Simona Tinelli – compagna di studi dalle superiori all'università, collega di lavoro e soprattutto compagna di vita!

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

1. Nozioni introduttive per la progettazione

1.1.	Il legno lamellare incollato	pag.	12
1.2.	Il materiale base, l'essenza	»	13
1.3.	Produzione del legno lamellare	»	16
1.3.1.	Controllo preliminare delle tavole	»	17
1.3.2.	Finger joint.....	»	18
1.3.3.	Preparazione delle lamelle e incollaggio	»	19
1.3.4.	Operazioni di finitura e lavorazioni	»	22
1.3.5.	Trattamento di finitura.....	»	24
1.4.	Prove di controllo sul legno lamellare prodotto	»	26
1.4.1.	Prova del giunto a pettine	»	26
1.4.2.	Prova di delaminazione	»	29
1.5.	Trasporto, montaggio e fasi esecutive	»	30
1.6.	Quadro normativo per il calcolo delle strutture in legno.....	»	35
1.7.	Robustezza.....	»	36
1.8.	Durabilità e manutenzione.....	»	37
1.8.1.	Funghi da carie e funghi che deturpano il legno.....	»	38
1.8.2.	Isotteri e coleotteri	»	40
1.8.3.	Durabilità naturale	»	41
1.8.4.	Trattamenti protettivi e protezione costruttiva	»	42
1.8.5.	La durabilità e la manutenzione secondo le NTC 2008.....	»	44

2. Progettazione e verifiche agli stati limite

2.1.	Classi di durata del carico.....	»	49
2.2.	Classi di servizio.....	»	50
2.3.	Progettazione e verifiche agli stati limite ultimi.....	»	50
2.4.	Elementi inflessi e instabilità di trave.....	»	51
2.5.	Elementi tesi	»	56

2.6. Tensoflessione	»	58
2.7. Trazione ortogonale alla fibratura	»	58
2.8. Elementi compressi e instabilità di colonna	»	59
2.9. Pressoflessione.....	»	62
2.10. Compressione ortogonale alla fibratura.....	»	63
2.11. Compressione inclinata rispetto alla fibratura	»	67
2.12. Taglio	»	68
2.13. Torsione.....	»	72
2.14. Combinazione di taglio e torsione	»	72
2.15. Travi rastremate	»	72
2.15.1. Travi a semplice rastremazione	»	73
2.15.2. Travi a doppia rastremazione (bifalda a intradosso dritto)....	»	74
2.16. Elementi curvi.....	»	75
2.17. Elementi curvi e rastremati.....	»	77
2.18. Progettazione e verifiche agli stati limite di esercizio	»	80
2.18.1. Stati limite di esercizio degli elementi inflessi	»	80
2.18.2. Deformabilità dei collegamenti	»	83

3. Tipologie strutturali e schemi statici

3.1. Strutture di copertura con travi semplicemente appoggiate	»	86
3.1.1. Verifiche agli SLU.....	»	87
3.1.2. Verifiche agli SLE	»	89
3.1.3. Considerazioni sul progetto e sui risultati	»	91
3.1.4. Approfondimenti sulle travi semplicemente appoggiate	»	91
3.2. Strutture di copertura con travi curve di grande luce	»	96
3.2.1. Verifiche dell'orditura secondaria	»	97
3.2.2. Considerazioni sul progetto	»	102
3.3. Strutture spingenti di copertura	»	103
3.3.1. Verifiche agli SLU.....	»	109
3.3.2. Considerazioni sul progetto e sui risultati	»	117
3.4. Sistemi a spinta eliminata	»	118
3.4.1. Aspetti generali.....	»	118
3.4.2. Verifiche agli SLU di una capriata	»	120
3.5. Cupole in legno lamellare.....	»	129

3.5.1.	Verifiche agli SLU.....	» 132
3.5.2.	Considerazioni sul progetto e sui risultati	» 145
 4. Progettazione dei dettagli costruttivi		
4.1.	Verifiche agli stati limite ultimi dei collegamenti	» 148
4.2.	Progettare con la ferramenta standard	» 148
4.2.1.	Collegamenti con viti a filettatura parziale.....	» 150
4.2.2.	Collegamenti con viti a doppia filettatura e a tutto filetto	» 153
4.2.3.	Calcolo dei mezzi d'unione a gambo cilindrico, bulloni e spinotti.....	» 154
4.2.3.1.	Resistenza a taglio nei collegamenti legno-legno....	» 157
4.2.3.2.	Resistenza a taglio nei collegamenti legno-acciaio .	» 159
4.2.3.3.	Calcolo della resistenza a taglio dei bulloni e degli spinotti.....	» 162
4.2.3.4.	Esempio di calcolo di un collegamento misto con bulloni e spinotti	» 164
4.2.4.	Collegamenti con chiodi	» 167
4.3.	Progettazione della ferramenta speciale	» 171
4.3.1.	Progettazione degli apparecchi di appoggio – vincoli cerniera	» 171
4.3.2.	Progettazione degli apparecchi di appoggio – vincoli carrello	» 174
4.3.3.	Cerniere di strutture spingenti	» 175
4.3.4.	Incastro al piede dei pilastri.....	» 178
4.3.5.	Vincoli interni, cerniere	» 181
4.3.6.	Vincoli interni, incastri	» 183
 5. Analisi sismica e controventature		
5.1.	Analisi sismica e normativa italiana	» 188
5.2.	Comportamento globalmente duttile	» 190
5.3.	Due esempi “estremi” di analisi sismica	» 192
5.3.1.	Copertura della palestra a Frigento (AV)	» 193
5.3.2.	Copertura della palestra a San Vito dei Normanni (BR)	» 202
5.4.	Analisi sismica di strutture “vecchie”	» 204

5.5. Dimensionamento delle controventature	» 210
5.5.1. Tipologie principali di controventamento	» 210
5.5.2. Principi di dimensionamento	» 212
5.5.3. Esempio pratico	» 213
 6. Resistenza al fuoco	
6.1. NTC 2008 e resistenza al fuoco.....	» 222
6.2. EC5 - Metodo analitico della sezione residua	» 223
6.3. Progetto e verifica al fuoco.....	» 225
6.4. Esempio di calcolo.....	» 227
6.5. Dettagli costruttivi nelle condizioni d'incendio	» 229
 NORMATIVA DI RIFERIMENTO E BIBLIOGRAFIA	» 231
SITOGRAFIA	» 232

Prefazione

Finalmente oggi in Italia il legno lamellare sta cominciando a ricevere le attenzioni e le considerazioni che merita.

Quando nel 2003, nel corso degli studi universitari, ho avuto il primo approccio con questo “giovane” materiale da costruzione ho subito intuito le sue potenzialità. Purtroppo però le informazioni che si riuscivano a reperire, in biblioteca e sul web, erano veramente minime. È stato nel 2005, quando ho cominciato a lavorare in un’azienda di produzione del legno lamellare, che ho avuto la conferma che queste sue potenzialità non fossero degnamente divulgate. Infatti, mentre per gli altri materiali strutturali erano disponibili normative e testi di grande importanza, il legno lamellare non era nemmeno contemplato nella normativa italiana. Ho dovuto cominciare a progettare le strutture in legno con una normativa tedesca del 1988 tradotta in italiano...

Oggi per fortuna la situazione è diversa: convegni, seminari, forum, riviste e libri parlano ampiamente del legno lamellare e questo materiale sta pian piano sconfiggendo i più infondati pregiudizi. I professionisti e gli utenti finali delle costruzioni sono attratti dai suoi innumerevoli pregi e anche le università italiane cominciano a diffonderne la cultura.

Questo libro nasce dalla personale esperienza nella progettazione e nel calcolo di strutture in legno lamellare e vuole essere un contributo alla letteratura tecnica del settore.

Il testo si rivolge agli studenti di ingegneria e di architettura; ai professionisti che si cimentano nella progettazione strutturale con questo materiale; ai professionisti già nel settore che possono trovare in questo libro motivo di spunto e di confronto; a tutti gli appassionati e curiosi che vogliono conoscere meglio il legno lamellare.

Il libro si struttura in sei capitoli:

- nel primo capitolo si espongono le *nozioni introduttive per la progettazione* e si affrontano gli aspetti generali e caratterizzanti del materiale: dalla produzione al trasporto e dal montaggio alla durabilità, presentando anche il quadro normativo italiano;
- nel secondo capitolo viene trattata la *progettazione e le verifiche agli stati limite*; partendo dalle normative e dai documenti tecnici, si descrive il metodo che è alla base del calcolo strutturale;

- nel terzo capitolo si entra nel “vivo” della progettazione presentando *le tipologie e gli schemi statici* spesso ricorrenti nelle strutture in legno lamellare. Ogni tipologia è corredata da esempi pratici di calcolo di costruzioni realmente realizzate;
- nel quarto capitolo si entra nel merito della *progettazione dei dettagli costruttivi* e si affronta il metodo di calcolo dei particolari. Ogni tipologia esposta è corredata da esempi pratici (spesso riferiti alle strutture analizzate nel capitolo precedente);
- nel quinto capitolo si affronta il tema dell’*analisi sismica e delle controventature*; vengono esposti i criteri di progettazione con esempi di calcolo riferiti a strutture realizzate;
- nel sesto capitolo è trattata la *resistenza al fuoco* del legno lamellare, in particolare è descritto il metodo di calcolo della *sezione residua* ed è presentato un esempio di calcolo.

Tutti gli argomenti trattati e gli esempi esposti hanno come fonti principali la normativa attualmente in vigore e l’esperienza dell’autore.

Vista la quantità di formule, di esempi e di calcoli presentati e per quanto il testo sia stato controllato più volte, non si può escludere che possano essere presenti delle “sviste”. È molto importante quindi che chi si cimenta in un calcolo reale faccia riferimento direttamente alla normativa, sfruttando e interpretando il metodo e l’esperienza messa a disposizione in questo libro.

Buona lettura!

Agosto 2014
Dario Curlante

1. Nozioni introduttive per la progettazione

La progettazione di una struttura comprende diversi aspetti che insieme determinano la riuscita della costruzione ed interagiscono spesso gli uni con gli altri.

Sicuramente i più evidenti sono il corretto dimensionamento degli elementi strutturali e dei dettagli costruttivi come anche la buona qualità della posa in opera e della produzione del materiale.

Ma quando si progetta col legno anche i concetti di robustezza, durabilità e manutenzione sono necessari alla riuscita della costruzione.

Pertanto nessuno di questi aspetti è trascurabile come nessuno di questi aspetti è più o meno importante.



- Dimensionamento e calcolo:
 - resistenza alle azioni ordinarie;
 - dettagli costruttivi;
 - resistenza al sisma;
 - resistenza al fuoco.
- Produzione e montaggio
- Robustezza e durabilità
- Prescrizioni d'uso e manutenzione

Figura 1.1. Inaugurazione di un luogo di culto con cupola in legno lamellare

Di conseguenza la progettazione di una struttura in legno lamellare non può prescindere da una sufficiente conoscenza delle caratteristiche del legno e del prodotto trasformato in lamellare.

1.1. Il legno lamellare incollato

Il legno lamellare è il prodotto di una ingegnerizzazione del legno resa necessaria per il superamento dei limiti del materiale base. Primo limite fra tutti quello della lunghezza delle travi per arrivare a coprire grandi luci. Infatti l'utilizzo diretto dei tronchi d'albero consente la realizzazione di elementi strutturali con le dimensioni che dipendono dal diametro e dalla lunghezza del tronco della pianta originaria. L'idea alla base del lamellare è invece l'impiego di tavole ricavate dai tronchi e giuntate in lunghezza e sovrapposte in altezza in modo da formare un fascio collaborante di lamelle.

L'invenzione del legno lamellare **incollato** così come lo conosciamo oggi risale al secolo scorso, ma la stessa intuizione di disporre una sequenza di tavole tenute insieme però da staffe e connessioni metalliche è stata sviluppata ed affrontata nel passato fino a farla risalire a *Leonardo da Vinci*.

L'introduzione delle colle strutturali ha poi consentito l'avvio del sistema di lamelle incollate capace di non pregiudicare le caratteristiche del legno ma addirittura di esaltarle. Infatti i difetti intrinseci del prodotto naturale, con questa tecnologia, possono essere controllati ed eliminati spingendo la qualità ed il profilo prestazionale ai livelli più alti. Proprio la definizione di un processo riproducibile e controllato consente il raggruppamento del legno lamellare in classi prestazionali di resistenza garantite che dipendono dalla qualità delle lamelle scelte e dalla loro combinazione nella composizione della sezione strutturale. Sono questi gli aspetti che interessano al progettista che oggi ha a disposizione un materiale sperimentato e prevedibile. Un materiale che conserva tutti i pregi del materiale base e che in più apre verso nuove frontiere la progettazione strutturale ed architettonica, potendo definire anche una forma agli elementi di legno. Infatti possono essere realizzati elementi curvi, rastremati a falde e, attraverso una adeguata progettazione, possono addirittura essere giuntati o combinati per moltiplicare le possibilità costruttive.

Il legno lamellare è l'unico prodotto che custodisce in sé una molteplice quantità di "qualità" che sono fondamentali per l'edilizia moderna, come:

- la resistenza meccanica, in quanto non necessita di specifici artifici per resistere efficacemente anche alla trazione e al taglio oltre che alla compressione;
- la leggerezza, che incide a partire dal trasporto, ai mezzi di sollevamento utilizzati nel montaggio, alle opere di fondazione fino all'esercizio della stessa struttura realizzata che avrà carichi permanenti ridotti;
- la velocità e la precisione di montaggio, proprie dei sistemi a secco;
- le prestazioni energetiche, con le caratteristiche bilanciate di trasmittanza e massa termica;
- le prestazioni igroscopiche, che consentono al materiale di regolare l'umidità negli ambienti, assorbendola o rilasciandola così da favorire un regime confortevole;
- la sostenibilità, in quanto è un materiale naturale e rinnovabile la cui produzione e trasformazione hanno un basso impatto energetico;

- l'ecocompatibilità, perché per produrlo il bilancio nell'ambiente vede l'assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera. Questo è dovuto al fatto che le piante in vita assorbono più anidride carbonica di quella immessa dal ciclo produttivo;
- e per ultimo, ma non meno importante, il legno lamellare possiede il fascino del legno che può restare "a vista" senza la necessità di onerose opere di finitura. Ha l'aspetto confortevole di un materiale tradizionale che ha seguito ed accompagnato l'evoluzione dell'uomo dalla creazione delle prime capanne per abitare, dei primi ponti per superare i confini e delle prime imbarcazioni per scoprire nuove terre.

1.2. Il materiale base, l'essenza

Secondo le EN 386 per la produzione di legno lamellare si possono prendere in considerazione soltanto le specie, o una miscela di specie, la cui idoneità è dimostrata. Nella maggior parte dei paesi europei sono disponibili le seguenti essenze considerate adatte:

- legno bianco europeo, abete (*Picea abies*, *Abies alba*);
- legno rosso europeo, pino silvestre (*Pinus sylvestris*);
- abete di Douglas o Douglasia costiera (*Pseudotsuga menziesii*).

In aggiunta sono state utilizzate per la produzione di legno lamellare anche le seguenti specie:

- Western Hemlock (*Tsuga heterophylla*, nativo della costa est del nord America);
- pino della Corsica e pino nero austriaco (*Pinus nigra*);
- larice (*Larix Decidua*);
- pino marittimo (*Pinus Pinaster*);
- pioppo (*Populus Robusta*, *Populus Alba*);
- pino radiata (*Pinus Radiata*);
- peccio di Sitka (*Picea Sitchensis*);
- cedro rosso americano dell'ovest (*Thuja Plicata*).

Ovviamente è da tenere in considerazione che alcune essenze legnose possono essere contemplate nella convenzione sul commercio internazionale delle specie protette e devono essere necessariamente escluse dai processi industriali.

I legni più utilizzati in Italia nella produzione a scala industriale sono sicuramente l'abete rosso, l'abete bianco e il larice. La scelta della specie più idonea alla particolare applicazione dipende dalle ragioni estetiche, dalla classe di resistenza che si vuole raggiungere ed anche dagli aspetti legati alla durabilità.



Figura 1.2. Tavola di larice con giunto a pettine



Figura 1.3. Tavola di abete con giunto a pettine

Per esempio il larice è da preferire rispetto all'abete per la realizzazione di elementi destinati a condizioni di maggiore usura e di maggiore rischio di attacchi biologici, poiché si dimostra maggiormente durabile. Così sarà da preferire il larice per il tavolato di calpestio posto all'esterno, per esempio di passerelle pedonali, o i dormienti a contatto con le fondazioni di strutture a pareti di legno. Mentre per le strutture in elevazione, di copertura e protette negli ambienti interni si preferirà l'abete. I profili prestazionali del legno lamellare sono normati dalla EN 1194 e dipendono dalle classi di resistenza delle tavole del materiale base che sono normate dalla UNI EN 338.

Il legno dolce di conifera è classificato con una sigla che indica il valore della resistenza caratteristica a flessione preceduta dalla lettera C (C18, C22, C24, ecc.).

Per il calcolo delle varie proprietà meccaniche del legno ci si riferisce a dei modelli matematici che sono basati sulla conoscenza della resistenza caratteristica a trazione e del modulo di elasticità media a trazione delle singole lamelle.

Per esempio nel caso del calcolo della resistenza caratteristica a flessione questa dovrà essere dimostrata con prove sui giunti delle lamelle, a partire dalla resistenza caratteristica di trazione, rispettando la relazione:

$$f_{m,j,k} \geq 8 + 1,4 f_{t,0,l,k} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Tabella 1.1. Classi di resistenza secondo le UNI EN 338:2009; sono indicate le sole classi di maggiore interesse. Alcuni valori riportati possono essere differenti da quelli indicati in altre versioni della medesima normativa

Legno dolce (di conifere)							
		C18	C22	C24	C30	C35	C40
Resistenze (in N/mm²)							
Flessione	$f_{m,k}$	18	22	24	30	35	40
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	11	13	14	18	21	24
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	18	20	21	23	25	26
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,2	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9
Taglio	$f_{v,k}$	3,4	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0
Moduli elastici (in kN/mm²)							
Medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	9	10	11	12	13	14
Caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	6,0	6,7	7,4	8,0	8,7	9,4
Medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,30	0,33	0,37	0,40	0,43	0,47
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,56	0,63	0,69	0,75	0,81	0,88
Massa volumica (in kg/m³)							
Massa volumica caratteristica	ρ_k	320	340	350	380	400	420
Massa volumica media	ρ_m	380	410	420	460	480	500

È da sottolineare che la massa volumica delle lamelle è una proprietà indicativa, in quanto la capacità di contenere acqua può variare anche fra piante della stessa specie.

L'attribuzione del profilo prestazionale ad una sezione in legno lamellare deve quindi avvenire a partire dalla classe di resistenza delle tavole impiegate. Questa attribuzione può essere automatica se si rispettano gli esempi di composizione delle tavole fornite in normativa oppure la si può calcolare e successivamente verificare con prove specifiche. Una prima distinzione viene fatta fra le sezioni ottenute con l'impiego di tavole caratterizzate dalla medesima classe di resistenza, dette *sezioni omogenee*, e le sezioni ottenute con tavole di diversa classe di resistenza, dette *sezioni combinate*.

Nella produzione di una sezione in legno lamellare, come si vedrà nel dettaglio in seguito, è infatti possibile impiegare nella stessa sezione anche diverse tipologie di lamelle per ottimizzare l'utilizzo del materiale.

Così per gli elementi inflessi si potranno posizionare le lamelle più resistenti sui lembi estremi della sezione, quello teso e quello compresso, mentre le restanti lamelle meno resistenti saranno disposte nella zona prossima all'asse neutro in cui le tensioni saranno minori.

Alcuni esempi di corrispondenza fra le proprietà del materiale base e le classi di resistenza del legno lamellare incollato sono riportati nella norma EN 1194 con la definizione delle classi normalizzate.

Per le sezioni omogenee si avrà:

- GL24h – con utilizzo di tavole di classe C24;
- GL28h – con utilizzo di tavole di classe C30;
- GL32h – con utilizzo di tavole di classe C40.

Per le sezioni combinate (lamelle esterne/lamelle interne) si avrà:

- GL24c – C24/C18;
- GL28c – C30/C24;
- GL32c – C40/C30.

Tabella 1.2. Classi di resistenza e valori caratteristici per il legno lamellare incollato omogeneo secondo UNI EN 1194

Classi di resistenza del legno lamellare		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistenze (in N/mm²)					
Flessione	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Compressione parallela	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Taglio	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Moduli elastici (in kN/mm²)					
Medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49
Modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Massa volumica (in kg/m³)					
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabella 1.3. Classi di resistenza e valori caratteristici per il legno lamellare incollato combinato secondo UNI EN 1194

Classi di resistenza del legno lamellare		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistenze (in N/mm²)					
Flessione	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,40	0,45	0,50
Compressione parallela	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3,0	3,3
Taglio	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,0	3,3
Moduli elastici (in kN/mm²)					
Medio parallelo alle fibre	$E_{0,g,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,g,mean}$	0,32	0,39	0,42	0,46
Modulo di taglio medio	$G_{g,mean}$	0,59	0,72	0,78	0,85
Massa volumica (in kg/m³)					
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

È da sottolineare che le proprietà flettenti (resistenza a flessione e moduli elastici paralleli alle fibre) nelle sezioni combinate restano invariate rispetto a quelle delle rispettive sezioni omogenee (per esempio GL24c e GL24h). Questo proprio perché si posizionano all'esterno della sezione le lamelle con maggiore resistenza e restano prossime all'asse neutro quelle più deboli consentendo praticamente alla sezione di inflettersi come se fosse omogenea.

Si può notare invece che le altre proprietà caratteristiche, come quelle di compressione e di trazione, sono influenzate anche dalle lamelle interne.

Infine sono da osservare le resistenze caratteristiche di compressione perpendicolare alla fibratura che, rispetto ad alcuni codici di progettazione, in questa normativa sono quasi dimezzate.

Questo al fine di tenere conto degli schiacciamenti localizzati nelle verifiche di resistenza degli appoggi.

1.3. Produzione del legno lamellare

Il legno lamellare incollato da quando è stato inventato ha visto il perfezionarsi dei processi di produzione al fine di ottimizzare le risorse, contenere i costi e incrementare le qualità del prodotto finito.

Il legno lamellare è ottenuto dalla composizione di lamelle o assi di legno, incollate di piatto parallelamente alle fibre.

Cosicché l'elemento conseguente sarà composto da un insieme di tavole incollate nelle sue due direzioni principali.

1.3.1. Controllo preliminare delle tavole

Ogni tavola deve essere sottoposta ad un processo di selezione e controllo per la rimozione dei difetti.



Figura 1.4. Individuazione dei difetti in una tavola destinata all'incollaggio di un elemento in legno lamellare; l'operatore segna la porzione che verrà scartata da una macchina dotata di controllo ottico



Figura 1.5. Scarto con difetti di una tavola

In ogni tavola deve essere anche controllato il contenuto di umidità. Infatti, affinché l'incollaggio possa avvenire con successo, il contenuto di umidità nel legno, oltre a non dover subire variazioni durante il processo produttivo, comunque deve essere contenuto entro determinati limiti (8%÷18%). Quindi prima di poterle incollare, le tavole saranno sottoposte ad una fase di essiccazione controllata che ne riduce gradualmente l'umidità per evitare fenomeni di deformazione. Ovviamente anche l'am-

biente in cui avviene l'incollaggio dovrà avere una umidità relativa dell'aria ed una temperatura costanti e monitorate.

Per questo è importante sottolineare che il legno raggiunge sempre un'umidità di equilibrio quando è esposto, per un tempo sufficiente, in un ambiente con umidità relativa e temperatura costanti. In particolare il legno raggiunge un contenuto di umidità del 12% quando è in equilibrio con l'aria al 65% di umidità relativa ed una temperatura di 20 °C.

Le EN 386, che definiscono i requisiti minimi di produzione, chiariscono che la temperatura minima all'interno dello stabilimento di produzione non deve mai essere inferiore a 15 °C e l'umidità relativa dell'aria non deve mai scendere sotto il 30%. È preferibile che rimanga sempre nel range dal 40% al 75%, se non per eccezioni che interessano un breve periodo di tempo durante la giornata. Per controllare le condizioni ambientali, sia la temperatura che l'umidità relativa presenti negli ambienti dello stabilimento sono contemporaneamente segnate ininterrottamente da un registratore automatico solitamente posto nei pressi delle zone d'incollaggio.

1.3.2. *Finger joint*

Ogni tavola ha una lunghezza limitata, di circa 400 cm, per le esigenze di stoccaggio e per i tagli resi necessari dall'eliminazione dei difetti.

Un primo incollaggio dovrà essere eseguito per ottenere le lamelle con la dimensione, in lunghezza, dell'elemento finale. Quindi tutte le tavole saranno giuntate una appresso all'altra.

Questa fase avviene attraverso il *finger joint*, o giunto a dita. Per realizzarlo le tavole vengono fresate sulle teste, conferendo loro la caratteristica forma di pettine, su cui si applica la colla, ed infine si passa ad incastrare a pressione in una sequenza continua. Ogni incollaggio dura poco più di due secondi, quindi il processo risulta abbastanza rapido e si può vedere scorrere una lamella senza soluzione di continuità fino al taglio che ne determina la lunghezza.



Figura 1.6. Sequenza dell'operazione d'incollaggio del *finger joint*

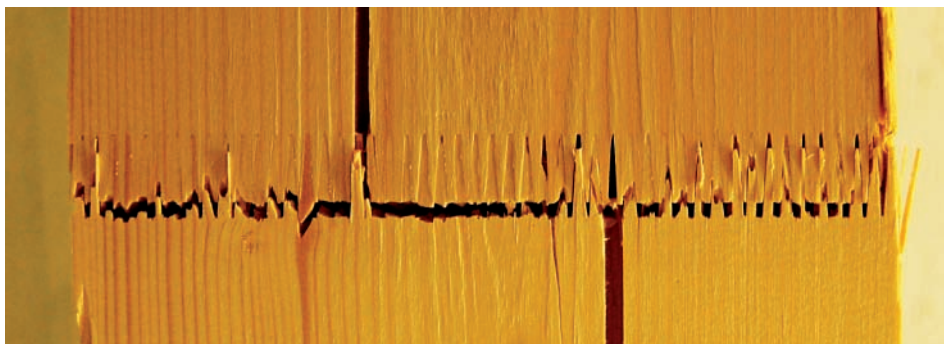


Figura 1.18. Prova del giunto a pettine di una lamella di Abete, la rottura è del tipo “S” perché il collasso avviene nel giunto con la rottura di taglio e il distacco dei denti

A questo carico massimo corrisponde una tensione di flessione che dipende dal modulo di resistenza della sezione e si calcola come segue:

$$f_m = M/W$$

in cui

M è il momento flettente nella sezione maggiormente sollecitata

$$W = B \cdot H^2/6$$

B è la base della lamella

H è l'altezza della lamella.

Osservando il modo di rottura del provino, questo può rientrare in una delle seguenti categorie:

- A collasso della lamella fuori dal giunto a pettine;
- G collasso del giunto con rottura di base;
- S collasso del giunto con rottura di taglio e distacco dei denti.

Nel caso più frequente di rottura di tipo S, completa o parziale nel giunto con distacco dei denti, occorre controllare il fianco dei denti e verificare lo strato di fibre di legno. È importante che la maggiore resistenza sia attribuibile all'adesivo.

La prova a flessione del giunto a pettine consente anche di conoscere il reale valore caratteristico della resistenza a flessione per la lamella testata. Questo valore ovviamente dovrà essere conforme a quello dichiarato per la lamella secondo le diverse classi definite nella UNI EN 338:

- C22 (L23) $f_{mk} = 22 \text{ N/mm}^2$

- C24 (L25) $f_{mk} = 24 \text{ N/mm}^2$
- C30 (L30) $f_{mk} = 30 \text{ N/mm}^2$
- C35 (L36) $f_{mk} = 36 \text{ N/mm}^2$
- C40 (L40) $f_{mk} = 40 \text{ N/mm}^2$

1.4.2. Prova di delaminazione

Il prelevamento dei campioni per la prova di delaminazione avviene per quantità di metri cubi prodotti ed è distribuito uniformemente nel tempo. I provini con lunghezza 90 mm dovranno essere prelevati direttamente dalle travi incollate, puliti e tagliati con precisione fino a raggiungere la dimensione finale di 75 mm di lunghezza. Sono dunque prismi con base ed altezza pari a quelli della trave a campione e lunghezza 75 mm.

Quando i provini sono pronti vengono pesati.

I campioni vengono sistemati a bagno in una cella con acqua a $10 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Verrà modificata la pressione nella cella fino a portarla da 70 a 85 kPa per 30 minuti e successivamente da 500 a 600 kPa fino a mantenere questa pressione per 120 minuti. Dopo questa operazione i provini saranno totalmente impregnati di acqua.

La fase successiva prevede di disporre i provini in un forno essiccatore ventilato, con le testate dei provini rivolte verso la corrente d'aria e ponendo attenzione affinché nella disposizione di più elementi non venga ostacolata la circolazione dell'aria.

La temperatura del forno raggiungerà i $65 \text{ }^\circ\text{C}$ fino a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ ed un'umidità di $8 \div 10\%$. L'essiccazione procederà per tutto il tempo necessario a far tornare i provini al peso iniziale.

Lo stress provocato nei campioni simula l'invecchiamento del materiale soggetto a



Figura 1.19. Campione sottoposto ad un ciclo della prova di delaminazione con esito positivo. Sono evidenti le fessure da ritiro, ma l'unica apertura sulla zona di colla (al centro fra le ultime lamelle a destra) è in corrispondenza di un nodo e non se ne tiene conto ai fini del superamento della prova

cicli di variazione di umidità concentrati in un breve periodo di tempo. Quindi il materiale può reagire con una delaminazione innaturale ed enfatizzata che dovrà essere contenuta in determinati limiti.

Ai fini della prova è considerata *delaminazione* l'apertura di fessure continue che può avvenire:

- all'interno dello strato di adesivo;
- nel contatto fra l'adesivo e la lamella connessa;
- all'interno del legno nei primi due strati prossimi all'adesivo.

In presenza di delaminazione saranno analizzate le fibre di legno intorno all'adesivo e calcolate le quote percentuali e massime di delaminazione. Se superano i valori massimi del 4% si dovrà eseguire un secondo ciclo in cui il risultato deve portare ad un valore massimo dell'8%.

1.5. Trasporto, montaggio e fasi esecutive

Quando si progetta col legno lamellare non sono rari i casi in cui i trasporti diventano *eccezionali*.

Il privilegio di essere leggero e la possibilità di realizzare pezzi interi che raggiungono i 40 m, spesso, vengono sfruttati nelle fasi progettuali.

Quando la lunghezza degli elementi è contenuta nei 7,50 m il trasporto può essere eseguito con semplici camion tipo *motrice*, con una portata utile di circa 50/100 q.li. Fino a 13,60 m con camion tipo *bilico* che hanno una portata utile di circa 28 ton. (ovvero circa 50 m³ di legno).



Figura 1.20. Carico su bilico con semirimorchio allungabile di travi in legno lamellare. Il cassone può essere allungato per raggiungere la dimensione delle travi caricate ed evitare sporgenze

Il limite nel trasporto normale non è solo in lunghezza ma anche in altezza (4,00 m) e larghezza (2,55 m).

Quando le dimensioni del carico superano questi limiti occorre passare ai trasporti speciali o addirittura eccezionali.

In particolare quando si progettano archi o travi troppo curve sarà fondamentale eseguire delle simulazioni del carico. Per esempio analizzando gli sporti degli elementi dal cassone o disporre le travi a S simulando i vari modi di orientare le curvature.



Figura 1.21. Trasporto eccezionale da 40 m di travi in legno lamellare

Se in un progetto si prevede un trasporto eccezionale devono essere studiati anche tutti i possibili percorsi stradali ed in alcuni casi può rendersi necessario intervenire su elementi di ostacolo lungo il percorso.

La maggior parte delle indagini viene svolta direttamente dal trasportatore che effettuerà i necessari sopralluoghi per valutare la fattibilità del viaggio. Sarà del trasportatore la responsabilità di dotarsi di tutti i permessi necessari e ottenere l'eventuale scorta tecnica o di polizia stradale.



Figura 1.22. Trasporto eccezionale di travi bifalda curve in legno lamellare. Il cuneo in sommità delle travi è stato rimosso per consentire la trasportabilità e verrà ripristinato in cantiere

In base alla sagoma, alla massa e alla sistemazione del carico ed in base al tipo di strade presenti nel tragitto è definito nel *Disciplinare per le scorte tecniche ai veicoli eccezionali ed ai trasporti in condizioni di eccezionalità* il numero di macchine ed il tipo di scorta da avere in dotazione. Come anche l'eventuale necessità di viaggiare durante la notte piuttosto che di giorno.

Per poter rendere l'idea, anche il periodo dell'anno può giocare sulla combinazione dei fattori influenti. Per esempio alcune tratte stradali possono essere chiuse ai trasporti eccezionali nei periodi di maggiore traffico.



Figura 1.23. Trasporto eccezionale di travi in legno lamellare da 34 m, in transito all'interno di un paese per raggiungere il cantiere

Il trasportatore dovrà dichiarare tutte le misure del carico e i pesi, ma soprattutto la compatibilità del trasporto con il percorso, perché non si possono ammettere imprevisti che sicuramente bloccherebbero il traffico con tutti i disagi annessi. Certamente già nelle fasi preliminari del progetto la consapevolezza del progettista dei limiti oggettivi della trasportabilità riduce le sorprese in fase esecutiva. È infatti spiacevole dover attribuire agli “imprevisti” la necessità di tagliare e di giuntare gli elementi che in principio erano stati pensati interi ed andare in variante ad un progetto ormai esecutivo.

La fase del *piano di carico* assume un ruolo cruciale che può condizionare, rallentandola, la fase di scarico. Per piano di carico si intende il posizionamento nel camion delle travature in un ordine



Figura 1.24. Fase di scarico in cantiere eseguita con autogrù da 80 ton

vento sono quelle che in questi casi possono compromettere la tempistica del cantiere sospendendo le operazioni di montaggio fino a quando la velocità del vento non rientra nei limiti di sicurezza.



Figura 1.26. Varo di un'intera campata preassemblata in cantiere. L'arco alto 8 m, a spinta eliminata dalla catena in legno, non poteva chiaramente essere trasportato. È inoltre evidente che montare l'orditura principale e secondaria in quota sarebbe stato molto più impegnativo e meno sicuro per gli operatori. Peso 25 ton. Area in pianta 330 m². Lunghezza in pianta 46 m

Inoltre, soprattutto quando si opera su telai, reticolari o strutture ingombranti, deve essere prestata la massima attenzione nella fase in cui questi vengono innalzati dalla posizione orizzontale a quella verticale perché devono essere evitate le torsioni e le sovrassollecitazioni sugli elementi stessi e sulle connessioni.

Se sono previsti e indispensabili, anche i preassemblaggi in cantiere devono essere studiati perché questi possono incidere in maniera significativa sui tempi di posa. Deve essere quindi individuata un'area per il preassemblaggio in cantiere. Spesso, nel caso di grandi coperture, questa zona coincide con l'ultimo piano della struttura da coprire cercando di disporre gli elementi nella proiezione della posizione finale in maniera da eseguire solo tiri verticali ed evitare spostamenti orizzontali. In questo caso si dovrà tenere conto dell'ingombro delle parti già montate che non deve ostacolare il varo degli ultimi elementi.

A seconda anche dei mezzi a disposizione dell'installatore e delle sue capacità, ma anche della dimensione del lavoro, deve essere ottimizzata la complessità dei dettagli costruttivi e delle connessioni. Spesso proprio da un posatore di considerevole esperienza possono nascere, insieme al progettista, soluzioni di grande efficacia.

Il vero successo di una grande realizzazione può essere dunque raggiunto solo dopo numerosi incontri fra progettista, trasportatore, posatore e gruista.

1.6. Quadro normativo per il calcolo delle strutture in legno

Le norme tecniche per le costruzioni, dapprima con la versione NTC 2005 e poi con la successiva versione pubblicata col D.M. 14 gennaio 2008 (NTC 2008), si aprono alle costruzioni di legno che per la prima volta vengono normate in Italia.

Prima noi tecnici italiani dovevamo rivolgerci a normative straniere come quella tedesca, la DIN 1052.

In particolare la versione dell'aprile 1988, descrive chiaramente tutti gli aspetti da considerare per eseguire un progetto e un calcolo di una struttura in legno lamellare. Questa normativa è stata un riferimento che ha formato i progettisti determinando metodi e soluzioni "standard" ormai collaudati nel tempo da costruzioni che oggi fanno la storia dell'architettura in legno.

Le DIN 1052-88 erano molto semplici da applicare, soprattutto perché utilizzavano il metodo delle *tensioni ammissibili*. La semplicità è un fattore che permette un controllo manuale diretto sulle attività di progetto e verifica.

È per questi motivi che il tecnico formato da questa normativa, pur progettando con i moderni criteri di calcolo, può contare su uno strumento di controllo molto spesso utile ed immediato.

L'evoluzione degli strumenti di calcolo, insieme alla maggiore sensibilità verso la più complessa concezione strutturale, ha portato a una corrispettiva variazione del metodo. Le NTC 2008 normano il legno alla pari di tutti gli altri materiali e lo analizzano nel dettaglio illustrando i principi fondamentali e tutti i parametri utili alla progettazione. Questa normativa esclude l'utilizzo del metodo delle tensioni ammissibili, se non per particolari casi in zone a bassissimo rischio sismico.

È proprio l'atteggiamento alle problematiche del sisma, con la conseguente maggiore attenzione al comportamento "globalmente duttile" di una struttura, che caratterizza il nuovo approccio normativo.

Quindi la valutazione della sicurezza deve essere svolta secondo il metodo degli stati limite. In particolare, i requisiti di resistenza, rigidità, funzionalità e robustezza potranno essere garantiti verificando gli stati limite ultimi e gli stati limite di esercizio della struttura, dei singoli componenti strutturali e dei collegamenti.

Tuttavia le NTC 2008, pur definendo i parametri ed i coefficienti da utilizzare nei calcoli, non entrano nel merito delle procedure di calcolo e non forniscono tutte le informazioni necessarie per effettuare una progettazione strutturale completa.

Ed anche la successiva circolare esplicativa n. 617 del 02 febbraio 2009, pubblicata nella gazzetta ufficiale del 26 febbraio 2009, chiarisce alcuni concetti ma lascia aperti molti argomenti e rimanda spesso a normative di comprovata validità o, più direttamente, agli eurocodici.

Noi tecnici italiani, ad integrazione delle NTC 2008, oggi abbiamo a disposizione l'Eurocodice 5 con l'ultima versione, per ora in lingua inglese, UNI EN 1995-1-1:2014 entrata in vigore dal 17 luglio 2014. Inoltre ulteriori supporti di comprovata validità sono il documento tecnico 206/2007 del CNR, le norme tedesche DIN 1052 con la versione dell'agosto 2008 e poi ancora la normativa svizzera SIA 265:2003.

Tutti questi riferimenti non si discostano sensibilmente fra di loro nel contenuto e conoscerli e consultarli tutti può aiutare a comprendere meglio gli argomenti. Comunque è rimandata alla sensibilità del progettista, che ne sarà anche responsabile, la scelta dei riferimenti e dei più opportuni metodi di calcolo.

In ogni caso è esplicitamente richiesto che venga garantito un livello di sicurezza non inferiore a quello previsto nelle NTC 2008.

Per esempio il coefficiente parziale γ_M per le proprietà del materiale per il legno lamellare incollato, secondo i diversi riferimenti normativi citati, è:

- NTC 2008 $\gamma_M = 1,45$;
- DT 206/2007 $\gamma_M = 1,25$;
- DIN 1052-August2008 $\gamma_M = 1,30$;
- UNI EN 1995-1-1:2014 $\gamma_M = 1,25$.

Nella progettazione strutturale in Italia si dovrà assumere il valore $\gamma_M = 1,45$ anche se il riferimento normativo, per la specifica operazione di calcolo, non è l'NTC 2008 e indica un valore inferiore del γ_M .

1.7. Robustezza

Al concetto di robustezza, l'NTC 2008 dedica un paragrafo in cui si elencano i provvedimenti costruttivi e le scelte progettuali indispensabili al raggiungimento dei requisiti di robustezza.

Tale è l'importanza di questo concetto che nella circolare del 2009 questo elenco viene ulteriormente integrato.

I provvedimenti da adottare saranno atti a diminuire la sensibilità della struttura nei confronti delle azioni eccezionali come per esempio sisma e fuoco.

Molti aspetti riguardano l'impegno che deve assumere il progettista per massimizzare il comportamento globalmente duttile della struttura, in quanto non ci si può affidare direttamente al materiale che per sua natura ha un comportamento fragile.

In altri termini il legno, soprattutto quello secco per uso strutturale, si può deformare molto ma al raggiungimento del limite elastico collassa senza riserva di resistenza. Quindi occorre prestare la massima attenzione nella progettazione dei collegamenti metallici perché saranno loro, con la propria duttilità, a garantire anche un ottimo livello di duttilità globale.

Ma il primo aspetto elencato è particolarmente caratterizzante per le proprietà del materiale e riguarda la protezione della struttura e dei suoi elementi componenti dall'umidità.

Nei confronti della flessione le resistenze caratteristiche del materiale non cambiano se la sezione è omogenea o combinata, questo perché la più alta resistenza del materiale viene concentrata nelle due estremità in cui le sollecitazioni sono maggiori. Il classico diagramma bitriangolare delle tensioni (figura 2.2) mostra che la zona intorno all'asse neutro è quella meno sollecitata. Quindi, nei confronti della flessione, l'utilizzo di lamelle di classe inferiore nella parte centrale non influenza il funzionamento globale della sezione.

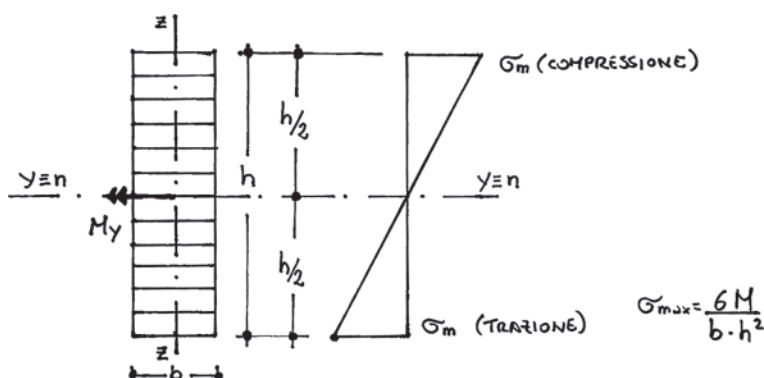


Figura 2.2. Diagramma a farfalla delle tensioni in una sezione rettangolare soggetta a flessione retta e calcolo della tensione massima con la formula di Navier applicata ad una sezione rettangolare

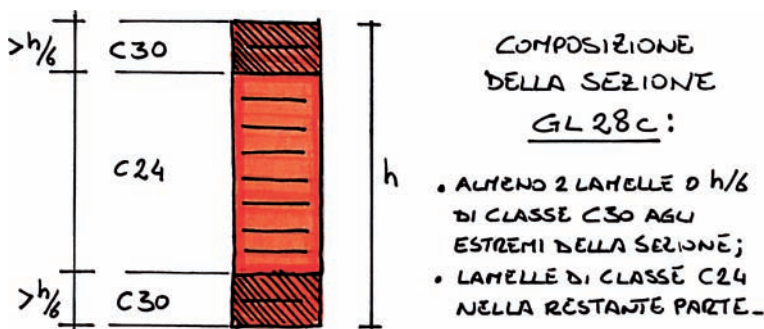


Figura 2.3. Esempio di composizione di una sezione rettangolare GL28c. Agli estremi devono essere poste almeno due lamelle di classe superiore o comunque un numero sufficiente per raggiungere un sesto dell'altezza totale

Negli elementi inflessi occorre inoltre verificare l'instabilità di trave affinché il momento flettente agente sull'asse forte y (coppia attorno all'asse y , figura 2.2) non provochi svergolamenti.

L'Eurocodice 5 descrive in maniera pratica un procedimento di calcolo che può essere seguito nelle condizioni più ricorrenti e che di seguito verrà esposto.

Le travi in cui questa verifica risulta più impegnativa sono quelle con maggiore snellezza nei confronti dell'instabilità flessio-torsionale. Pertanto la resistenza di calcolo a flessione subisce una riduzione, attraverso il coefficiente $k_{crit,m}$, per tenere conto dello sbandamento laterale. La condizione di verifica, nel caso in cui sia presente il solo momento M_y , agente intorno all'asse forte y , risulterà:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit,m} \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

in cui

$\sigma_{m,y,d}$ è la tensione di calcolo massima per flessione

$f_{m,d}$ è la resistenza di calcolo a flessione

$k_{crit,m}$ è il coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità di trave.

Il valore del coefficiente $k_{crit,m}$ è calcolato a partire dalla snellezza relativa di trave nelle tre condizioni:

$$k_{crit,m} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{se } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,40 \\ 1 / \lambda_{rel,m}^2 & \text{se } 1,40 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

nelle quali:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad \text{è la snellezza relativa di trave}$$

$f_{m,k}$ è la resistenza caratteristica a flessione

$\sigma_{m,crit}$ è la tensione critica per flessione calcolata secondo la teoria classica della stabilità:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y}$$

con:

W_y modulo di resistenza a flessione attorno all'asse forte y ;

$M_{y,crit}$ momento critico per instabilità flessio-torsionale attorno all'asse y ottenibile dalla relazione:

$$M_{y,crit} = \frac{\pi}{\ell_{eff}} \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}$$

per ottimizzare la sezione di una trave di grandi dimensioni, dopo averla dimensionata col momento flettente, occorrerà posizionare dei ritegni torsionali intermedi atti a limitare la lunghezza efficace. In questo modo il coefficiente $k_{crit,m}$ può essere contenuto con valori più prossimi all'unità e può essere meglio sfruttato il materiale. Solitamente, nelle grandi coperture, i ritegni coincidono con i nodi dei puntoni delle controventature di falda, per cui alla stessa controventatura è affidato il compito di assorbire lo sbandamento delle travi principali. Si può quindi affermare che nei confronti dello sbandamento in verticale (sull'asse forte della trave) funziona la trave con la sua sezione rettangolare orientata verticalmente, mentre in orizzontale (sull'asse debole della trave) agisce la controventatura ed in questo modo interagiscono e si completano i due sistemi. L'Eurocodice 5 specifica che il $k_{crit,m}$ può essere posto pari ad 1 quando sono applicati degli accorgimenti che impediscano lo spostamento laterale del lato compresso per tutta la lunghezza dell'elemento e che impediscano anche la rotazione torsionale agli appoggi. Come si vedrà nel seguito, i concetti e le formule dell'instabilità di trave si ripresentano nelle situazioni in cui la flessione è combinata con altri stati di sollecitazione. In particolare quando in un elemento è contemporaneamente presente sia la flessione che la compressione, entrambe le sollecitazioni possono generare delle instabilità e gli effetti di tutte e due le sollecitazioni dovranno essere considerati.

2.5. Elementi tesi

Gli elementi resistenti a trazione centrata devono essere verificati secondo la seguente condizione:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

in cui

$\sigma_{t,0,d}$ è la tensione di calcolo a trazione parallela alla fibratura

$f_{t,0,d}$ è la resistenza di calcolo a trazione parallela alla fibratura.

Considerando che N_d è lo sforzo di trazione di calcolo nell'elemento e A_n è l'area netta resistente a trazione allora si avrà:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_n} [\text{N/mm}^2]$$

e la verifica potrà essere riscritta nel seguente modo:

$$\frac{N_d}{A_n} / f_{t,0,d} \leq 1$$

Come si è visto per la flessione, anche la resistenza a trazione può essere incrementata tenendo conto delle dimensioni della sezione attraverso il coefficiente correttivo k_h . Quindi se sia la base che l'altezza dell'elemento progettato sono contenute nelle dimensioni di 600 mm anche in questo caso il fattore correttivo potrà incrementarne la resistenza fino al 10%. Per quanto riguarda la classe di resistenza dell'elemento c'è la possibilità di scegliere fra una sezione omogenea ed una combinata. Nel caso degli elementi tesi è però preferibile utilizzare sempre le sezioni omogenee poiché tutte le lamelle sono sottoposte alle azioni assiali e quindi lavorano nello stesso modo. Anche il momento flettente, dovuto alle piccole eccentricità, generalmente non può giustificare la scelta della sezione combinata.

Tabella 2.3. Classi di resistenza e valori caratteristici di trazione parallela per il legno lamellare incollato secondo UNI EN 1194

Classi di resistenza del legno lamellare		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h
Resistenze (in N/mm²)					
Trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
Classi di resistenza del legno lamellare		GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Resistenze (in N/mm²)					
Trazione parallela	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5

Un elemento in legno sollecitato a trazione avrà dei collegamenti di testa atti a trasmettere lo sforzo assiale. La presenza di questi collegamenti disturba la sezione trasversale attraverso degli indebolimenti dovuti ai fori per i connettori ed alle eventuali fresature per l'inserimento delle lame interne. La riduzione di sezione da parte dei fori dei bulloni potrebbe essere trascurabile nelle sezioni compresse, in quanto la presenza dei connettori assicurerebbe una continuità del materiale nel passaggio degli sforzi. Quando si è in presenza di trazione, vista anche la delicatezza dello stato tensionale che non consente riserve di resistenza, è bene non ammettere alcuna eccezione e valutare approfonditamente l'area netta da sottoporre a verifica.

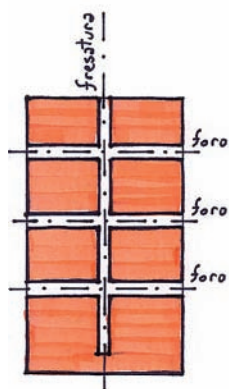


Figura 2.4
Esempio di una sezione ridotta dalle lavorazioni di testa nella catena in legno lamellare di una capriata

2.6. Tensoflessione

L'azione di trazione può non essere sempre centrata, o per condizioni di vincolo eccentrico o perché esiste un piccolo momento flettente dovuto semplicemente al peso proprio, ed in questi casi gli elementi progettati a trazione eccentrica devono essere verificati soddisfacendo la seguente condizione:

$$\frac{N_d}{A_n} / f_{t,0,d} + \frac{M_d}{W_n} / f_{m,d} \leq 1$$

In cui M_d è il momento flettente e W_n è il modulo di resistenza netto della sezione che tiene conto degli eventuali indebolimenti $f_{m,d}$ è la resistenza di calcolo a flessione.

Nel caso più classico della presenza di momento flettente dovuto al solo peso proprio della catena, questo è nullo sul vincolo indebolito dell'appoggio, mentre risulta massimo dove la sezione è "piena" per cui non è determinante per la verifica l'indebolimento della sezione. Tuttavia nelle catene di grande luce, divise in più elementi, possono esserci dei collegamenti intermedi che contengono entrambe le sollecitazioni in una sezione indebolita dal collegamento stesso ma in questi punti è preferibile inserire dei pendini metallici che "appendono" la catena ai puntoni superiori al fine di contenerne la deformazione portando quindi la condizione di verifica al caso precedente del momento nullo sul vincolo indebolito.

Si possono presentare anche condizioni più rare in cui, per scelta del progettista, le catene o altri elementi tesi svolgono pure la funzione di trave, o viceversa, e più genericamente le condizioni di verifica da soddisfare sono:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Non si deve trascurare che occorre comunque verificare anche le condizioni di instabilità di trave attraverso l'inserimento del coefficiente $k_{crit,m}$ come moltiplicatore della resistenza di calcolo a flessione relativa al solo asse forte y.

2.7. Trazione ortogonale alla fibratura

Il legno lamellare è un materiale che deve essere considerato ortotropo ed è quindi un materiale che non possiede la stessa resistenza nelle sue direzioni principali. Quella che si è vista in precedenza è la trazione parallela alla fibratura, o parallela alle lamelle. Ben diverso è il comportamento del legno alla trazione ortogonale. Infatti in questa direzione la sua resistenza si riduce di circa quaranta volte.

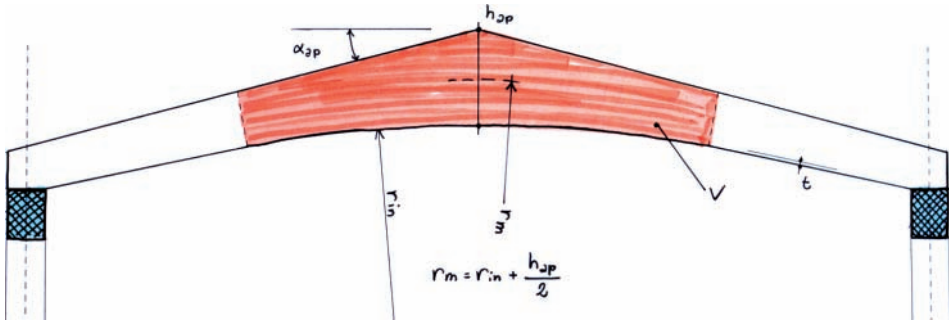


Figura 2.21. Schema di trave a falde inclinate e centinata

Per quanto riguarda la verifica a flessione, la relazione da soddisfare è la seguente:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r f_{m,d}$$

in cui la tensione di flessione $\sigma_{m,d}$ deve essere calcolata tenendo in conto attraverso il coefficiente k_ℓ , che la zona di colmo è appunto sia rastremata che curva:

$$\sigma_{m,d} = k_\ell \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}$$

Quindi la verifica può essere riscritta come segue:

$$k_\ell \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} \leq k_r f_{m,d}$$

con k_ℓ che dipende dalla relazione di quattro coefficienti k_i col rapporto dell'altezza della trave all'apice ed il suo raggio misurato sull'asse neutro della sezione di colmo ($r_m = r_{in} + 0,5h_{ap}$):

$$k_\ell = k_1 + k_2 \left(\frac{h_{ap}}{r_m} \right) + k_3 \left(\frac{h_{ap}}{r_m} \right)^2 + k_4 \left(\frac{h_{ap}}{r_m} \right)^3$$

in cui i quattro coefficienti k_i assumono i seguenti valori dipendenti dall'angolo di rastremazione α :

$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha + 5,4 \tan^2 \alpha$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha$$

$$k_3 = 0,60 + 8,3 \tan \alpha - 7,8 \tan^2 \alpha$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha$$

Mentre il k_r , già incontrato nelle travi curve, tiene conto solo del raggio di curvatura minimo, quello interno r_{in} , e dello spessore delle lamelle utilizzate, t :

$$k_r = 1 \quad \text{se} \quad \frac{r_{in}}{t} \geq 240$$

$$k_r = 0,76 + 0,001 \frac{r_{in}}{t} \quad \text{se} \quad \frac{r_{in}}{t} < 240$$

Per quanto riguarda le verifiche della trazione ortogonale alla fibratura, dovrà essere soddisfatta la seguente relazione:

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} \cdot k_{Vol} \cdot f_{t,90,d}$$

in cui:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2}$$

nella quale:

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h_{ap}}{r_m} \right) + k_7 \left(\frac{h_{ap}}{r_m} \right)^2$$

$$k_5 = 0,20 \tan \alpha$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha + 2,6 \tan^2 \alpha$$

$$k_7 = 2,1 \tan \alpha - 4 \tan^2 \alpha$$

Il k_{dis} da considerare per le travi centinate e rastremate è $k_{dis} = 1,7$ ed il k_{Vol} :

$$k_{Vol} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.2}$$

V_0 è il volume di riferimento pari a $0,01 \text{ m}^3$

V è il volume della zona d'apice curva e rastremata espresso in m^3 ed assunto al massimo pari ai $2/3$ del volume totale della trave V_b .

Le travi curve e le travi bifalda ad intradosso dritto, viste nei punti precedenti, sono due casi particolari e semplici di questi elementi più complessi. Infatti la prima tipologia ha l'angolo di rastremazione $\alpha = 0^\circ$ e la seconda tipologia ha un raggio d'intradosso $r_{in} = \infty$.

Infatti sostituendo questi valori nelle formule delle travi a doppia falda ad intradosso curvo si ricavano le formule ridotte riportate nei punti precedenti.

Infine, se sono contemporaneamente presenti le tensioni di trazione ortogonale alla fibratura e le tensioni di taglio dovrà essere verificata anche la seguente espressione, somma della verifica a taglio e di quella a trazione ortogonale:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{Vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1$$

2.18. Progettazione e verifiche agli stati limite di esercizio

La progettazione delle strutture in legno lamellare nei confronti degli stati limite di esercizio deve essere svolta tenendo in considerazione il comportamento reologico del materiale nei confronti dell'umidità e delle condizioni di carico.

Le deformazioni degli elementi lignei sono infatti influenzate dalla classe di servizio assegnata e dalla durata del carico. Quindi se è maggiore l'umidità presente nel materiale e se è più lunga la durata del carico allora le deformazioni degli elementi saranno più grandi.

Inoltre, in generale, devono essere valutate anche le deformazioni dei collegamenti. Esse possono incidere anche in maniera significativa sul risultato quando, in strutture articolate, questi scorrimenti si sommano fra di loro e alla deformazione degli elementi. Deve essere quindi verificato che le deformazioni complessive siano compatibili con l'esercizio della struttura.

2.18.1. Stati limite di esercizio degli elementi inflessi

Le condizioni da verificare negli elementi inflessi sono determinate dal controllo delle deformazioni provocate applicando determinate combinazioni di carico alla strut-

tura. Occorre considerare il comportamento reologico del materiale e devono essere valutate sia le deformazioni istantanee che quelle a lungo termine. La deformazione finale sarà quindi valutata contando il contributo di entrambe.

Le deformazioni istantanee si calcolano utilizzando i valori medi dei moduli elastici ed il valore istantaneo del modulo di scorrimento nelle unioni. Le deformazioni a lungo termine si possono calcolare utilizzando valori ridotti, di $1/(1 + k_{def})$, dei valori medi dei moduli elastici e valori ridotti allo stesso modo dei moduli di scorrimento nelle unioni.

Inoltre la deformazione istantanea si calcola con riferimento alla combinazione di carico rara, mentre la deformazione a lungo termine si calcola con riferimento alla condizione di carico quasi permanente.

Infine la deformazione finale può essere calcolata sommando alla deformazione a lungo termine *la deformazione istantanea dovuta alla sola aliquota mancante, nella combinazione quasi permanente, del carico accidentale prevalente* (DT 206/2007 del CNR).

In via semplificata la deformazione finale, u_{fin} , può essere anche calcolata come il risultato della somma di una deformazione iniziale (o istantanea), u_{in} , con una deformazione differita, u_{dif} :

$$u_{fin} = u_{in} + u_{dif}$$

in cui la deformazione iniziale deve essere calcolata direttamente applicando la combinazione di carico rara alla struttura:

$$G_1 + G_2 + Q_1 + \sum \psi_{0,i} \cdot Q_i \longrightarrow u_{in}$$

La deformazione differita deve essere calcolata a partire dalla deformazione istantanea desunta applicando alla struttura la combinazione di carico quasi permanente, u'_{in} , poi moltiplicata per il k_{def} (tabella 1.7):

$$G_1 + G_2 + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \longrightarrow u'_{in} \longrightarrow u_{dif} = u'_{in} \cdot k_{def}$$

In definitiva le combinazioni di carico da applicare per il calcolo delle deformazioni sono le seguenti:

- per il calcolo della freccia iniziale u_{in} :

$$G_1 + G_2 + Q_1 + \sum \psi_{0,i} \cdot Q_i$$

- per il calcolo della freccia finale u_{fin} :

$$(1+k_{def}) \cdot (G_1 + G_2) + (1+\psi_{2,i}k_{def}) \cdot Q_1 + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i}k_{def}) \cdot Q_i$$

Se è prevista una controfreccia, u_0 , questa è da sottrarre alla freccia finale ai fini delle verifiche. Quindi la freccia netta finale, $u_{net,fin}$, è data dalla relazione:

$$u_{net,fin} = u_{fin} - u_0$$

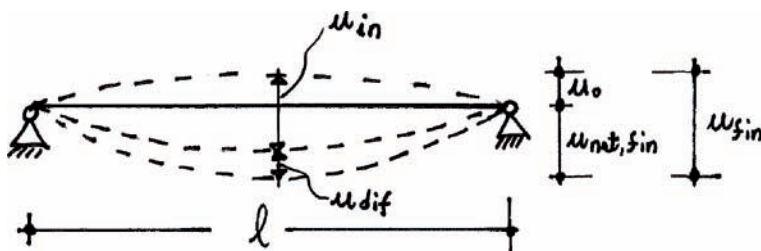


Figura 2.22. Schema delle deformazioni in una trave con due appoggi

Il documento tecnico 206/2007 del CNR raccomanda di non superare i seguenti limiti negli elementi inflessi:

$u_{in} \leq L / 300$ per la freccia istantanea calcolata con la combinazione di carico rara;

$u_{fin} \leq L / 200$ per la freccia finale;

$u_{net,fin} \leq L / 250$ per la freccia netta finale.

Il simbolo L rappresenta la distanza fra i due appoggi dell'elemento inflesso o il doppio della lunghezza degli sbalzi.

Per completezza, nella tabella 2.7, si riportano anche gli esempi dei limiti di deformazione per gli elementi inflessi riportati nell'Eurocodice 5.

Tabella 2.7. Limiti di deformazione per gli elementi inflessi – Eurocodice 5, par. 7.2 Limiting values for deflections of beams

	u_{in}	$u_{net,fin}$	u_{fin}
Travi con due appoggi	da $\ell/300$ a $\ell/500$	da $\ell/250$ a $\ell/350$	da $\ell/150$ a $\ell/300$
Sbalzi	da $\ell_{sb}/150$ a $\ell_{sb}/250$	da $\ell_{sb}/125$ a $\ell_{sb}/175$	da $\ell_{sb}/75$ a $\ell_{sb}/150$

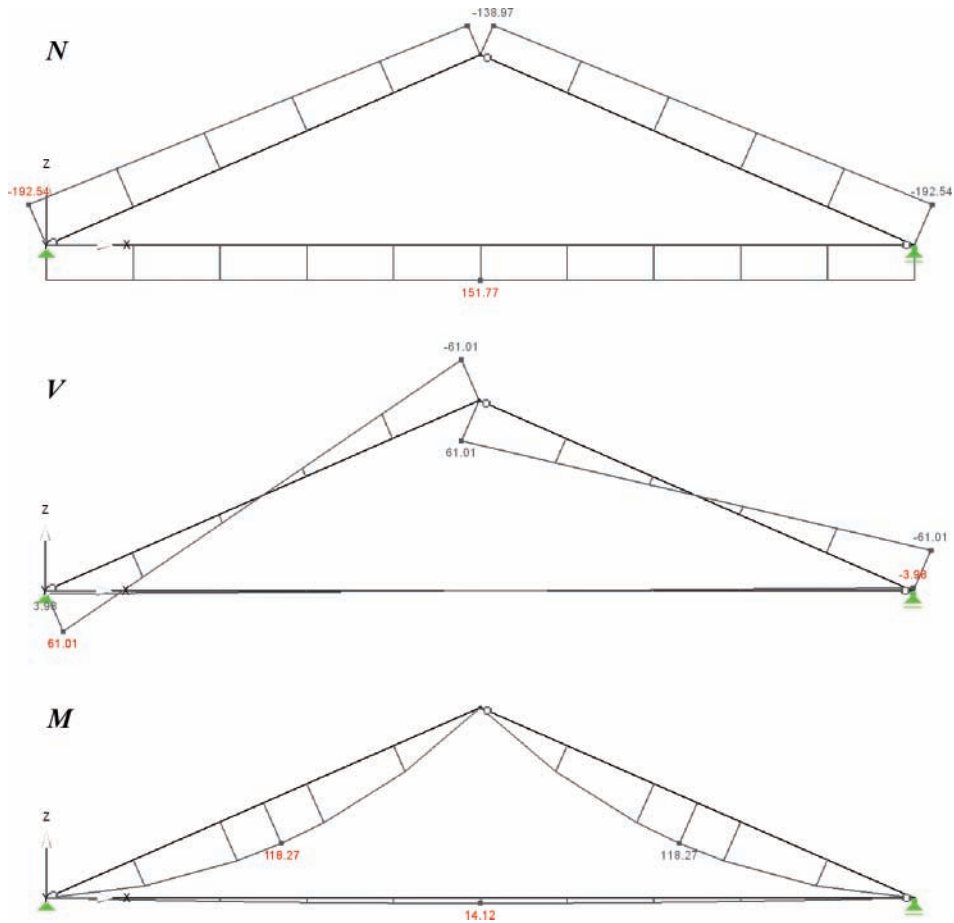


Figura 3.38. Caratteristiche della sollecitazione ottenute con la combinazione di carico agli SLU (1,3G + 1,5S)

Le massime tensioni, per la compressione e per la flessione, all'interno dei puntoni risultano quindi:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{165.760 \text{ N}}{200 \text{ mm} \cdot 836 \text{ mm}} = 0,991 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{6 \cdot 118.270.000 \text{ Nmm}}{200 \text{ mm} \cdot (836 \text{ mm})^2} = 5,077 \text{ N/mm}^2$$

Le tensioni di calcolo, considerando la *classe di servizio 1* e la classe di durata del carico *breve*, risultano:

$$f_{c,0,d} = \frac{0,90 \cdot 24 \text{ N/mm}^2}{1,45} = 14,897 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{m,d} = \frac{0,90 \cdot 24 \text{ N/mm}^2}{1,45} = 14,897 \text{ N/mm}^2$$

Le verifiche da eseguire saranno quelle della pressoflessione, andando a valutare se sono da tenere in conto l'instabilità a compressione ($k_{crit,c}$) e l'instabilità a flessione ($k_{crit,m}$).

Per quanto riguarda la lunghezza libera di inflessione nel piano della capriata, essa può essere considerata, a vantaggio di statica, pari a 1,25 volte lo sviluppo del punto-ne (come per gli archi dell'esempio precedente):

$$\ell_{0,z} = 1,25 \cdot 7,75 \text{ m} = 9,688 \text{ m}$$

Per quanto riguarda la lunghezza libera di inflessione fuori dal piano, la massima distanza fra i puntoni di controventamento di falda è pari a 4,90 m:

$$\ell_{0,y} = 4,900 \text{ m}$$

Si passano ora a calcolare le snellezze rispetto ai due assi y e z per valutare l'instabilità a compressione.

Per la sezione rettangolare in esame i raggi di inerzia sono rispettivamente:

$$\rho_y = h / \sqrt{12} = 83,6 \text{ cm} / \sqrt{12} = 24,133 \text{ cm}$$

$$\rho_z = b / \sqrt{12} = 20 \text{ cm} / \sqrt{12} = 5,774 \text{ cm}$$

per cui le snellezze saranno:

$$\lambda_y = \frac{\ell_{0,z}}{\rho_y} = \frac{968,8 \text{ cm}}{24,1 \text{ cm}} = 40$$

$$\lambda_z = \frac{\ell_{0,y}}{\rho_z} = \frac{490,0 \text{ cm}}{5,8 \text{ cm}} = 84$$

entrambe minori del limite di 150.

Le snellezze relative saranno:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{40}{\pi} \sqrt{\frac{24 \text{ N/mm}^2}{9400 \text{ N/mm}^2}} = 0,643$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{84}{\pi} \sqrt{\frac{24 \text{ N/mm}^2}{9400 \text{ N/mm}^2}} = 1,351$$

Poiché le snellezze relative superano entrambe il valore di 0,30, dovrà essere calcolato il $k_{crit,c}$, ovvero il coefficiente riduttivo delle tensioni di calcolo che tiene conto dell'instabilità dell'elemento rispetto al suo lato più debole, in cui assume il valore minimo:

$$k_{crit,c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = 0,947$$

$$k_{crit,c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = 0,492$$

con:

$$k_y = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) = 0,724$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) = 1,465$$

dove $\beta_c = 0,1$ per il legno lamellare incollato.

Dunque per tenere conto dell'instabilità dei puntoni compressi, nel calcolo si andrà a ridurre la resistenza a compressione in ragione del $k_{crit,c}$ e si considera:

$$k_{crit,c} = 0,492$$

Per l'instabilità dovuta alla flessione si deve valutare il valore del coefficiente $k_{crit,m}$ che è calcolato a partire dalla snellezza relativa di trave nelle tre condizioni:

$$k_{crit,m} = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{se } 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,40 \\ 1 / \lambda_{rel,m}^2 & \text{se } 1,40 \leq \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

per cui si calcolano la tensione critica, la snellezza relativa ed infine il coefficiente $k_{crit,m}$. Secondo l'Eurocodice 5, nel caso di asta prismatica in legno dolce di sezione piena e rettangolare, la tensione critica può essere calcolata dalla relazione:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot \ell_{eff}} \cdot E_{0,05}$$

quindi si ha:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot (200 \text{ mm})^2}{836 \text{ mm} \cdot 4900 \text{ mm}} \cdot 9400 \text{ N/mm}^2 = 71,60 \text{ N/mm}^2$$

La snellezza relativa risulta così:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24,00 \text{ N/mm}^2}{71,60 \text{ N/mm}^2}} = 0,579 < 0,75$$

per cui l'instabilità flessionale può essere trascurata e si ha:

$$k_{crit,m} = 1$$

Dunque la verifica combinata può essere scritta nella forma che segue:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{crit,c} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

ovvero

$$\frac{0,991 \text{ N/mm}^2}{0,492 \cdot 14,897 \text{ N/mm}^2} + \frac{5,077 \text{ N/mm}^2}{14,897 \text{ N/mm}^2} = 0,48 \leq 1$$

La sezione maggiormente sollecitata dallo sforzo di taglio è quella in corrispondenza dell'appoggio in cui il taglio è massimo.

In aggiunta in questa zona la sezione del puntone ha subito delle lavorazioni per consentire l'appoggio orizzontale e per l'inserimento della piastra di collegamento con la catena.



Figura 3.39. Vista dell'appoggio della capriata in fase di montaggio. Si può notare la rastremazione del puntone alla base, necessaria per ottenere un appoggio orizzontale, e la lama interna, in attesa ancora della catena, che con la sua fresatura indebolisce ulteriormente la sezione del puntone

La sezione resistente, ai fini della verifica, è pari a 19 cm · 65,3 cm, ed il taglio è:

$$V_d = 61,01 \text{ kN}$$

La massima tensione di calcolo dovuta al taglio risulta:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h} = \frac{1,5 \cdot 61010 \text{ N}}{190 \text{ mm} \cdot 653 \text{ mm}} = 0,738 \text{ N/mm}^2$$

La tensione resistente di calcolo è:

$$f_{v,d} = \frac{0,90 \cdot 2,7 \text{ N/mm}^2}{1,45} = 1,676 \text{ N/mm}^2$$

e la verifica può essere scritta come segue:

$$\tau_d / f_{v,d} = (0,738 \text{ N/mm}^2) / (1,676 \text{ N/mm}^2) = 0,44 \leq 1$$

Si passa così alla verifica agli stati limite ultimi della catena che ha sezione rettangolare con base pari a 20 cm e altezza pari a 43,1 cm.

La sezione maggiormente sollecitata a tensoflessione è quella in posizione intermedia in cui si presenta il massimo valore del momento flettente (figura 3.38):

$$N_d = 151,77 \text{ kN}$$

$$M_d = 14,12 \text{ kNm.}$$

Le massime tensioni, per la trazione e per la flessione, nella sezione della catena considerata, risultano pari a:

$$\begin{aligned}\sigma_{c,0,d} &= \frac{165.760 \text{ N}}{200 \text{ mm} \cdot 836 \text{ mm}} = 0,991 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{m,d} &= \frac{6 \cdot 118.270.000 \text{ N/mm}}{200 \text{ mm} \cdot (836 \text{ mm})^2} = 5,077 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Le tensioni di calcolo, considerando la *classe di servizio 1* e la classe di durata del carico *breve*, risultano:

$$\begin{aligned}f_{t,0,d} &= \frac{0,90 \cdot 16,5 \text{ N/mm}^2}{1,45} = 10,241 \text{ N/mm}^2 \\ f_{m,d} &= \frac{0,90 \cdot 24 \text{ N/mm}^2}{1,45} = 14,897 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Le verifiche da eseguire saranno quelle della pressoflessione, andando a valutare se è da tenere in conto l'instabilità a flessione ($k_{crit,m}$):

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

Si passa quindi a calcolare la tensione critica:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot (200 \text{ mm})^2}{431 \text{ mm} \cdot 14200 \text{ mm}} \cdot 9400 \text{ N/mm}^2 = 47,92 \text{ N/mm}^2$$