

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,  
AMBIENTALE E DEI MATERIALI**

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE*

**TESI DI LAUREA**

In  
**TEORIA DELLE STRUTTURE**

**LEGNO E BAMBÙ LAMELLARE: MATERIALI ECOSOSTENIBILI A  
CONFRONTO NEL CASO STUDIO DI UN *GARDEN OFFICE* CON  
PRESTAZIONI ACUSTICHE NELLA COPERTURA**

CANDIDATO

Martina Tirocchi

RELATORE

Prof.ssa Ing. Luisa Molari

CORRELATORI

Ing. Andrea Canducci

Francesco Pellisari

Anno Accademico 2020/21

Sessione I

*Non fermatevi là dove siete  
arrivati.*

*Pitagora*

## Indice

Introduzione .....	2
Materiali .....	4
1. Il bambù .....	4
1.1 Distribuzione.....	6
2. Bambù lamellare .....	9
2.1 Tecniche di produzione.....	9
2.2 Utilizzo delle colle .....	14
2.3 Impatto ambientale di prodotti a base di bambù .....	16
2.4 Proprietà meccaniche e fisiche .....	18
2.5 Normative.....	23
2.6 Produttori .....	28
2.7 Esempi di strutture realizzate in bambù lamellare .....	31
3. Legno lamellare.....	37
3.1 Produzione .....	38
3.2 Proprietà meccaniche e fisiche .....	39
3.3 Normative .....	41
4. Confronto legno lamellare - bambù lamellare .....	42
Caso Studio .....	47
5. Inquadramento generale .....	48
6. Progetto in Legno Lamellare.....	51
6.1 Materiali .....	51
6.2 Carichi e combinazione di calcolo .....	55
6.3 Dimensionamento .....	64
6.4 Modellazione .....	66
6.5 Progetto e verifica dei portali .....	68
6.6 Progetto e verifica delle connessioni portale .....	76
6.7 Analisi delle vele .....	84

7. Progetto in Bambù Lamellare .....	93
7.1 Materiali .....	93
7.2 Carichi e combinazione di calcolo .....	95
7.3 Dimensionamento .....	96
7.5 Progetto e verifica dei portali .....	98
7.6 Progetto e verifica delle connessioni .....	102
7.7 Analisi delle vele .....	107
8. Confronto applicato al caso studio .....	116
Conclusioni .....	120
Bibliografia .....	122

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Specie di Bambù strutturale <a href="https://www.bambutigre.it/wp-content/uploads/2017/12/rivista-mondo-bambu.pdf">https://www.bambutigre.it/wp-content/uploads/2017/12/rivista-mondo-bambu.pdf</a> ;	4
Tabella 2 - Distribuzione Globale del Bambù: il bambù per un'economica sostenibile	7
Tabella 3 - Studi sulla produzione del bambù lamellare	13
Tabella 4- Tipi di adesivi per il laminato di bambù	14
Tabella 5 - Indice di prestazione di PF - <a href="https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa">https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa</a> .	14
Tabella 6 – Produttori di bambù lamellare	28
Tabella 7 - Dimensione sezioni	37
Tabella 8- Proprietà meccaniche bambù lamellare e legno lamellare	43
Tabella 9 – Classi di resistenza del legno lamellare	51
Tabella 10 – Caratteristiche GL24h - <a href="http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf">http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf</a>	52
Tabella 11 – Valore di $s_k$	56
Tabella 12 - Parametri carico vento	58
Tabella 13 – Coefficiente di esposizione	59
Tabella 14 – Parametri per il carico del vento	60
Tabella 15 – Calcolo dei carichi permanenti strutturali	62
Tabella 16 – Calcolo dei carichi permanenti non strutturali	62
Tabella 17 – dimensionamento travi portali	65
Tabella 18 – Dimensionamento travetti	65
Tabella 19 – Sollecitazioni portale II	69
Tabella 20 – Verifica a pressoflessione	71
Tabella 21 - Verifica di Stabilità, Instabilità di colonna	72
Tabella 22 – Verifica di instabilità di trave	74
Tabella 23 – Sollecitazioni posizionamento interno ed esterno	75
Tabella 24 – Verifiche a pressoflessione, confronto interno ed esterno	75
Tabella 25 – Tipologia di connessioni	76
Tabella 26 – Valori ottenuti nel caso studio	79
Tabella 27 – Calcolo capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione	82
Tabella 28 – Resistenza riferita a n piani di taglio	82
Tabella 29 – Calcolo della resistenza di calcolo e verifica	83

Tabella 30 – Taglio per le connessioni .....	84
Tabella 31 - Calcolo delle sollecitazioni.....	88
Tabella 32 – Tipologia di connessione .....	90
Tabella 33 – calcolo della capacità caratteristica di estrazione e resistenza a trazione delle viti .....	90
Tabella 34 – Controllo Rope Effect e calcolo della capacità di estrazione.....	91
Tabella 35 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione .....	91
Tabella 36 - Resistenza di calcolo.....	92
Tabella 37 – Proprietà meccaniche del bambù lamellare .....	94
Tabella 38 – Carichi permanenti strutturali $G_1$ , bambù lamellare .....	95
Tabella 39 - Carichi permanenti non strutturali $G_2$ , bambù lamellare .....	95
Tabella 40 – Dimensionamento travi portali.....	97
Tabella 41 – Sezioni Lamboo .....	97
Tabella 42 – Sollecitazioni massime associate al portale II.....	99
Tabella 43 – Verifica a pressoflessione, bambù lamellare.....	99
Tabella 44 – Verifica a pressoflessione, instabilità di colonna.....	100
Tabella 45 – Verifica di stabilità, instabilità di trave .....	101
Tabella 46 – Sollecitazioni caso interno ed esterno .....	102
Tabella 47 - Valori minimi di spaziatura e distanza da bordi ed estremità, per spinotti – bambù lamellare.....	103
Tabella 48 – Sollecitazione per il calcolo delle connessioni .....	104
Tabella 49 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione .....	104
Tabella 50 – Resistenza riferita a n piani di taglio.....	104
Tabella 51 – Calcolo della resistenza di calcolo e verifica .....	105
Tabella 52 – Sollecitazione di taglio, caso esterno e caso interno in bambù lamellare .....	106
Tabella 53 – Calcolo del peso della vela H.....	107
Tabella 54 – Calcolo del taglio nei travetti, bambù lamellare .....	108
Tabella 55 – Calcolo della capacità caratteristica di estrazione e resistenza a trazione delle viti, bambù lamellare.....	108
Tabella 56 – Controllo Rope Effect e calcolo della capacità di estrazione, caso bambù lamellare.	109
Tabella 57 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione, caso bambù lamellare.....	109
Tabella 58 - Resistenza di calcolo, caso bambù lamellare.....	110
Tabella 59 – Riepilogo QRD .....	112
Tabella 60 – Metodo QRD per la scelta dei diametri .....	113

Tabella 61 - Sollecitazioni massime .....	117
Tabella 62 - Peso a confronto per la vela H .....	118
Tabella 63 - Taglio per le connessioni, bambù lamellare e legno lamellare.....	119

## Indice delle figure

Figura 1 - Microstruttura del Bambù .....	5
Figura 2 - Microstruttura della canna di bambù (fonte: Abdul Khalil et al., 2012, Materials and Design 42: 353-368).....	6
Figura 3 - Analisi delle fibre di bambù .....	6
Figura 4 - Produzione nel mondo del bambù .....	7
Figura 5 - Sx: Distribuzione nel mondo del bambù. Regione Pacifico-Asiatica (I); Regione Americana (II); Regione Africana (III) .....	8
Figura 6 - Passaggio dal bambù al bambù laminato .....	9
Figura 7 - Taglio dei culmi .....	10
Figura 8- Taglio longitudinale .....	10
Figura 9- Processo di produzione del Bambù laminato - <a href="https://qualecoltura.com/wp-content/uploads/2018/04/Bamb%C3%B9-Trasformato-per-applicazioni-strutturali-Universit%C3%A0-di-Cambridge-Bhata-Massachussets-Pittsburg.pdf">https://qualecoltura.com/wp-content/uploads/2018/04/Bamb%C3%B9-Trasformato-per-applicazioni-strutturali-Universit%C3%A0-di-Cambridge-Bhata-Massachussets-Pittsburg.pdf</a> .....	11
Figura 10 Processo di produzione del bambù lamellare: (a) lamella singola, (b) applicazione di colla, (c) provino bloccato, (d) orientamento orizzontale radiale, (e) orientamento verticale radiale. - Production, environmental impact and mechanical properties of glubam.....	11
Figura 11 - Processo di Produzione del GLGB - Analysis of the Bolted Connection of a Bamboo Composite I-Shaped Beam Subjected to Bending .....	12
Figura 12 - Produzione del glubam - Production, environmental impact, and mechanical properties of glubam.....	12
Figura 13 - Limitazioni sull'emissione di formaldeide - <a href="https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa">https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa</a> . 15	15
Figura 14 - Confronto del consumo di energia tra materiali - Production, environmental impact and mechanical properties of glubam .....	17
Figura 15 - Confronto delle emissioni di carbonio tra materiale - Production, environmental impact and mechanical properties of glubam .....	18
Figura 16 - test setup e dimensioni: a) compressione parallela b) compressione perpendicolare c) trazione parallela d) trazione perpendicolare e) taglio f) flessione .....	19
Figura 17 - strumentazione a) compressione parallela b) compressione perpendicolare c) trazione parallela d) trazione perpendicolare e) taglio f) flessione - Engineered bamboo for structural applications .....	20
Figura 18 - Trazione parallela e perpendicolare - Engineered bamboo for structural applications...	20

Figura 19 - compressione perpendicolare - Engineered bamboo for structural applications.....	21
Figura 20 - taglio parallelo - Engineered bamboo for structural applications .....	21
Figura 21 - Norme tecniche internazionali - <a href="https://www.researchgate.net/publication/284345386">https://www.researchgate.net/publication/284345386</a> .....	24
Figura 22 - Norme europee - <a href="https://www.researchgate.net/publication/284345386">https://www.researchgate.net/publication/284345386</a> .....	27
Figura 23 - Bamboo N-finity by Moso International .....	28
Figura 24 - Dimensioni sezioni in bambù lamellare, Lamboo - <a href="https://www.lamboo.us/">https://www.lamboo.us/</a> .....	29
Figura 25 - Lamboo Structure, brochure <a href="https://www.lamboo.us/">https://www.lamboo.us/</a> .....	30
Figura 26 - pannelli di bambù laminato - <a href="http://www.zenbamboo.cn/en/Paneling.htm">http://www.zenbamboo.cn/en/Paneling.htm</a> .....	30
Figura 27 - ArchLegno – Trave isostatica in bambù lamellare.....	32
Figura 28 - a) visuale da sopra il ponte in Bambù; b) Visuale di lato e sopra del ponte; c) Visuale da sotto del ponte; d) Visuale di lato e sotto del ponte. ....	33
Figura 29 - Proposta Arch. Pizzigoni Expo 2010 - <a href="https://www.archdaily.com/57891/norway-pavilion-for-shanghai-world-expo-2010">https://www.archdaily.com/57891/norway-pavilion-for-shanghai-world-expo-2010</a> .....	33
Figura 30 - Esterno Intero Kunming Bamboo House .....	34
Figura 31 - Interno Intero Kunming Bamboo House .....	34
Figura 32 - Interno Intero Kunming Bamboo House.....	34
Figura 33 - Bamboo tower in the sky- Kunming Joy-City Ucommune.....	35
Figura 34 - a) posizione tower bamboo. b) visualizzazione 3D della struttura. c) Modellazione dell'elemento strutturale d) Elemento strutturale in bambù lamellare.....	35
Figura 35 - Aeroporto di Madrid, Terminal T4 .....	36
Figura 36 - Il legno lamellare.....	37
Figura 37 - Fasi di produzione del legno lamellare .....	39
Figura 38 - I livelli del legno .....	40
Figura 39 - Aumento dei costi anni 90-2010 del bambù - Source: Yue Yongde (2012).....	42
Figura 40 - Modulo e resistenza alla flessione in materiali costruttivi differenti - CES. Cambridge engineering selector edupack software. Cambridge, UK: Granta Design Limited; 2013.....	44
Figura 41 - 3D caso studio .....	49
Figura 42 - Lato ovest (sx), Lato est (dx) .....	49
Figura 43 - Prospetto YY con entrata .....	50
Figura 44 – Vista 3D di portali, pedana e saetta porta.....	50
Figura 45 - Classe di resistenza delle conifere - <a href="http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf">http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf</a> .....	53
Figura 46 - Tipologia di connessione trave-pilastro – Catalogo Soltech.....	53
Figura 47 - Classe acciaio, connessione trave-pilastro – Catalogo Soltech.....	53

Figura 48 - Caratteristiche meccaniche degli spinotti.....	54
Figura 49 - Viti, connessione portali-vele – Catalogo Soltech .....	54
Figura 50 – Classe delle viti, connessione portali-vele – Catalogo Soltech .....	54
Figura 51 - Caratteristiche delle viti – Catalogo Soltech .....	54
Figura 52 - Posizione Cambridge,UK, per il carico neve Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com).....	56
Figura 53 - Determinazione del valore $S_k$ Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com) .....	56
Figura 54- Valori del coefficiente di forma, Tab. 3.4.II .....	57
Figura 55 - Mappa per carico vento, Inghilterra Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com).....	57
Figura 56 - Valori ottenuti da Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com) per i parametri del carico vento .....	58
Figura 57 - Classe di esposizione.....	59
Figura 58 - Indicazioni sopra vento e sottovento .....	61
Figura 59 - Valori $C_{pe}$ .....	61
Figura 60 - Valori dei coefficienti di combinazione, Tab. 2.5.1 .....	63
Figura 61 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, Tab. 2.6.1.....	63
Figura 62 - Classe di durata .....	63
Figura 63 - Dimensioni tipiche, travi in C24 .....	66
Figura 64 - Modellazione dei portali.....	67
Figura 65 - Carichi verticali permanenti strutturali, non strutturali e neve.....	67
Figura 66 - Carichi orizzontali, vento .....	68
Figura 67 - Sezione Portali.....	69
Figura 68 - Valori di $k_{mod}$ .....	70
Figura 69 - Valori di beta per l'instabilità di trave .....	73
Figura 70 - Modalità di collasso, connessioni a gambo cilindrico.....	77
Figura 71 - Curva carico – spostamento .....	77
Figura 72 – Spaziature e distanze dai bordi .....	78
Figura 73 - Valori minimi di spaziature e distanze da bordi ed estremità, per spinotti .....	79
Figura 74 - Modalità di collasso .....	80
Figura 75 - Calcolo della sollecitazione.....	81
Figura 76 - Disposizione della lama interna .....	82
Figura 77 - Dettaglio costruttivo, connessione legno-legno .....	83

Figura 78 - 3D struttura con vele, Rhino .....	85
Figura 79 - Struttura vele .....	86
Figura 80 - Vela H in esame .....	87
Figura 81 - Dettaglio Vela H.....	87
Figura 82 - Dettaglio connessione portale-vela .....	92
Figura 83 - 3D struttura in bambù lamellare, Rhino .....	93
Figura 84 - Pianta portale in bambù lamellare .....	98
Figura 85 - Dettaglio costruttivo, connessione portale in bambù lamellare .....	105
Figura 86 - Pianta delle vele con focus sulla vela H.....	107
Figura 87 - Inquadramento vela F-I .....	111
Figura 88 – sx, vista frontale; dx, vista dall’alto; in alto, vista destra; in basso, vista dal basso.....	114
Figura 89 - Reggette per culmi .....	115
Figura 90 - Travetti e Culmi con reggette.....	115

## *Abstract*

Il legno e il bambù lamellare sono materiali ecosostenibili con ottime prestazioni meccaniche. Entrambi i materiali derivano dalla lavorazione del materiale grezzo, i prodotti che ne derivano consentono di utilizzare il materiale in sezioni avendo caratteristiche migliori rispetto al materiale naturale. L'elaborato presenta le proprietà dei due prodotti confrontandoli tra loro e dimostrando che il bambù ingegnerizzato ha caratteristiche paragonabili o superiori a quelle del legno e dei prodotti a base di legno. Al fine di fornire un'analisi completa si realizza la progettazione di un *garden office* studiando sia il posizionamento interno sia esterno. La particolarità della copertura della struttura, realizzata nel rispetto di parametri acustici ha fatto sì che venisse sviluppata un'alternativa nella progettazione in bambù lamellare come base per successive valutazioni acustiche.

Il risultato mette in evidenza come il bambù lamellare possa proporsi come materiale alternativo fornendo un'ulteriore prospettiva di sostenibilità.

## Introduzione

L'utilizzo del bambù in ambito strutturale nasce proprio dalla esigenza di utilizzare materiali sostenibili nel campo dell'edilizia, responsabile del 30% delle emissioni di CO<sub>2</sub>. L'impatto ambientale dell'edilizia è quindi uno dei principali responsabili delle emissioni.

I materiali naturali come legno e bambù sono una alternativa ai materiali convenzionali fortemente impattanti usati nel campo delle costruzioni come acciaio e calcestruzzo ma sono soggetti alle variazioni di dimensioni e di prestazioni proprie dei materiali naturali. Queste limitazioni possono essere superate con l'utilizzo di questi materiali naturali opportunamente assemblati.

L'uso del legno laminato ha avuto un fortissimo sviluppo proprio perché ha rappresentato per l'uomo la possibilità di risolvere, per molti secoli, i più complessi problemi strutturali inoltre il facile approvvigionamento, la leggerezza e la versatilità ovvero la possibilità di realizzare elementi curvilinei ha favorito l'impiego del legno lamellare in contesti molto particolari.

Stesso percorso potrebbe seguire il bambù che si presenta in natura cavo ma con prestazioni meccaniche superiori a quelle di gran parte delle specie di legno utilizzate, in più le foreste di legname richiedono 30-50 anni per la crescita mentre per il bambù la crescita è molto più rapida, 3-5 anni.

Lo studio del bambù strutturale sta avendo una rapida crescita nel campo della ricerca con particolare attenzione alla caratterizzazione del materiale e alle sue proprietà meccaniche.

Uno dei principali ostacoli al suo uso diffuso è la mancanza di standard e normative. A livello internazionale vi è un tavolo tecnico ISO che ha appena pubblicato una norma sul progetto di strutture in culmi di bambù ed è allo studio una norma sul bambù lamellare strutturale.

In Italia, vi è ancora scarsa consapevolezza del materiale e non vi è ancora un quadro normativo che collochi il materiale fra i possibili materiali utilizzabili a livello strutturale.

In questa tesi, si analizzano bambù e legno lamellare confrontandone le prestazioni, il percorso produttivo e il contesto normativo.

Si considera poi un caso studio, un Garden Office realizzato a Cambridge dall'azienda Canducci SRL in legno lamellare progettandolo sia con l'utilizzo del legno lamellare sia del bambù lamellare per capire le peculiarità e i limiti dei due materiali.

La struttura analizzata presenta una particolarità dovuta alla presenza di una copertura realizzata tramite vele disposte al fine di ottenere elevate prestazioni acustiche.



## Materiali

L'elaborato di tesi si sviluppa in due parti, la prima parte riguarda la descrizione dei materiali.

Nel capitolo 1, si introduce il bambù e la sua distribuzione nel mondo per fare un quadro sulla tipologia da cui deriva il lamellare di bambù.

Nei capitoli 2 e 3, si presentano i metodi di produzione, le proprietà meccaniche e normative del bambù lamellare e del legno lamellare. Definite queste informazioni, nel capitolo 4 viene effettuato un confronto per analizzare le differenze tra i due materiali.

### 1. Il bambù

L'interesse per il bambù nelle costruzioni si pone come obiettivo la riduzione dell'impatto ambientale.

Esistono più di 1200 specie che variano in base alla località e pertanto dal clima. Il bambù deriva dalla famiglia delle graminacee, sottofamiglia del bambusoideae.

Esistono due grandi sottofamiglie:

- Bambuseae, bambù legnosi con circa 1200 specie;
- Olieae, bambù erbacei con circa 100 specie.

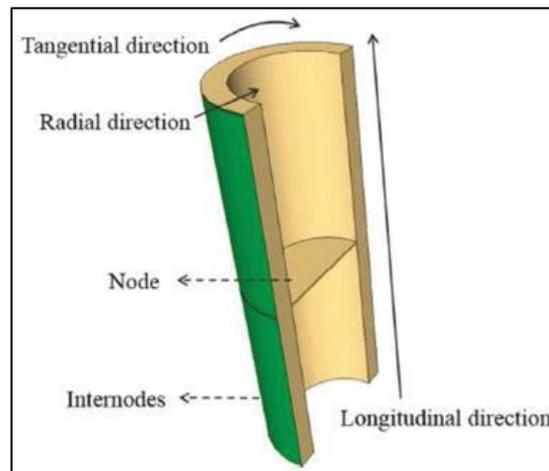
Tabella 1 - Specie di Bambù strutturale <https://www.bambutigre.it/wp-content/uploads/2017/12/rivista-mondo-bambu.pdf>;

<i>Specie di bambù strutturale</i>		
<b>Nome della specie</b>	<b>Localizzazione</b>	<b>Diametro [mm]</b>
Guadua angustifolia kunth	Sud Africa	120-160
Dendrocalamus strictus (Calcutta)	Asia	25-80
Bambusa vulgaris	Africa, Asia, Sud America	80-150
Phyllostachys edulis (Moso)	Asia	120-180
Dendrocalamus sper (Petung)	Asia, Sud America	80-200
Bambusa blumeana (Spiny/Thorny Bamboo)	Asia, Asia-Pacifica	60-150
Gigantochloa apus	Asia	40-100

Le dimensioni e in particolare, il diametro, varia in base alla specie di bambù con un massimo di 200 mm e un minimo di 25 mm.

Il culmo di bambù è il nucleo segmentale che parte dal rizoma. È formato da:

- Collo: collega rizoma e culmo;
- Nodi: sono punti di unione degli internodi, costituiscono la parte resistente del culmo. Essi presentano colori e struttura differenti;
- Internodi: è la parte compresa tra due nodi, possono essere vuoti o resistenti.



*Figura 1 - Microstruttura del Bambù*

La pianta del bambù è costituita per il 50-70% da emicellulosa, per il 30% di pentosani e per il 20-25% di lignina.

Il bambù è ricco di silice (0,5-5%), la maggior parte di essa si trova nell'epidermide esterna, mentre nel resto del culmo tale elemento è assente; lo strato ceroso impregnato di silicio è fortemente resistente ai fenomeni atmosferici e ai patogeni e fornisce una resistenza meccanica delle fibre di bambù pari a quelle delle fibre di vetro. Inoltre, possiede una piccola quantità di resina, schiume e tannino. Viene classificato come un materiale composito naturale con struttura anatomica formata da fibre e vasi tale da avere una struttura di tipo gerarchico. Le fibre determinano la resistenza e la durezza, infatti più fibre sono presenti su una stessa area e più il bambù è resistente. La forma delle fibre è tubolare cava con diametri piccoli pari a 0,03 mm, lunghezza massima di 3,5 mm e spessore della parete di 0,006 mm. Lateralmente sono presenti una serie di strati, dette lamelle, che racchiudono i vasi così da portare il nutrimento alla pianta.

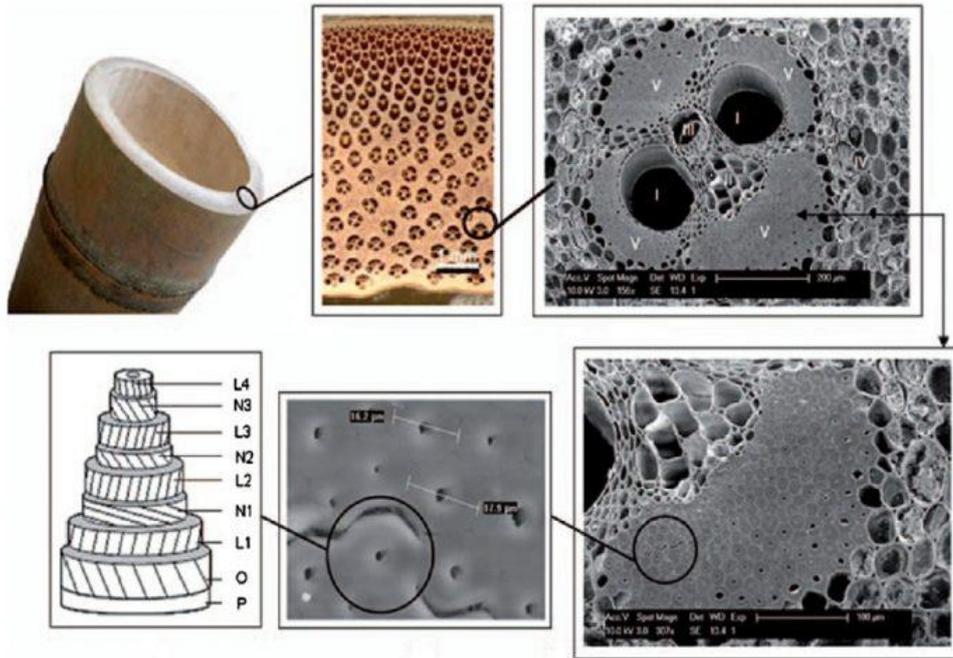


Figura 2 - Microstruttura della canna di bambù (fonte: Abdul Khalil et al., 2012, *Materials and Design* 42: 353-368)

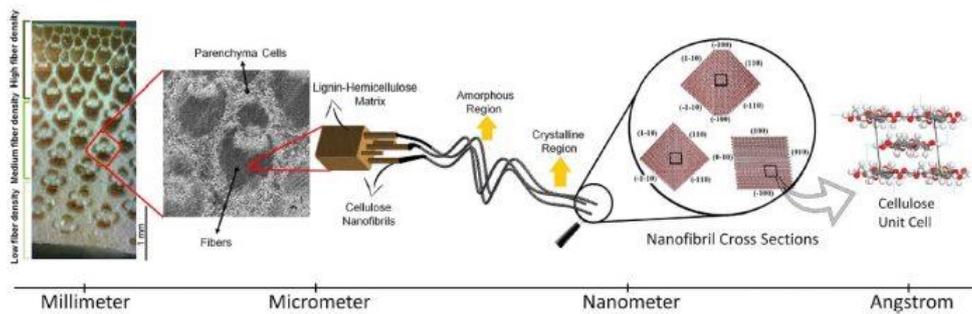


Figura 3 - Analisi delle fibre di bambù

La densità delle fibre, varia con l'altezza del culmo, infatti più si raggiungono altezze elevate e più il numero delle fibre aumenta.

Le fibre sono orientate nella direzione che presenta migliori caratteristiche.

Il comportamento macroscopiche che ne deriva è fortemente anisotropo. Il bambù reagisce in base alla direzione della sollecitazione in modo differente. Inoltre, il comportamento del materiale varia in base al contenuto d'acqua presentando quindi la proprietà di igroscopia.

### 1.1 Distribuzione

Le foreste di bambù hanno una diffusione estesa tra i paralleli 46" Nord e 47" Sud, che comprende le regioni calde con piogge abbondanti e frequenti, quindi Asia tropicale e subtropicale, America latina e Africa con l'eccezione dell'Europa

Normalmente cresce a temperature tra gli 8,8°C e 36°C, la presenza della pioggia ha un ruolo dominante nella crescita delle diverse specie. Come pianta, preferisce regioni con elevate precipitazioni che vanno da circa 1270 mm a circa 6350 mm.

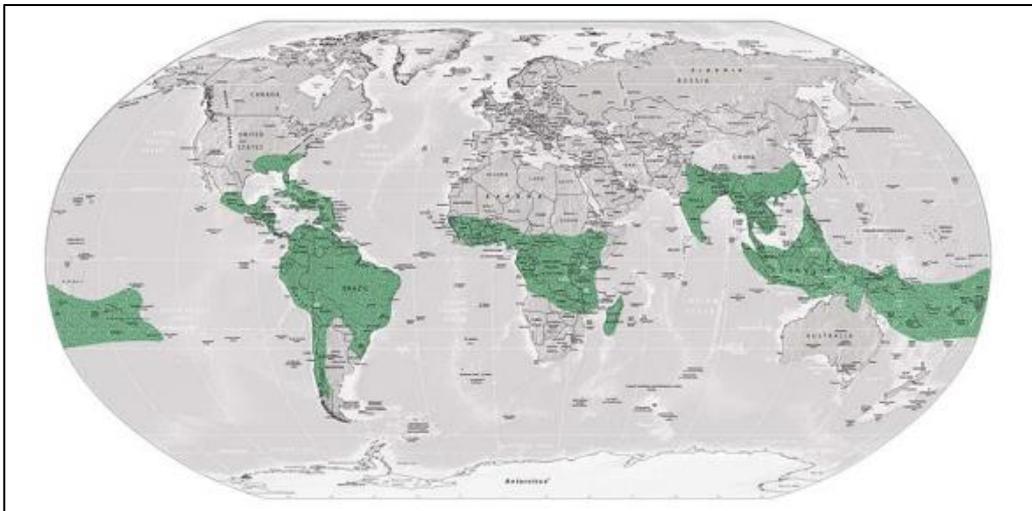


Figura 4 - Produzione nel mondo del bambù

Secondo il Forest Resource Assessment 2010 della FAO ci sono circa 31,5 milioni di ettari di bambù in tutto il mondo. Sono presenti 39 categorie di bambù, che coprono più di 500 specie.

Tabella 2 - Distribuzione Globale del Bambù: il bambù per un'economica sostenibile

<b>Distribuzione Globale del Bambù</b>			
Paesi	Ettari	Tipologia	Famiglia
Cina	5,7 milioni	Dendrocalamus	Bambuseae
Cina	900 mila	Phyllostachys (Moso)	
America Latina Centrale	5,4 milioni	Guadua	
India	9,3 milioni	Bambusa balcooa	

La Cina è uno dei principali paesi produttori di bambù.

In Cina, il bambù è distribuito principalmente nelle province meridionali di Zhejiang, Sichuan, Fujian, Hunan e Jiangxi. Tra queste, la provincia del Fujian ha le risorse di bambù più abbondanti.

Oltre la Cina, molti paesi asiatici come India, Myanmar, Indonesia, Thailandia e Vietnam sono molto ricchi di risorse di bambù grazie al clima tropicale e temperato.

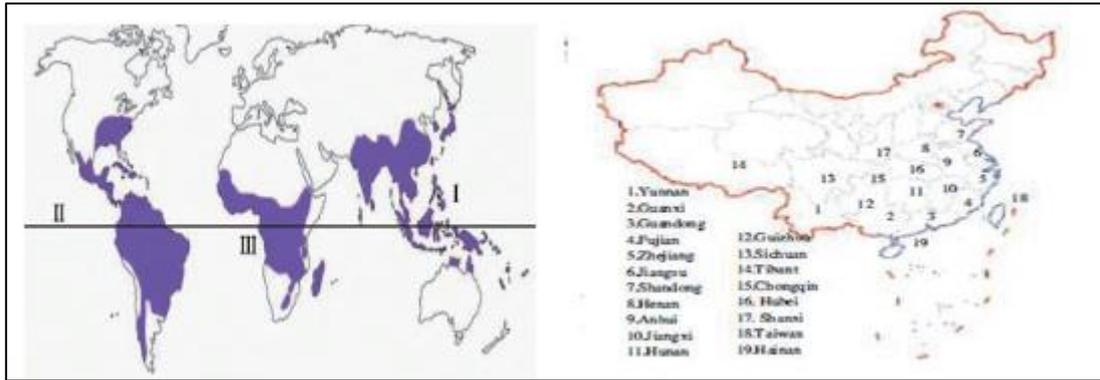


Figura 5 - Sx: Distribuzione nel mondo del bambù. Regione Pacifico-Asiatica (I); Regione Americana (II); Regione Africana (III)

In America esistono circa 600 specie di bambù che crescono dal sud degli Stati Uniti a nord del Cile e in Argentina, di queste specie però se ne considerano solamente 20 idonee alla costruzione.

Come descritto in tabella 2, in America la specie maggiormente prodotta è la Guadua in particolare, in Colombia viene utilizzata da più di 20 anni come materiale da costruzione.

Nel caso del Brasile, questo non presenta, anche avendo molte aree di bambù un utilizzo abbondante della materia prima.

La Cina, in confronto agli altri paesi, anche con un'area meno vasta, produce ed esporta un quantitativo maggiore di bambù soprattutto in Europa, USA e Giappone.

## 2. Bambù lamellare

Se si parla di lamellare, si pensa ad un materiale composito formato da legno naturale di cui vengono mantenuti i pregi ed eliminati i difetti propri del legno.

L'andare a eliminare i difetti del legno comporta un aumento dei valori di resistenza, così da ottenere travi molto leggere e resistenti aventi alte prestazioni elastiche e di conseguenza sismo-resistenti.

L'obiettivo è partire dalla tecnica costruttiva del legno lamellare utilizzando come materia prima il bambù analizzandone le prestazioni.

### 2.1 Tecniche di produzione

La produzione del bambù lamellare nasce con la raccolta dei culmi che, una volta arrivati a 5 o 6 anni, entrano nella fase di invecchiamento ed è proprio prima di questo periodo che è consigliato tagliare il bambù per la laminazione.

Le modalità di realizzazione del bambù lamellare, si basano in generale, sulla tecnica utilizzata nella produzione del legno lamellare ma sperimentano nuove modalità di produzione.

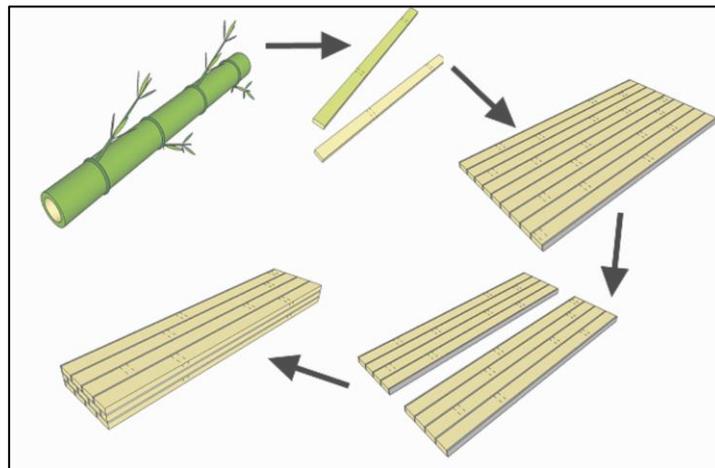


Figura 6 - Passaggio dal bambù al bambù laminato

Uno dei processi di lavorazione prevede cinque passaggi. Si inizia suddividendo il culmo e per tale operazione si possono utilizzare modalità differenti.

Nel *Manual de construcion con bambù*, come descritto da Oscar Hildalgo Lopez, è possibile andare a tagliare con l'aiuto di un'ascia si praticano incisioni profonde attorno a ciascuno dei nodi e perpendicolari ad essi, con una distanza tra 1 e 3 centimetri (Figura a). In seguito con l'aiuto di una pala, si apre longitudinalmente su uno dei lati (Figura b), rompendo contemporaneamente le assi interne. (Figura c). Infine, si apre manualmente il culmo (Figura d) e una volta realizzate le lamelle, viene rimossa la parte interna (Figura e) per evitare che venga aggredita dagli insetti e si leviga così da formare lamelle sottili di bambù in modo da lavorarle tramite sbiancamento o caramellazione.

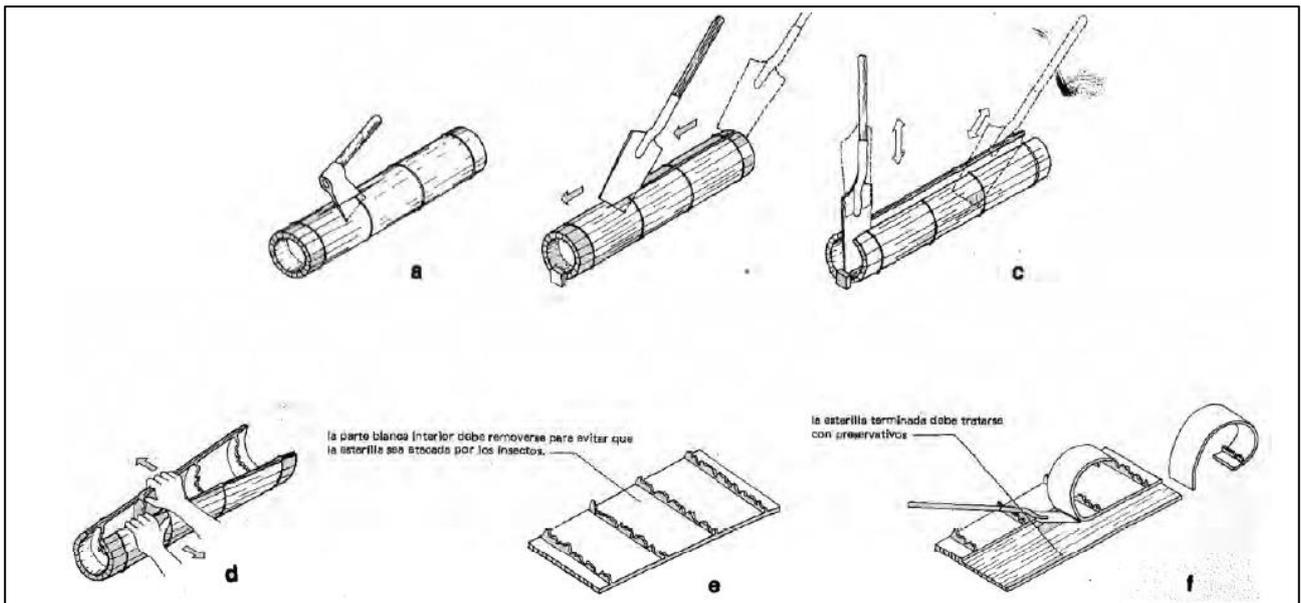


Figura 7 - Taglio dei culmi

Un'altra modalità di taglio è utilizzare tecniche di taglio longitudinale (“splitting”) della canna di bambù mediante lama e “splittatore”.

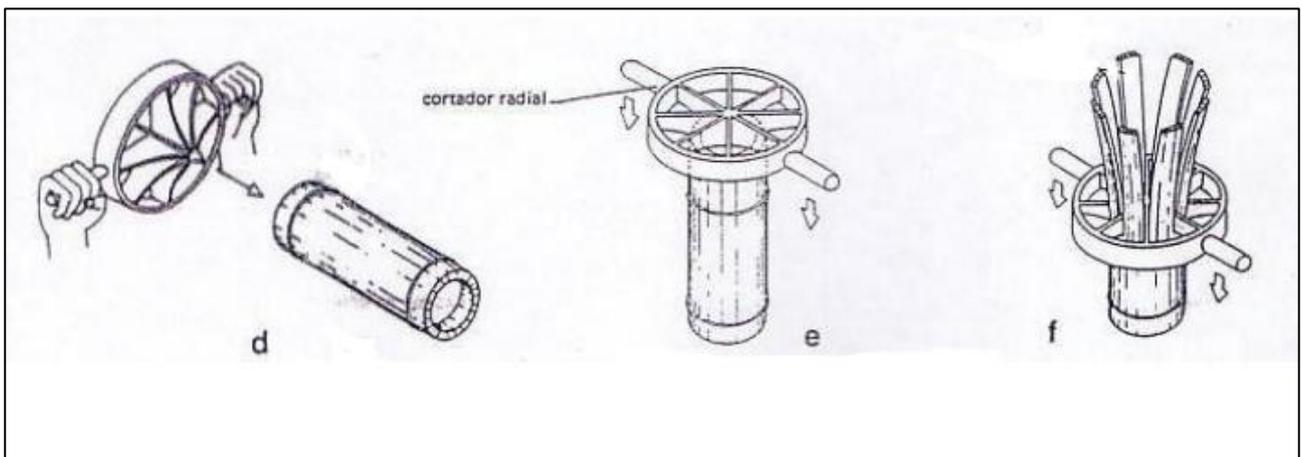


Figura 8- Taglio longitudinale

Successivamente le lamelle vengono incollate e pressate così da formare travi laminate oppure vengono solo pressate e incollate ed a volte vengono piallate in modo da avere delle sezioni perfettamente rettangolari.

In questo modo si ottengono travi con un numero di operazioni minori rispetto al legno lamellare in quanto non vi è il passaggio di controllo e eliminazione dei difetti, inoltre nel bambù laminato l'orientamento delle strisce viene inserito casualmente all'interno della tavola velocizzando ancora di più la produzione; si predilige sempre orientare le fibre nella stessa direzione così da avere migliore caratteristiche.



Figura 9- Processo di produzione del Bambù laminato - <https://qualecoltura.com/wp-content/uploads/2018/04/Bamb%C3%B9-Tra-sformato-per-applicazioni-strutturali-Universit%C3%A0-di-Cambridge-Bhata-Massachussets-Pittsburg.pdf>

Un possibile metodo a basso costo per i laminati è e simile al precedente consiste nel suddividere il culmo a metà. Una volta ottenute le due parti, vengono martellate così da replicare la forma delle lamelle.

Con entrambe le tecniche è possibile andare a ottenere sia un orientamento delle fibre verticale che orizzontale.

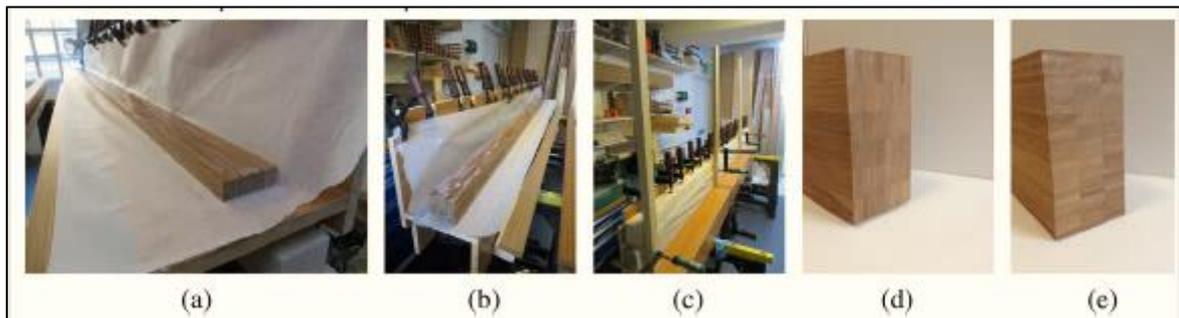


Figura 10 Processo di produzione del bambù lamellare: (a) lamella singola, (b) applicazione di colla, (c) provino bloccato, (d) orientamento orizzontale radiale, (e) orientamento verticale radiale. - Production, environmental impact and mechanical properties of glubam

La scelta di andare a utilizzare differenti tipi di bambù garantisce una varietà nelle sue tecniche di produzione. Un esempio è sicuramente l'utilizzo della Guadua, tramite il quale viene prodotto il bambù Guadua laminato incollato (GLGB).

Una volta tagliati in strisce di lunghezza costante di circa 2,5 m, vengono riscaldate ad una temperatura di 150°C al fine di sterilizzare il materiale. Successivamente vengono essiccate in forno fino a raggiungere un valore di umidità di circa il 14%.

Al termine dell'essiccamento, vengono lucidate per garantire l'uniformità. A questo punto, le strisce sono affiancate e incollate insieme creando un foglio di strisce di bambù.

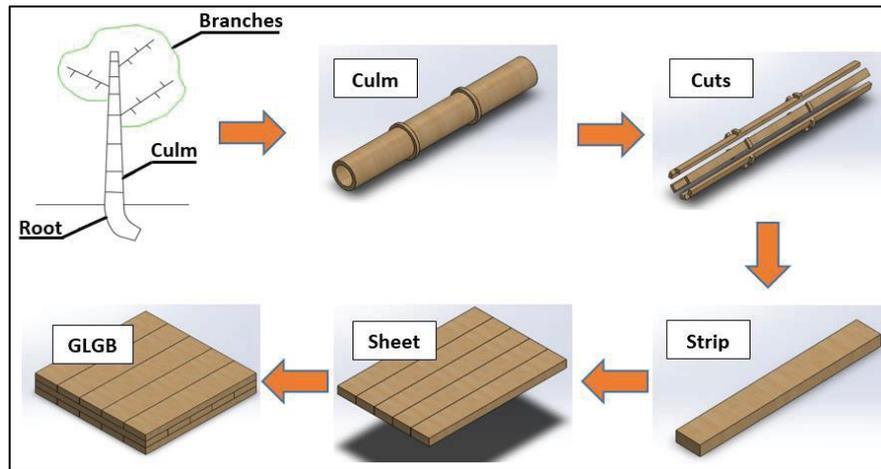


Figura 11 - Processo di Produzione del GLGB - Analysis of the Bolted Connection of a Bamboo Composite I-Shaped Beam Subjected to Bending

Le lamelle ottenute vengono levigate ed il tutto si riveste con una resina adesiva lungo le facce affiancate e sovrapposte così da ottenere fogli di lamina di Guadua.

Una volta che l'adesivo è indurito, le lamelle vengono incollate sovrapponendo i vari fogli per formare il laminato incollato di Guadua.

Un'altra tecnica di produzione è la realizzazione del glubam [*structural behavior of glued laminated guadua bamboo as a construction material*].

In primo luogo, vengono selezionati i materiali che soddisfano i requisiti di maturità. Come materia di produzione in questo caso è usuale l'utilizzo del bambù Moso.



Figura 12 - Produzione del glubam - Production, environmental impact, and mechanical properties of glubam

I culmi vengono divisi in lamelle sottili di spessore 2-3 mm e una larghezza di 20-30 mm con il vantaggio di non doverli appiattare. Dopo il processo di taglio, si immergono in acqua calda per eliminare le sostanze organiche all'interno del materiale (Figura 12b).

Eliminate le sostanze organiche si fanno asciugare all'aria con un'umidità di circa 20 % (Figura 12c) e successivamente poste parallelamente l'una all'altra (Figura 12d) o trasversalmente in base all'orientamento.

Queste lamelle di bambù vengono asciugate in forno prima e nuovamente dopo averle saturate con una resina fenolica formaldeide e sovrapposti in direzione parallela o ortogonale.

Infine, gli strati di bambù impilati si pressano con una temperatura di circa 150 °C e una pressione di 20 MPa.

Come nella tecnica di produzione del legno lamellare in base all'elemento che si vuole ottenere si formano giunzioni a pettine così da realizzare, come per esempio, delle colonne glubam (figura 12g).

Le tecniche sono molteplici e attraverso la tabella 3 sono stati raccolti studi relativi ai prodotti in bambù in base alla tipologia di bambù, adesivi/colle, metodo di laminazione (morsetti o pressa), temperatura (fredda o riscaldata), pressione e tempo, umidità iniziale e densità ottenuta.

Tabella 3 - Studi sulla produzione del bambù lamellare

<i>Studi sul bambù lamellare</i>	<i>Tipologia di bambù</i>	<i>Adesivi/colle</i>	<i>Metodo di laminazione</i>	<i>Valore iniziale di umidità [%]</i>	<i><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</i>
Lee et al. (2013)	P. Pubescens	R	Hydraulic press	10 - 15	620 - 660
Bansal and Prasad (2004)	B. bambos	UF, MUF, PF	Hydraulic hot press	8 - 10	728 - 796
Correal and Lopez (2008)	G. angustifolia Kunth	PVA	Hydraulic cold press	6 - 8	-
Correal et al. (2010)	G. angustifolia Kunth	PRF, MUF, PRF-MUF	Hot press	-	730
Sulastiningsih and Nurwati (2009)	G. apus G. robusta	TRF	Cold pressed and clamped	12	710 - 750
Pereira and Faria (2009)	D. giganteus	PVA	-	-	-
Mahadavi et al. (2012)	P. Pubescens	PRF	Mechanical press	16	510
Sinha et al. (2014)	-	PRF	Clamped	-	-
Xiao et al. (2013)	P. Pubescens	PF	Hydraulic hot press	15	800 - 980

Adesivi: R, resorcinol; PF, fenol formaldeide, MUF, melanina urea formaldeide, PRF, fenol resorcinol formaldeide, PVA, poluvirol acetate, TRF, tanin resorcinol formaldeide

Si evidenzia come la densità ottenuta varia tra i 500 e gli 980 kg/m<sup>3</sup>, di molto superiore ai valori di densità del legno lamellare.

Come nel legno, affinché si ottenga un buon legame, il contenuto di umidità è fondamentale e vista la natura fibrosa del bambù i laminati di bambù non riescono a mantenere un basso contenuto di umidità e pertanto si effettua l'essiccazione in forno prima della laminazione come precedentemente descritto.

## 2.2 Utilizzo delle colle

Nella realizzazione del laminato di bambù è fondamentale evidenziare i diversi utilizzi di resine e colle.

La tabella 4 elenca i tipi di adesivi derivanti da una raccolta di studi basati sullo studio del lamellare di bambù, in particolare sono stati utilizzati adesivi per uso strutturale tra cui:

Tabella 4- Tipi di adesivi per il laminato di bambù

<i>Adesivi/colle</i>	
R	Resorcinolo
UF	Urea formaldeide
PVA	Poluvirolo acetato
TRF	Tannino resorcinolo formaldeide
MUF	Melanina urea formaldeide
PRF	Fenolo resorcinolo formaldeide
PF	Fenolo formaldeide
PRF-MUF	

L'unica tra le colle che ha una limitata sperimentazione negli studi è il MUF, Melanina urea formaldeide.

Per la produzione di laminati di bambù si utilizza prevalentemente fenolo formaldeide, tuttavia vengono utilizzati anche colle a base di soia e privi di formaldeide [*Engineered bamboo: state of the art*].

Tabella 5 - Indice di prestazione di PF - <https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa>

Solid Content	48%-51%
pH	10.5-11.5
Water Solubility (25°C)	>7 times
Free Formaldehyde	<1.0%
Viscosity (20°C)	20cps-40cps

L'utilizzo della formaldeide provoca danni alla salute umana e il suo impiego è controllato dai limiti di utilizzo con valenza internazionale, nonostante ciò, risulta comunque prevalente il suo impiego.

La normativa a cui si fa riferimento è la UNI EN 13986, nella quale si classificano i pannelli a base di legno in due classi E1 e E2. La classe di emissione viene assegnata al prodotto sulla base di prove iniziali di tipo e di prove periodiche di controllo della produzione.

I parametri che caratterizzano i pannelli di classe E1 sono i seguenti:

Valore ottenuto con il metodo di riferimento EN 717-1	Valore con EN 120 (pannelli grezzi di particelle, MDF o OSB)	Valore con EN 717-2 (compensati, pannelli di legno massiccio, LVL e tutti i pannelli rivestiti)
0,124 mg/m <sup>3</sup> aria (=0,1 ppm)	8 mg/100 g	3,5 mg/h m <sup>2</sup>

Figura 13 - Limitazioni sull'emissione di formaldeide - <https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-ineuropa>

In Tabella 6 si forniscono in base agli studi raccolti, famiglia del bambù e tipologia di adesivi i valori di Modulo elastico e modulo di rottura.

Tabella 6 - Studi del laminato di bambù in base alla tipologia di adesivi

<i>Studi sul bambù lamellare</i>	<i>Tipologia di bambù</i>	<i>Adesivi/colle</i>	<i>Modulo di elasticità (MOR) [MPa]</i>	<i>Modulo di rottura (MOE) [GPa]</i>
Lee et al. (2013)	P. Pubescens	R	71-86	8
Bansal and Prasad (2004)	B. bambos	UF, MUF, PF	123-145	12-17
Correal and Lopez (2008)	G. angustifolia Kunth	PVA	82	-
Correal et al. (2010)	G. angustifolia Kunth	PRF, MUF, PRF-MUF	111	-
Sulastiningsih and Nurwati (2009)	G. apus G. robusta	TRF	39-95	7-10
Pereira and Faria (2009)	D. giganteus	PVA	99	14
Mahadavi et al. (2012)	P. Pubescens	PRF	77	9
Sinha et al. (2014)	-	PRF	42-70	22-23
Xiao et al. (2013)	P. Pubescens	PF	99	9

Gli studi raccolti forniscono parametri non sempre esaustivi al completamento dell'analisi ma danno un punto di partenza sullo studio e l'utilizzo delle colle nella produzione di bambù lamellare.

In particolare, l'unico parametro analizzato da tutti gli studi è il modulo di elasticità e risulta come Bansal e Prasad (2004) che realizzano il bambù laminato con il *Bambusa bambos* e lo testano attraverso l'utilizzo di tre tipi di colle: urea formaldeide, melammina urea formaldeide e fenolo formaldeide fornisca valori di modulo di elasticità più elevate rispetto ad altri adesivi come il PRF, fenol resorcinol formaldeide. I valori ottenuti si attestano intorno a 123-145 MPa e dalla tabella si evidenzia come siano i valori più alti ottenuti dagli studi raccolti.

Il modulo di rottura MOE, si attesta intorno agli 8-22 GPa. Mahadavi et al. (2012) e Sinha et al. (2014) anche utilizzando lo stesso tipo di colla, il PRF, non ottengono un valore uguale di modulo di rottura e questo potrebbe essere legato alla tipologia di bambù utilizzato in quanto Sinha et al. non lo forniscono.

### **2.3 Impatto ambientale di prodotti a base di bambù**

La produzione dei laminati ha comportato la necessità di esplorare l'impatto ambientale di diversi prodotti a base di bambù.

Lo studio effettuato da *Zea, Escamilla e Habert* (2014) ha dimostrato che il bambù laminato con colla ha un maggiore impatto ambientale rispetto ai prodotti a bassa industrializzazione ovvero senza l'utilizzo degli adesivi.

Come è noto, l'influenza sull'ambiente del bambù è un aspetto importante nella tendenza odierna verso l'industria edile sostenibile soprattutto perché produce meno carbonio e impatto ambientale rispetto a materiali industrializzati come muratura, cemento o acciaio.

Un'analisi esaustiva che approfondisce questo ambito e valuta l'energia prodotta è stata effettuata da *Y. Xiao, R.Z. Yang e B. Shan*, in un mulino situato nella contea di Yanling, nella provincia di Hunan, dove è presente una grande quantità di bambù moso.

In questa zona a circa 50 km dalla foresta di bambù, si ha una produzione annuale di circa 12000 m<sup>3</sup> di glubam e plybamboo ovvero pannelli di bambù sempre derivanti dalla lavorazione di laminazione. A partire dalle effettive condizioni di produzione si è valutato il consumo energetico per metro cubo di lamelle di bambù laminato.

I consumi energetici della produzione di glubam sono rilevati dal trasporto di materie prime, consumo di elettricità, resina fenolo-formaldeide e materiali utilizzati nella realizzazione del laminato.

Lo studio ha riscontrato che l'utilizzo della resina fenolo-formaldeide e l'elettricità sono le principali fonti di consumo energetico per la produzione del glubam o plybamboo. Pertanto, lo sviluppo di una resina più ecologica e la riduzione del consumo di elettricità sarebbe il modo più efficiente per ridurre ulteriormente il consumo energetico della produzione di glubam.

L'istogramma in figura 14 riassume il confronto delle prestazioni ambientali del Glubam con altri materiali da costruzione come legno, compensato, cemento, alluminio e acciaio. L'analisi della lavorazione fornisce un assaggio dell'energia incorporata e gli impatti associati, sebbene siano necessari degli studi aggiuntivi per comprendere appieno l'impatto ambientale e i costi associati ai prodotti derivanti dal bambù laminato.

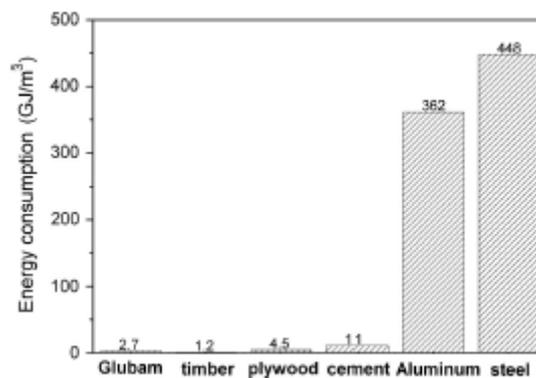


Figura 14 - Confronto del consumo di energia tra materiali - Production, environmental impact and mechanical properties of glubam

Si nota subito che l'alluminio e l'acciaio sono grandi consumatori di energia. Glubam consuma una quantità di energia inferiore rispetto al cemento di circa il 75% ma comunque superiore al legno. È interessante da notare che il consumo di energia per il glubam è inferiore rispetto al compensato, che può essere attribuito al minor coinvolgimento del processo del macchinario durante la produzione.

L'istogramma in figura 15 confronta invece, l'emissione di carbonio:

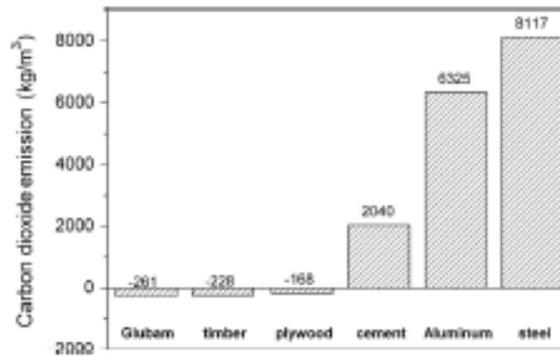


Figura 15 - Confronto delle emissioni di carbonio tra materiale - Production, environmental impact and mechanical properties of glulam

Le emissioni di cemento, alluminio e acciaio sono maggiori rispetto agli altri materiali.

In confronto, il glulam ha un valore negativo delle emissioni di carbonio e supera il legno e compensato. Le ridotte emissioni di carbonio dei prodotti di bambù sono state ampiamente riconosciute, rendendolo molto attraente nella ricerca di oggi verso una società sostenibile.

Questo studio non riflette ovviamente tutte le condizioni di produzione dei laminati di bambù ma fornisce una valutazione iniziale dell'impatto ambientale di laminati di bambù.

## 2.4 Proprietà meccaniche e fisiche

Non essendo presente ancora un metodo di prova standardizzato per la determinazione delle proprietà del bambù laminato, avviene normalmente che i test vengano condotti seguendo gli standard internazionali per il legno e prodotti in legno: ASTM International ovvero l'organismo di normazione statunitense, acronimo di American Society for Testing and Materials International.

Le prove che vengono condotte secondo gli standard sono:

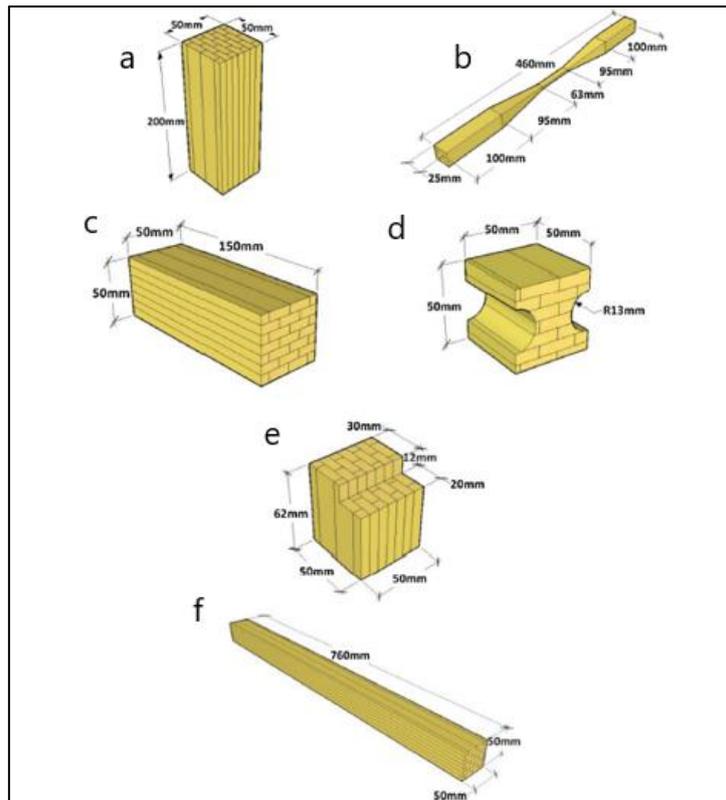


Figura 16 - test setup e dimensioni: a) compressione parallela b) compressione perpendicolare c) trazione parallela d) trazione perpendicolare e) taglio f) flessione

Tabella 7 – prove ASTM

<b>Prove</b>	<b>ASTM</b>
a,b: Compressione: // e $\perp$	ASTM E132
e: Taglio	
f: Flessione	
Temperatura	ASTM D143
Umidità relativa	
Densità	
Contenuto d'umidità	ASTM D4442

Lo standard ASTM fornisce il numero di test da effettuare e il setup delle prove, generalmente si effettuano dieci prove per ogni proprietà da determinare e le sezioni variano in base al test da effettuare.

Tabella 8 – prove standard - Engineered bamboo for structural applications.

Test method	Riferimento test	Direzione	Numero prove	Dimensione campioni [mm]
Trazione	a	Parallela	10	25 x 25 x 460
	b	Perpendicolare	10	62 x 50 x 50
Compressione	c	Parallela	10	20 x 20 x 60
	d	Perpendicolare	10	50 x 50 x 50
Taglio	e	Parallela	10	50 x 50 x 50
Flessione in 4 punti	f	-	10	60 x 120 x 2400

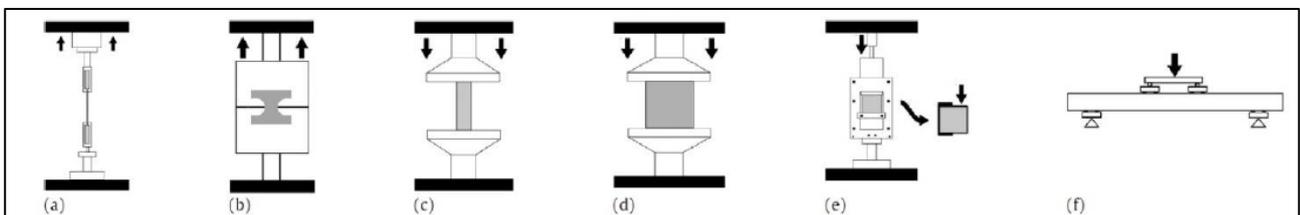


Figura 17 - strumentazione a) compressione parallela b) compressione perpendicolare c) trazione parallela d) trazione perpendicolare e) taglio f) flessione - Engineered bamboo for structural applications

### Trazione

La figura 18 mostra a confronto sia i cedimenti per i test paralleli che perpendicolari alle fibre, l'andamento è lineare in entrambi i casi prima del cedimento. Cedimenti maggiori si hanno per trazione parallela e si nota inoltre che i valori  $f_{tk}$  sono più grandi di quaranta volte la forza perpendicolare.

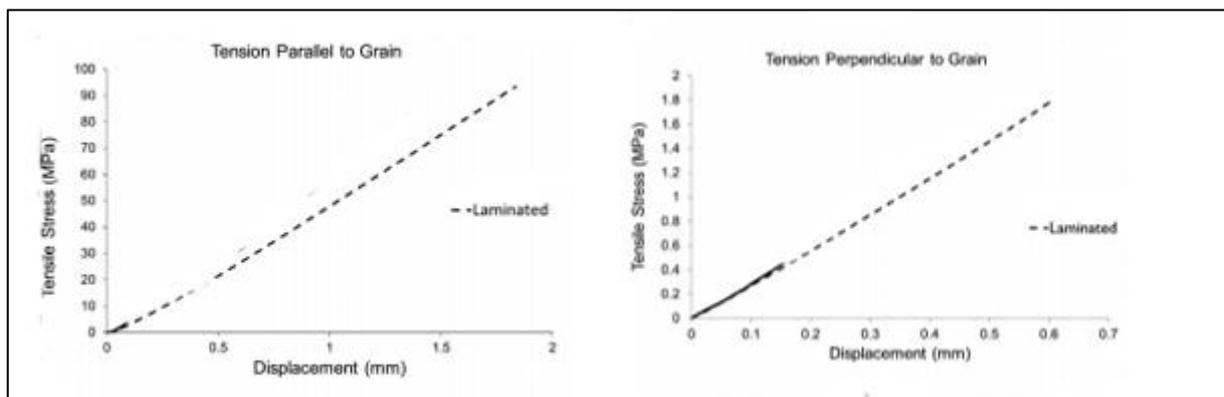


Figura 18 - Trazione parallela e perpendicolare - Engineered bamboo for structural applications

### Compressione

Le curve rappresentative mostrano un comportamento bilineare. Poiché l'instabilità del provino domina il comportamento, la resistenza alla compressione è determinata in tutti i casi al limite elastico.

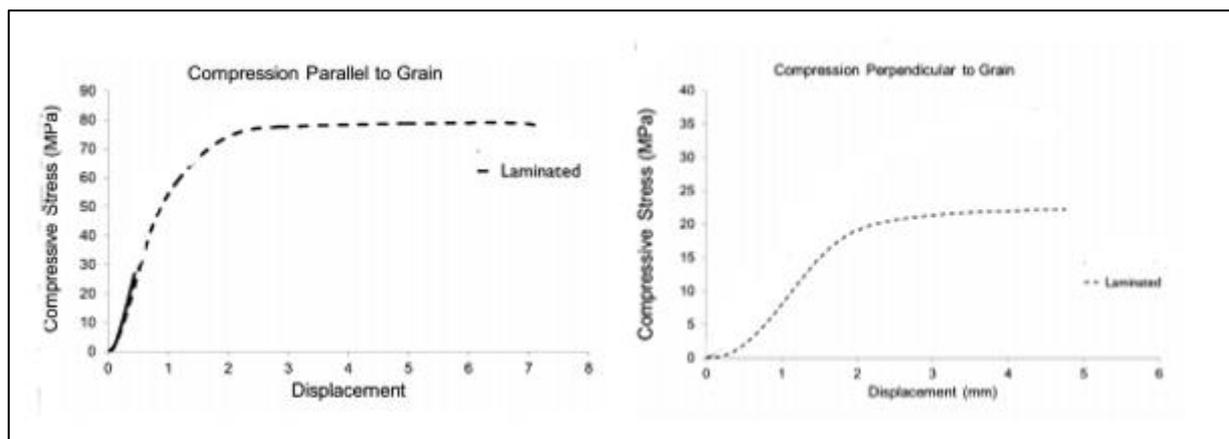


Figura 19 - compressione perpendicolare - Engineered bamboo for structural applications

La resistenza alla compressione perpendicolare alla fibra  $f_{ck}$  ha valori più bassi rispetto alla direzione parallela alla fibra, nello specifico si ottengono risultati quattro volte più alti nel caso della compressione parallela.

### Taglio

Il taglio parallelo alle fibre,  $f_{sk}$ , ha un comportamento a S il bambù lamellare è in grado di sopportare carichi e spostamenti elevati prima di arrivare a rottura.

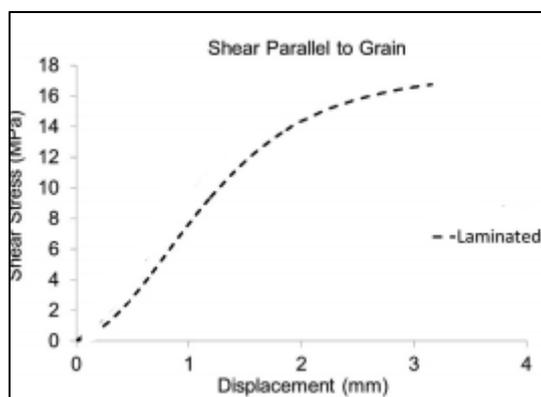


Figura 20 - taglio parallelo - Engineered bamboo for structural applications

I legami costitutivi forniscono le informazioni utili per definire le caratteristiche del materiale, che sono state raccolte nella tabella 9, quali:

- Densità;
- Modulo di rottura;
- Modulo elastico;
- Compressione parallela e perpendicolare;
- Trazione parallela e perpendicolare.

Tabella 9 – Proprietà del bambù lamellare

<i>Studi sul bambù lamellare</i>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Flexural		Compression Stress [MPa]		Tension Stress [MPa]	
		<i>MOR</i> [MPa]	<i>MOE</i> [GPa]	<i>Parallel to grain</i>	<i>Perpendicular to grain</i>	<i>Parallel to grain</i>	<i>Perpendicular to grain</i>
Lee et al. (2013)	620 - 660	71-86	8	-	-	-	-
Bansal and Prasad (2004)	728 - 796	123-145	12-17	-	-	-	-
Correal and Lopez (2008)	-	82	-	36	-	-	-
Correal et al. (2010)	730	111	-	60	-	95	-
Sulastiningsih and Nurwati (2009)	710 - 750	39-95	7-10	49-56	-	-	-
Pereira and Faria (2009)	-	99	14	66	-	144	-
Mahadavi et al. (2012)	510	77	9	-	-	-	-
Sinha et al. (2014)	-	42-70	22-23	9-10	-	-	-
Xiao et al. (2013)	800 - 980	99	9	51	-	82	-
Sharma et al. <sup>a,b</sup>	577-750	78-88	1-12	63-64	20	102-191	3-4
Xiao Y et al. <sup>c</sup>	880	-	-	51	-	82	-
Correal, Echeverry et al. <sup>d</sup>	741	103-122	12,7-13,3	62	-	143	-

a: Lamboo (2013)

b: Plyboo (2013)

c: GLUBAM

d: GLG radial/tangential

La tabella ci fornisce informazione tali da poter affermare che:

- Il laminato di bambù è un materiale classificato come ortotropo ovvero presenta caratteristiche meccaniche diverse nella direzione longitudinale e in quella trasversale.

Sulla proprietà ortotropa del materiale è stato condotto uno studio per andare a valutare gli effetti dei carichi in diverse direzioni così da poter determinare la tipologia di rottura. Preso

$\theta$ , l'angolo che si forma tra la direzione delle fibre e la direzione del carico, si ottengono rotture differenti in base al valore di  $\theta$ :

- Per valori uguale a  $0^\circ$  si ottiene una tipica modalità di rottura parallela alla fibre;
  - Per valori pari a  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$  si ha una modalità di rottura per taglio;
  - Per valori pari a  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$  si ottiene una tipica modalità di rottura perpendicolare alla fibratura.
- Come il legno, il bambù lamellare, è un materiale igroscopico ma a differenza del legno, il bambù inizia però a ritirarsi (diminuire di volume al diminuire dell'umidità) sin dall'inizio della stagionatura.
  - I valori di densità sono risultati pressoché costanti tra i vari studi e pertanto affidabili e comunque superiori ai valori definiti nel legno lamellare, si ottengono valori intorno ai 500-980 kg/m<sup>3</sup>;
  - Come per il legno lamellare, la direzione in cui viene effettuata la prova influenza le proprietà di resistenza ed è maggiore nella direzione parallela, infatti i risultati sono in numero superiore rispetto alla direzione perpendicolare. Questo potrebbe derivare dal fatto che il comportamento che si aspetta è simile a legno lamellare.
  - I moduli di rottura e di elasticità come descritto nel capitolo 2.2 sono legati alla tipologia di adesivo utilizzato;

I risultati raccolti dagli studi sulle caratteristiche fisiche e meccaniche selezionate presentano un quadro tecnico per la definizione dei valori di progetto strutturale, nonché una base per ulteriori ricerche.

## **2.5 Normative**

Attualmente non esistono normative che forniscono criteri per un utilizzo del bambù nell'ambito dell'ingegneria civile in Italia.

Questa mancanza non aiuta i professionisti a sceglierlo e utilizzarlo come materiale da costruzione, lo sviluppo di uno standard internazionale incoraggerebbe i produttori a creare un prodotto di alta qualità, efficiente e capace di ridurre gli impatti ambientali.

### *Standard e codici esistenti*

Nel 2004, l'Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO) ha pubblicato tre standard sulla costruzione in bambù, che è stato il primo passo per standardizzare il bambù per questo scopo (ISO, 2004a, 2004b, 2004c).

Un decennio dopo, il campo è avanzato con un aumento di interesse dall'Accademia scientifica, ma la richiesta di ulteriore standardizzazione e la codificazione della costruzione del bambù continua. Nel mondo in questo momento in paesi non europei come India, Ecuador, Perù, Colombia e America esistono normative tecniche nazionali che aiutano gli ingegneri nella progettazione e nella verifica delle strutture realizzate con questo materiale.

I codici disponibili e standard per la progettazione strutturale e la costruzione con bambù sono riassunti nella figura 21:

Country	Code	Standard
China		JG/T 199: Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building (PRC MoC, 2007)
Colombia	<i>Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente – chapter G12 Estructuras de Guadua (Guadua structures) (CONTEC, 2010)</i>	NTC 5407: Uniones de Estructuras con <i>Guadua angustifolia</i> Kunth (Structural unions with <i>Guadua angustifolia</i> Kunth) (CONTEC, 2006) NTC 5525: Métodos de Ensayo para Determinar las Propiedades Físicas y Mecánicas de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth (Methods and tests to determine the physical and mechanical properties of <i>Guadua angustifolia</i> Kunth) (CONTEC, 2007)
Ecuador	<i>Norma Ecuatoriana de la Construcción – chapter 17 Utilización de la Guadua Angustifolia Kunth en la Construcción (Use of Guadua angustifolia Kunth in construction) (INEN, 2011)</i>	INEN 42: Bamboo Caña Guadua (bamboo cane Guadua) (INEN, 1976)
India	<i>National Building Code of India, section 3 Timber and bamboo: 3B (BIS, 2010)</i>	IS 6874: Method of tests for round bamboos (BIS, 2008) IS 15912: Structural design using bamboo – code of practice (BIS, 2012)
Peru	<i>Reglamento Nacional de Edificaciones, Section III. Code E100 – Diseño y Construcción con Bamboo (ICG 2012)</i>	
USA		ASTM D5456: Standard specification for evaluation of structural composite lumber products (ASTM, 2013)
International		ISO 22156: Bamboo – structural design (ISO, 2004a) ISO 22157-1: Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 1: requirements (ISO, 2004b) ISO 22157-2: Bamboo – determination of physical and mechanical properties – part 2: laboratory manual (ISO, 2004c)

Figura 21 - Norme tecniche internazionali - <https://www.researchgate.net/publication/284345386>

## Cina

Tutt'ora la ricerca sulle costruzioni in bambù continua ad aumentare. Gli standard sul bambù riguardano principalmente il culmo intero, come JG/T 199: Metodo di prova per le proprietà fisiche e meccaniche di bambù utilizzato nell'edilizia, che fornisce una guida per prove sui materiali.

Lo standard include il test fisico e meccanico trovati in ISO 22156 (ISO, 2004a), ma differisce nei metodi e nei parametri di prova. Ad esempio, JG/T 199 utilizza sezioni del culmo per tutte le prove meccaniche considerando che lo standard ISO utilizza l'intero culmo per la compressione, prove di taglio e flessione.

Non sono presenti normative che riguardano il laminato di bambù.

### *Colombia*

La norma colombiana si focalizza principalmente sull'utilizzo della Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) (ICONTEC, 2010).

Come mostrato in figura 21, gli standard colombiani sono NTC 5407, su giunti strutturali con *Guadua angustifolia* Kunth (ICONTEC, 2006), e NTC 5525, che riguarda metodi e prove per determinare le proprietà fisiche e meccaniche di *Guadua angustifolia* Kunth (ICONTEC, 2007).

Si fa riferimento per il laminato di bambù allo standard NTC 5829 dove vengono definite le dimensioni dei laminati.

### *Ecuador*

Il capitolo 17 della “Norma Ecuatoriana de la Construcción” riguarda l'utilizzo della *Guadua angustifolia* Kunth in edilizia ovvero: la lavorazione, la selezione, la costruzione e la manutenzione.

Simile alle norme colombiane, il capitolo descrive il processo, ma non include i calcoli di progettazione. Allo stesso modo,

INEN 42 (INEN, 1976) promuove gli aspetti utili del bambù come materiale da costruzione in Ecuador, ma non ne include una guida alla progettazione.

### *USA*

In America per il legno lamellare si utilizza ASTM.

Circa 10 anni fa, ASTM D5456, “Specifiche per la valutazione dei prodotti in legno composito strutturale”, ha aggiunto il bambù come materiale in fibra che può essere utilizzato nella fabbricazione di prodotti coperti dallo standard.

Questo standard, sviluppato con il sottocomitato tecnico ASTM D07.02.03 sul legname composito strutturale, può essere applicato ai materiali cellulosici utilizzati per strutture. Per questo motivo, il bambù ingegnerizzato rientra nei lavori del Comitato tecnico (TC) D07, che si interfaccia con vari TC, tra cui E06 (Performance of Buildings), E05 (Fire Standards), D14 (Adhesives) e C16 (Thermal Insulation). Oltre allo standard D5456, gli ingegneri possono anche fare riferimento ad altri standard nei documenti di costruzione del progetto, che tra gli altri possono includere:

- D1037: Metodi di prova standard per la valutazione delle proprietà delle fibre a base di legno e dei materiali dei pannelli di particelle;
- D1761: Metodi di prova standard per elementi di fissaggio meccanici in legno;
- D5055: Specifiche standard per la determinazione e il monitoraggio delle capacità strutturali dei travetti prefabbricati in legno.

### *Organizzazione internazionale per la standardizzazione (ISO)*

A livello mondiale l'ente più importante per redazione delle norme tecniche è l'ISO, che ha pubblicato alcune normative sul bambù strutturale.

Per il bambù lamellare sono in fase di sviluppo la:

- ISO / CD 23478.2 “Strutture di bambù - Bambù lamellare incollato - Metodi di prova per la determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche” che riguarda i test per definire le proprietà fisiche e meccaniche;
- Per la classificazione dei prodotti in bambù invece è uscita la ISO 21625:2020 “Vocabolario relativo al bambù e ai prodotti in bambù”.
- La ISO 22156 (ISO, 2004a) sul “Bambù-Progettazione strutturale”, pubblicata nel 2004 e appena ripubblicata nel 2021, si applica alla progettazione delle strutture in bambù. Affronta l'aspetto strutturale applicazione non solo del bambù in culmo, ma anche plybamboo, che è composto da stuoie di bambù intrecciate incollate insieme o strati di strisce di bambù spaccate posate l'una sull'altra e incollate insieme. Lo standard indica che la caratterizzazione di materiale dovrebbe essere condotto sulla base di standard nazionali per compensato.
- Lo standard è supportato da ISO 22157 1” Bamboo - determinazione del fisico e proprietà meccaniche - parte 1”: requisiti (ISO, 2004b), che specifica i metodi di prova;
- ISO 22157-2 (ISO, 2004c), manuale di laboratorio per la determinazione delle proprietà dei materiali. Un campo emergente è lo studio di prodotti di bambù laminati per costruzione.

Gli standard devono essere supportati da dati affidabili, i test strutturali sono costosi e inoltre essendo un materiale naturale hanno il requisito aggiuntivo di dover effettuare un gran numero di ripetizione al fine di tenere conto della variabilità.

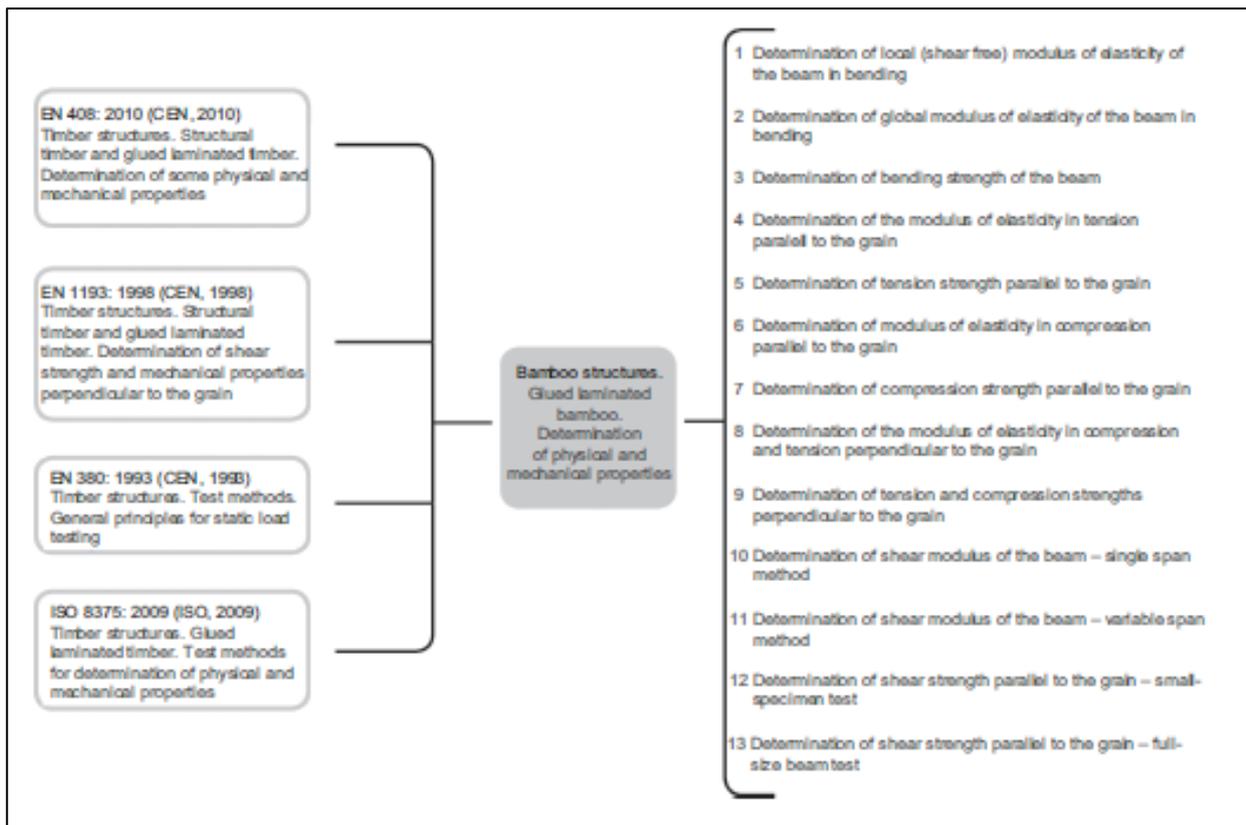


Figura 22 - Norme europee - <https://www.researchgate.net/publication/284345386>

La figura 22 dimostra un esempio di come potrebbero essere sviluppati gli standard sul bambù, basati su norme esistenti ed europee e standard ISO. La figura illustra le proprietà fisiche e meccaniche del bambù ingegnerizzato, determinate utilizzando standard basati sul legno.

La standardizzazione dei prodotti strutturali in bambù riflette il crescente interesse da parte della società e fornisce una nuova apertura per uno sviluppo industriale sostenibile. La nascita di una normativa completa del bambù strutturale dovrebbe essere efficace nel prossimo futuro, ma senza partecipazione coordinata delle parti interessate il processo sarà lento e inefficace.

La ricerca accademica dovrebbe mirare a informare il processo, attraverso sperimentazione e analisi, in modo che le industrie possano lavorare per creare le basi per la standardizzazione. Il contributo congiunto di ciascuna delle parti interessate sarà in grado di guidare il crescente interesse economico e ambientale e fornirà un passo cruciale verso la standardizzazione di prodotti di bambù strutturali e ingegnerizzati.

La speranza è che come nel caso del legno lamellare, anche per il bambù lamellare vi sia un'evoluzione a livello normativo che permetta agli ingegneri e architetti di poterlo utilizzare come materiale nelle costruzioni.

## 2.6 Produttori

Essendo un materiale recente, la produzione del bambù laminato è limitata a pochi produttori, principalmente con sede in Cina. Non avendo a disposizione una normativa comune, ogni produttore fa riferimento a prove diverse per arrivare a definire le caratteristiche del materiale. Inoltre, anche per le sezioni non si ha una omogeneità come per il legno lamellare ma ogni produttore rende disponibili delle sezioni che non sono del tutto tradizionali. Ovviamente offrono la possibilità di realizzare sezioni standard ma a prezzi maggiorati. Coloro che producono principalmente lamellare di bambù sono riassunti in tabella 6:

Tabella 6 – Produttori di bambù lamellare

<i>Produttori</i>	<i>Stabilimento</i>
Moso International	Cina
July Bamboo & Wood Products Co.	Cina
Lamboo	America
ABC Bamboo Plyood	Cina
Hangzhou Zen Bamboo & Hardwood Products Co.	Cina
BWG Bamboo	Vietman
Colguadua Ltda	Colombia

- *MOSO International* con sede principale nei Paesi Bassi e produzione in Cina:

Tra gli elementi prodotti da Moso, per travi e rivestimento da esterni vi è il *bamboo N-finity*. Grazie allo speciale processo di impregnazione, *bamboo N-finity* ha la più alta classe di durabilità secondo



Figura 23 - *Bamboo N-finity* by Moso International

la EN 350. Le travi sono testate in base alle proprietà meccaniche di flessione, taglio, tensione e compressione.

Moso fornisce sezione con base 2x18 e altezza variabile non superiore a 120 mm. Su richiesta è possibile produrre altri formati, il massimo formato della trave è 5800 x 200 x 120 mm o 5800 x 120 x 200 mm.

Per le prestazioni, le caratteristiche dichiarate sono: modulo elastico 9721 N/mm<sup>2</sup> (Verticale), 8866 N/mm<sup>2</sup> (Orizzontale) secondo l'EN 408; la resistenza a flessione 56,7 N/mm<sup>2</sup> (Verticale), 50,8 N/mm<sup>2</sup> (Orizzontale) sempre secondo l'EN 408; la densità intorno ai 700 kg/m<sup>3</sup>.

- *July Bamboo & Wood Products Co.* con sede e produzione in Cina;
- *Lamboo*, unico tra i produttori che si trova in America, Illinois;

Con Lamboo® Structure™, (SBP) Structural Bamboo Products, i sistemi strutturali possono ottenere maggiori resistenze, portate più lunghe e durata maggiore. I prodotti possono essere fabbricati in componenti dimensionali comuni e travi lamellari più grandi.

Le sezioni fornite sono riportate in figura 24:

DIMENSIONAL COMPONENT SIZES								
SIZE CODE	NOMINAL SIZE (in x in)	ACTUAL SIZE		AVAILABLE LENGTHS		IN STOCK ITEMS		
		(in x in)	(mm x mm)	(in feet)	(in meters)	HSP	VSP	SSP
104	1 X 4	3/4 X 3-1/2	19 X 89	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
106	1 X 6	3/4 X 5-1/2	19 X 140	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
108	1 X 8	3/4 X 7-1/4	19 X 184	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
110	1 X 10	3/4 X 9-1/4	19 X 235	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
112	1 X 12	3/4 X 11-1/4	19 X 286	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
202	2 X 2	1-1/2 X 1-1/2	38 X 38	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
204	2 X 4	1-1/2 X 3-1/2	38 X 89	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
206	2 X 6	1-1/2 X 5-1/2	38 X 140	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
208	2 X 8	1-1/2 X 7-1/4	38 X 184	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
210	2 X 10	1-1/2 X 9-1/4	38 X 235	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
212	2 X 12	1-1/2 X 11-1/4	38 X 286	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
404	4 X 4	3-1/2 X 3-1/2	89 X 89	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
406	4 X 6	3-1/2 X 5-1/2	89 X 140	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
408	4 X 8	3-1/2 X 7-1/4	89 X 184	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A
408	4 X 12	3-1/2 X 11-1/4	89 X 286	8ft., 16ft.	2.4m & 4.9m	N/A	in stock	N/A

Lengths up to 20 feet (6 meters) is available upon request with a 6-8 week lead time. Custom sizes also available per request.

Strand Components Available In Custom Sizes Upon Request

[HSP = Horizontal] [VSP = Vertical] [SSP = Strand]      STRUCTURE™ Product Weight - 42lbs/ft<sup>3</sup> - 673kg/m<sup>3</sup>

Figura 24 - Dimensioni sezioni in bambù lamellare, Lamboo - <https://www.lamboo.us/>

Si può affermare che tra i produttori trovati, Lamboo sia quello che ha una maggiore scelta sia di travi e pannelli.

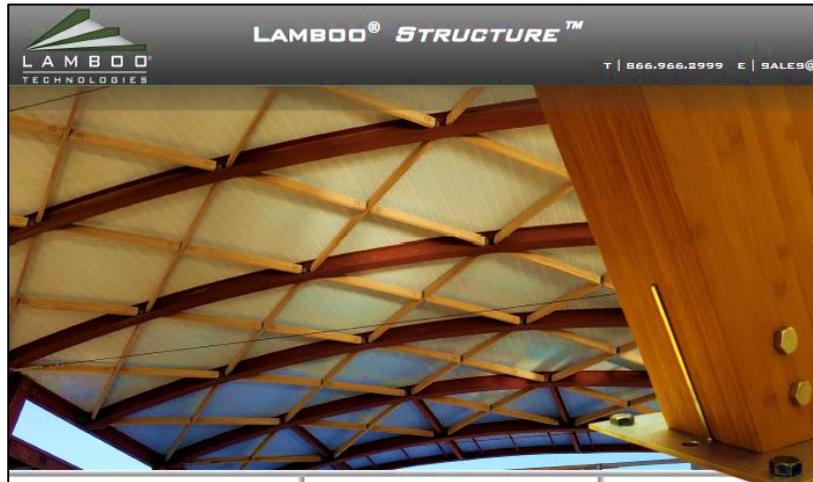


Figura 25 - Lamboo Structure, brochure <https://www.lamboo.us/>

- ABC Bamboo Plyood produce in Cina nella Regione di Fujian a Non Ping;
- Hangzhou Zen Bamboo & Hardwood Products Co. produce principalmente pannelli bidirezionali nella regione di Zhejiang a China Linan City;

Zen Bamboo produce tre diversi tipi di pannello in bambù: pannello ad uno strato, pannello sandwich e pannello multistrato. Ogni tipo di pannello è disponibile sia in colori naturale che carbonizzati, in direzione orizzontale e verticale.

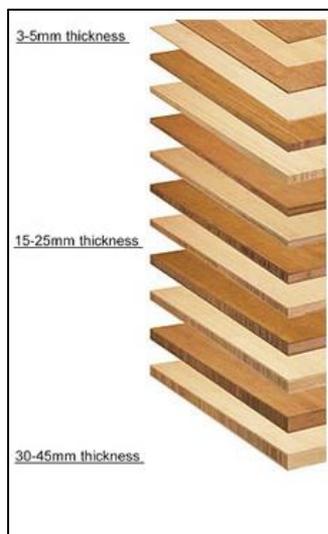


Figura 26 - pannelli di bambù laminato - <http://www.zenbamboo.cn/en/Paneling.htm>

- *BWG Bamboo*: producono in Vietnam, nella provincia di Hoa Bin.

BWG produce travi in bambù lamellare chiamate BGB. Il bambù lamellare così riferito dalla BWG mostra una qualità superiore al legno in termini di maggiore resistenza e densità, minore ritiro e maggiore stabilità dimensionale.

La densità fornita è leggermente maggiore rispetto a quella di MOSO ma comunque si ferma intorno ai 750 kg/m<sup>3</sup> e vale lo stesso per la resistenza a flessione.

Tutte le travi sono personalizzate e realizzate su ordinazione. Le sezioni massime sono 300x128x50 cm (LxPxH). La lunghezza massima della trave di bambù è 3000 mm, ma utilizzando l'articolazione a pettine è possibile creare qualsiasi lunghezza.

- *Colguadua Ltda*: Società colombiana che produce lamellare di bambù da culmi di bambù *Guadua angustifolia* Kunth di quattro anni dalla regione di Caicedonia, Colombia:

La Colguadua Ltda utilizza culmi di diametro 70-140 mm e spessore variabile da 8 a 20 mm. Per produrre elementi dritti, i culmi sono tagliati in piccole parti lunghe circa 1,5 m nella direzione radiale e vengono rimossi gli internodi.

Una volta tagliati vengono tolti gli strati esterni e viene applicata una soluzione chimica al fine di proteggere il materiale da attacchi di insetti. In seguito, si essicano in forno alla temperatura di 80°C fino ad ottenere un contenuto di umidità del 5% e poi spianate con una lucidatrice. Ciascuna lamina di *Guadua* risulta essere lunga circa 1–1,5 m, larga 20–30 mm e spessa 7–10 mm. Le facce strette delle lamine sono ricoperte con una resina adesiva (miscela di urea-formaldeide al 50% e miscela di melamina-formaldeide al 50%) e impilate insieme per formare fogli applicando una pressione laterale di 1,2 MPa a una temperatura di 100° C con una stampa calda.

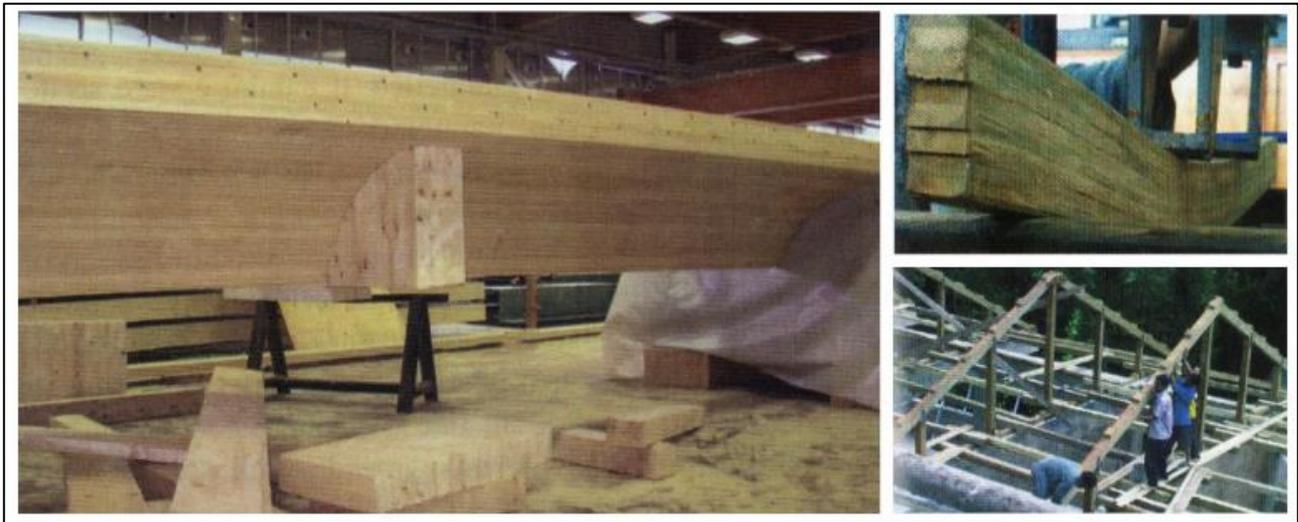
In base alle dimensioni desiderate, si incollano i fogli e vengono incollate tra loro utilizzando lo stesso adesivo.

## **2.7 Esempi di strutture realizzate in bambù lamellare**

Nel mondo l'utilizzo del bambù laminato cresce con il passare degli anni, sono molteplici le strutture che forniscono pertanto un'avanguardia per lo sviluppo di questo materiale eco-sostenibile.

In Italia ArchLegno, azienda specializzata nella produzione del legno lamellare, ha realizzato una struttura in bambù lamellare lunga 13,85 m, larga 1,66 m, alta 0,66 m e 1,76 m con il peso di circa 5000 kg con una portata di 400 kg/m<sup>2</sup>.

La struttura è stata realizzata e provata in azienda in quanto non erano ancora affidabili le prestazioni del bambù lamellare. Dagli studi si è osservato come i parametri di resistenza del bambù lamellare ricordano quelli ottenuti dal legno lamellare in abete.



*Figura 27 - ArchLegno – Trave isostatica in bambù lamellare*

La struttura è una trave isostatica in semplice appoggio. Sono presenti travi in bambù incollate tra loro con la tecnologia utilizzata per il legno lamellare. La produzione finale nelle due direzioni, longitudinale e trasversale è stata eseguita con frese a controllo numerico.

Sempre in Italia, a Milano è stato realizzato dall'Arch. Michele De Lucchi con Alessandro Pedron un ponte di accesso al "Triennale Design Museum" commissionato dalla Fondazione La Triennale di Milano nel periodo 2003-2007. Il progetto architettonico per la ristrutturazione del palazzo e l'allestimento del Museo sono di Michele De Lucchi, che disegnò anche il celebre ponte di accesso: passerella in bambù lamellare, acciaio e vetro che collega il grande atrio centrale del palazzo al primo piano con l'entrata del museo. Il ponte è un prototipo, unico nel suo genere, mai realizzato, costituito da una composizione di listelli di bambù, tenuti insieme da una colla espressamente prodotta per questo scopo. Le prove di resistenza del composito furono condotte nei laboratori dell'Università di Venezia, resasi disponibile a sperimentare materiali e tecnologie non codificate.

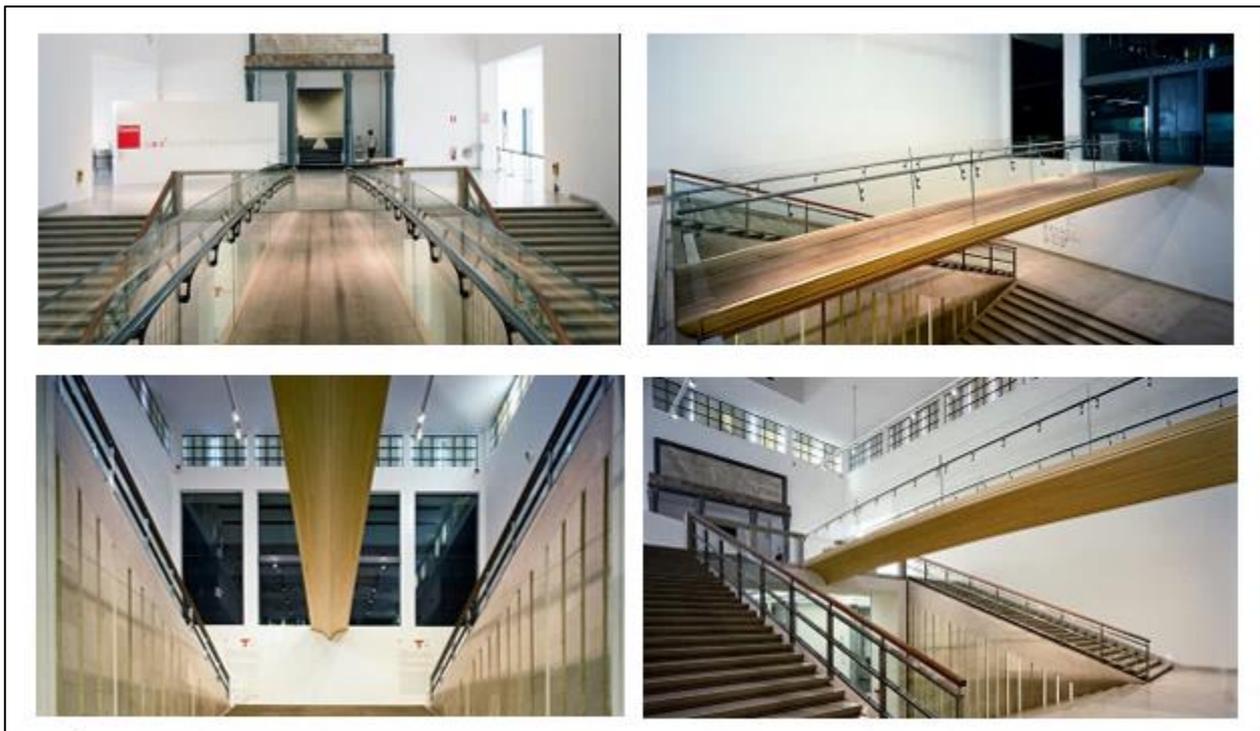


Figura 28 - a) visuale da sopra il ponte in Bambù; b) Visuale di lato e sopra del ponte; c) Visuale da sotto del ponte; d) Visuale di lato e sotto del ponte.

Anche Arch. Attilio Pizzigoni con il progetto portato al concorso per il padiglione italiano all'Expo di Shanghai del 2010, presenta lo schema strutturale delle travi in semplice appoggio di Leonardo in travi in bambù lamellare. Il suo obiettivo è quello di unire la tradizione italiana con un materiale ecologico e molto utilizzato nell'Expo.



Figura 29 - Proposta Arch. Pizzigoni Expo 2010 - <https://www.archdaily.com/57891/norway-pavilion-for-shanghai-world-expo-2010>

La società The Oval Partnership realizza INTERO Kunming Bamboo House ovvero la prima casa in bambù laminato a più piani al mondo, realizzata nel sito Expo INTEGER, a Kunming, nella provincia di Yunnan, nella parte della Cina occidentale.



*Figura 30 - Esterno Interno Kunming Bamboo House*

La struttura è a due piani si distingue per le superfici lisce e linee pulite, situata su un terreno collinare è realizzata totalmente in bambù. La tecnologia utilizzata in questa struttura si fonda su un sistema di schermatura antipioggia e pannelli sandwich che forniscono isolamento termico elevato.



*Figura 31 - Interno Interno Kunming Bamboo House*

La casa è stata completata nel 2010 e la Oval Partnership ha realizzato questo progetto di ricerca con scienziati e ingegneri delle istituzioni accademiche locali, inclusa l'Università di Scienza e Tecnologia di Kunming.



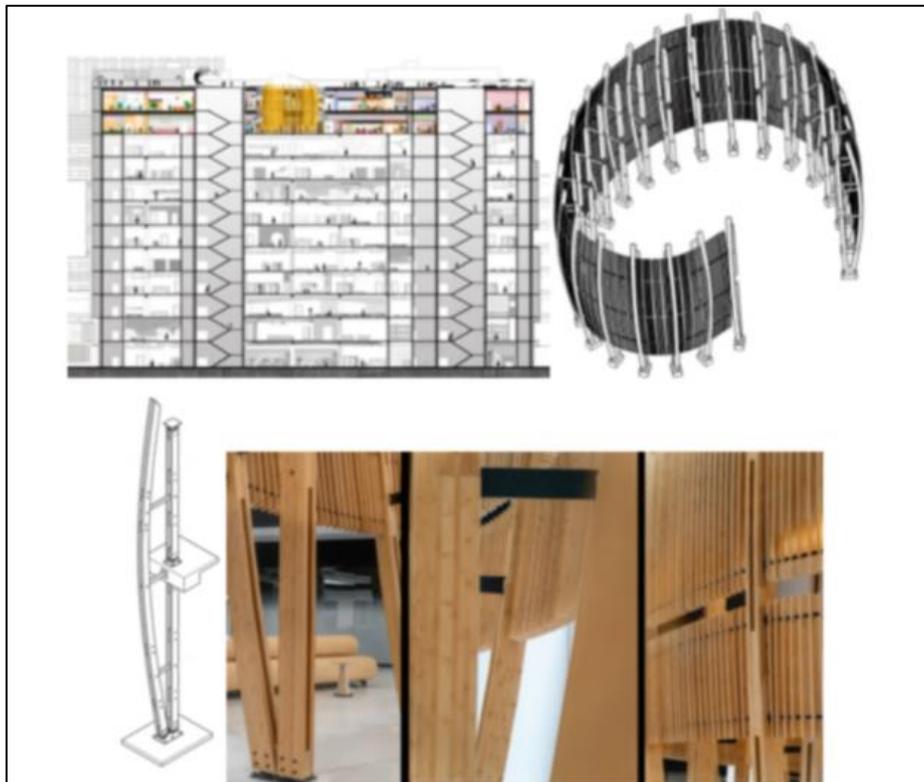
*Figura 32 - Interno Interno Kunming Bamboo House*

La società Daga Architects realizzò nel 2019 “Bamboo tower in the sky”- Kunming Joy-City Ucomune nel distretto industriale Kunming, Laoluoshi Bay a Beijing in Cina.



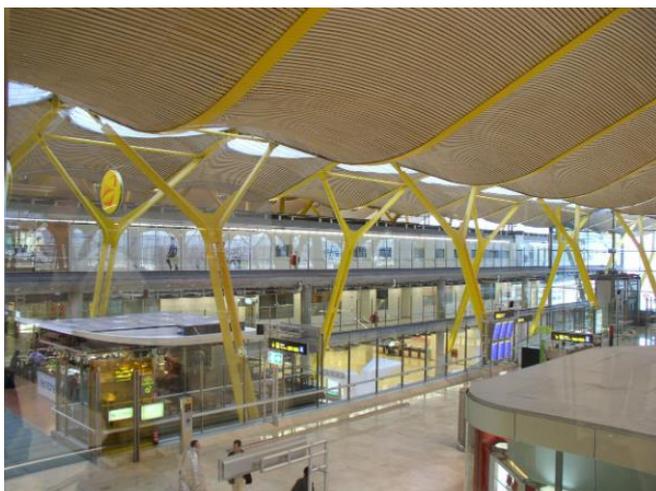
*Figura 33 - Bamboo tower in the sky- Kunming Joy-City Ucommune*

Ucommune è situato internamente ad un altro edificio all'undicesimo e dodicesimo piano di Joy City.



*Figura 34 - a) posizione tower bamboo. b) visualizzazione 3D della struttura. c) Modellazione dell'elemento strutturale d) Elemento strutturale in bambù lamellare*

Moso International ha realizzato con il design Rogers Stirk Harbour + Partners – Estudio Lamela Arquitectos, il più grande progetto al mondo realizzato in bambù, l'Aeroporto Internazionale di Madrid Adolfo Suárez Barajas è il secondo aeroporto più grande d'Europa. Il controsoffitto curvo del Terminal 4, aggiunto durante la ristrutturazione completata nel 2005, è diventato il segno distintivo dell'aeroporto visitato da milioni di passeggeri ogni anno.



*Figura 35 - Aeroporto di Madrid, Terminal T4*

Il bambù è stato scelto in quanto materiale adatto a soddisfare sia i più elevati standard di sicurezza antincendio, sia i requisiti tecnici richiesti dal design curvo del controsoffitto.

Il soffitto è composto da tavole larghe 100 mm realizzate in multistrato di impiallacciatura di bambù MOSO. Le qualità visive di questo materiale conferiscono al terminal T4 un carattere unico e particolare.

### 3. Legno lamellare

Il legno lamellare è il più classico dei prodotti di legno chiamati ingegnerizzati, che nasce dalla necessità di superare i limiti dimensionali e strutturali del legno massiccio.

Le due tecniche da cui nasce il legno lamellare sono:

- Laminazione: diminuire i limiti della materia prima ovvero ridurre i difetti;
- Incollaggio: aumentare i limiti dell'elemento finito;

È un materiale composito derivante dal legno naturale lavorato a livello industriale per conservare i pregi ma anche migliorare gli svantaggi del legno massiccio. Prevalentemente vengono utilizzati l'abete rosso, abete bianco e larice.

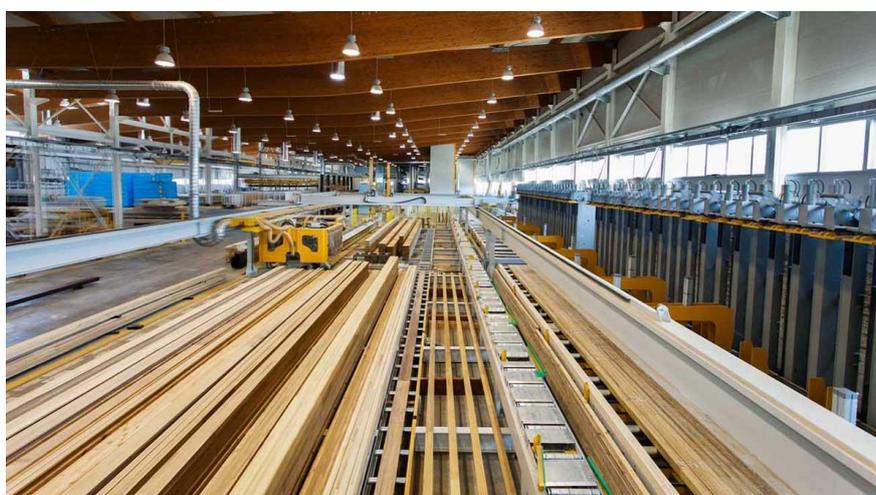


Figura 36 - Il legno lamellare

I primi esemplari nascono in Europa all'inizio dello scorso secolo, in Italia invece fa la sua comparsa in Alto Adige intorno agli anni '60 ma il primo vero stabilimento nasce a Bressanone intorno agli anni '70.

Per quanto riguarda le dimensioni, in commercio si trovano sezioni standard come:

Tabella 7 - Dimensione sezioni

<b>Dimensioni degli elementi [cm]</b>	
8×10	12×20
8×16	16×24
10×10	12×24
10×12	20×20
12×12	20×24
12×16	20×28
16×16	20×32
16×20	20×40

### 3.1 Produzione

La lavorazione avviene tramite incollaggio di un minimo di tre lamelle (o strati) di legno di larghezza non superiore ai 20 mm incollate tra loro con le fibre parallele, in modo da ottimizzare le tensioni della singola tavola e ottenere un prodotto finale più stabile e più elastico.

In questo modo si possono superare in spessore anche i limiti dimensionali per le travi di legno massello, vantaggio fondamentale nel settore edilizio.

Il legname di partenza da ridurre in tavole si distingue in legno di 1° categoria e legno di 2° categoria in base alle proprietà come la presenza di difetti e il peso specifico.

Il legno di prima categoria deve essere caratterizzato da una limitata presenza di nodi ed un peso specifico intorno ai 500 kg/m<sup>3</sup> mentre per il legno di seconda categoria la dimensione dei nodi può raggiungere i 4 cm a differenza di quello di prima categoria e il peso può ridursi fino ai 400 kg/m<sup>3</sup>.

Una volta effettuato questo controllo si passi alla riduzione dei tronchi in lamelle, in seguito viene effettuata l'essiccazione delle tavole, in modo da mantenere un grado di umidità compatibile con il tipo di colla. In linea generale, l'umidità delle colle si aggira intorno al 10%.

L'essiccazione del legno è sottoposta a parametri molto rigidi: posto nei cosiddetti forni di essiccazione, il legname impiegato deve raggiungere un grado di umidità molto specifico, in modo che sia compatibile con la colla utilizzata, ma soprattutto che possa assolvere la sua funzione una volta installato in una struttura.

Al fine di ottenere questo grado di umidità, le lamelle vengono lasciate in appositi essiccatoi. Terminata l'essiccazione, le lamelle si lasciano riposare per 18-24 ore, prima dell'incollaggio.

Una fase importante è il controllo delle tavole, per escludere le lamelle che hanno dei difetti come spaccature e nodi che superano certe dimensioni. Questi controlli vengono eseguiti durante tutto l'intero ciclo produttivo, alcuni di questi controlli come il controllo del tasso di umidità sono automatizzati altri invece sono visivi come la presenza di nodi o spaccature.

Per fornire una buona finitura si effettua la piallatura, ciò è utile per un corretto incollaggio con l'assenza di difetti.

L'incollaggio delle lamelle avviene tramite presse automatizzate, una volta terminata la stesura della colla le tavole vengono sistemate sotto le presse dove rimangono per 10-15 ore.

In questa fase l'elemento fondamentale è la colla che deve assicurare una resistenza meccanica che eguagli quella del legno e risulti omogenea per tutta la sezione della trave.

La colla impiegata è molto speciale e deve rispettare dei requisiti specifici (stabiliti dalla norma UNI EN 301 come descritto per il lamellare di bambù).

Esistono diversi tipi di colle, tra cui, colle resistenti agli agenti atmosferici, colle resistenti a escursioni termiche e temperature elevate.

Le prestazioni del lamellare sono fondamentalmente legate alla qualità dell'incollaggio. Alla base per valutare il grado di incollaggio raggiunto vi è:

- Resistenza a flessione e a taglio;
- Rottura del legno ovvero si considera la % di fibre sane sulla superficie di rottura;
- delaminazione

Una volta stesa la colla, si passa alla pressatura con una certa rapidità.

L'ultima fase è la finitura delle travi, questa fase potrebbe prevedere la predisposizione di fori destinati a connessione metalliche. In questa ultima fase le travi vengono fatte passare dentro presse fisse in modo da uniformare lo spessore.

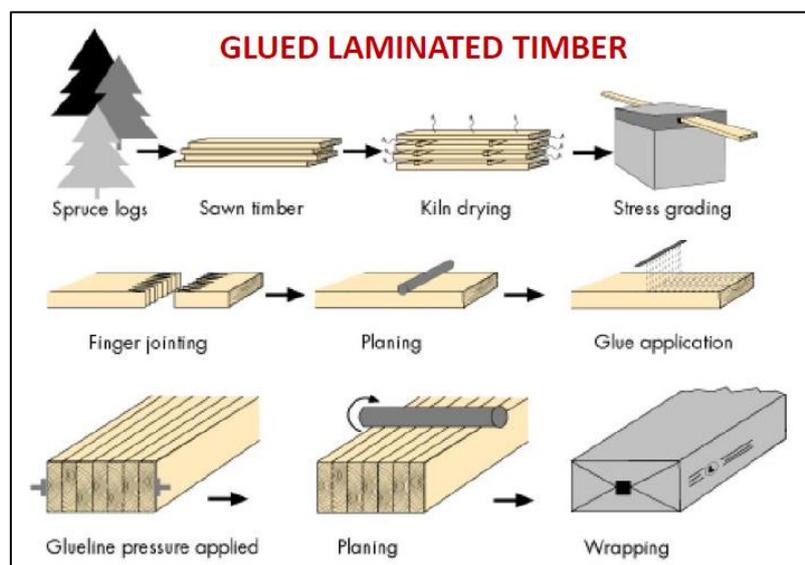


Figura 37 - Fasi di produzione del legno lamellare

### 3.2 Proprietà meccaniche e fisiche

Le prestazioni meccaniche del legno lamellare sono connesse all'origine naturale del materiale. La fibra può essere assimilata ad un composito con matrice (lignina) in cui si trovano elementi fibrosi ad alta resistenza meccanica disposte parallelamente all'asse delle fibre.

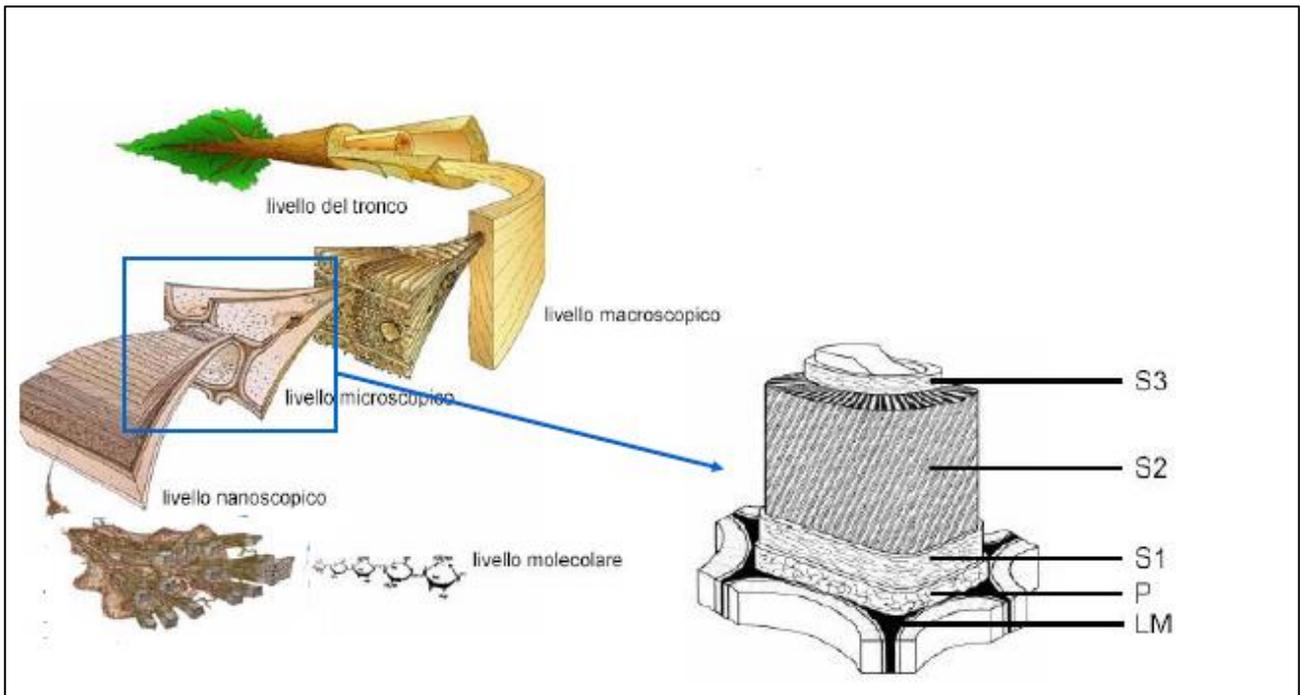


Figura 38 - I livelli del legno

Una delle caratteristiche principali del legno lamellare, è la leggerezza in particolare si ha un peso specifico di  $\gamma = 500 \text{ kg/m}^3$ , circa 1/5 del calcestruzzo e 15 volte più leggero dell'acciaio. La leggerezza incide positivamente sui costi del trasporto e sulla maggiore capacità a sostenere i carichi. La buona resistenza statica che forniscono al legno lamellare eccellenti proprietà antisismiche; inoltre è importante la resistenza agli agenti atmosferici e al fuoco.

Per la resistenza agli agenti atmosferici, il legno è un materiale igroscopico e risente sia della variazione di umidità, della temperatura e dell'umidità relativa. Di questo se ne tiene conto all'interno dei coefficienti legati alla classe di servizio e durata.

Per la resistenza al fuoco, questa risulta essere superiore a quella delle strutture in acciaio o in calcestruzzo armato. Infatti, nel legno lamellare, grazie alla natura essere un materiale combustibile e al buon isolamento termico fornito dalla parte di sezione carbonizzata, la combustione avviene lentamente: un aumento lento della temperatura corrisponde ad una variazione trascurabile della resistenza meccanica delle fibre di legno della sezione non carbonizzata.

La struttura arriva a rottura solo quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente diminuita da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante, risulta così di avere una buona resistenza meccanica per l'intera struttura.

Il legno inoltre è anche un materiale ortotropo ovvero le proprietà meccaniche sono funzione dell'orientazione delle fibre, in particolare le caratteristiche migliori si avranno in direzione parallela alla fibratura. Infatti, le resistenze in direzione perpendicolare alle fibre sono molto ridotte rispetto a

quelle in direzione parallela; le verifiche vengono effettuate separatamente proprio a causa della sua natura ortotropa.

Importante è evitare la presenza di tensione di trazione perpendicolare ma nel caso in cui non potessero essere evitate vanno valutate con molta attenzione e mantenute a valori bassi.

Viene considerato un materiale fortemente viscoso, dove la deformazione prodotta dai carichi permanenti cresce nel tempo ma anche un materiale durabile nel caso in cui viene ben protetto.

### **3.3 Normative**

A differenza del bambù lamellare, le normative che riguardano il legno lamellare sono molteplici.

In Italia si fa riferimento alle norme tecniche NTC2018, all'Eurocodice 5 – EN 1995-1-1:2014 e al CNR DT206/2018-R1.

Nel 2007 veniva pubblicato, sotto l'egida del Consiglio Nazionale delle Ricerche, il documento DT 206/2007 avente ad oggetto le "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno".

Nelle istruzioni fornite dalla CNR vengono forniti i requisiti di resistenza meccaniche, comportamento in esercizio e durabilità delle strutture.

Nel 2018 con l'aggiornamento delle NTC, si è cercato di armonizzare quanto fornito dall'EC5.

In Germania, le strutture in legno sono progettate utilizzando la DIN 1052:2008-12, mentre in Svizzera si utilizza la SIA 265:2012 + SIA 265-C1:2012.

#### 4. Confronto legno lamellare - bambù lamellare

La sfida più grande per l'uso del bambù laminato è il costo.

Sono stati effettuati degli studi riguardanti i costi dei materiali da costruzione e confrontando i costi del legno rispetto al bambù lamellare è risultato che, nonostante il bambù laminato usasse meno materiale, il costo del progetto era tre volte quello del legname strutturale.

Il pensiero comune è che in aree con risorse di legname limitate e bassi tassi di manodopera, il lamellare di bambù possa comunque essere competitivo.

In Italia i prezzi variano in base allo spessore, si passa da 5 a 40 con un prezzo medio che varia da 14 €/m<sup>2</sup> a 74 €/m<sup>2</sup>.

In Cina, dagli anni 1990 al 2010 ci si è trovati davanti ad una crescita esponenziale dei guadagni riguardanti il bambù, l'aumento dell'utilizzo del materiale fornisce una speranza nei prossimi anni di un incremento nell'utilizzo nell'ambito delle strutture.

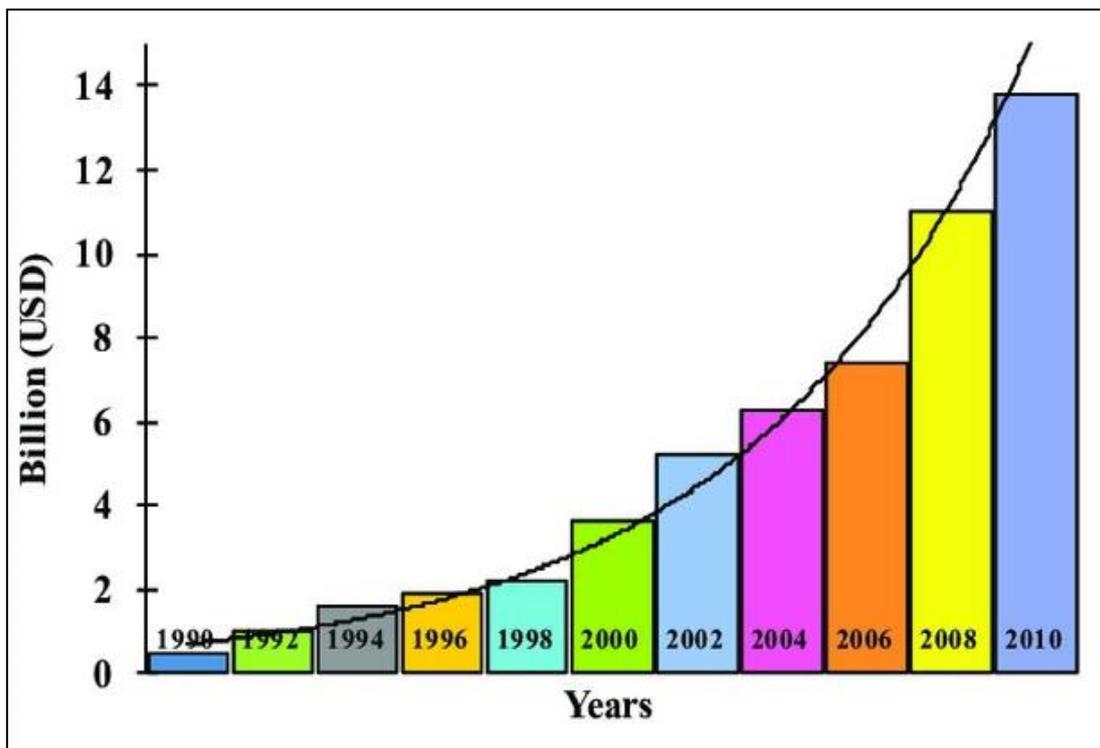


Figura 39 - Aumento dei costi anni 90-2010 del bambù - Source: Yue Yongde (2012)

Per il legno invece i prezzi sono inferiori, essendo molto utilizzato come materiale strutturale ha una variabilità molto ampia.

Ovviamente il prezzo dipende da quanto sia pregiato il legname di partenza oltre che dalle dimensioni, grado di finitura e qualità di lavorazione.

Un esempio può essere il prezzo delle travi in legno lamellare in abete, piallate sui quattro lati, di qualità industriale, che varia dai 500 ai 700 euro al metro cubo.

Per travi in lamellare, in larice bilama, il prezzo oscilla dai 1100 ai 1300 euro circa a metro cubo.

Dalle quotazioni a metro cubo vengono poi determinati i prezzi al dettaglio per il singolo elemento.

Inoltre, il bambù è un materiale “più” sostenibile del legno, questo perché se prendiamo per esempio la specie più diffusa in Italia ovvero il rovere, questo ha tempi di ricrescita di circa 80 anni. Per il bambù invece, il tempo medio di crescita è di circa 4-5 anni.

Questa netta differenza mette al primo posto il bambù come pianta con la crescita più rapida, rendendolo rinnovabile soprattutto se il prelievo avviene in aree soggette a riforestazione garantita.

Il fatto di essere un materiale “più” rinnovabile del legno lo si può riscontrare nella produzione, il bambù può produrre fino a 20 volte più legname rispetto al numero di alberi di una stessa area.

Come è stato descritto nei capitoli precedenti, un altro problema del bambù lamellare è la disponibilità delle sezioni. Per il legno sono disponibili sezioni standard, ma essendo un materiale relativamente nuovo i produttori del bambù lamellare prediligono sezioni ridotte e meno uniformi.

I produttori però riferiscono che nel caso in cui si volessero delle sezioni standard, queste verrebbero realizzate ma ovviamente i prezzi aumenterebbero ancora di più.

Nella *tabella 8* vengono riportate le proprietà meccaniche a confronto:

*Tabella 8- Proprietà meccaniche bambù lamellare e legno lamellare*

<b>Proprietà meccaniche metriche</b>			
<b>Caratteristiche</b>		<b>Bambù lamellare</b>	<b>Legno lamellare [*]</b>
Compressione	Parallela [0°]	<b>93 MPa</b>	<b>24 MPa</b>
	Perpendicolare [90°]	<b>21 MPa</b>	<b>2,5 MPa</b>
Trazione	Parallela [0°]	<b>148 MPa</b>	<b>16,5 MPa</b>
	Perpendicolare [90°]	<b>3,75 MPa</b>	<b>0,4 MPa</b>
Flessione	-	<b>56,7 MPa</b>	<b>24 MPa</b>
Taglio	-	<b>20 MPa</b>	<b>3,5 MPa</b>
Modulo elastico	-	<b>26 x 10<sup>3</sup> MPa</b>	<b>11600 MPa</b>
Modulo di taglio	-	<b>9630 MPa</b>	<b>720 MPa</b>
Densità	-	<b>690 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>385 kg/m<sup>3</sup></b>

[\*]: EN 14080: 2013 "strutture di legno - legno lamellare incollato" - [http://www.sttan.it/ap-punti/Prontuario/NTC2018-04\\_4-Legno-resistente\\_prodotti\\_legno.pdf](http://www.sttan.it/ap-punti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf)

Il confronto è stato effettuato sui dati forniti da *Lamboo* per il bambù lamellare e per il legno lamellare si è preso in considerazione il GL24h ovvero il più utilizzato in commercio.

I risultati delle prove di compressione e trazione (sia parallele che perpendicolare alla fibratura) indicano che la direzionalità delle fibre ha effetto significativo sulle proprietà di resistenza e rigidità di GLG, essendo in tutti i casi più alto per la direzione parallela.

Si può notare però che, similmente al legno lamellare, la resistenza perpendicolare alle fibre risulta essere comunque inferiore alla resistenza in direzione parallela.

Un vantaggio del bambù laminato è la resistenza a flessione rapportata al modulo di elasticità che restituisce valori elevati rispetto al legno lamellare.

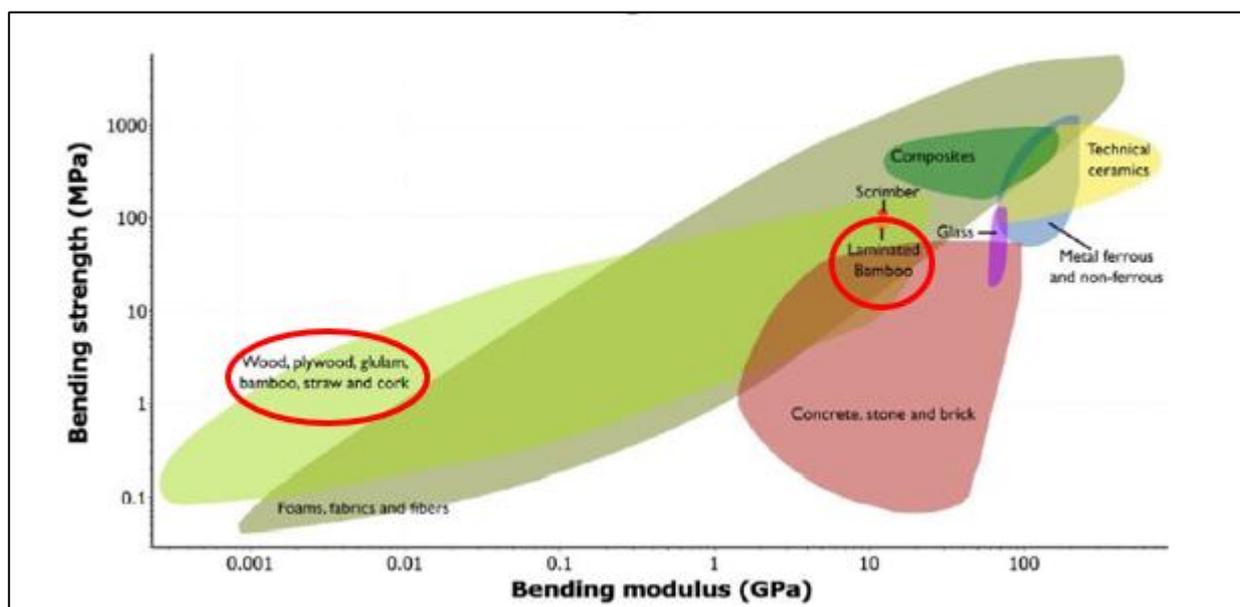


Figura 40 - Modulo e resistenza alla flessione in materiali costruttivi differenti - CES. Cambridge engineering selector edupack software. Cambridge, UK: Granta Design Limited; 2013.

Le caratteristiche del bambù lamellare sono nettamente superiori a quelle del legno lamellare, importante è valutare la densità: il bambù lamellare ha un valore di densità superiore al valore del legno lamellare.

Inoltre, se si vogliono analizzare i valori di ritiro nelle direzioni radiale e tangenziale, queste sono rispettivamente del 3,5% e del 4,0% e il calo di volume è stato stimato al 7,7%.

Quando si confrontano questi valori con quelli tabulati per le specie di conifere, il lamellare di bambù può essere considerato un materiale più stabile dal punto di vista dimensionale poiché i valori di ritiro sono inferiori a quelli della maggior parte delle specie legnose.

Tuttavia, il restringimento nella direzione longitudinale (0,6%) è notevolmente superiore a quella valori tipici per le specie legnose (0,1–0,2%) e quindi dovrebbe essere considerato con attenzione quando i cambiamenti longitudinali nelle dimensioni causato da cambiamenti di umidità potrebbe essere motivo di preoccupazione.

Il confronto tra le proprietà meccaniche selezionate di bambù lamellare contro valori del legno lamellare riportati dimostrano che il bambù lamellare potrebbe essere considerato un eccellente prodotto da costruzione, grazie alla sua elevata resistenza e rigidità.

Pertanto, il laminato di bambù ha un grande potenziale come materiale alternativo per costruzioni a base di bambù, tuttavia il fatto che le proprietà meccaniche del laminato di bambù sono determinate su piccoli campioni non fanno ottenere una completa caratterizzazione del laminato, sarà necessario in futuro effettuare ulteriori ricerche per affrontare le lacune dovute a queste limitazioni.

Si può affermare però che anche avendo un limitato numero di dati a disposizione, questi rappresentano un buon punto di partenza per ulteriori approfondimenti.



## Caso Studio

La seconda parte dell'elaborato, si concentra lo studio sul confronto tra legno e bambù lamellare esaminando il caso di un *garden office*.

Viene effettuato il progetto con entrambi i materiali e nel caso nel bambù lamellare si studia inoltre, la realizzazione di un'alternativa di due delle vele facenti parte la struttura di copertura andando ad inserire dei culmi secondo la teoria dei diffusori acustici.

Una volta progettata la struttura, si vogliono analizzare e confrontare i due materiali esaminando una struttura reale determinandone i pro e i contro a livello di progettazione, modellazione e verifica.

## 5. Inquadramento generale

Il caso studio riguarda il progetto strutturale di un *garden office*, costruito a Cambridge in Inghilterra, nel mese di aprile 2021.

Perché costruire un *garden office*? L'Inghilterra, è tra gli stati che prediligono avere delle aeree verdi nel retro delle proprie abitazioni. A differenza dell'Italia, le abitazioni inglesi sono principalmente realizzate con un numero limitato piani; gli edifici possono risultare simili alle villette a schiera costruite in Italia.

L'idea del *garden office* nasce, dall'esigenza di separare la vita lavorativa dalla vita domestica, nell'ultimo periodo a causa della pandemia, sono aumentati i lavori che prediligono lo smart working e la realizzazione dei *garden office* risulta la scelta più adatta per stare all'aperto mentre si lavora.

Uno dei vantaggi è che raramente hanno bisogno di un permesso di pianificazione, purché soddisfi criteri di base.

I criteri di base da rispettare sono principalmente relativi alle dimensioni del giardino, all'altezza in quanto non può essere alto più di un piano e alla vicinanza dell'edificio adiacente.

Pertanto, è necessario verificare con il permesso di pianificazione e i regolamenti edilizi. Nella maggior parte dei casi è improbabile che si abbia bisogno di un permesso di pianificazione per un *garden office*, poiché le strutture sono spesso capannoni e case riproposte, che sono tutte nelle linee guida di sviluppo consentite.

I *garden office* tendono a non richiedere nemmeno il permesso di pianificazione o le fondamenta, il che li rende veloci da acquistare e veloci da installare.

Lo stato britannico ha incentivato la costruzione di *garden office* con finanziamenti a fondo perduto.

Definito il concetto di *garden office*, si passa alla presentazione della struttura: realizzata da quattro portali collegati tramite delle vele formate da travetti su cui è appoggiato un pannello.

La struttura è stata realizzata dalla *Canducci SRL* e per la parte acustica è stata studiata dal Designer Francesco Pellisari che è anche colui che ha ideato e commissionato il lavoro.

Le dimensioni della struttura fanno riferimento:

- lunghezza: il valore massimo di 7,203 metri si raggiunge nel versante ovest della struttura;
- altezza: il valore massimo si raggiunge nel portale II lato est, con una quota di 3,233 metri con conseguente riduzione di altezza fino a circa 3 metri nel portale IV mentre nel lato ovest l'altezza massima raggiunge i 2,563 metri;

Il portale I, è formato da una trave unica, mentre il portale II e II sono realizzati tramite tre e quattro travi a causa del passaggio delle vele che collegano i vari portali mentre il portale IV è formato da 2 travi che si congiungono nell'intersezione tra trave e vela.

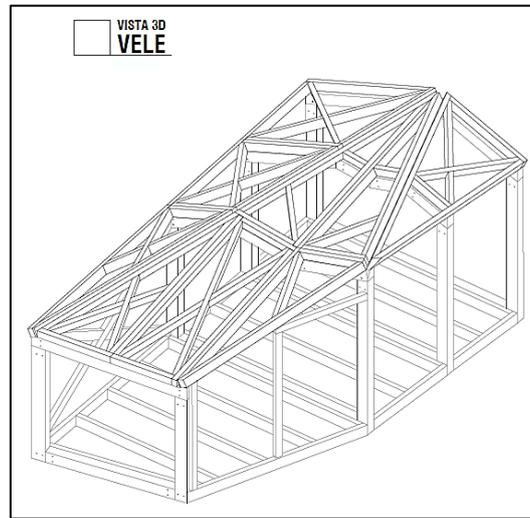


Figura 41 - 3D caso studio

Le vele che formano la copertura dei portali sono realizzate tramite studi riguardanti l'acustica al fine di utilizzare il materiale legno come fonte di diffusione del suono al passaggio in pedana.

I portali sono realizzati con degli appoggi e tra loro hanno differenti altezze dal primo al quarto portale e aumentano con dei dislivelli in corrispondenza dei travetti che collegano i portali così da portare continuità.

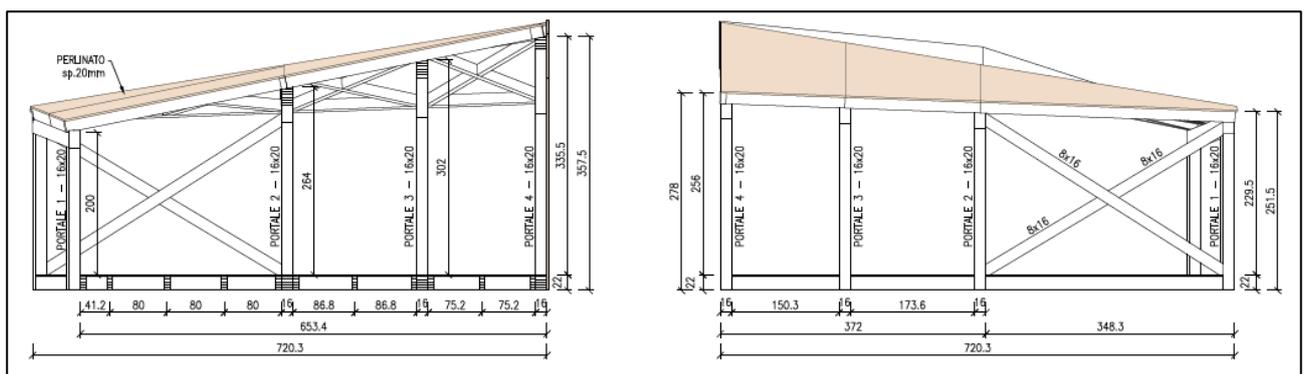


Figura 42 - Lato ovest (sx), Lato est (dx)

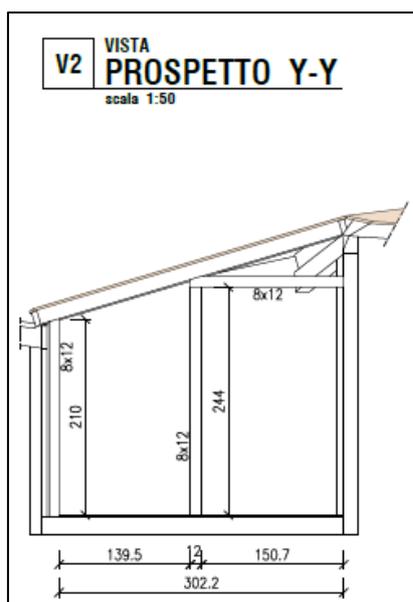


Figura 43 - Prospetto YY con entrata

È presente nel lato ovest un controventamento a X a causa della distanza tra il primo e il secondo portale. L'entrata si trova nel lato est della struttura.

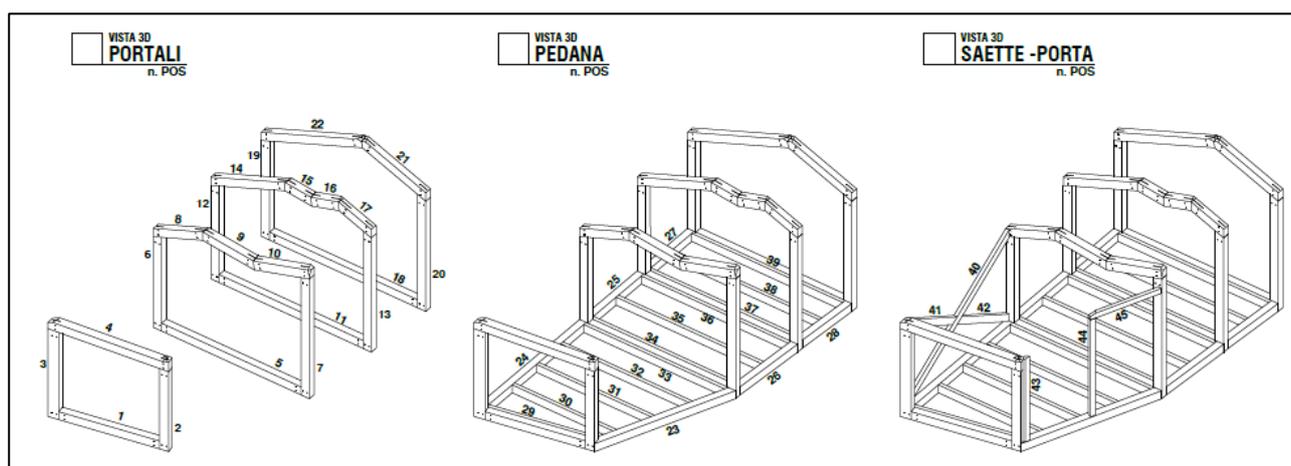


Figura 44 – Vista 3D di portali, pedana e saetta porta

La struttura viene studiata con l'utilizzo del legno lamellare e successivamente tramite l'utilizzo del bambù lamellare così da evidenziare le differenze e scoprire se ci sono delle possibilità di utilizzo di questo nuovo materiale.

Sono state implementate nel software le combinazioni considerando il peso proprio, carico neve e vento in entrambe le tipologie di realizzazione della struttura sviluppando sia il posizionamento interno che esterno.

Una volta progettati i portali e le conseguenti connessioni, si è passati allo studio delle vele progettando sia le connessioni con il legno lamellare che con il bambù lamellare.

## 6. Progetto in Legno Lamellare

Il progetto del *garden office* è sviluppato con l'utilizzo del legno lamellare, e consiste nella realizzazione di quattro portali in legno lamellare collegati da travetti costituenti un sistema di vele chiuso con un perlinato.

Il capitolo 6 si concentra sull'analisi, progettazione e verifica della struttura grazie all'ausilio del software Strauss7 per ciò che riguarda la modellazione e Microsoft Excel per la progettazione e verifica della struttura.

### 6.1 Materiali

#### *Legno lamellare*

Le classi di resistenza normate secondo EN 14080:2013, per l'impiego strutturale del legno lamellare incollato vengono definite tramite la sigla GL XX h o GL XX c; la denominazione delle classi di resistenza del legno lamellare incollato è composta dai caratteri *GL* (abbreviazione di "Glulam", Glued Laminated Timber, ovvero legno lamellare in inglese) e dal valore caratteristico XX della resistenza a flessione espresso in  $N/mm^2$ .

Per quanto riguarda la composizione delle sezioni si distinguono le sezioni "omogenee" (indicate dalla lettera "h") e quelle "combinata" (indicate dalla lettera "c"). Di regola le classi di legno lamellare incollato sono quindi descritte come, per esempio, GL 24h, oppure GL 28c.

La EN 14080:2013 definisce sette diverse classi di resistenza, tanto per le sezioni omogenee quanto per le sezioni combinate.

Tabella 9 – Classi di resistenza del legno lamellare

<i>Classi di resistenza del legno lamellare incollato con sezione omogenea/combinata</i>
GL 20 h/c
GL 22 h/c
<i>GL 24 h/c</i>
GL 26 h/c
GL 28 h/c
GL 30 h/c
GL 32 h/c

Le classi di resistenza usuali sono le classi GL 24h, GL 28c e GL 32c.

In rosso nella tabella 9 è evidenziato il tipo di legno lamellare utilizzato nella realizzazione dei portali ovvero il GL 24h, mentre nella tabella 10 si riportano le caratteristiche in accordo con la EN 1194 e UNI EN 14080:2013:

Tabella 10 – Caratteristiche GL24h - [http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04\\_4-Legno-resistente\\_prodotti\\_legno.pdf](http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_prodotti_legno.pdf)

In accordo alla EN 1194 e UNI EN 14080:2013	<b>GL24h</b>
<b>Resistenza [MPa]</b>	
$f_{m,k}$	24
$f_{t,0,k}$	19,2
$f_{t,90,k}$	0,5
$f_{c,0,k}$	26
$f_{c,90,k}$	2,5
$f_{v,k}$	3,5
<b>Modulo Elastico [MPa]</b>	
$E_{0,mean}$	12100
$E_{0,05}$	10100
$E_{90,05}$	300
$G_{mean}$	650
$G_{0,05}$	540
<b>Massa volumetrica [kg/m<sup>3</sup>]</b>	385

### *Legno massiccio*

I travetti che costituiscono la copertura dei portali sono realizzati con il legno massiccio strutturale. La classificazione viene eseguita secondo la UNI EN 338: 2016 nella quale si distinguono due classi di resistenza distinte:

- Classe C per conifere e pioppo;
- Classe D per latifoglie.

La lettera riferita alla classe viene poi seguita da un numero che sta a indicare la resistenza caratteristica a flessione espressa in MPa.

Si riporta unicamente come esempio la tabella fornita dalla norma tecnica per la classe C evidenziando in rosso le caratteristiche riferite alla classe utilizzata per i travetti:

	Class	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
<b>Strength properties in N/mm<sup>2</sup></b>													
Bending	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tension parallel	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tension perpendicular	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression parallel	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compression perpendicular	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Shear	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
<b>Stiffness properties in kN/mm<sup>2</sup></b>													
Mean modulus of elasticity parallel bending	$E_{0,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
5 percentile modulus of elasticity parallel bending	$E_{0,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Mean modulus of elasticity perpendicular	$E_{0,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Mean shear modulus	$G_{mean}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
<b>Density in kg/m<sup>3</sup></b>													
5 percentile density	$\rho_k$	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Mean density	$\rho_{mean}$	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520
NOTE 1 Values given above for tension strength, compression strength, shear strength, char. modulus of elasticity in bending, mean modulus of elasticity perpendicular to grain and mean shear modulus have been calculated using the equations given in EN 384.													
NOTE 2 The tension strength values are conservatively estimated since grading is done for bending strength.													
NOTE 3 The tabulated properties are compatible with timber at moisture content consistent with a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 %, which corresponds to a moisture content of 12 % for most species.													
NOTE 4 Characteristic values for shear strength are given for timber without fissures, according to EN 408.													
NOTE 5 These classes may also be used for hardwoods with similar strength and density profiles such as e.g. poplar or chestnut.													
NOTE 6 The edgewise bending strength may also be used in the case of flatwise bending.													

Figura 45 - Classe di resistenza delle conifere - [http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04\\_4-Legno-resistente\\_pro-dotti\\_legno.pdf](http://www.sttan.it/appunti/Prontuario/NTC2018-04_4-Legno-resistente_pro-dotti_legno.pdf)

## Acciaio

Nel seguente elaborato, la casa produttrice di riferimento è la *Soltech s.r.l.* specializzata a livello nazionale in sistemi di fissaggio per la costruzione in legno.

Per le connessioni trave-pilastro si utilizzano *spinotti*  $\phi 16$  di lunghezza 130 mm con classe di acciaio S235JR.



Figura 46 - Tipologia di connessione trave-pilastro – Catalogo Soltech



Commerciale		Dimensionale		
Gamma	Q.tà	D1	L	Acciaio
13016130	50	16	130	S 235

Figura 47 - Classe acciaio, connessione trave-pilastro – Catalogo Soltech

SPC > Caratteristiche meccaniche

Tipo di acciaio	$f_{u,k}$	$f_{y,k}$	$M_{y,k} \text{ } \phi \text{ 8-12-16-20}$
-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	Nm
S 235	360	235	24,1 - 68,1 - 145,9 - 260,7

Figura 48 - Caratteristiche meccaniche degli spinotti

La casa produttrice fornisce come  $f_{u,k}$  il valore di  $360 \text{ N/mm}^2$ , normalmente questo viene posto pari a  $400 \text{ N/mm}^2$ .

Per le connessioni portale-vele si utilizzano viti Torx da costruzione testa svasata con filetto parziale di diametro  $\phi 6$  di lunghezza 180 mm.



Figura 49 - Viti, connessione portale-vele – Catalogo Soltech

Gamma	Q.tà	d 1	L	Lf	Tfix
1656180	100	6	180	75	105



Figura 50 – Classe delle viti, connessione portale-vele – Catalogo Soltech

Descrizione	Diametro nominale [d]	
-	6,0 mm	
Diametro testa [dk]	[dk]	12,0
Diametro gambo	[ds]	4,25
Diametro nocchio	[d2]	4,0
Impronta torx	[Tx]	T-30
Momento di snervamento	[My,k]	10 Nm
Resistenza caratteristica di snervamento	[fy,k]	1000 N/mm <sup>2</sup>
Parametro caratteristico penetrazione testa	[fhead,k]	9,4 N/mm <sup>2</sup>

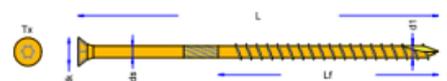


Figura 51 - Caratteristiche delle viti – Catalogo Soltech

## 6.2 Carichi e combinazione di calcolo

Le azioni agenti sono principalmente:

- pesi propri (strutturali e non strutturali);
- azione della neve;
- azione del vento;
- carichi accidentali in riferimento ad una copertura praticabile: circa 60 kg/m<sup>2</sup>.

Essendo posizionata a Cambridge, Inghilterra, si è adottata come normativa di riferimento *EN 1991 – Eurocode 1: Actions on structures Part 1-3 General actions – Snow Loads* per il carico neve e la *EN 1991-1-4:2005 - Wind actions* per il carico derivante dal vento.

### *Carico neve*

La normativa *EN 1991 – Eurocode 1* riguardo alla neve risulta molto simile alla normativa italiana. Il carico di neve deriva dal carico di neve al suolo, moltiplicato per fattori di conversione appropriati quali forma, termica e coefficienti di esposizione.

$$q_s = \mu_i \cdot C_E \cdot C_t \cdot s_k \quad (1)$$

$q_s$ : carico neve sulla copertura

$\mu_i$ : coefficiente di forma della copertura

$C_E$ : coefficiente di esposizione

$C_t$ : coefficiente termico

$s_k$ : valore caratteristico di riferimento del carico neve al suolo.

I carichi caratteristici della neve al suolo  $s_k$  sono dati dall'allegato nazionale riferito ad ogni paese CEN.

Nella figura 45 viene definita la posizione di Cambridge,UK, con quota 16,85 m s.l.m.

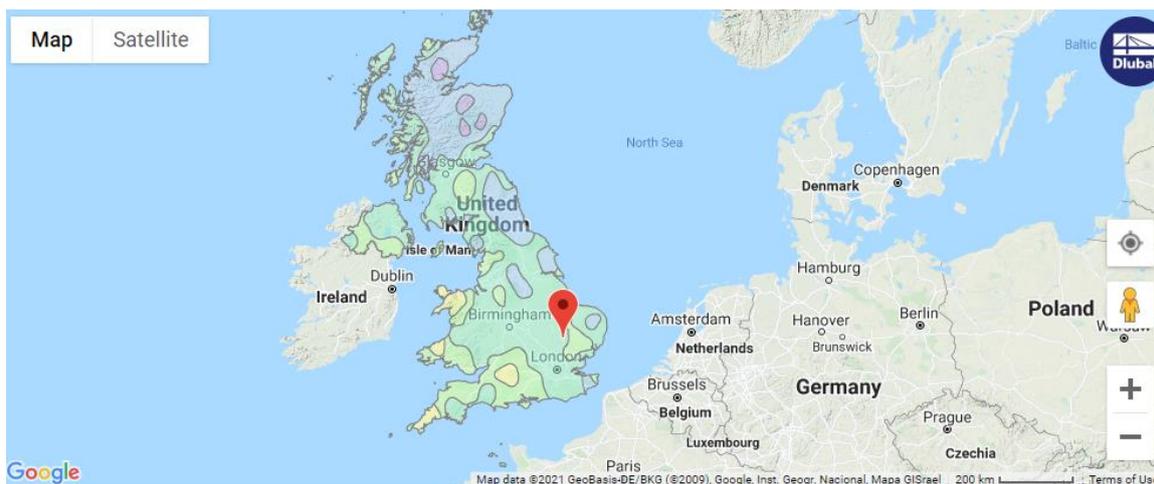


Figura 52 - Posizione Cambridge, UK, per il carico neve Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com)

E una volta specificata la posizione, viene definito il valore di  $s_k$ :

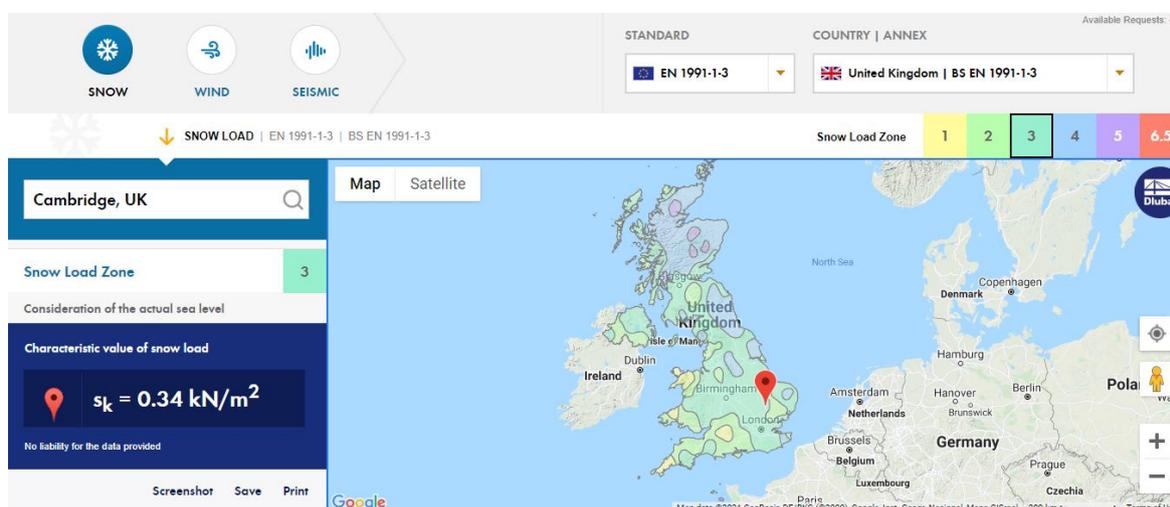


Figura 53 - Determinazione del valore  $s_k$  Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com)

Tabella 11 – Valore di  $s_k$

<b>Variabile: Neve</b>	
Zona 3 - Cambridge, Inghilterra 16,85 m s.l.m.	
$a_s$ [m]	$s_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
16,85	0,34

$C_E$  deve essere preso come 1,0 se non diversamente specificato per topografie diverse.

$C_t$  viene preso anch'esso pari a 1,0.

Per  $\mu_i$ , essendo la copertura di forma particolare viene assunto come angolo il valore massimo di inclinazione dei portali, con riferimento alla formula in figura 45:

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

Figura 54- Valori del coefficiente di forma, Tab. 3.4.II

Definiti tutti i parametri, si ottiene il carico neve:

$$q_s = \mu_i \cdot C_E \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,34 = 0,272 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Secondo la pratica inglese, nel caso in cui il carico neve non superi il carico accidentale di copertura praticabile (definito dalla normativa con valore pari a @  $60 \text{ kg/m}^2$ ) si può pensare di trascurarlo.

In questa situazione:

$$q_s \cong 30 \text{ kg/m}^2 \leq q_{\text{accidentale}} \cong 60 \text{ kg/m}^2$$

Pertanto, il carico neve si trascura.

### Carico vento

La normativa EN 1991-1-4:2005 - Wind actions fornisce indicazioni per il carico derivante dal vento differenti dalla normativa italiana.

La valutazione della velocità di progetto e della pressione cinetica di picco del vento procede secondo i passi seguenti:

- definita la posizione geografica e l'altitudine sul livello del mare della costruzione, si valuta la velocità base di riferimento  $v_{b,0}$  e la pressione  $q_b$ ;



Figura 55 - Mappa per carico vento, Inghilterra Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com)

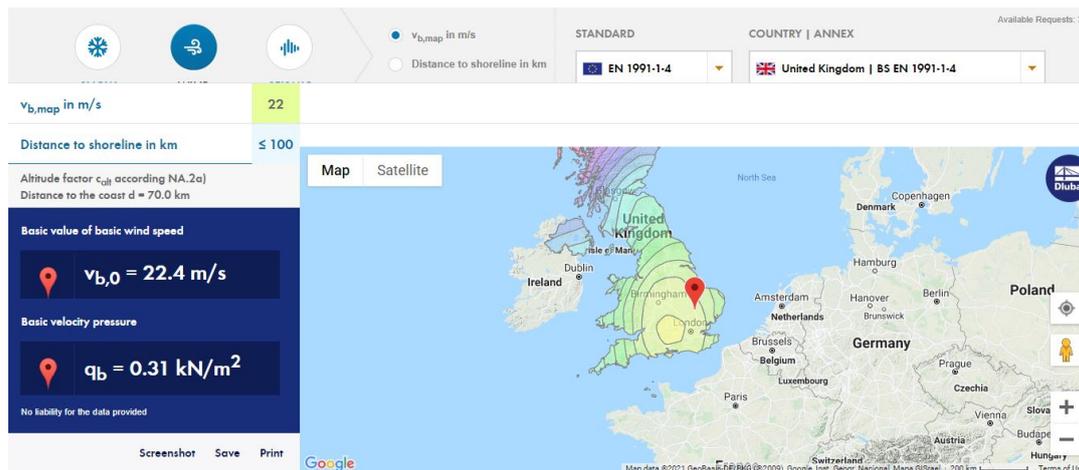


Figura 56 - Valori ottenuti da Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode (dlubal.com) per i parametri del carico vento

Tabella 12 - Parametri carico vento

<b>Variabile: Vento</b>		
<i>Zona 3 - Cambrige, Inghilterra 16,85 m s.l.m.</i>		
$v_{b,0} [m/s]$	$a_0 [m]$	$k_a [s^{-1}]$
22,4	16,85	0,01
$q_b [N/m^2]$	313,6	

- definita la rugosità locale del terreno nel sito ove sorge la costruzione, si determina la categoria di esposizione che in questo caso viene classificata come B ovvero: Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive;
- definita la topografia locale del sito ove sorge la costruzione, si valuta il coefficiente di direzione  $c_{dir}$  e coefficiente di stagione  $c_{season}$  posti pari a 1 per definire la velocità di base secondo la formula:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (3)$$

- in base alla classe di esposizione si determina il fattore del terreno in funzione della lunghezza di scabrezza  $z_0$ , che si ottiene a partire dalla categoria del terreno (figura 57) secondo la formula:

$$k_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (4)$$

$$z_{0,II} = 0,05 \text{ m (Terreno categoria II, Tabella 4.1)}$$

Terrain category		$z_0$ m	$z_{min}$ m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

Figura 57 - Classe di esposizione

Tabella 13 – Coefficiente di esposizione

Coefficiente di esposizione - Categoria di esposizione III		
$k_r$	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0,22	0,3	5

- Si calcola la velocità media  $v_m(z)$  (4.3.1) secondo la formula:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (5)$$

$c_r(z)$ : coefficiente di rugosità (4.3.2)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6)$$

$c_0(z)$ : coefficiente di orografia posto pari a 1;

- Viene calcolata la turbolenza (4.4) con la formula:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_i \quad (7)$$

$k_i$ : fattore di turbolenza posto pari a 1;

e per definire l'intensità della turbolenza si utilizza:

$$I_v(z) = \frac{k_i}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (8)$$

- Per determinare il carico derivante dal vento si definisce la pressione cinetica di riferimento  $q_p$ :

$$q_p = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot r \cdot v_m^2(z) \quad (9)$$

Con quest'ultima che vai a determinare le azioni del vento, moltiplicando per i coefficienti di pressione.

- La  $c_e$  la ricavi dal rapporto  $q_p(z)$  su  $q_b$ .

Di seguito si riportano i valori ottenuti:

*Tabella 14 – Parametri per il carico del vento*

<b>Calcolo dei parametri</b>	
z [m]	16,85
$c_r(z)$ -fattore di rugosità - 4.3.2 EN1991	0,87
turbolenza - 4.4	4,82
$I_v$	0,25
$c_0(z)$ -fattore di orografia	1
$k_I$	1
$q_p$ - pressione cinetica di riferimento [N/m <sup>2</sup> ]	633,41
$v_m(z)$ - velocità media - 4.3.1	19,44
$c_e$	2,02

- Determinate tutte le grandezze si moltiplica la pressione cinetica per i coefficiente di pressione e si valuta il carico del vento:

Pressioni interne: la EN 1991-1-4, 7.2.9(6) stabilisce che in assenza di un'apertura dominante il coefficiente di pressione interna ( $c_{pi}$ ) può essere assunto tra +0.2 e -0.3 ma come nella CNR per costruzioni completamente stagne viene posto pari a 0.

Pressioni esterne: si definisce a partire dalla figura 58 prese come condizioni unicamente la D e E

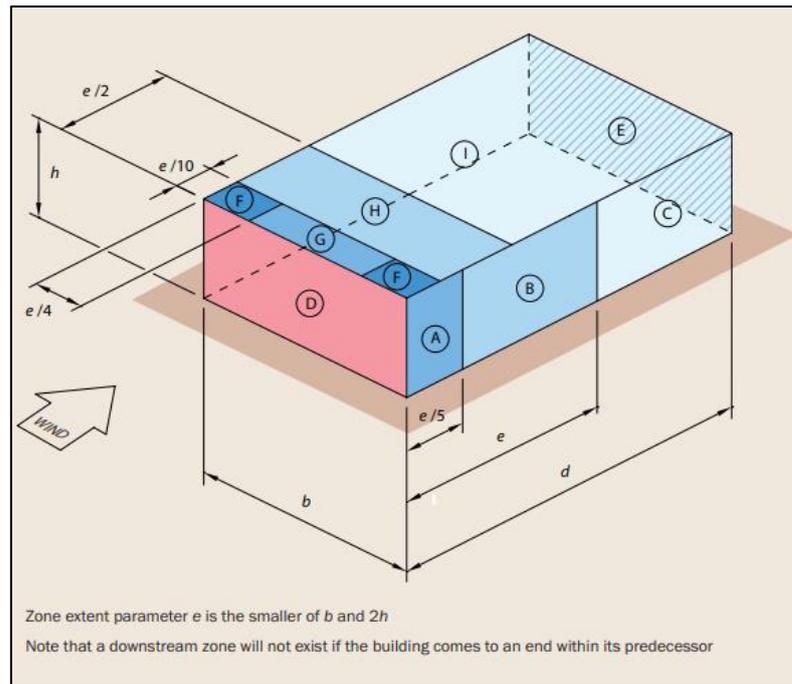


Figura 58 - Indicazioni sopra vento e sottovento

E tramite la tabella in figura 59 otteniamo a partire da un rapporto  $h/d$  minore di 0,25:

SIDE ZONES			FRONT	REAR	$h/d$
A	B	C	D	E	
				-0.7	5
				-0.65	4
			+0.8	-0.6	3
				-0.55	2
				-0.5	1
-1.2	-0.8	-0.5	+0.77	-0.45	0.8
			+0.75	-0.39	0.6
			+0.73	-0.37	0.5
			+0.72	-0.34	0.4
			+0.71	-0.31	0.3
			+0.7	-0.3	$\leq 0.25$

Note: No pressure coefficients are available for  $h/d > 5$ , except that for cladding pressure (only) NA.2.27 permits use of the values for  $h/d = 5$  'in the absence of better test data'.

Figura 59 - Valori  $C_{pe}$

Concludendo il carico derivante dal vento sarà:

- Front:

$$q_s = q_b \cdot c_{pe} = 0,44 \text{ kN/m}^2 \quad (10)$$

- Rear:

$$q_s = q_b \cdot c_{pe} = -0,19 \text{ kN/m}^2 \quad (11)$$

### *Peso proprio*

Come carichi permanenti strutturali si considerano i pesi proprio delle travi costituenti i portali di dimensioni:

- 16 x 24
- 16 x 20

*Tabella 15 – Calcolo dei carichi permanenti strutturali*

<b>Carichi Permanenti strutturali - <math>G_1</math> [kN/m]</b>	
<i>trave 16x24</i>	<i>0,23</i>
<i>trave 16x20</i>	<i>0,19</i>
	<b><i>0,42</i></b>

I permanenti non strutturali consistono nella somma dei pesi propri derivanti dai travetti posti in copertura e il perlinato:

*Tabella 16 – Calcolo dei carichi permanenti non strutturali*

<b>Carichi Permanenti non strutturali - <math>G_2</math> [kN/m]</b>	
<i>Perlinato spessore 20 mm - 4,50 x 0,020</i>	<i>0,12</i>
<i>Travetti 80x160 - 4,20 x 0,08 x 0,16</i>	<i>0,05</i>
	<b><i>0,17</i></b>

### *Combinazione dei carichi*

Le combinazioni delle azioni da adottarsi seguono la normativa italiana, e si trovano al punto 2.5.1 della NTC2018:

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (12)$$

Con:

$G_1$ : peso proprio degli elementi strutturali;

$G_2$ : peso proprio degli elementi non strutturali;

$Q$ : azioni variabili.

I coefficienti di sicurezza da adottarsi sono indicati nelle tabelle 2.5.1 e 2.6.1 della NTC2018:

Categoria/Azione variabile	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{1j}$	$\Psi_{2j}$
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E - Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $> 30$ kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota $\leq 1000$ m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota $> 1000$ m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Figura 60 - Valori dei coefficienti di combinazione, Tab. 2.5.1

		Coefficiente $\gamma_F$	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	favorevoli	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup>Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Figura 61 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, Tab. 2.6.1

Dato che la durata dell'azione influenza la resistenza del materiale a ciascuna azione è attribuita una classe di durata del carico:

Classe di durata del carico	Durata del carico	Esempio
Permanente	più di 10 anni	Peso proprio
Lunga durata	6 mesi - 10 anni	Carichi variabili di depositi
Media durata	1 settimana - 6 mesi	Carichi variabili in generale
Breve durata	meno di 1 settimana	Neve
Istantanea	--	Vento, sisma

Figura 62 - Classe di durata

Nel caso di combinazioni di carichi di durata differenti si deve far riferimento al carico con la durata più breve. Le combinazioni sono:

*Permanente:*

$$F_{d,permanente} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 \quad (13)$$

$$F_{d,permanente} = 1,3 \cdot 0,42 + 1,5 \cdot 0,17 = 0,81 \text{ kN/m}$$

*Breve:*

$$F_{d,breve} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} \quad (14)$$

$$F_{d,breve} = 1,3 \cdot 0,42 + 1,5 \cdot 0,17 + 1,5 \cdot 0,6 = 1,701 \text{ kN/m}$$

*Istantanea:*

$$F_{d,istantanea} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} \quad (15)$$

$$F_{d,istantanea} = 1,3 \cdot 0,42 + 1,5 \cdot 0,17 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,44 = 2,097 \text{ kN/m}$$

### 6.3 Dimensionamento

Essendo la struttura progettata precedentemente l'analisi, si è analizzata la scelta delle dimensioni utilizzate per effettuare il dimensionamento considerando tutti i carichi agenti.

Il dimensionamento si basa sulla determinazione del valore della  $h_{min}$  a partire da una verifica a flessione considerando come schema statico lo schema di una trave doppiamente appoggiata e come carico distribuito, il carico con durata più breve ovvero la combinazione istantanea.

Si ricava la sollecitazione di momento considerando come lunghezza, la maggiore ovvero associata al portale 4.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = 3,38 \text{ kNm} \quad (16)$$

*Verifiche di sicurezza*

I valori di calcolo della resistenza si ottengono con la relazione:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad (17)$$

$k_{mod}$ : coefficiente di correzione che tiene conto degli effetti della durata del carico e dell'umidità;

$X_k$ : valore caratteristico di una proprietà di resistenza;

$\gamma_M = 1,25$  coefficiente di sicurezza secondo Eurocodice 5.

Considerando una classe di servizio I il valore di  $k_{mod}$  associato risulta essere:

$$k_{mod,istantanea} = 1,1$$

La relazione da soddisfare è:

$$F_d \leq X_d \quad (18)$$

Che nel caso di verifica a flessione diventa:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (19)$$

Per determinare la  $h_{min}$ , si procede partendo dalla  $\sigma_{m,d}$  tramite la formula di Navier, ricavando il modulo di resistenza  $W$  avendo ipotizzando la dimensione della base:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \rightarrow \quad h_{min} = \sqrt{\frac{6 \cdot M}{\sigma_{m,d} \cdot b}} \quad (20)$$

In tabella 17, sono riassunti i risultati ottenuti:

Tabella 17 – dimensionamento travi portali

<b>Dimensionamento travi</b>	
b [mm]	160
M [kNm]	3,38
$f_{m,d}$ [MPa]	21,12
$W_{x,min}$ [mm <sup>3</sup> ]	1,60E+05
$h_{min}$ [mm]	<b>77,45</b>
H [mm]	<b>200</b>

Si osserva come il valore  $h_{min}$ , risulta essere molto inferiore al valore scelto in fase di progettazione, la causa è ricondotta alla disposizione delle travi con conseguente inserimento delle connessioni.

La sezione 16x20 viene aumentata a 16x24 nelle zone dei portali in cui il posizionamento dei collegamenti non rispetta la verifica delle distanze delle connessioni dai bordi della sezione, a causa dell'inclinazione elevata delle travi.

Questo comporta l'impossibilità di utilizzare come sezione, la sezione minima la 16x16.

Lo stesso ragionamento viene svolto per il dimensionamento dei travetti:

Tabella 18 – Dimensionamento travetti

<b>Dimensionamento travetti</b>	
b [mm]	80
M [kNm]	0,35
$f_{m,d}$ [MPa]	21,12
$W_{x,min}$ [mm <sup>3</sup> ]	1,67E+04
$h_{min}$ [mm]	<b>35,39</b>
H [mm]	<b>160</b>

Per i travetti il ragionamento è differente, in quanto, come si può osservare in figura 63 con una base di 80 mm, il minimo valore di altezza utilizzabile è pari a 160 mm, pertanto, la sezione che si utilizza risulta essere la minima.

**Dimensioni tipiche [mm]**

Larghezza	Altezza delle travi Duo							
	100	120	140	160	180	200	220	240
80				*	*	*	*	*
100	*			*	*	*	*	*
120		*		*	*	*	*	*
140			*			*	---	---
160	*	*		*		---	---	---

*Figura 63 - Dimensioni tipiche, travi in C24*

### 6.4 Modellazione

La modellazione dei portali è stata effettuata tramite l'utilizzo del software Strauss7, una volta dimensionati gli elementi principali si è semplificata la struttura andando a modellare unicamente i portali ed i due elementi della copertura che funzionano come collegamento dei portali con le vele.

La forma non uniforme della struttura, pertanto, viene semplificata in quattro portali collegati tra di loro da due travi soggette unicamente a sforzo normale vincolata alla base dei pilastri con degli incastri.

Di seguito si riporta la modellazione ottenuta tramite l'utilizzo di elementi *beam*, ricordando che le dimensioni degli elementi costituenti i portali sono variabili.

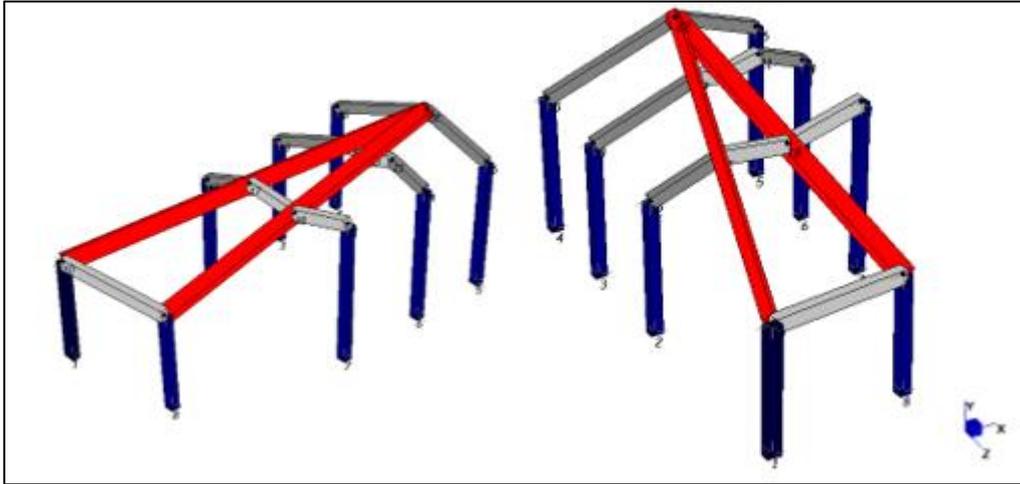


Figura 64 - Modellazione dei portali

Una volta modellata la struttura, si inseriscono le combinazioni di carico calcolate nel capitolo 6.2 e in particolare nel caso di combinazioni di carichi di durata differenti si deve far riferimento al carico con la durata più breve ovvero in questo caso la *combinazione di carico istantanea*:

*Istantanea*:

$$F_{d,istantanea} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} \quad (21)$$

$$F_{d,istantanea} = 1,3 \cdot 0,42 + 1,5 \cdot 0,17 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,44 = 2,097 \text{ kN/m}$$

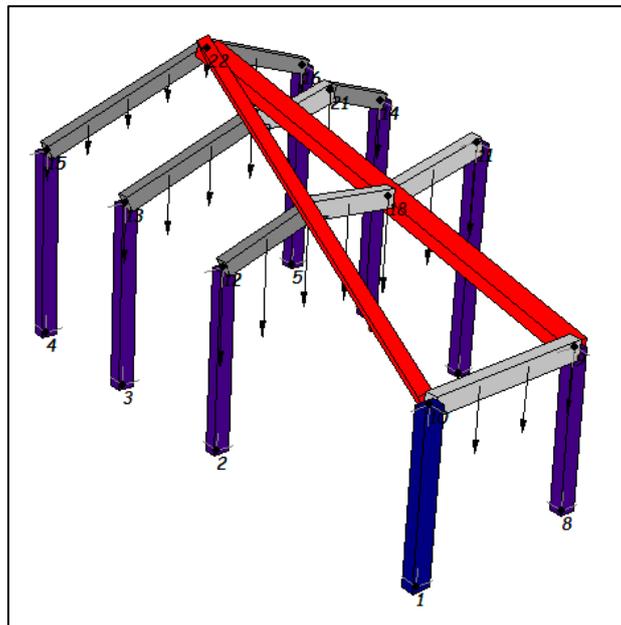


Figura 65 - Carichi verticali permanenti strutturali, non strutturali e neve

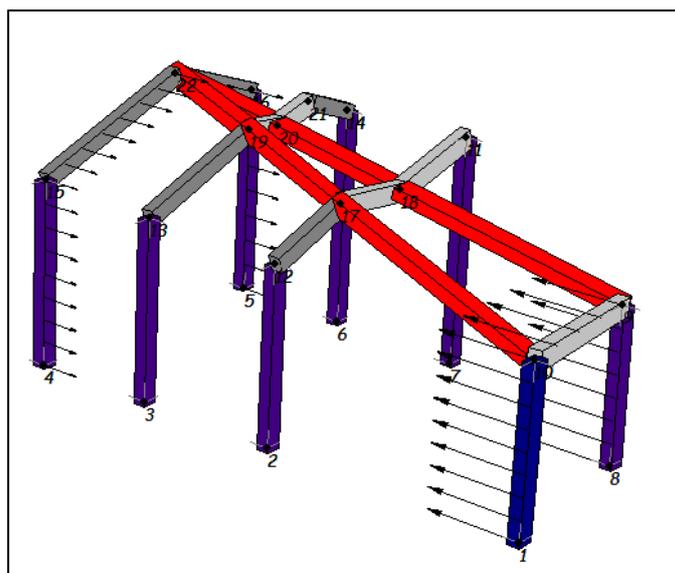


Figura 66 - Carichi orizzontali, vento

## 6.5 Progetto e verifica dei portali

Il *garden office* inizialmente non era stato previsto per essere disposto all'esterno, pertanto, la progettazione ha comportato una prima valutazione considerando unicamente il peso proprio della struttura.

In seguito, si è ipotizzata come alternativa la possibilità di andare a posizione il *garden office* esternamente così che si considerasse oltre che il peso proprio, anche il carico accidentale, il carico del vento osservando quanto l'aumento delle sollecitazioni incidesse sulla progettazione dei portali e delle connessioni.

Non si considera il carico della neve a seguito delle valutazioni effettuate nel capitolo dei *carichi e combinazione dei carichi*.

In questa fase si esaminano due differenti alternative di posizionamento della struttura, internamente ed esternamente.

### *Posizionamento interno della struttura*

Considerato il posizionamento interno della struttura, i carichi associati sono unicamente il peso portante della struttura e i carichi permanenti non strutturali trascurando carichi accidentali, neve e vento. Definiti i carichi, si ricavano le sollecitazioni da utilizzare nella progettazione e verifica dei portali.

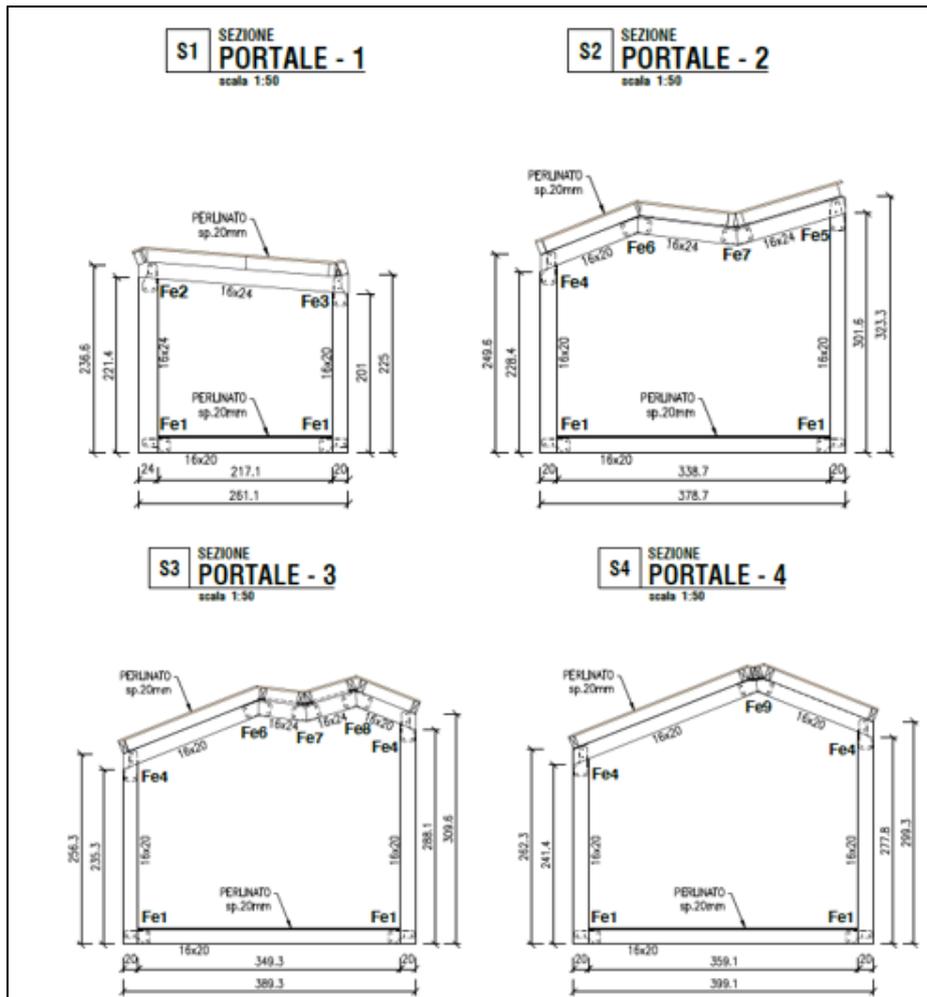


Figura 67 - Sezione Portali

La verifica si riconduce all'analisi del portale maggiormente sollecitato, che in questa situazione corrisponde al portale II.

Tabella 19 – Sollecitazioni portale II

<b>Sollecitazioni – Portale II</b>	
T [kN]	3,2653
M [kNm]	1,4377
N [kN] - C	3,772

Le verifiche a cui vengono sottoposti i portali sono:

- Verifica a taglio;
- Verifica a pressoflessione;
- Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna;
- Verifica di Stabilità - Instabilità di trave.

Si basano sulla relazione (18), utilizzata nel dimensionamento:

$$F_d \leq X_d$$

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad (22)$$

Il valore di  $k_{mod}$  in questo caso fa riferimento alla combinazione *permanente*, di conseguenza sarà  $k_{mod} = 0,6$  essendo la classe di servizio pari a 1.

Materiale	Riferimento	Classe di servizio	
			Permanente
Legno massiccio Legno lamellare incollato Microlamellare (LVL)	EN 14081-1	1	0,60
	EN 14080	2	0,60
	EN 14374, EN 14279	3	0,50

Figura 68 - Valori di  $k_{mod}$

### Verifica a taglio

In accordo con la CNR-DT-206-R1-2018 al paragrafo 7.6.1.1.9, deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$t_d \leq f_{v,d} \quad (23)$$

Nella quale:

- $t_d$  è la massima tensione tangenziale di calcolo, valutata secondo la teoria di Jourawsky;
- $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di calcolo a taglio.

Nella valutazione della  $t_d$  è opportuno considerare l'influenza delle fessurazioni presenti nell'elemento strutturale. Ciò si può tenere in conto utilizzando al posto della larghezza  $b$  della sezione trasversale una larghezza efficace  $b_{ef}$  data da:

$$b_{ef} = k_{cf} \times b \quad (24)$$

Dove:

$b$  è la larghezza della sezione dell'elemento;

$k_{cf}$  è un coefficiente pari a 1,00 per il legno lamellare incollato conforme alla UNI EN 14080.

$$t_{d,max} = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{A} = \frac{3}{2} \times \frac{3,2653 \text{ kN}}{0,02144 \times 10^6} = 0,23 \text{ MPa} \quad (25)$$

Si calcola la tensione resistente:

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \times 3,4}{1,25} = 1,68 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$t_{d,max} \leq f_{v,d} \quad (27)$$

La verifica è soddisfatta.

### Verifica a pressoflessione

Nel caso di sforzo normale di compressione accompagnato da sollecitazione di flessione deve essere soddisfatta la condizione:

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (28)$$

In tabella 20 viene riportata la verifica:

Tabella 20 – Verifica a pressoflessione

<b>Verifica a pressoflessione</b>	
<i>N</i> [kN]	3,77
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,12
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
<i>M</i> [kNm]	1,44
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,35
$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84
<i>Verifica</i>	0,73
	<b>VERIFICATO</b>

### Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna

Oltre le verifiche di resistenza, è necessario andare ad eseguire le verifiche nei confronti di possibili fenomeni di instabilità, quali sbandamento laterale di elementi pressoinflessi o compressi (*instabilità di colonna*).

Per queste verifiche si devono utilizzare i valori caratteristici al frattile 5% per i moduli elastici dei materiali.

La relazione da soddisfare è:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{crit,c} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (29)$$

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - l_{rel,y}^2}} \quad (30)$$

$$k_y = 0,5 \times (1 + b_c(l_{rel,y} - 0,3)) + l_{rel,y}^2 \quad (31)$$

$b_c = 0,1$  per legno lamellare incollato

$$l_{rel,y} = \frac{l_y}{p} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (32)$$

$$l_y = L_0 / r_{min} \quad (33)$$

$L_0$ , lunghezza libera d'inflexione: presa in riferimento allo schema statico incastro-incastro.

Tabella 21 - Verifica di Stabilità, Instabilità di colonna

<b>Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna - Elementi Pressoinflessi</b>	
$N$ [kN]	3,772
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,12
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
$M$ [kNm]	1,4377
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,34784375
$f_{m,y,d}$ [MPa]	12,63
$b_c$	0,1
$L_0$ [m]	0,938
$l_y$	16,25
$l_{rel,y}$	0,26
$k_y$	0,53
$k_{c,y}$	1,00
$Verifica$	0,12
	<b>VERIFICATO</b>

### Verifica di Stabilità - Instabilità di trave

Oltre l'instabilità di colonna, va effettuata la verifica per lo svergolamento delle travi inflesse (*instabilità flessio-torsionale*).

La relazione da soddisfare è:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{crit,m} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1 \quad (34)$$

$$k_{crit,m} = \begin{cases} 1 & \text{per } l_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75l_{rel,m} & \text{per } 0,75 < l_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{l_{rel,m}^2} & \text{per } 1,4 < l_{rel,m} \end{cases} \quad (35)$$

$$l_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{s_{m,crit}}} \quad (36)$$

$$s_{m,crit} = M_{y,crit} / W_y \quad (37)$$

$$M_{y,crit} = \frac{p}{l_{eff}} \sqrt{E_{0,05} \times I_z \times G_{0,05} \times I_{tor}} \quad (38)$$

$$I_{tor} = \frac{b^3 \times h}{3(1 + \frac{0,6 \times b}{h})} \quad (39)$$

$l_{eff} = l \times b$ : luce efficace della trave, tiene conto del vincolamento e del tipo di carico.

Tabella 7-4 - Valori del coefficiente  $\beta$  per il calcolo della lunghezza efficace  $l_{eff}$

Condizioni di vincolo	Tipo di carico o di sollecitazione	$\beta$
Semplice appoggio	Momento flettente costante	1.00
	Carico uniformemente distribuito	0.88
	Forza concentrata in mezzera	0.74
Incastro ad un estremo (mensola)	Carico uniformemente distribuito	0.49
	Forza concentrata all'estremo libero	0.78

Figura 69 - Valori di beta per l'instabilità di trave

Tabella 22 – Verifica di instabilità di trave

<b>Verifica di Stabilità - Instabilità di trave Elementi Pressoinflessi</b>	
$M$ [kNm]	1,44
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	0,04
$f_{m,y,d}$ [MPa]	12,63
$N$ [kN]	3,77
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	3,54
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
$J_{\text{torsionale}}$ [m <sup>4</sup> ]	0,000185
$b$	0,78
$l_{\text{eff}}$ [m]	1,05
$M_{y,\text{critico}}$ [kNm]	787,80
$S_{m,\text{critica}}$ [MPa]	964,78
$l_{\text{rel,m}}$	0,16
$k_{\text{crit,m}}$	1,00
$Verifica$	0,29
	<b>VERIFICATO</b>

### *Posizionamento esterno della struttura*

L'idea è analizzare un'alternativa al posizionamento originario della struttura, la posizione interna per la quale è stata progettata viene modificata e si vuole studiarla esternamente.

In questo caso non è possibile considerare solo i carichi permanenti strutturali e non strutturali ma è necessario che si aggiungano i carichi accidentali e il carico vento trascurando il carico neve.

Le sollecitazioni, di conseguenza, non sono più le stesse determinate per il caso interno ma aumentano e la progettazione deve essere rivalutata.

Tabella 23 – Sollecitazioni posizionamento interno ed esterno

**Posizionamento Esterno**

<b>Sollecitazioni Portale I</b>		<b>Sollecitazioni Portale II</b>		<b>Sollecitazioni Portale III</b>		<b>Sollecitazioni Portale IV</b>	
T [kN]	3,35	T [kN]	7,19	T [kN]	4,76	T [kN]	2,15
M [kNm]	0,78	M [kNm]	2,80	M [kNm]	2,11	M [kNm]	1,09
N [kN] - C	0,26	N [kN] - C	4,50	N [kN] - C	3,24	N [kN] - C	1,61

**Posizionamento Interno**

<b>Sollecitazioni Portale I</b>		<b>Sollecitazioni Portale II</b>		<b>Sollecitazioni Portale III</b>		<b>Sollecitazioni Portale IV</b>	
T [kN]	1,52	T [kN]	3,27	T [kN]	2,17	T [kN]	1,02
M [kNm]	0,49	M [kNm]	1,44	M [kNm]	1,05	M [kNm]	0,54
N [kN] - C	0,37	N [kN] - C	3,77	N [kN] - C	1,48	N [kN] - C	0,78

Valutando le sollecitazioni, si osserva come a confronto, i valori del *taglio* e *momento* siano raddoppiati posizionando la struttura esternamente a causa dell'aggiunta dei carichi.

A livello di verifiche, i portali I e IV non subiscono modifiche invece, il portale II e III come riportato in tabella 24:

Tabella 24 – Verifiche a pressoflessione, confronto interno ed esterno

<b>Verifica a pressoflessione Portale III - Sezione 16x20 - interno</b>		<b>Verifica a pressoflessione Portale III - Sezione 16x20 - esterno</b>		<b>Verifica a pressoflessione Portale III - Sezione 16x24 - esterno</b>	
N [kN]	1,48	N [kN]	3,2413	N [kN]	3,2413
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,05	$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,10	$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,08
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48	$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48	$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
M [kNm]	1,05	M [kNm]	2,11	M [kNm]	2,11
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	0,98	$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,98	$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,37
$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84	$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84	$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84
Verifica	0,53	Verifica	1,07	Verifica	0,75
	<b>VERIFICATO</b>		<b>NON VERIFICATO</b>		<b>VERIFICATO</b>

<b>Verifica a pressoflessione Portale II - Sezione 16x20 - interno</b>	
$N$ [kN]	3,772
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,12
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
$M$ [kNm]	1,44
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,35
$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84
	0,73
Verifica	<b>VERIFICATO</b>

<b>Verifica a pressoflessione Portale II - Sezione 16x20 - esterno</b>	
$N$ [kN]	4,4983
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,14
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
$M$ [kNm]	2,80
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	2,62
$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84
	1,42
Verifica	<b>NON VERIFICATO</b>

<b>Verifica a pressoflessione Portale II - Sezione 16x24 - esterno</b>	
$N$ [kN]	4,4983
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,12
$f_{c,0,d}$ [MPa]	12,48
$M$ [kNm]	2,80
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	1,82
$f_{m,y,d}$ [MPa]	1,84
	0,99
Verifica	<b>VERIFICATO</b>

Le verifiche sono tutte rispettate tranne la verifica a pressoflessione, utile risulta anche per ciò che riguarda le connessioni, incrementare il valore della sezione da 18x20 a 18x24 e come riportato sopra la verifica risulta soddisfatta.

## 6.6 Progetto e verifica delle connessioni portale

### *Teoria di Johansen*

La teoria su cui si basa la progettazione delle connessioni per il legno è la *teoria di Johansen*, tale teoria analizza le modalità di collasso osservate sperimentalmente delle connessioni con connettori cilindrici sollecitati perpendicolarmente al loro asse.

I mezzi di unione metallici a gambo cilindrico prevalentemente utilizzati per i collegamenti degli elementi strutturali in legno sono classificati secondo quattro tipologie: chiodi, viti, bulloni e spinotti.

Tabella 25 – Tipologia di connessioni

<b>Tipologia di connessione</b>	<b>Collegamento</b>
Chiodi	legno - legno piastre metalliche
Viti	
Bulloni	
Spinotti	piastre metalliche

Il vantaggio di chiodi, bulloni e viti è la facile reperibilità e messa in opera dei connettori, l'elevata resistenza del collegamento mentre gli svantaggi sono legati alla necessità di dover posizionare sempre a vista le piastre metalliche in modo da consentire un agevole alloggiamento del mezzo di unione nel foro della piastra stessa.

Gli spinotti invece, presentano il vantaggio di non dover pre-forare e la possibilità di andare a realizzare un collegamento completamente o parzialmente invisibile.

Definite le tipologie di connessioni, dalle sperimentazioni si osserva che il legno a contatto con il connettore può presentare deformazioni locali quali, *rifollamento* adiacente ai piani di taglio ovvero lato legno e *formazione di cerniere plastiche* nei connettori concentrano deformazioni e rotazioni.



Figura 70 - Modalità di collasso, connessioni a gambo cilindrico

Dalla curva carico-spostamento si possono osservare due situazioni interessanti:

- e connessioni possono avere un comportamento di tipo *fragile* (curva rossa) quando la rottura è governata dal solo *rifollamento del legno*;
- Un comportamento di tipo *duttile* (curva blu) quando la rottura è determinata dalla *plasticizzazione dei connettori*.

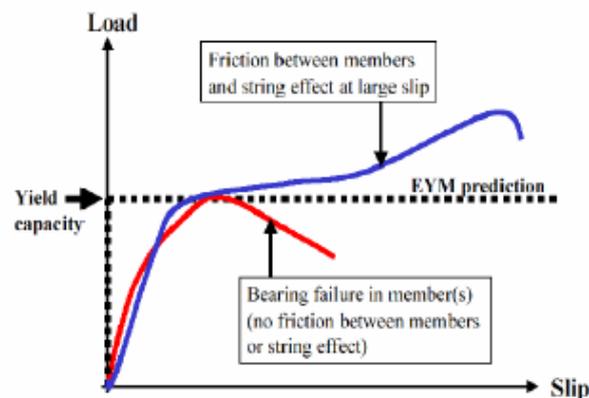


Figura 71 - Curva carico – spostamento

In questo caso i connettori non si mantengono più perpendicolari alla direzione della forza e il carico può aumentare a causa della forza di trazione che si genera all'interno dei connettori (*rope effect*).

Il carico di collasso delle connessioni può essere determinato tramite la teoria sviluppata di Johansen nota come *European Yield Model (EYM)*.

La teoria di Johansen è una teoria in campo plastico che assume per i materiali un comportamento rigido-plastico e si basa sulle seguenti ipotesi:

- Per il legno una resistenza di rifollamento caratteristica  $f_{h,i,k}$  [ $N/mm^2$ ]
- Per il connettori si definisce il momento plastico caratteristico  $M_{y,Rk}$  [ $Nmm$ ]

### Progetto delle connessione

La normativa utilizzata nel presente elaborato è *Eurocodice 5* che definisce le grandezze necessarie alla progettazione e verifica di elementi strutturali in legno con collegamento a gambo cilindrico.

### Verifica geometria legno

La progettazione e verifica delle connessione, parte dalla verifica della geometria dell'elemento strutturale in legno e fa riferimento al *prospetto 8.5* della normativa *EC5*.

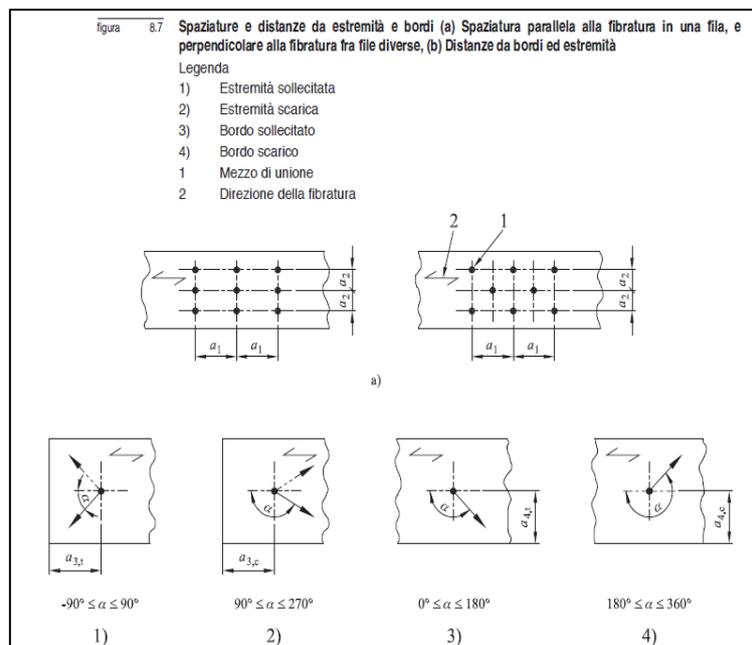


Figura 72 – Spaziature e distanze dai bordi

Spaziature e distanze da bordi/estremità (vedere figura 8.7)	Angolo	Minima spaziatura o distanza da bordo/estremità
$a_1$ (parallela alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(3 + 2  \cos \alpha ) d$
$a_2$ (ortogonale alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$
$a_{3,t}$ (estremità sollecitata)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	max. (7 d ; 80 mm)
$a_{3,c}$ (estremità scarica)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	max. ( $a_{3,t}  \sin \alpha $ ) d ; 3d)
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	3d
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	max. ( $a_{3,t}  \sin \alpha $ ) d ; 3d)
$a_{4,t}$ (bordo sollecitato)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	max. ((2 + 2 sin $\alpha$ ) d ; 3d)
$a_{4,c}$ (bordo scarico)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3d

(4) I requisiti per gli scostamenti ammessi per il foro dello spinotto sono forniti nel punto 10.4.4.

Figura 73 - Valori minimi di spaziature e distanze da bordi ed estremità, per spinotti

Tabella 26 – Valori ottenuti nel caso studio

<b>Valori minimi di spaziatura e distanza da bordi ed estremità, per spinotti</b>				
<b>Spaziature e distanze da estremità/bordi</b>	<b>intervallo angolo <math>\alpha</math></b>	<b>angolo <math>\alpha</math></b>	<b>Spaziatura o distanza minima [mm]</b>	<b>valori scelti [mm]</b>
$a_1$ - parallela alla fibratura	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	80	100
$a_2$ - ortogonale alla fibra- tura	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	48	-
$a_{3,t}$ - estremità sollecitata	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	0 °	112	-
$a_{3,c}$ - estremità scarica	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	-
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	-
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	-
$a_{4,t}$ - bordo sollecitato	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	0 °	48	60
$a_{4,c}$ - bordo scarico	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	-

### Formulazione matematica della teoria di Johansen

Per eseguire le verifiche sono state utilizzate le formule presenti nella normativa EC5 e di seguito sono riportate in ordine di applicazione:

$$f_{h,0,k} = 0,11 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \quad (40)$$

w: diametro del connettore, in mm;

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (41)$$

$f_{h,\alpha,k}$ : resistenza caratteristica a rifollamento del legno per un angolo  $\alpha$  rispetto alla direzione della fibratura;

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d \quad (42)$$

Per il valore caratteristico del momento di snervamento del connettore si utilizza la formula al punto 8.5.1:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad (43)$$

$M_{y,Rk}$  è il valore caratteristico del momento di snervamento, in Nmm;

$f_{u,k}$  è la resistenza caratteristica a trazione, in N/mm<sup>2</sup>;

$d$  è il diametro del bullone, in mm.

Per le connessioni il coefficiente  $\gamma_m = 1,3$ .

Per valutare la  $F_{v,Rk}$ , si considera al punto 8.11 il caso di piastra di acciaio di qualsiasi spessore interposta come elemento centrale di una connessione a doppio taglio:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \cdot \left[ \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot t_1^2 \cdot d}} - 1 \right] \\ 2,3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} \end{array} \right. \quad (44)$$

Nel caso di spinotti il contributo del *Rope Effect* non viene considerato in quanto gli spinotti non sono sottoposti a pre-foratura.

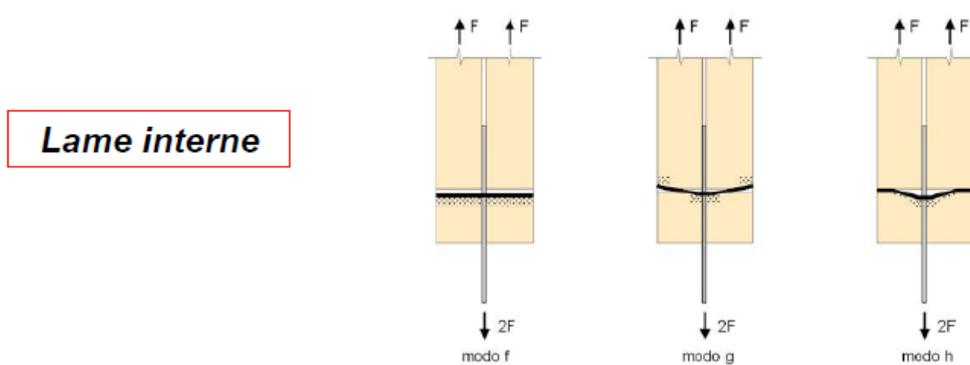


Figura 74 - Modalità di collasso

Per la determinazione del numero efficace si fa riferimento all'EC5 2009:

$$n_{ef} = \min \left\{ n, n^{0,94} \sqrt{\frac{a_1}{13 \cdot d}} \right. \quad (45)$$

$a_1$ : spaziatura fra bulloni in direzione della fibratura;

La resistenza caratteristica relativa alla connessione è fornita dalla formula:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{eff} \cdot F_{v,Rk} \quad (46)$$

$$R_k = n_{piani\ di\ taglio} \cdot F_{v,ef,Rk} \quad (47)$$

La resistenza di calcolo è pertanto:

$$R_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{R_k}{\gamma_m} \quad (48)$$

Una volta calcolata la resistenza di calcolo si verifica:

$$R_{Ed} \leq R_{v,d} \quad (49)$$

### Applicazione – Posizionamento interno

Formulata la teoria, definiti i materiali, il progetto e la verifica delle connessioni si riduce al calcolo matematico delle relazioni sopra citate.

La sollecitazione agente deriva dalla presenza della sollecitazione di sforzo normale di compressione e dalla flessione agente nel nodo.

Si determina tramite la relazione:

$$\frac{N}{n_{piani\ di\ taglio}} + \frac{M}{a_1} \quad (50)$$

Con  $a_1$  pari al braccio della coppia interna.

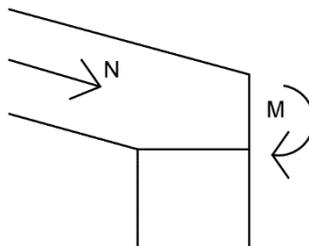


Figura 75 - Calcolo della sollecitazione

Posto  $t_1 = 200\ mm$  ovvero la dimensione della sezione della trave, si definisce inizialmente la capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione presi 2 piani di taglio e ipotizzando 2 spinotti disposti 1 per fila si esegue a verifica:

Tabella 27 – Calcolo capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione

<i>F<sub>v,Rk</sub> - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione</i>	
f <sub>h,o,k</sub> [MPa]	26,52
α [°]	0,00
α [rad]	0,00
k <sub>90</sub>	1,59
f <sub>h,α,k</sub> [MPa]	26,52
t <sub>1</sub> [mm]	200,00
f <sub>u,k</sub> - Acciaio [MPa]	400,00
M <sub>yrk</sub> [Nmm]	162141,13
γ <sub>m,connessioni</sub>	1,30
<b><i>F<sub>v,Rk,singolo piano</sub> [N]</i></b>	<b><i>19077,06</i></b>

Si considerano due piani di taglio:

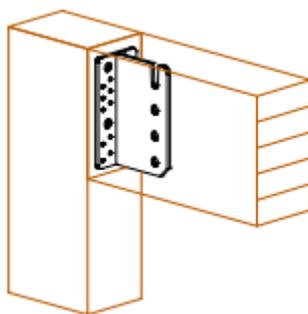


Figura 76 - Disposizione della lama interna

Tabella 28 – Resistenza riferita a n piani di taglio

n piani di taglio	2
<i>R<sub>v,k,piani di taglio</sub> [N]</i>	<i>38154,11</i>

Si definisce la resistenza di calcolo, verificando la relazione (49):

$$R_{Ed} \leq R_{v,d}$$

Tabella 29 – Calcolo della resistenza di calcolo e verifica

<b>Calcolo <math>R_{v,d}</math> e Verifica</b>	
$a_1$ [mm]	100,00
<b><math>n^\circ</math> di spinotti</b>	<b>2</b>
$n^\circ$ di spinotti per fila	1
$n_{\text{eff, fila}}$	0,83
$R_{v,k,ef}$ [N]	15885,30
$R_{v,k,ef,tot}$ [N]	31770,61
$R_{v,d}$ [N]	15249,89
Sollecitazione [N]	<b>14586,00</b>
<b>VERIFICATO</b>	

In figura 77, si riporta il dettaglio costruttivo:

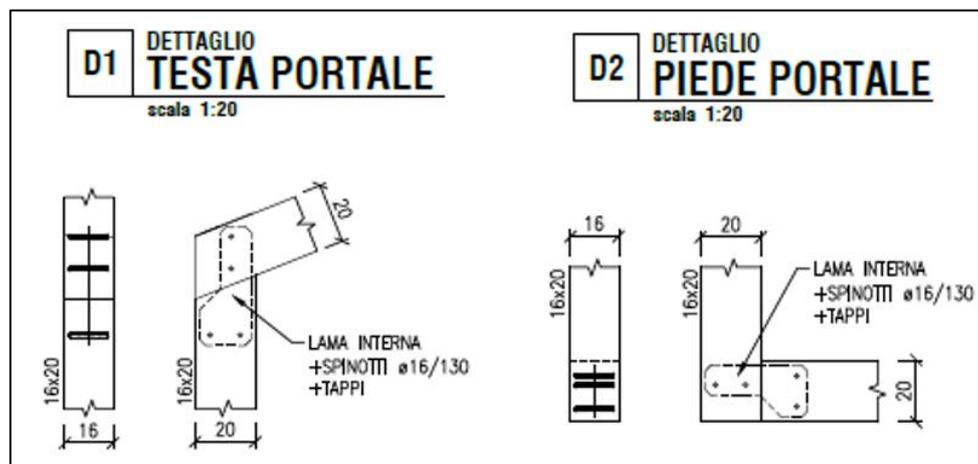


Figura 77 - Dettaglio costruttivo, connessione legno-legno

#### Applicazione – Posizionamento esterno

Come anticipato nel capitolo 6.5, incrementando il carico, si ha un aumento del taglio da considerare nella progettazione delle connessioni e in tabella 30 si riportano le sollecitazioni ottenute nei due casi, la relazione utilizzata è la (50).

Tabella 30 – Taglio per le connessioni

<b>Taglio connessione - Portale 2 interno</b>		<b>Taglio connessione - Portale 2 esterno</b>	
M [kNm]	1,27	M [kNm]	2,79
N [kN] - C	3,77	N [kN] - C	8,31
Sollecitazioni totale [kN]	<b>14,59</b>	Sollecitazioni totale [kN]	<b>32,06</b>

L'aumento delle sollecitazioni comporta un incremento della resistenza di calcolo necessaria alla progettazione e verifica delle connessioni.

L'aumento della sezione non fa in modo che la verifica a rifollamento venga soddisfatta ma vi è la necessità di incrementare il numero delle connessioni da 2 a 6 comportando una rielaborazione della verifica delle distanze e della progettazione in generale.

Inserendo 6 spinotti la verifica però risulta soddisfatta tramite la relazione (49):

$$R_{Ed} = 32055 N \leq R_{v,d} = 40989$$

Ciò comporta che esista la possibilità di andare a realizzare la struttura esternamente.

### 6.7 Analisi delle vele

L'inserimento delle vele nasce dallo studio del Designer Francesco Pellisari esperto di acustica, la loro disposizione si basa sulla valutazione e risoluzione delle problematiche riguardanti i teatri di inizio '900.

Nell'architettura dei teatri, si cerca di ottenere un rapporto ottimale tra vista e acustica per ogni postazione. Fin dall'antichità, gli studiosi hanno cercato di ottenere un risultato soddisfacente tramite le simulazioni acustiche che portano però, ad una limitata comprensione dei fenomeni.

Inoltre, la disposizione delle gradinate dei teatri, essendo disposte in modo crescente comportano inevitabilmente che il palco si trovi nel punto più basso dell'edificio. Questa condizione fisica ha determinato la prevalenza di un'acustica insoddisfacente.

Si è cercato di trovare soluzioni temporanee a questo problema, cercando di mantenere la più ridotta distanza dal palco al soffitto.

Con l'evoluzione della Fisica tecnica si forniscono stimoli sullo studio del suono e di conseguenza sull'eco e il riverbero.

Il riverbero, e talvolta anche l'effetto eco, è causato da grandi superfici piate che danno al suono l'opportunità di riflettere e quindi essere riflesso nello spazio. Tuttavia, è necessaria una certa "distanza di base" in modo che il suono possa propagarsi di conseguenza.

L'effetto del riverbero è stato risolto in maniera efficace regolando la propagazione del suono tramite l'utilizzo di *superfici veliche*. La predisposizione delle vele è quella di diffondere il suono e non rifletterlo grazie alla forma convessa aggiuntiva (vista dal basso). Questo fa in modo che le onde sonore non possano moltiplicarsi, inalterando la propagazione in tutte le altre direzioni.

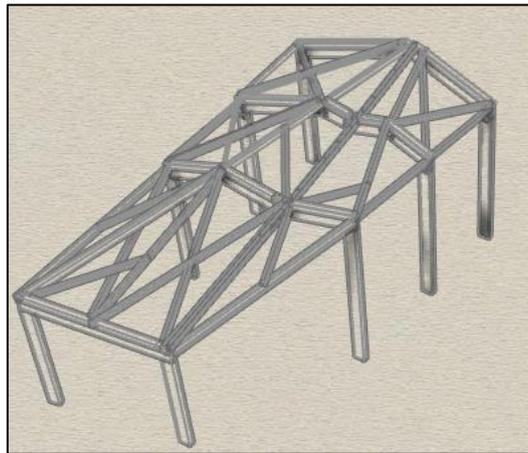


Figura 78 - 3D struttura con vele, Rhino

Nella realizzazione della copertura del *garden office*, le problematiche principali che sono state riscontrate e che hanno portato all'utilizzo delle vele acustiche sono:

- Errata geometria acustica: problema legato alla geometria dell'intera sala;
- Suono del palco corto: dovuto alla geometria, il volume del palco entra in risonanza con il volume della sala a certe frequenze, creando cancellazione dell'onda. Geometricamente oltretutto si è ottenuto un ribassamento del soffitto.
- *Speech Transmission Index* (STI) troppo basso intelligibilità del parlato: si basa sulla qualità acustica di una sala. Il metodo ipotizza che un'ottima trasmissione del parlato si accompagni alla modifica nella forma dell'onda sonora e nel passaggio da sorgente ad ascoltare. La qualità della intelligibilità è valutata analizzando la modulazione subita dall'onda emessa dalla sorgente a causa di:
  - o Tempo di riverbero;
  - o Assorbimento differenziato dei materiali che compongono l'ambiente.

La presenza delle vele genera un assorbimento molto lineare.

- St60 troppo alto causa il riverbero: il T60 è il tempo di riverbero, parametro che definisce la qualità di risposta acustica di un ambiente ed è espressa in secondi. In altre parole, il riverbero è parzialmente assimilabile ai concetti noti di eco ed è una sorta di coda sonora dei suoni generati in un locale chiuso. Nel caso in cui il T60 è troppo lungo si genera un effetto di confusione sonora in cui tutti i suoni si sovrappongono diventando incomprensibili; al contrario se è breve, i suoni sono ovattati e non raggiungono l'ascoltatore;
- C20 troppo alto: non era presente nessun contributo del soffitto e delle pareti. È associato alla qualità della comunicazione tra due persone e prende in esame l'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione del suono diretto e la comparsa delle prime riflessioni ovvero 20 secondi, che hanno la caratteristica di rinforzare l'intensità del suono, al contrario delle riflessioni successive che possono essere percepite come fastidiose.

Le vele, grazie al loro posizionamento ed inclinazione hanno migliorato notevolmente questi parametri. Ciò che comporta la scelta delle vele ricade oltre che sulle simulazioni acustiche che, come detto inizialmente portano comunque ad una limitata comprensione dei fenomeni anche su un lavoro basato sull'ascolto in loco.

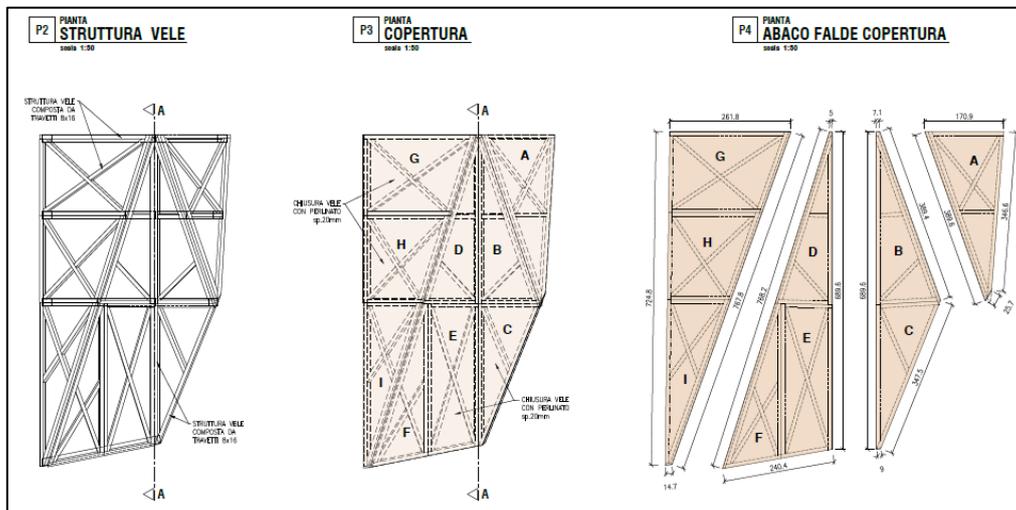


Figura 79 - Struttura vele

Le vele sono denominate dalla A alla I, suddivise in quattro blocchi dove ogni collegamento viene realizzato nelle travi dei portali.

### Progetto delle connessioni portali-vele

Nell'elaborato si è analizzata nel particolare la vela H al fine di progettare e verificare le connessioni.

La vela H ricade tra il portale II e il portale III nel lato ovest della struttura.

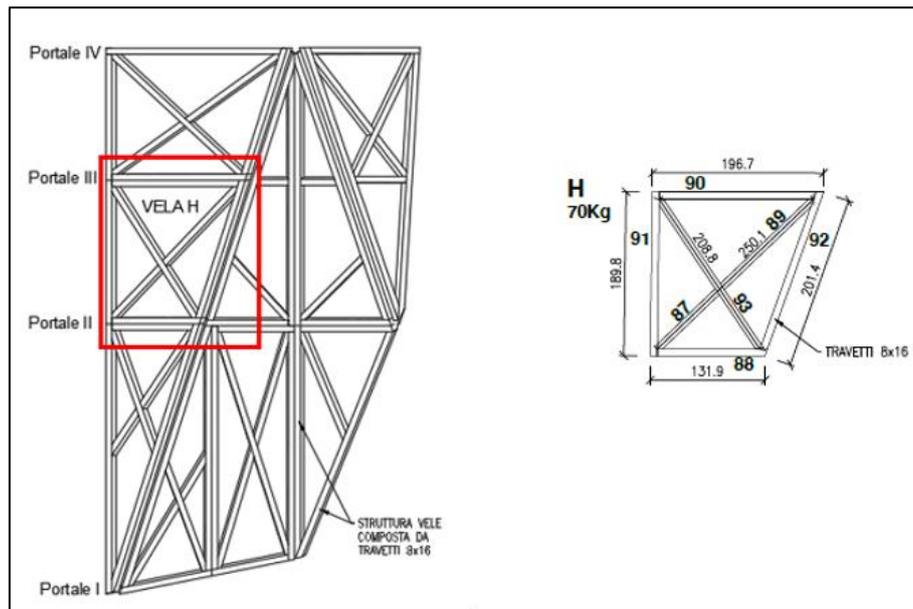


Figura 80 - Vela H in esame

Per la progettazione delle connessioni portali-vele, si deve preliminarmente definire la sollecitazione di taglio, gli elementi sollecitati sono le diagonali da valutare tramite le aree di influenza.

La diagonale considerata di lunghezza 2,501 m sarà influenzata da metà della lunghezza di  $L_1$  e metà della diagonale di lunghezza  $L_2$ .

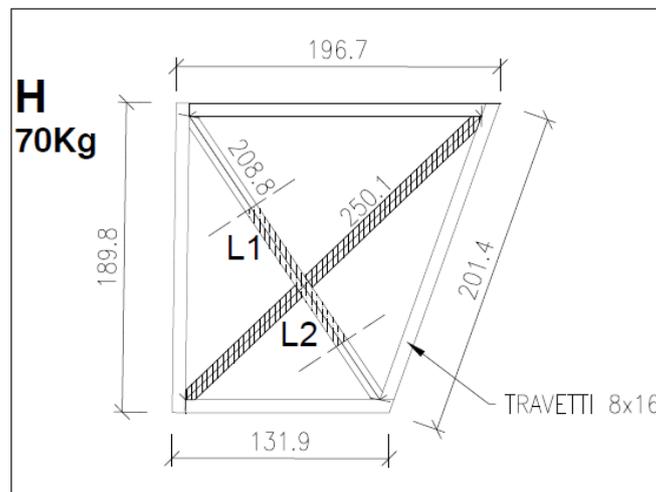


Figura 81 - Dettaglio Vela H

Come descritto, posizionato superiormente le vele è disposto un perlinato di 20 mm che si considera nel calcolo del peso agente sulla vela, le dimensioni dei travetti sono come descritto nel capitolo *dimensionamento* di 80x160.

Tabella 31 - Calcolo delle sollecitazioni

<b>Taglio nei travetti</b>		
$l_1$ [m]	2,501	
$b$ [mm]	80	
$h$ [mm]	160	
$W_x$ [mm <sup>3</sup> ]	341333	
Perlinato spessore 20 mm - 4,50 x 0,020	$Q_{2k}$ [kN/m]	0,12
	$Q_d$ [kN/m]	0,7
	$M$ [kNm]	0,54
	<b><math>T</math> [kN]</b>	<b>0,87</b>

In tabella 31, si riportano i valori di momento flettente e taglio determinati considerando la diagonale con lo schema statico di trave doppiamente appoggiata.

Con il valore di taglio ottenuto si esegue la progettazione e verifica della connessione.

Nel caso di viti devono essere soddisfatte relazione differenti da quelle utilizzate nel caso di connessione tramite spinotti.

Il caso in esame si ricade nel caso di connessione per mezzo di unione a taglio doppio con viti caricate assialmente, le relazioni sono in questo caso:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{n,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{n,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{n,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{n,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{n,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \quad (51)$$

$$b = \frac{f_{h,1,k}}{f_{h,2,k}} \rightarrow f_{h,i,k}: \text{resistenza caratteristica a rifollamento nell}'i - \text{esimo elemento ligneo}$$

$t_1$ : spessore del legno;

$d$ : diametro del mezzo di unione;

$M_{y,Rk}$ : momento caratteristico di snervamento per il mezzo di unione valutato nella relazione (43);

L'EC5 riporta che:

“Si raccomanda che la lunghezza minima di penetrazione, dal lato della punta, della parte filettata sia pari a  $6d$ .

Per connessioni con viti in conformità alla EN 14592 con:

-  $6 \text{ mm} \leq d \leq 12 \text{ mm}$

-  $0,6 \leq d_1/d \leq 0,75$ ”

Dove  $d$  è il diametro esterno della filettatura e  $d_1$  il diametro interno della filettatura.

$F_{ax,Rk}$ : capacità caratteristica assiale a estrazione per mezzo di unione secondo un angolo  $\alpha$  rispetto alla direzione della fibratura, in N.

$$F_{ax,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \quad (52)$$

$f_{ax,k}$ : è la resistenza caratteristica a estrazione, perpendicolare rispetto alla direzione della fibratura, in  $\text{N/mm}^2$ .

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot r_k^{0,8} \quad (53)$$

$n_{ef}$ : numero efficace calcolato tramite la relazione (45);

$l_{ef}$ : è la lunghezza di penetrazione della parte filettata in mm;

$$k_d = \min \left\{ \frac{d}{8}, 1 \right\} \quad (54)$$

Inoltre, si raccomanda di valutare che la resistenza caratteristica all'attraversamento dell'elemento da parte delle connessioni con viti caricate assialmente:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} \cdot f_{head,k} \cdot d_h^2 \cdot \left( \frac{r_k}{r_a} \right)^{0,8} \quad (55)$$

$f_{head,k}$ : è il C della vite, in millimetri.

Riferisce che la resistenza caratteristica a trazione della connessione (strappo della testa oppure capacità a trazione del gambo)  $F_{t,Rk}$  sia presa come:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} \cdot f_{tens,k} \quad (56)$$

$f_{tens,k}$ : è la capacità caratteristica a trazione della vite determinata in conformità alla EN 14592; per il contributo del *Rope Effect*, per le connessioni con viti:

“il primo termine sul lato destro rappresenta la capacità portante secondo la teoria dello snervamento di Johansen, mentre il secondo termine  $F_{ax,Rk}/4$  è il contributo dovuto all’ “effetto cordata”. Si raccomanda che il contributo alla capacità portante dovuto all’ “effetto cordata” sia limitato alle seguenti percentuali della parte Johansen:

- chiodi a gambo cilindrico 15%;
- chiodi a gambo quadro e scanalato 25%;
- altri chiodi 50%;
- viti 100%;
- bulloni 25%;
- spinotti 0%.”

Tabella 32 – Tipologia di connessione

<b>Tipologia Connessione</b>
Viti con $d > 6 \text{ mm}$
$d$ – diametro esterno
<b>6 mm</b>
$d_1$ – diametro interno
<b>4 mm</b>
<b>Tipo di caricamento</b>
Viti caricate assialmente

Definite le relazioni, il calcolo è riportato di seguito:

Tabella 33 – calcolo della capacità caratteristica di estrazione e resistenza a trazione delle viti

<b><math>F_{ax,\alpha,Rk}</math> - Capacità caratteristica di estrazione</b>	
<b>Controllo EN14592</b>	<b>Verificato</b>
$l_{eff}$ [mm]	75
$\alpha$ [°]	47
Controllo $\alpha$	Verificato
$f_{ax,k}$ [MPa]	17,29
$k_d$	0,75
$n_{viti}$	2
$n_{eff}$	1,86
<b><math>F_{ax,\alpha,Rk}</math> [N]</b>	<b>9967,63</b>

$F_{t,Rk}$ - Resistenza caratteristica a trazione della vite	
$f_{tens,k}$ [MPa]	400
$F_{t,Rk}$ [N]	746,42

Tabella 34 – Controllo Rope Effect e calcolo della capacità di estrazione

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - Capacità caratteristica di estrazione	
$l_{eff}$ [mm]	75
$\alpha$ [°]	47
$r_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	350
$f_{ax,k}$ [MPa]	14,95
$k_d$	0,75
$n_{viti}$	2
$n_{eff}$	1,866065983
$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	53781,35

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - Resistenza caratteristica all'attraversamento	
$f_{head,k}$ [MPa]	9,4
$d_h$ [mm]	12
$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	2922,55

$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	9967,63
------------------------	---------

Controllo $F_{v,rk,Rope}$ Effect	
$R_{ax,k}$ [N]	1392,88
$F_{v,rk,Rope}$ Effect [N]	348,22
Verificato	

Tabella 35 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione

$F_{v,Rk}$ - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione	
$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	420
$\rho_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]	420
$f_{h,o,k,1}$ [MPa]	32,37
$f_{h,o,k,2}$ [MPa]	32,37
$t_1$ [mm]	160
$t_2$ [mm]	160
$\alpha$ [°]	47
$\alpha$ [rad]	0,820

$k_{90}$	1,44
$f_{h,\alpha,k,1}$ [MPa]	26,20
$f_{h,\alpha,k,2}$ [MPa]	26,20
$b$	1
$t_1$ [mm]	160
$t_2$ [mm]	160
$f_{u,k}$ - Acciaio [MPa]	400
$M_{yrk}$ [Nmm]	12658,27
$\gamma_{m,connessioni}$	1,3
<b><math>F_{v,Rk,singolo\ piano}</math> [N]</b>	<b>2642,66</b>

Si considerano n piani di taglio e si calcolato la resistenza di calcolo:

Tabella 36 - Resistenza di calcolo

$n_{piani\ di\ taglio}$	2
$R_{v,k,piani\ di\ taglio}$ [N]	5285,32

Calcolo $R_{v,d}$ e Verifica	
$R_{v,d}$ [N]	2439,37
$F_{V,Ed}$ [N]	875,35
<b>VERIFICATO</b>	

Di seguito il dettaglio costruttivo del collegamento portale-vela:

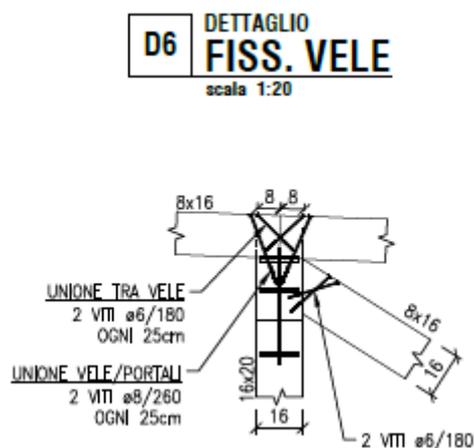


Figura 82 - Dettaglio connessione portale-vela

## 7. Progetto in Bambù Lamellare

Il progetto nasce con l'utilizzo del legno lamellare, l'elaborato di tesi vuole porre attenzione sull'analisi della struttura con il bambù lamellare così che si possano analizzare prospettive future per l'utilizzo del laminato di bambù.

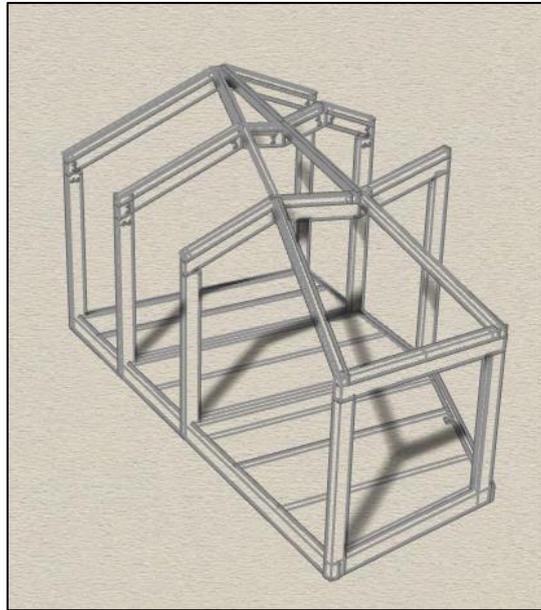


Figura 83 - 3D struttura in bambù lamellare, Rhino

La scelta della realizzazione ricade nel posizionamento interno ed esterno del *garden office*, come analizzato nel caso del legno lamellare in modo da avere un confronto più accurato tra i due materiali.

La novità, in questo caso, è analizzare la forma delle vele e utilizzare culmi di bambù per sostituire il perlinato secondo la *teoria acustica del resto quadratico*.

Data la disposizione particolare degli elementi, l'utilizzo dei culmi vuole portare ad un risultato contemporaneamente estetico e acustico ma è necessario un ulteriore approfondimento in successive elaborazioni per ottenere uno studio corretto sull'acustica, in quanto la simulazione non porta a un risultato attendibile ma solo la realizzazione di un prototipo può fornire valutazioni adeguate.

Nell'elaborato si definisce uno studio iniziale che fornirà una base per le future ricerche.

### 7.1 Materiali

#### *Bambù lamellare*

Per la progettazione della struttura analizzata con l'utilizzo del bambù lamellare si fa riferimento alla casa produttrice americana *LAMBOO*, partner della *Canducci S.R.L.*

Le caratteristiche meccaniche e fisiche come analizzano nella prima parte dell'elaborato, sono basate su studi sviluppati nel corso degli anni, la *LAMBOO* in questo campo risulta il produttore che fornisce dati attendibile sulle caratteristiche da utilizzare nella progettazione.

Tabella 37 – Proprietà meccaniche del bambù lamellare

	<b>Lamboo® Structure™ Components</b>		
	<b>Proprietà meccaniche metriche</b>		
Compressione	Parallela [0°]	<b>92,966 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM 3501-86 A
	Perpendicolare [90°]	<b>20,98 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM 3501-86 A
Trazione	Parallela [0°]	<b>147,996 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM 3500-90
	Perpendicolare [90°]	<b>3,744 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM 3500-90
Flessione	-	<b>28,406 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM D3043
Taglio	-	<b>20,002 kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM D3048
Modulo elastico	-	<b>26 x 10<sup>6</sup> kN/m<sup>2</sup></b>	ASTM D1037
Densità	-	<b>690 kg/m<sup>3</sup></b>	-

Per il modulo di taglio:

$$G = \frac{E}{2(1+n)} \quad \text{con } n = 0,35$$

#### Acciaio

Per poter confrontare la progettazione della struttura con il legno e il bambù lamellare, si preferisce utilizzare la stessa tipologia descritta nel capitolo 6.1 ovvero acciaio *S235JR*, spinotti  $\phi 16$  di lunghezza *130 mm* per le connessioni dei portali e viti *Torx* da costruzione testa svasata con filetto parziale di diametro  $\phi 6$  di lunghezza *180 mm*.

## 7.2 Carichi e combinazione di calcolo

### *Peso proprio*

Posizionata internamente, la struttura è caricata con carichi permanenti strutturale e non strutturali.

Tabella 38 – Carichi permanenti strutturali  $G_1$ , bambù lamellare

<b>Carichi Permanenti strutturali - <math>G_1</math> [kN/m]</b>	
trave pilastri 89x184	0,11
travi portale 89x184	0,11
	<b>0,23</b>

Tabella 39 - Carichi permanenti non strutturali  $G_2$ , bambù lamellare

<b>Carichi Permanenti non strutturali - <math>G_2</math> [kN/m]</b>	
Pannello in bambù lamellare spessore 19 mm - 6,73 x 0,019	0,13
Travetti 89x89 - 6,90 x 0,089 x 0,089	0,05
	<b>0,18</b>

I carichi relativi al vento e alla neve, determinati nel capitolo 6.2 rimangono validi anche in questa valutazione.

### *Combinazione dei carichi*

Le combinazioni di carico fanno riferimento alla combinazione *permanente*:

$$F_{d,permanente} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 \quad (57)$$

$$F_{d,permanente} = 1,3 \cdot 0,23 + 1,5 \cdot 0,18 = 0,57 \text{ kN/m}$$

### *Breve:*

$$F_{d,breve} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} \quad (58)$$

$$F_{d,breve} = 1,3 \cdot 0,23 + 1,5 \cdot 0,18 + 1,5 \cdot 0,6 = 1,47 \text{ kN/m}$$

### *Istantanea:*

$$F_{d,istantanea} = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} \quad (59)$$

$$F_{d,istantanea} = 1,3 \cdot 0,23 + 1,5 \cdot 0,18 + 1,5 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 0,6 \cdot 0,44 = 1,866 \text{ kN/m}$$

### 7.3 Dimensionamento

La scelta delle dimensioni degli elementi strutturali ricade come nel caso di utilizzo del legno lamellare, nella determinazione del valore di  $h_{min}$  a partire da una verifica a flessione considerando come schema statico lo schema di una trave doppiamente appoggiata e come carico distribuito, il carico associato alla combinazione corrispondente al periodo più breve ovvero *istantanea*.

Si ricava la sollecitazione di momento considerando come lunghezza la maggiore che ricade sul portale 4.

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = 2,83 \text{ kNm} \quad (60)$$

#### Verifiche di sicurezza

I valori di calcolo della resistenza si ottengono con la relazione:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad (61)$$

$k_{mod}$ : coefficiente di correzione che tiene conto degli effetti della durata del carico e dell'umidità, si considerano le stesse verifiche di sicurezza utili per il legno lamellare;

$X_k$ : valore caratteristico di una proprietà di resistenza;

$\gamma_M = 1,25$  coefficiente di sicurezza secondo Eurocodice 5.

Considerando una classe di servizio I il valore di  $k_{mod}$  associato risulta essere:

$$k_{mod,istantanea} = 1,1$$

La relazione da soddisfare è:

$$F_d \leq X_d \quad (62)$$

Che nel caso di verifica a flessione diventa:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d} \quad (63)$$

Per determinare la  $h_{min}$ , si procede partendo dalla  $\sigma_{m,d}$  tramite la formula di Navier, ricavando il modulo di resistenza  $W$  avendo ipotizzando la dimensione della base:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad \rightarrow \quad h_{min} = \sqrt{\frac{6 \cdot M}{\sigma_{m,d} \cdot b}} \quad (64)$$

In tabella 37, sono riassunti i risultati ottenuti:

Tabella 40 – Dimensionamento travi portali

<b>Dimensionamento travi</b>	
b [mm]	89
M [kNm]	2,83
$f_{m,d}$ [MPa]	27,216
$W_{x,min}$ [mm <sup>3</sup> ]	1,04E+05
$h_{min}$ [mm]	<b>83,83</b>
H [mm]	<b>184</b>

Il valore  $h_{min}$  risulta essere molto inferiore al valore scelto in fase di progettazione, la scelta è ricaduta in un valore maggiore di altezza per evitare in fase di progettazione delle connessioni una verifica non soddisfatta.

La sezione minima fornita dalla LAMBOO risulta essere la 89x89, in questa situazione l'inserimento delle connessioni non avrebbe rispettato le distanze definite dalla normativa, per questo motivo si è scelto di utilizzare come la sezione la 89x184 che, come si vedrà successivamente, rispetta le distanze necessarie all'inserimento delle connessione.

Tabella 41 – Sezioni Lamboo

		<b>Lamboo® Structure™ Components</b>
		<b>Dimensioni degli elementi</b>
	<b>BxH [mm]</b>	<b>L [m]</b>
<b>4x4</b>	89x89	2,4 - 4,9
<b>4x6</b>	89x140	2,4 - 4,9
<b>4x8</b>	89x184	2,4 - 4,9
<b>4x12</b>	89x286	2,4 - 4,9

I travetti dimensionati allo stesso modo, sono presi come nel caso del legno lamellare rispetto alla sezione minima ovvero la 89x89.

Si cerca di utilizzare sezioni compatibili con il progetto della struttura in legno lamellare per poter realizzare un confronto sia a livello di sollecitazione, sezione, materiale e connessioni.

## 7.5 Progetto e verifica dei portali

La scelta di eseguire la progettazione internamente ed esternamente anche in questa analisi fornisce un quadro completo per poter analizzare i due materiali.

Si inizia valutando la posizione iniziale della struttura e poi si passa alla disposizione esterna con le analogie e differenze.

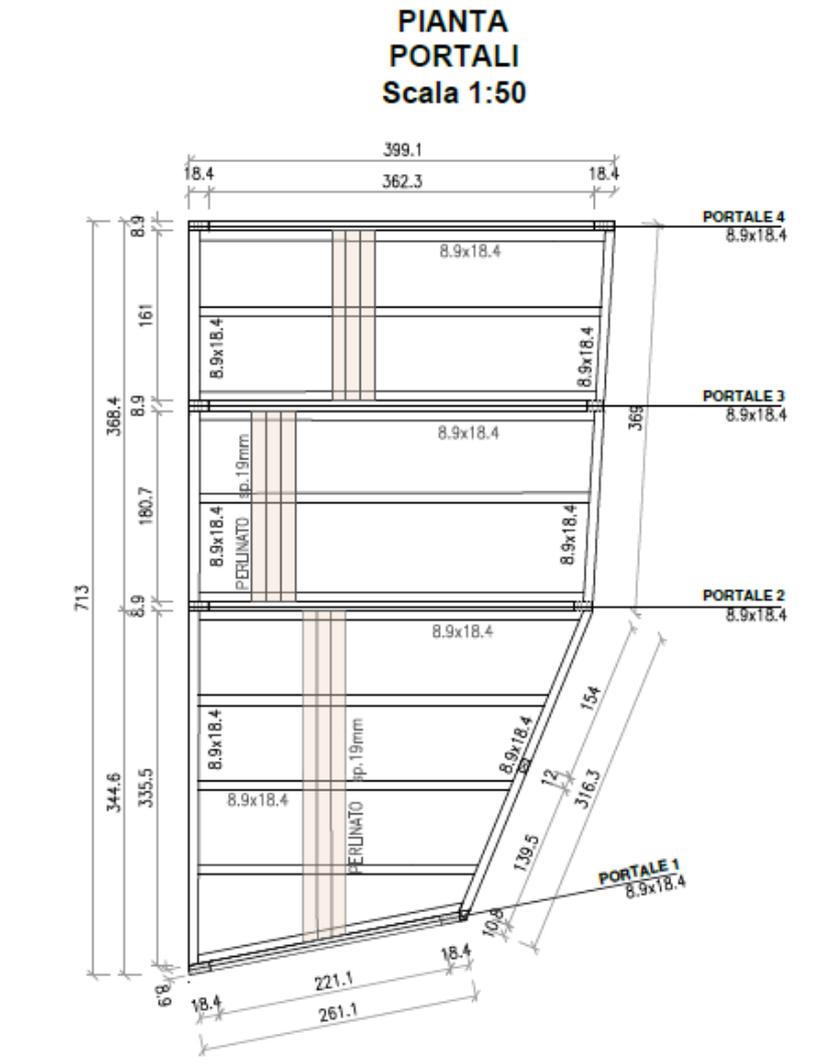


Figura 84 - Pianta portale in bambù lamellare

Le verifiche a cui vengono sottoposti i portali sono le stesse utilizzate per il legno lamellare:

- Verifica a taglio;
- Verifica a pressoflessione;
- Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna;
- Verifica di Stabilità - Instabilità di trave.

Il motivo di questa scelta ricade sull'impossibilità di utilizzare formule differenti dal legno in quanto non è presente una normativa che fornisce le istruzioni per verificare gli elementi.

### Posizionamento interno della struttura

Come nel caso del legno lamellare, si considerano il peso proprio e il carico permanente non strutturale determinando come sollecitazioni associate al portale maggiormente sollecitato ovvero il portale II:

Tabella 42 – Sollecitazioni massime associate al portale II

<b>Sollecitazioni – Portale II</b>	
T [kN]	2,48
M [kNm]	1,125
N [kN] - C	1,66

### Verifica a taglio

Le relazioni utilizzate sono la (23), (24) e (25).

$$\tau_{d,max} = \frac{3}{2} \times \frac{V_d}{A} = \frac{3}{2} \times \frac{2,48 \text{ kN}}{0,016376 \times 10^6} = 0,23 \text{ MPa} \leq f_{vd} = 9,6 \text{ MPa}$$

### Verifica a pressoflessione

Per la pressoflessione, si utilizza la relazione (28) ottenendo i valori:

Tabella 43 – Verifica a pressoflessione, bambù lamellare

<b>Verifica a pressoflessione</b>	
N [kN]	1,66
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,10
$f_{c,0,d}$ [MPa]	44,64
M [kNm]	1,13
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	2,26
$f_{m,y,d}$ [MPa]	9,60
Verifica	0,23
	<b>VERIFICATO</b>

### Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna

Per l'instabilità di colonna, si utilizzano le relazioni da (29) a (33).

Tabella 44 – Verifica a pressoflessione, instabilità di colonna

<b>Verifica di Stabilità - Instabilità di colonna - Elementi Pressoinflessi</b>	
$N$ [kN]	1,66
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	0,10
$f_{c,0,d}$ [MPa]	44,64
$M$ [kNm]	1,13
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	2,25
$f_{m,y,d}$ [MPa]	27,22
$b_c$	0,1
$L_o$ [m]	0,94
$l_y$	17,66
$l_{rel,y}$	0,34
$k_y$	0,56
$k_{c,y}$	1,00
	0,08
<i>Verifica</i>	<b>VERIFICATO</b>

### Verifica di Stabilità - Instabilità di trave

Le relazioni saranno dalla (34) alla (39).

Tabella 45 – Verifica di stabilità, instabilità di trave

<b>Verifica di Stabilità - Instabilità di trave Elementi Pressoinflessi</b>	
$M$ [kNm]	1,13
$\sigma_{m,y,d}$ [MPa]	0,07
$f_{m,y,d}$ [MPa]	27,22
$N$ [kN]	1,67
$\sigma_{c,0,d}$ [MPa]	3,33
$f_{c,0,d}$ [MPa]	44,64
$J_{\text{torsionale}}$ [m <sup>4</sup> ]	0,000034
$b$	0,78
$l_{\text{eff}}$ [m]	1,05
$M_{y,\text{critico}}$ [kNm]	905,21
$\sigma_{m,\text{critica}}$ [MPa]	309,36
$l_{\text{rel},m}$	0,43
$k_{\text{crit},m}$	1,00
$Verifica$	0,08
	<b>VERIFICATO</b>

## Posizionamento esterno della struttura

Come sviluppato nel capitolo 6.5 si va ad analizzare la struttura posizionandola in esterno, le sollecitazioni anche in questa situazione sono aumentate rispetto alla condizione interna.

Tabella 46 – Sollecitazioni caso interno ed esterno

### Posizionamento Esterno

<b>Sollecitazioni Portale I</b>	
T [kN]	2,91
M [kNm]	1,00
N [kN] - C	0,85

<b>Sollecitazioni Portale II</b>	
T [kN]	6,13
M [kNm]	2,77
N [kN] - C	4,08

<b>Sollecitazioni Portale III</b>	
T [kN]	4,00
M [kNm]	1,90
N [kN] - C	2,83

<b>Sollecitazioni Portale IV</b>	
T [kN]	1,72
M [kNm]	0,89
N [kN] - C	1,32

### Posizionamento Interno

<b>Sollecitazioni Portale I</b>	
T [kN]	1,17
M [kNm]	0,41
N [kN] - C	0,20

<b>Sollecitazioni Portale II</b>	
T [kN]	2,49
M [kNm]	1,13
N [kN] - C	1,66

<b>Sollecitazioni Portale III</b>	
T [kN]	1,62
M [kNm]	0,77
N [kN] - C	1,14

<b>Sollecitazioni Portale IV</b>	
T [kN]	0,70
M [kNm]	0,37
N [kN] - C	0,54

A causa dell'aumento del carico, come per il legno lamellare, i valori aumentano anche se rimangono inferiori a quelli ottenuti per il legno lamellare. Questa considerazione viene analizzata nel confronto.

L'aumento di sollecitazioni però non implica che le verifiche non vengano soddisfatte, infatti tutte le verifiche rimangono soddisfatte anche considerando il vento e il carico accidentale.

## 7.6 Progetto e verifica delle connessioni

### Le connessioni e il laminato di bambù

Con l'ascesa nell'edilizia del bambù, gli studi hanno rivolto le ricerche verso le tecnologie di produzione, proprietà fisiche e meccaniche del laminato di bambù ma la ricerca sul comportamento delle connessioni è rimasto insufficiente.

Come per il legno lamellare, le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali nel connettore devono essere uniformi e stabili.

Tuttavia, molte imprese producono bambù ingegnerizzato solo sulla base dell'esperienza senza uno standard generale.

Sarà necessario, in futuro, sviluppare standard generali formali per la produzione.

Sebbene le strutture in bambù ingegnerizzato siano analoghe alle strutture in legno, è necessario condurre un gran numero di esperimenti e studi teorici per stabilire una teoria di progettazione unificata e un sistema di calcolo conforme alle caratteristiche dei materiali di bambù ingegnerizzati.

L'attuale ricerca sui giunti di falegnameria è principalmente rivolta ai mobili in bambù. Tuttavia, sono esistite alcune applicazioni di giunti di carpenteria negli edifici in bambù ingegnerizzati. Al momento, mancano ricerche sui giunti di carpenteria per l'utilità nelle strutture edilizie in bambù. Pertanto, dovrebbero essere svolte ulteriori ricerche su questo aspetto.

#### Verifica geometria legno

L'inserimento delle connessioni deve rispettare distanze stabilite dal *prospetto* 8.5 nella normativa EC5 definite in figura (73) capitolo 6.6.

Tabella 47 - Valori minimi di spaziatura e distanza da bordi ed estremità, per spinotti – bambù lamellare

<b>Valori minimi di spaziatura e distanza da bordi ed estremità, per spinotti</b>				
<b>Spaziature e distanze da estremità/bordi</b>	<b>intervallo angolo <math>\alpha</math></b>	<b>angolo <math>\alpha</math></b>	<b>Spaziatura o distanza minima [mm]</b>	<b>valori scelti [mm]</b>
a <sub>1</sub> - parallela alla fibratura	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	80	80
a <sub>2</sub> - ortogonale alla fibratura	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	48	
a <sub>3,t</sub> - estremità sollecitata	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	0 °	112	
a <sub>3,c</sub> - estremità scarica	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	
	$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	
a <sub>4,t</sub> - bordo sollecitato	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	0 °	48	52
a <sub>4,c</sub> - bordo scarico	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	0 °	Non utile per il calcolo	

#### Applicazione – Posizionamento interno

Non essendo presenti delle normative che definiscono le connessioni per il bambù, si fa riferimento come nel caso delle verifiche, alle normative disponibili per il legno lamellare.

Le formule, pertanto, rimangono le stesse utilizzate nel capitolo 6.6 – *progetto delle connessioni*.

Le sollecitazioni che riguardano il caso studio con il bambù lamellare sono:

Tabella 48 – Sollecitazione per il calcolo delle connessioni

<b>Taglio connessione Portale 2 - interno</b>	
M [kNm]	1,13
N [kN] - C	1,66
Sollecitazioni totale [kN]	<b>14,89</b>

Posto  $t_1 = 184 \text{ mm}$  ovvero la dimensione della sezione della trave, si definisce inizialmente la capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione presi 2 piani di taglio e ipotizzando 2 spinotti disposti 1 per fila si esegue a verifica:

Tabella 49 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione

<b><math>F_{v,Rk}</math> - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione</b>	
$f_{h,o,k}$ [MPa]	47,53
$\alpha$ [°]	0,00
$\alpha$ [rad]	0,00
$k_{90}$	1,59
$f_{h,\alpha,k}$ [MPa]	47,53
$t_1$ [mm]	184,000
$f_{u,k}$ - Acciaio [MPa]	400,00
$M_{yrk}$ [Nmm]	162141,13
$\gamma_{m,connessioni}$	1,30
<b><math>F_{v,Rk,singolo\ piano}</math> [N]</b>	<b>25539,10</b>

Si considerano due piani di taglio:

Tabella 50 – Resistenza riferita a n piani di taglio

$n_{\text{piani di taglio}}$	2
$R_{v,k,piani\ di\ taglio}$ [N]	51078,19

Si definisce la resistenza di calcolo, verificando la relazione (49):

$$R_{Ed} \leq R_{v,d}$$

Tabella 51 – Calcolo della resistenza di calcolo e verifica

<b>Calcolo <math>R_{v,d}</math> e Verifica</b>	
$a_1$ [mm]	80,00
<b><math>n^\circ</math> di spinotti</b>	2
$n^\circ$ di spinotti per fila	1
$n_{\text{eff,fil}}$	0,79
$R_{v,k,ef}$ [N]	20112,32
$R_{v,k,ef,tot}$ [N]	40224,64
$R_{v,d}$ [N]	18565,22
Sollecitazione [N]	14890,80
<b>VERIFICATO</b>	

In figura 83, si riporta il dettaglio costruttivo:

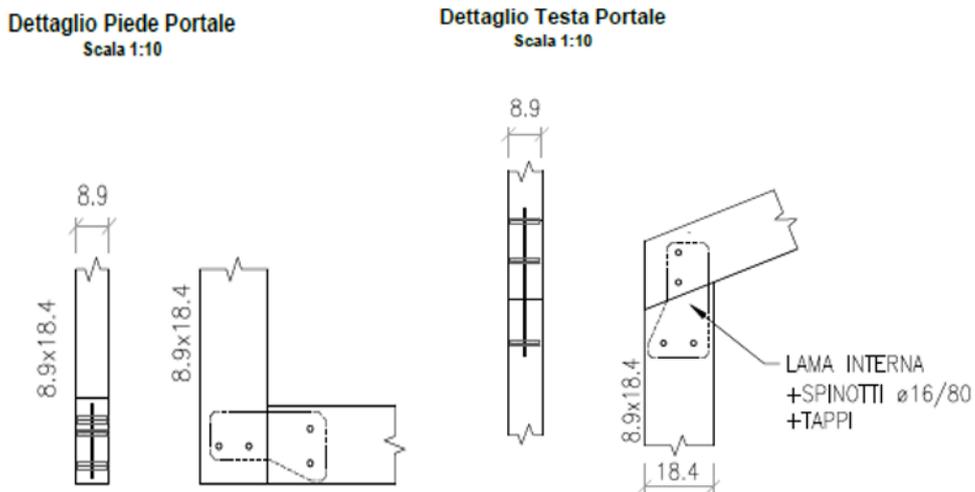


Figura 85 - Dettaglio costruttivo, connessione portale in bambù lamellare

### Applicazione – Posizionamento esterno

L'incremento del carico determina un aumento dei valori di sollecitazione come per il legno lamellare. La scelta di ipotizzare una posizione diversa dall'originaria determina di per sé un'alternativa che può essere valutata in modo approfondito in studi futura, per ora si limita lo studio alla valutazione delle sollecitazioni, delle verifiche e della progettazione delle connessioni.

Tabella 52 – Sollecitazione di taglio, caso esterno e caso interno in bambù lamellare

<b>Taglio connessione Portale 2 - interno</b>		<b>Taglio connessione Portale 2 - esterno</b>	
M [kNm]	1,13	M [kNm]	2,77
N [kN] - C	1,66	N [kN] - C	4,08
Sollecitazioni totale [kN]	<b>14,89</b>	Sollecitazioni totale [kN]	<b>35,32</b>

La relazione (50) in questo caso, prende come lo stesso numero di piani di taglio ovvero 2 e come distanza  $a_1 = 80 \text{ mm}$ . Il valore di  $a_1$  è ridotto rispetto al caso del legno lamellare, infatti si riduce del 20% essendo in precedenza 100 mm in riferimento ad una sezione di  $18 \times 20$ , questa scelta è legata principalmente alle dimensioni della sezione in quanto il non rispetto di queste comporterebbe un rischio di collasso nel legno.

$$\frac{N}{n_{\text{piani di taglio}}} + \frac{M}{a_1}$$

Bisognerebbe come nel caso del legno lamellare aumentare la sezione per ottenere una progettazione adeguata delle connessioni in quanto per due spinotti la verifica non risulta soddisfatta.

## 7.7 Analisi delle vele

### Progetto delle connessioni portali-vele

Nel caso di bambù lamellare, si valuta il peso della vela considerata, si prende la vela H come già considerata nell'elaborazione con il legno lamellare, si valuta il peso della vela per determinare le sollecitazioni da utilizzare nella progettazione delle connessioni.

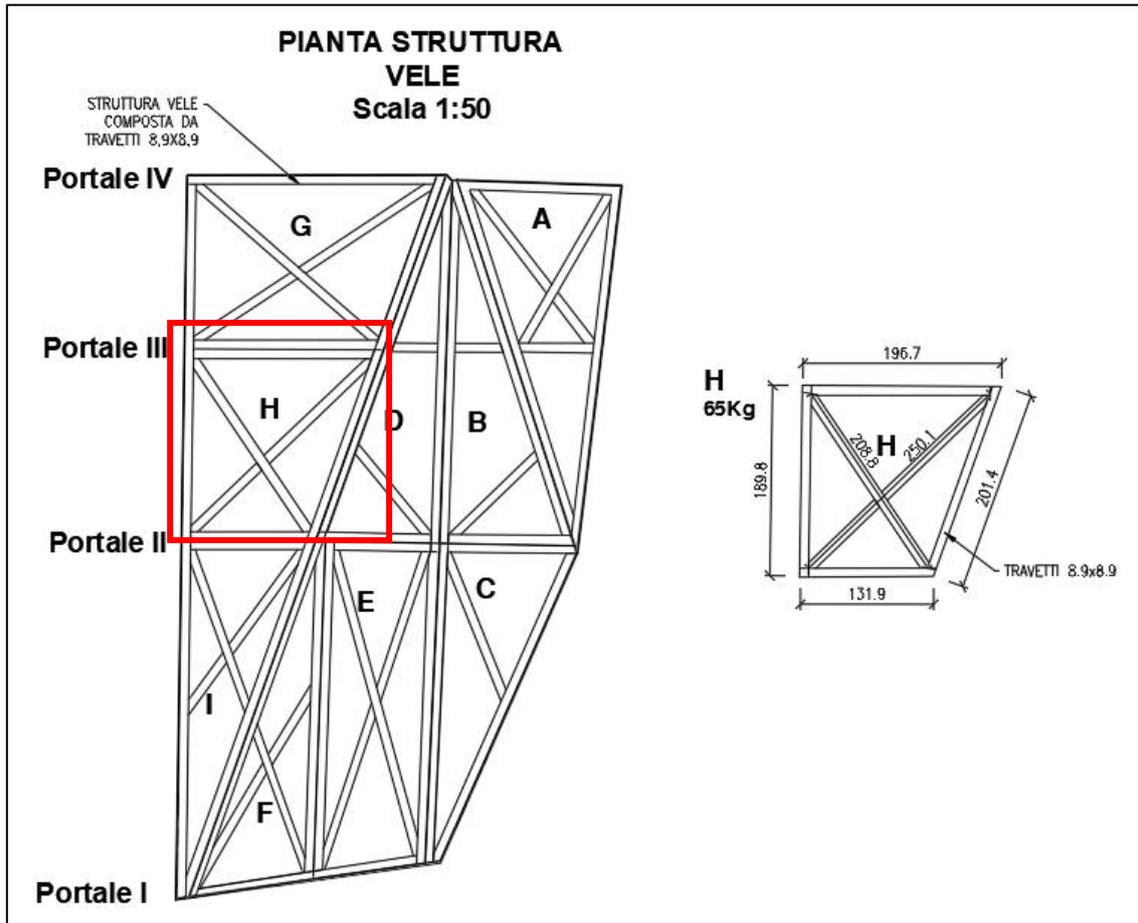


Figura 86 - Pianta delle vele con focus sulla vela H

Considerando il peso  $\gamma = 673 \text{ kg/m}^3$  e conoscendo la sezione dei travetti,  $89 \times 89$  si passa a valutare il peso totale della vela considerando le lunghezze degli elementi costituenti la vela stessa.

Tabella 53 – Calcolo del peso della vela H

L <sub>elemento</sub>	Peso [kg]
1,967	10,75
2,501	13,67
2,088	11,41
1,319	7,21
1,898	10,37
2,014	11,01
	<b>64,42</b>

Nel caso del legno lamellare, il peso si attestava intorno ai 70, si scende di poco nel caso del bambù lamellare.

Il carico agente con il quale si effettua la progettazione delle connessioni tramite viti si determina come descritto precedentemente:

Tabella 54 – Calcolo del taglio nei travetti, bambù lamellare

<b>Taglio nei travetti</b>	
$l_1$ [m]	2,501
$b$ [mm]	89
$h$ [mm]	89
$W_x$ [mm <sup>3</sup> ]	117494,83
$Q_d$ [kN/m]	1,02
$M$ [kNm]	0,80
<b><math>T</math> [kN]</b>	<b>1,27</b>

In tabella 54, si riportano i valori di momento flettente e taglio determinati considerando la diagonale con lo schema statico di trave doppiamente appoggiata.

Con il valore di taglio ottenuto si esegue la progettazione e verifica della connessione.

Le relazioni rimangono a quelle descritte nel capitolo 6.7 come l'utilizzo delle viti *Torx da costruzione testa svasata con filetto parziale* di diametro  $\phi 6$  di lunghezza 180 mm.

Definite le relazioni, il calcolo è riportato di seguito:

Tabella 55 – Calcolo della capacità caratteristica di estrazione e resistenza a trazione delle viti, bambù lamellare

<b><math>F_{ax,\alpha,Rk}</math> - Capacità caratteristica di estrazione</b>	
<b>Controllo EN14592</b>	<b>Verificato</b>
$l_{eff}$ [mm]	40
$\alpha$ [°]	47
Controllo $\alpha$	Verificato
$f_{ax,k}$ [MPa]	26,86
$k_d$	0,75
$n_{viti}$	2
$n_{eff}$	1,86
<b><math>F_{ax,\alpha,Rk}</math> [N]</b>	<b>8254,74</b>

<b><math>F_{t,Rk}</math> - Resistenza caratteristica a trazione della vite</b>	
$f_{tens,k}$ [MPa]	400
<b><math>F_{t,Rk}</math> [N]</b>	<b>746,42</b>

Tabella 56 – Controllo Rope Effect e calcolo della capacità di estrazione, caso bambù lamellare

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - Capacità caratteristica di estrazione	
$l_{eff}$ [mm]	40
$\alpha$ [°]	47
$r_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	350
$f_{ax,k}$ [MPa]	15,92
$k_d$	0,75
$n_{viti}$	2
$n_{eff}$	1,86
$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	71368,89

$F_{ax,\alpha,Rk}$ - Resistenza caratteristica all'attraversamento	
$f_{head,k}$ [MPa]	9,4
$d_h$ [mm]	12
$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	4261,62

$F_{ax,\alpha,Rk}$ [N]	8254,74
------------------------	---------

Controllo $F_{v,rk,Rope\ Effect}$	
$R_{ax,k}$ [N]	1392,88
$F_{v,rk,Rope\ Effect}$ [N]	348,22
Verificato	

Tabella 57 - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione, caso bambù lamellare

$F_{v,Rk}$ - Capacità portante caratteristica, per piano di taglio e per mezzo di unione	
$\rho_1$ [kg/m <sup>3</sup> ]	673
$\rho_2$ [kg/m <sup>3</sup> ]	673
$f_{h,o,k,1}$ [MPa]	51,87
$f_{h,o,k,2}$ [MPa]	51,87
$t_1$ [mm]	89
$t_2$ [mm]	89
$\alpha$ [°]	47
$\alpha$ [rad]	0,82
$k_{90}$	1,44
$f_{h,\alpha,k,1}$ [MPa]	41,99
$f_{h,\alpha,k,2}$ [MPa]	41,99
$b$	1

$t_1$ [mm]	89
$t_2$ [mm]	89
$f_{u,k}$ - Acciaio [MPa]	400
$M_{yRk}$ [Nmm]	12658,27
$\gamma_{m,connessioni}$	1,3
<b><math>F_{v,Rk,singolo\ piano}</math> [N]</b>	<b>3252,64</b>

Si considerano n piani di taglio e si calcolato la resistenza di calcolo:

Tabella 58 - Resistenza di calcolo, caso bambù lamellare

n piani di taglio	2
<b><math>R_{v,k,piani\ di\ taglio}</math> [N]</b>	<b>6505,28</b>

<b>Calcolo <math>R_{v,d}</math> e Verifica</b>	
$R_{v,d}$ [N]	3002,43
<b><math>F_{v,Ed}</math> [N]</b>	<b>1271,99</b>
<b>VERIFICATO</b>	

#### *Studio delle vele F – I in campo acustico*

L'idea da sviluppare è sostituire il perlinato posizionato sopra le vele con culmi di bambù italiano disposti inferiormente, ovvero solidarizzate al perimetro delle vele tramite l'utilizzo di reggette.

Le due vele che si analizzano sono la F e I, disposte nel lato ovest della struttura con inclinazioni differenti

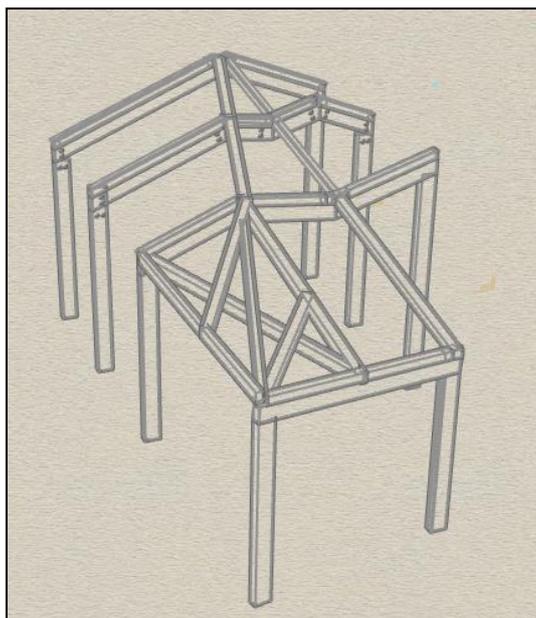


Figura 87 - Inquadramento vela F-I

La disposizione dei culmi si basa sulla teoria di Schroeder riguardo la diffusione a reticoli di fase ovvero il QRD.

Il diffusore a resto quadrato (*QRD, quadratic residue sequence*) consiste in una serie di incavi della stessa larghezza ma profondità differenti. Le profondità sono determinate da una sequenza a resto quadratico basata su un numero primo.

I diffusori sono 1D, cioè diffondono il suono su un solo piano mentre nell'altra direzione si comportano come una superficie piana.

Per la costruzione è adatto qualsiasi materiale liscio, riflettente e non diaframmatico. L'onda sonora che incide su questa tipologia di diffusori viene riflessa dal fondo degli incavi e re-irradiata nell'ambiente circostante.

La pressione sonora misurata in un punto esterno al diffusore è determinata dall'interferenza tra le onde re-irradiate da ogni incavo. Nonostante le onde sonore re-irradiate abbiano la stessa ampiezza, possiedono fasi differenti, dovute alla differenti profondità degli incavi.

Il suo funzionamento si base allora, sull'inviare una nota, prodotta da un oscillatore, verso un pannello formato da scanalature parallele, di profondità definita, disposte secondo una sequenza precisa su una superficie originariamente liscia, e si misurano gli effetti di diffusione; ossia la capacità del pannello di restituire il suono su angoli diversi dal  $180^\circ$  speculare tipico della superficie piatta.

Essendo le scanalature scavate secondo una sequenza binaria ricavata da calcoli ben precisi si è messo in correlazione la matematica pura con il comportamento acustico dei diffusori.

Per definire le profondità, si sceglie il numero primo (1-3-5-7-11-17-19-23-29...) su cui basare il calcolo; avendo a disposizione diametri dei culmi da 1 cm a 9 cm, la scelta è ricaduta sul numero 7. Questo numero corrisponderà al numero massimo delle sezioni del diffusore (più una); in linea di massima più alto il numero, più il diffusore "diffonde" in maniera uniforme.

Si crea una sequenza di numeri in base al quantitativo necessario, in questo caso a partire dalla larghezza della vela  $L = 123,5$  cm con una media di 4 cm di diametro dei culmi si ottengono 31 canne di bambù da inserire di lunghezze non uguali a causa della disposizione delle vele e alla loro inclinazione.

Pertanto, quello che si vuole ottenere è avere 31 canne di bambù con variabilità di diametro da 1 a 9 cm in 123,5 cm.

Il QRD viene utilizzato per la scelta dei diametri, perciò scelto il diametro e definita la sequenza si calcola il quadrato dei numero della sequenza  $n^2$  e si arrotonda il numero prendendo l'intero della divisione del quadrato per il numero primo (ad esempio  $\text{INT}(2,5) = 2$ ).

Si inserisce il resto ottenuto sottraendo  $n$  volte il numero primo scelto.

Riepilogando NP è il numero primo ed  $n$  è il numero progressivo da 0 a NP:

Tabella 59 – Riepilogo QRD

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>1</i>	<i>n</i>	$=A^2$	$=\text{INT}(B1/NP)$	$=B1-(C1*NP)$

In colonna A il numero progressivo, in B il quadrato, in C l'intero della divisione del quadrato per il numero primo, in D il resto ovvero la differenza tra il quadrato ed il risultato di C.

Come fattore di proporzione di sceglie il numero 2 incrementando il diametri di 1 così da ottenere diametri variabili da 1 a 9 cm.

Il numero più elevato sarà quindi il fondo del diffusore, il numero più basso invece la scanalatura meno profonda del diffusore.

Non appare mai il numero primo scelto ma i calcoli si baseranno sempre sul riferimento al valore massimo 8.

Le scanalature sono in questa ovvero la prima scanalatura sarà di altezza  $\frac{4}{4}$ , la seconda  $\frac{3}{4}$ , la terza  $\frac{0}{4}$  (il fondo), la quarta  $\frac{2}{4}$  e così via specularmente.

Tabella 60 – Metodo QRD per la scelta dei diametri

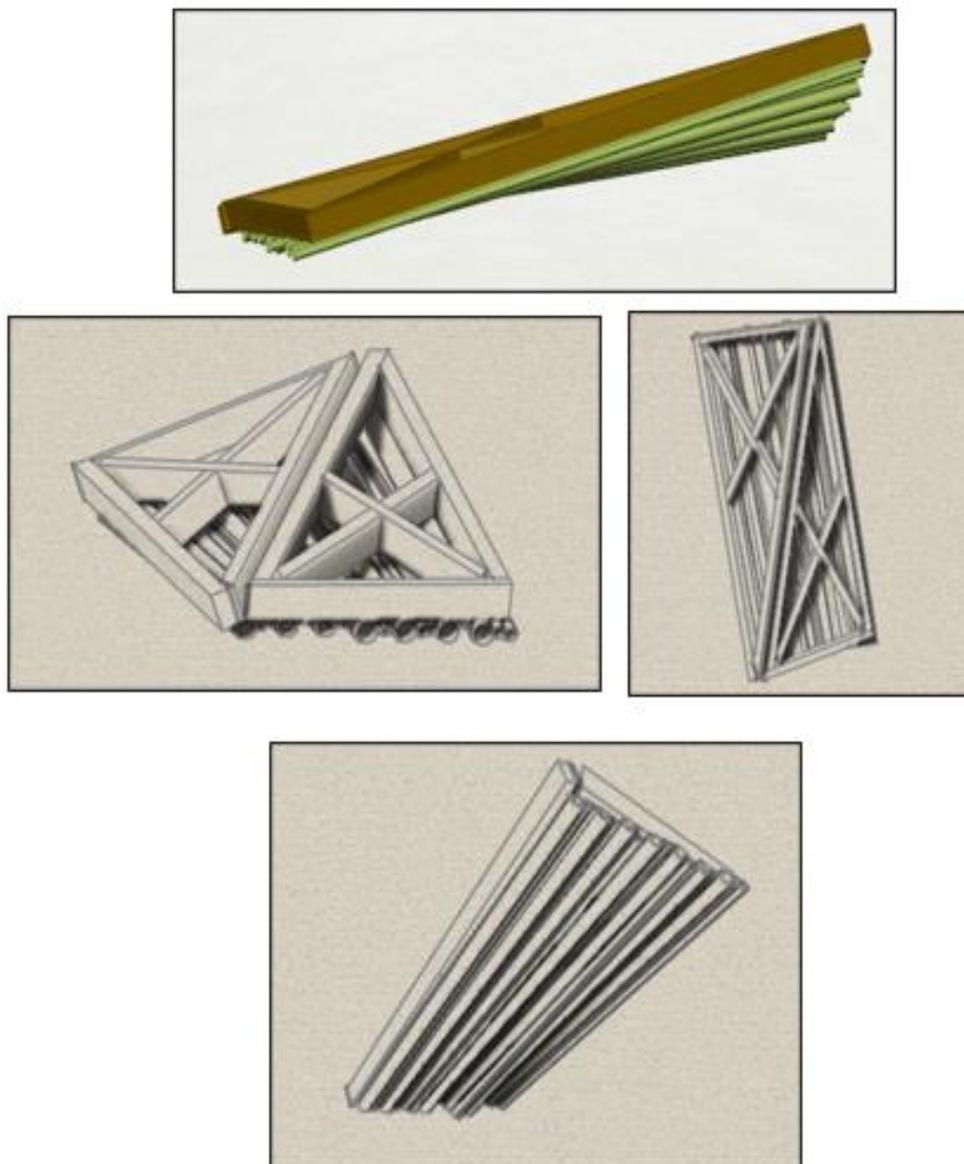
<i>Sequenza</i>	<i>n<sup>2</sup></i>	<i>Arrotondo</i>	<i>Resto</i>	<i>2</i>	<i>Diametro</i>
1	1	0	1	2	3
2	4	0	4	8	9
3	9	1	2	4	5
4	16	2	2	4	5
5	25	3	4	8	9
6	36	5	1	2	3
7	49	7	0	0	1
8	64	9	1	2	3
9	81	11	4	8	9
10	100	14	2	4	5
11	121	17	2	4	5
12	144	20	4	8	9
13	169	24	1	2	3
14	196	28	0	0	1
15	225	32	1	2	3
16	256	36	4	8	9
17	289	41	2	4	5
18	324	46	2	4	5
19	361	51	4	8	9
20	400	57	1	2	3
21	441	63	0	0	1
22	484	69	1	2	3
23	529	75	4	8	9
24	576	82	2	4	5
25	625	89	2	4	5
26	676	96	4	8	9
27	729	104	1	2	3
28	784	112	0	0	1
29	841	120	1	2	3
30	900	128	4	8	9
31	961	137	2	4	5

In realtà disegnando i culmi si osserva che i culmi non saranno 31 ma 25:

- 7 culmi da 9 cm;
- 8 culmi da 5 cm;
- 7 culmi da 3 cm;

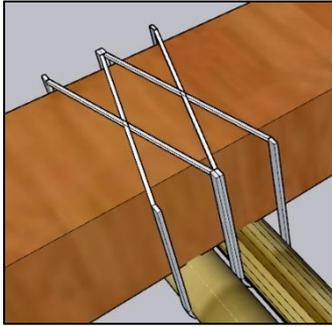
- 3 culmi da 1 cm.

Si riportano i prospetti delle due vele analizzate con l'inserimento dei culmi.



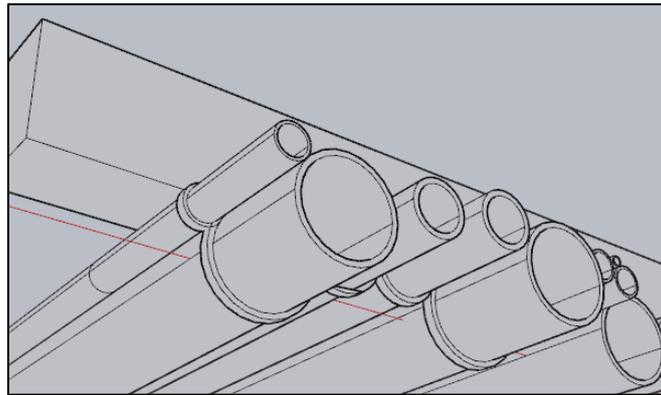
*Figura 88 – sx, vista frontale; dx, vista dall'alto; in alto, vista destra; in basso, vista dal basso.*

Il collegamento tra vele e culmi avviene tramite delle reggette in PVC di colore neutro che “abbracciano” il culmi così da ancorarlo alla vela.



*Figura 89 - Reggette per culmi*

Che è possibile visualizzare dal basso in figura 90:



*Figura 90 - Travetti e Culmi con reggette*

## 8. Confronto applicato al caso studio

Lo studio si completa confrontando i risultati ottenuti per il caso studio con i due materiali che servirà come base per ampliare la ricerca sul bambù lamellare nel campo dell'edilizia.

### *Dimensionamento*

Sezioni differenti portano a risultati differenti, il peso proprio di per sé non coincide sia per le dimensioni delle sezioni ma anche dal valore di peso specifico che nel caso del legno lamellare è circa 450 kg/m<sup>3</sup> mentre per il bambù si ha circa 690 kg/m<sup>3</sup>.

Questo porta ad ottenere un  $G_{1\text{legno}} = 0,42 \text{ kN/m} > G_{1\text{bambù}} = 0,23 \text{ kN/m}$

Pertanto, sezioni maggiori anche se con peso specifico minore forniscono valori di  $G_1$  maggiori e questo già si traduce nel confermare che il peso proprio di una struttura in bambù lamellare è comunque più di una struttura in legno lamellare che già di per sé è molto leggera.

### *Sollecitazioni*

Le sollecitazioni determinate con i due materiali considerando la disposizione esterna e interna confermano quanto descritto per il dimensionamento.

Le sollecitazioni nel caso interno sono comunque maggiori utilizzando il legno lamellare, riguardo ciò incide la disponibilità delle sezioni in quanto essendo un materiale più conosciuto e sviluppato si mettono a disposizione dimensioni più conformi a differenza del bambù lamellare che ha una limitata disponibilità di sezioni e per giunta diverse dal solito tipo di sezioni; ovviamente come già descritto è possibile personalizzare la dimensione delle sezioni comportando però un incremento del prezzo. Solo il frequente utilizzo e normative adatte possono migliorare questa limitazione.

Nel caso esterno vi è sempre un aumento delle sollecitazioni ma grazie al ridotto peso proprio nel bambù lamellare l'incremento di esse è limitato e si ottiene:

Tabella 61 - Sollecitazioni massime

<b>Bambù lamellare</b>			
<b>Posizionamento Interno</b>		<b>Posizionamento Esterno</b>	
T [kN]	2,49	T [kN]	6,13
M [kNm]	1,13	M [kNm]	2,77
N [kN] - C	1,66	N [kN] - C	4,08

<b>Legno lamellare</b>			
<b>Posizionamento In-terno</b>		<b>Posizionamento Esterno</b>	
T [kN]	3,27	T [kN]	7,19
M [kNm]	1,44	M [kNm]	2,80
N [kN] - C	3,77	N [kN] - C	4,50

I valori massimi in tabella 61 si ottengono in entrambi i casi e per entrambe le condizioni nel portale II.

### *Verifiche*

La verifica che risulta essere fondamentale analizzare è la *verifica a pressoflessione*, come descritto nel capitolo 6.5 per il legno lamellare e 7.5 per il bambù lamellare, è l'unica verifica che cambiando il posizionamento da interno ad esterno non risultava più verificata.

Con il bambù lamellare la verifica in entrambe le situazioni restituisce un risultato positivo mentre per il legno lamellare non è così, infatti per ottenere un risultato positivo nella verifica è utile aumentare la dimensione della sezione da 18x20 a 18x24, ciò è legato all'aumento delle sollecitazioni che per il legno lamellare è più incidente rispetto al bambù lamellare.

### *Peso delle vela H*

Nel momento in cui si è analizzata la vela H, è risultato utile valutarne il peso per entrambi i materiali. Il peso specifico e la sezione incidono, come negli altri punti descritti, sul valore del peso anche se non si parla di ordini di grandezza ma di pochi kg si ottiene un valore massimo di circa 70 kg.

Tabella 62 - Peso a confronto per la vela H

<i>Bambù lamellare</i>	
$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	690
Sezione [m]	0,089
	0,089

L <sub>elemento</sub> [m]	Peso [kg]
1,967	10,75
2,501	13,67
2,088	11,41
1,319	7,21
1,898	10,37
2,014	11,01
	<b>64,42</b>

<i>Legno lamellare</i>	
$\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	450
Sezione [m]	0,08
	0,16

L <sub>elemento</sub> [m]	Peso [kg]
1,967	11,33
2,501	14,41
2,088	12,03
1,319	7,60
1,898	10,93
2,014	11,60
	<b>67,89</b>

### Conessioni

Il taglio sollecitante viene determinato in entrambi i casi con la relazione (50), il numero degli spinotti rimane uguale ma cambia il valore di  $a_1$  che come precedentemente descritto si riduce del 20% dal caso del legno lamellare al bambù lamellare.

Il valore di  $a_1$  che deriva sempre dalle dimensioni delle sezioni e, le condizioni di carico potevano farci ottenere una netta differenza tra i valori di taglio da considerare ma il taglio risulta pressoché uguale nei due materiali e in entrambe le situazioni.

Tabella 63 - Taglio per le connessioni, bambù lamellare e legno lamellare

<b>Taglio connessione - Portale 2 - interno Legno lamellare</b>	
M [kNm]	1,27
N [kN] - C	3,77
Sollecitazioni totale [kN]	<b>14,59</b>

<b>Taglio connessione - Portale 2 - esterno Legno lamellare</b>	
M [kNm]	2,79
N [kN] - C	8,31
Sollecitazioni totale [kN]	<b>32,06</b>

<b>Taglio connessione - Portale 2 - interno Bambù lamellare</b>	
M [kNm]	1,13
N [kN] - C	1,66
Sollecitazioni totale [kN]	<b>14,89</b>

<b>Taglio connessione - Portale 2 - esterno Bambù lamellare</b>	
M [kNm]	2,77
N [kN] - C	4,08
Sollecitazioni totale [kN]	<b>35,32</b>

Inoltre, analizzando i valori di calcolo per il caso interno si nota come essendo la resistenza a rifollamento dipendente dalla densità e avendo valori maggiori di densità per il bambù lamellare, il risultato che si ottiene è avere un valore maggiore di circa 3 kN per il caso del bambù lamellare.

Tutto il confronto si basa fondamentalmente su due fattori che determinano tutte le differenze osservate:

- Densità;
- Disponibilità delle sezioni.

Il bambù lamellare risulta un materiale ottimo per l'edilizia e ciò che lo limita come è risultato dallo studio, è la poca sperimentazione nelle costruzioni

## Conclusioni

Dalle analisi effettuate è risultato come il bambù lamellare sia un ottimo materiale sostenibile.

Dallo studio è emerso come le prestazioni del bambù lamellare siano confrontabili con quelle del legno lamellare: in particolare per il valore di densità, nel bambù lamellare è superiore a quello del legno lamellare.

Il laminato di bambù ha una densità che varia tra 500 e 900 kg/m<sup>3</sup>, mentre il legno presenta una massa volumica tra 300 e 600 kg/m<sup>3</sup>.

A definirne le differenze è la quantità di fibre presenti. Inoltre, la densità è strettamente legata alle prestazioni meccaniche del materiale e ciò è emerso a livello progettuale in quanto i valori di resistenza di progetto sono risultati più limitanti nel caso del legno lamellare.

Ciò che accomuna i due materiali è la natura igroscopica, ma il bambù, a differenza del legno inizia a ritrarsi (diminuire di volume al diminuire dell'umidità) sin dall'inizio della stagionatura.

Inoltre, come per il legno lamellare, gli studi condotti sul laminato di bambù hanno evidenziato che la direzione di applicazione del carico incide sui valori di resistenza, risultando maggiore nella direzione parallela. Questo deriva dalla natura ortotropa di entrambi i materiali, infatti, nella direzione perpendicolare alle fibre i valori di resistenza sono relativamente bassi e si predilige anche nel laminato di bambù andare a effettuare le verifiche separatamente proprio a causa della sua natura ortotropa.

Il legno lamellare, a differenza del laminato di bambù, ha una disponibilità maggiore di sezioni standardizzati con costi nettamente inferiori; ciò deriva dal maggiore sviluppo dovuto alla presenza di un valido quadro normativa.

Per il laminato di bambù, invece, solo negli ultimi anni si sta avendo una rapida crescita nel campo della ricerca che incentiva la sua evoluzione vista la natura del materiale e la possibilità di utilizzarlo con tempi ridotti rispetto al legno, rimane però limitante la mancanza di standard e normative.

A livello progettuale, l'utilizzo del laminato di bambù ha comportato la possibilità di valutare la struttura e restituire comunque risultati attendibili anche non avendo a disposizione sezioni standardizzate e differenti valori di densità che incidessero sui valori di resistenza.

A causa della mancanza di un quadro normativo adeguato riguardo il laminato di bambù ed essendo i due materiali comparabili, dalla progettazione delle connessioni è risultato come la teoria di

Johansen alla base dello studio delle connessioni negli elementi in legno sia adeguata anche per la valutazione del laminato di bambù che presenta valori di resistenza più elevati.

Lo studio, inoltre, ha cercato di individuare un'alternativa per la copertura che può essere presa come base per ulteriori approfondimenti a livello acustico, in quanto solo la realizzazione di un prototipo potrà fornire un risultato adeguato.

Concludendo, il bambù lamellare ha ancora limitazioni rispetto al legno lamellare (costi, normative, ...) ma può, con la sua industrializzazione, essere un materiale alternativo fornendo un'ulteriore prospettiva di sostenibilità.

## Bibliografia

- J. Li, Y. Yuan, X. Guan. *Assessing the Environmental Impacts of Glued-Laminated Bamboo Based on a Life Cycle Assessment*. "Glulam bamboo & LCA," BioResources 11(1), 1941-1950:
- H. H. Becker. *Laminated Bamboo Structures for a Changing World*. Catholic University of America:
- J. Correal, F. Ramirez, S. Gonzalez, J. Camacho - *Structural behavior of Glued Laminated Guadua Bamboo as a construction material*; Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia:
- N. Mordà, P. Macías, M. Stroschia, P. Bajzelj. *Il Bambù: una scelta di Ecologia Strutturale*; DoMo Studio - Turin (IT):
- F. A. T. Mera, C. Xu: *Plantation management and bamboo resource economics in China*;
- M. Mahdavi; P. L. Clouston, A.M.ASCE; *Development of Laminated Bamboo Lumber: Review of Processing, Performance, and Economical Considerations*; 1036 - 1042 / Journal of materials in civil engineering © asce / july 2011 – <http://www.ascelibrary.org> -
- B. Sharma, A. Gatóo, M. Bock, M. Ramage - *Engineered bamboo for structural applications*; Department of Architecture, University of Cambridge, Cambridge, UK - Available online 23 February 2015 - Construction and Building Materials. Journal homepage [www.elsevier.com/locate/conbuildmat](http://www.elsevier.com/locate/conbuildmat):
- J. F. Correal. *Mechanical properties of Colombian glued laminated bamboo*;
- J. Mater. W. Xing; J. Hao, K. S. Sikora, *Shear Performance of Adhesive Bonding of Cross-Laminated Bamboo*; Article in Journal of Materials in Civil Engineering June 2019.
- J Wood Sci, M-C. Yeh, Y-L. Lin: *Finger joint performance of structural laminated bamboo member*;
- M. Càrdenas Laverde, 2011: *Il Bambù come materiale da costruzione*;

*Il mondo del Bambù*, rivista dal sito <https://www.bambutigre.it/wp-content/uploads/2017/12/rivista-mondo-bambu.pdf>;

F.Rusch, R. Trevisan, É.Hillig, E. Chagas Mustefaga,.: *Physical- mechanical properties of laminated bamboo panels*; e-ISSN 1983-4063 - <https://www.agro.ufg.br/pat> -, v. 49, e53714, 2019

ISSUE 7 – 2012 Edition ISSN No. 1985-4951, Intropica, Institute of tropical forestry and forest products. Centre of R&D in Tropical: *Bamboo World*;

B. Sharma, A. Gattoo, M. Bock, H. Mulligan, M. Ramage: *Engineered bamboo: state of the art*;

D. Trujillo – MSc DIC CEng MIStructE- Senior Lecturer / Chair of the INBAR Task Force for Bamboo Construction: *Developments in Structural Design Standards with Bamboo*;

Politecnico di Torino, <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/14651>: *Sviluppo di sistemi reticolari spaziali ibridi acciaio-bambù: caratterizzazione sperimentale del comportamento delle connessioni*;

Z. Escamilla, Habert G (2014) *Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity*. Journal of Cleaner Production 69(1) 117–127;

Correal J, Ramirez F, Gonzalez S and Camacho J (2010) *Structural behavior of glued laminated Guadua bamboo as a construction material*. In Proceedings of the 11th World Conference on Timber Engineering, Trentino, Italy. [www.ewpa.com/Archive/2010/june/Paper014.pdf](http://www.ewpa.com/Archive/2010/june/Paper014.pdf);

W. Liese, and G.Weiner (1996) *Ageing of bamboo culms: A review*. Wood Science and Technology 30(2): 77–78;

J. Vogtlander, P. Van der Lugt, H. Brezet (2010) *The sustainability of bamboo products for local and Western European applications. LCAs and land-use*. Journal of Cleaner Production 18(13): 1260–1269;

- Y. Xiao, RZ Yang and B. Shan (2013) *Production, environmental impact and mechanical properties of glulam*. *Construction and Building Materials* 44(1): 765–773;
- AK Bansal and TRN Prasad (2004) *Manufacturing laminates from sympodial bamboo – an Indian experience*. *Journal of Bamboo and Rattan* 3(1): 13–22;
- H.H. Becker - Catholic University of America: *Laminated Bamboo Structures for A Changing World*;
- Rittironk, Supreedee, 2009, *Investigating Laminated Bamboo Lumber as a Viable Structural Material in Architectural Applications*, Illinois Institute of Technology;
- Architettura Tecnologia Design: Bamboo [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_collettivo\\_cerretini/33](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_collettivo_cerretini/33);
- INTERO Kunmig Bamboo House*: <https://www.ovalpartnership.com/en/work/project/INTEGER-Kunming-Bamboo-House>;
- Bamboo tower in the sky- Kunming Joy-City Ucommune: <https://architizer.com/projects/bamboo-tower-in-the-sky-kunming-joy-city-ucommune/>
- Ponte in bambù lamellare: <http://buromilan.com/project/ponte-di-accesso-al-triennale-design-museum-milano-italia/>
- D. Yang, H. Li, Z. Xiong, L. Mimendi, R. Lorenzo, I. Corbi, O. Corbi, C. Hong: *Mechanical properties of laminated bamboo under off-axis compression*
- Lamboo, Sezioni e prestazioni del bambù lamellare: <https://lamboo-technologies.wixsite.com/lamboo-us/structure-bamboo-structural-beams>
- Moso International, *Sezioni e prestazioni del bambù lamellare*: <https://www.moso-bamboo.com/it/prodotto/bamboo-n-finity-travi-e-rivestimenti-da-esterno/>
- BWG, *Sezioni e prestazioni del bambù lamellare*: <http://bwg.vn/en/bamboo-beams-lumber-vietnam-p14.html>

*Legno lamellare: caratteristiche, prezzi ed usi* <https://www.faidate360.com/legno-lamellare.html>

*Il legno lamellare incollato: caratteristiche e alcuni aspetti di produzione* <https://www.ingenio-web.it/27686-il-legno-lamellare-incollato-caratteristiche-e-alcuni-aspetti-di-produzione>

*Il legno lamellare nelle strutture da esterno: pregi e caratteristiche* <https://naturalwood.it/legno-lamellare-pregi/>

*Legno lamellare in bioedilizia: una scelta sostenibile per un design da sogno*  
<https://www.ambientebio.it/permacultura/casa-bio-edilizia/legno-lamellare-travi-lamellari-tetti-1993/#che-cose-il-legno-lamellare>

Alessandra Marini, Università di Bergamo - *Legno: caratteristiche fisiche e meccaniche*  
<http://www.data.unibg.it/dati/corsi/60044/69775-Legno20%20propriet%C3%A0%20fisico-meccaniche.pdf>

Istruzioni CNR per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno  
<https://www.ingenio-web.it/19500-istruzioni-cnr-per-la-progettazione-lesecuzione-ed-il-controllo-delle-strutture-di-legno>

A. Gattoo, B. Sharma, M. Bock, H. Mulligan, M. H. Ramage: Article in Engineering Sustainability · October 2014: *Sustainable structures: Bamboo standards and building codes*

J. F. Correal, J. S. Echeverry, F. Ramírez, L. E. Yamín *Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua angustifolia Kunth:*

A. Solari, Vero o Falso: Il Bambù (e Perché è Davvero Sostenibile): <https://www.houzz.it/magazine/vero-o-falso-il-bambu-e-perche-e-davvero-sostenibile-stsetivw-vs~76434684>

A. Gattoo, B. Sharma, M. Bock, H. Mulligan, M. H. Ramage: *Bambù Trasformato per Applicazioni Strutturali*

Y. Xiao, R.Z. Yang, B. Shan: *Production, environmental impact, and mechanical properties of glubam*

A.Sofò: Un'altra erba legnosa: <http://horty.altervista.org/blog/2019/08/09/unaltra-erba-legnosa/>

Caratteristiche Poco Note della Pianta: <https://www.pavibamboo.com/il-bamboo/caratteristiche-poco-note-della-pianta>

Normative per categorie di prodotto - Classi di emissione di formaldeide in Europa

[:https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-in-europa](https://www.federlegnoarredo.it/it/servizi/normativa/normative-per-categoria-di-prodotto/pannelli-e-semilavorati/pannelli-a-base-di-legno-e-emissioni/classi-di-emissione-di-formaldeide-in-europa)

Nuova norma EN 14080:2013 LEGNO LAMELLARE INCOLLATO

<https://www.mastrangelialdo.info/single-post/2015/10/20/nuova-norma-en-140802013-legno-lamellare-incollato>

Determinazione del carico neve e vento: [\*Snow Load Zones of the United Kingdom According to Eurocode \(dlubal.com\)\*](#)

A.F. Hughes - *Wind action to BS EN 1991-1-4*

Ing. O. Italiano – Analista STACEC Srl: *Collegamenti legno – acciaio con connettori metallici a gambo cilindrico* - <https://webapi.ingenio-web.it/immagini/file/byname?name=mqeK0JZi5f.pdf>

Catalogo Soltech: <https://www.soltechonline.com/download-cataloghi-soltech-soluzioni-tecniche.php>

Metodo STI [http://www.crbnet.it/FisicaTecnica/didattica/lezioni/illuminotecnica/A\\_Acustica\\_ambienti\\_chiusi.pdf](http://www.crbnet.it/FisicaTecnica/didattica/lezioni/illuminotecnica/A_Acustica_ambienti_chiusi.pdf)

*Acustica e visibilità nella progettazione di teatri e sale per concerti*: <https://www.castelbuonolive.com/acustica-e-visibilita-nella-progettazione-di-teatri-e-sale-per-concerti/>

C. Hong, H. Li, Z. Xiong, R. Lorenzo, I. Corbi, O. Corbi, D. Wei, C. Yuan, D. Yang, H. Zhang:  
*Review of connections for engineered bamboo structures*

Teoria dei diffusori a resto quadratico (QRD): <http://www.ptoproject.it/tech/teoriaQRD.htm>

Arch. S. Spandre: *Calcolare il Tempo di Riverberazione (T60)* <https://www.acustico.com/approfondimenti/calcolare-tempo-di-riverberazioneT60.html>

D. Russo, *Correzione Acustica di Aule Scolastiche: Risultati di un Progetto Pilota*: <https://www.casaportale.com/public/uploads/Correzione%20acustica%20di%20aule%20scolastiche.%20Progetto%20pilota.%20BIMED.pdf>

## ***Ringraziamenti***

È stato un percorso pieno di salite e trasferirmi a Bologna è stata la salita più ripida, vivere lontano dalla mia famiglia mi ha fatto crescere e non smetterò mai di ringraziarli per questo.

I miei genitori, Rosalba e Giampiero, sono i miei eroi, sempre al mio fianco, non mi hanno mai lasciato sola e ogni gioia e dolore loro ci sono stati senza mai perdere fiducia in me. Ho cercato in ogni modo di rendervi orgogliosi di me e spero di esserci riuscita.

La mia sorellona Roberta e il mio cognatino ormai fratello Riccardo, sono stati la mia guida aiutandomi senza mai pensarci due volte. E ora c'è anche la principessa Irene, che proteggerò per tutta la vita e spero di renderla orgogliosa.

I miei Nonni, che ormai non ci sono più ma li sento sempre accanto a me con il loro amore, i ricordi e le passioni che mi hanno trasmesso non mi lasceranno mai sola.

Partirò da Roma e soprattutto da 3 persone che sono diverse ma mi completano a loro modo: Eleonora, Erika e Francesca. Voi 3 siete le mie migliori amiche, le mie sorelle, il mio punto di riferimento quando ho paura, la spalla su cui piangere e le persone con cui ridere e spettegolare. Non vi ringrazierò mai abbastanza per quello che fate per me.

Ora arriviamo a Bologna, sono arrivata qui che ero una romana impaurita dal mondo e tutto mi aspettavo tranne che trovare delle persone che avrebbero reso la mia vita migliore, creandomi quella “famiglia” di amici che tutti meritano. Ho conosciuto in questi 3 anni persone da tutta Italia ma il “4 is the magic number” mi riempie il cuore ogni giorno, voi mi avete sopportata più che supportata, avete resistito ai miei cambi d'umore, ai litigi, e alle miei crisi improvvise però come vi ho sempre detto: ovunque andremo a finire, noi ci saremo sempre e sapete benissimo che non potete liberarvi di me.

Infine, la mia Relatrice, Prof. Molari e i miei correlatori Andrea Canducci e Francesco Pellisari, vorrei ringraziarvi per la passione che mi avete trasmesso e con la quale lavorate, per le esperienze che avete condiviso con me ed i consigli di cui farò tesoro.

La mia carriera universitaria, si conclude oggi 21 luglio 2021 e come ho sempre pensato questa non è una mia vittoria, ma è la vittoria e la gioia di tutte le persone che hanno creduto e crederanno in me.

*Grazie di rendermi migliore ogni giorno, Martina.*