

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo di sistemi reticolari spaziali ibridi acciaio-bambù: caratterizzazione sperimentale del comportamento delle connessioni

Relatore

Prof. Fabio Di Trapani

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica,
Politecnico di Torino

Laureanda

Maria Minardi

Co-Relatore

Prof. Cristoforo Demartino

Zhejiang University - University of Illinois at Urbana Champaign Institute

MARZO 2020

“Imagination is more important than knowledge. For knowledge is limited, whereas imagination embraces the entire world, stimulating progress, giving birth to evolution.”

— Albert Einstein

“L’immaginazione è più importante della conoscenza. La conoscenza è limitata. L’immaginazione abbraccia il mondo, stimolando il progresso, facendo nascere l’evoluzione”.

— Albert Einstein

Abstract

The continuous search for materials more sustainable to cope with the impact of carbon on our environment has classified bamboo as one of the best alternative building materials, especially in regions such as China, South Asia and South America, where bamboo is abundant. Bamboo is a versatile and highly renewable natural material that could play an important role in sustainable construction. It has desirable physical and mechanical properties, including a high resistance to weight ratio and significant intensity of tension and compression. However, these properties depend on factors such as moisture content, culm diameter and species. Besides, the hollow shape of bamboo, considerable variability, anisotropy and fragile failure modes make it difficult to work and its modern use is hampered by a lack of structural codes and insufficient engineered connection designs.

Bamboo can be also used in the form of engineered material. Different authors investigated its use in the form of a laminated material by creating small slices and gluing them using different techniques. Using this approach, it is possible to realize unidimensional elements (i.e., bars) that can be used for structural applications. Among the possible different applications, an interesting one emerging from different studies is their use in spatial frame systems sometimes in combination with more traditional steel elements. However, although the possibilities of realizing hybrid truss system was demonstrated, little attention has been paid to behavior of the connections. The application of a composite bolted connection using laminated bamboo and steel plates in a laminated bamboo structure necessitates a detailed investigation of its behaviour.

ABSTRACT

To overcome these limitations of the literature, the goal of this study is to introduce an original hybrid truss system made of steel and glued laminated bamboo (glubam) bars and to investigate the static mechanical behaviour of the bolted connections between the steel plates and laminated bamboo (Glubam) bars. Specifically, the considered spatial truss structure consists of steel elements with a hollow cross-section at the lower chord and glubam beams for upper chord and diagonal bars.

This thesis is organized as follows. First, the main physical and mechanical properties of the glubam and steel used in the prototype structure are introduced. Also, the physical and mechanical properties of laminated wood are also introduced. Next, the behaviour of both types of connection, glubam-steel connection and wood-steel connection, under the action of static loads, was analysed. An experimental program has been designed and used to perform a series of specimen tests on both single-bolted and multiple-bolted connections using laminated bamboo and steel plates. Monotonic tension tests were carried out to characterize the behavior of the connection. The observed failure mode of the specimens was the longitudinal splitting of the bamboo bars due to a delamination process.

The analysis of the experimental results shows that laminated bamboo has characteristics comparable or higher than wood laminated in terms of parallel strength to fibres. The glubam samples tested have a higher tensile strength than wood laminated samples.

Keywords: *laminated bamboo, hybrid truss system structures, Glubam, sustainable construction, bolted connections, bamboo connection.*

Sommario

La continua ricerca messa in atto per fronteggiare l'impatto del carbonio sul nostro ambiente ci porta ad individuare il bambù come uno dei materiali protagonisti classificandolo tra i migliori materiali da costruzione alternativi, soprattutto nelle regioni come la Cina, l'Asia meridionale e il Sud America, dove la sua presenza abbonda. Il Bambù è un materiale naturale, versatile e altamente rinnovabile che potrebbe ricoprire un ruolo importante nell'edilizia sostenibile. Ha proprietà fisiche e meccaniche desiderabili, tra cui un alto rapporto resistenza/peso e una significativa intensità delle tensioni di trazione e di compressione. Tuttavia, queste proprietà dipendono da fattori come il contenuto di umidità, il diametro del culmo e dalla specie di appartenenza della pianta. In opposizione alle sue notevoli qualità vi sono la sua forma cava, la notevole variabilità, l'anisotropia e il suo comportamento fragile a rottura che lo rendono difficile da lavorare. Anche la mancanza di codici strutturali e l'insufficiente progettazione delle connessioni diventano un ostacolo per il suo utilizzo moderno.

Il bambù può essere utilizzato anche sotto forma di materiale ingegnerizzato. Diversi ricercatori ne hanno studiato l'uso sotto forma di materiale laminato partendo dalla creazione di piccoli fogli che vengono incollati tra loro usando e sperimentando tecniche diverse. Utilizzando questo approccio, è possibile realizzare elementi unidimensionali (ad esempio barre) che possono essere adoperati per applicazioni strutturali. Tra le possibili applicazioni, un interessante esempio che emerge da diversi studi è l'utilizzo di barre in glubam (barre di bambù laminate) in combinazione con elementi in acciaio, più tradizionali, per la realizzazione di sistemi reticolari spaziali. Ciò nonostante, sebbene siano state dimostrate le possibilità di realizzare sistemi reticolari ibridi, è stata prestata poca attenzione al comportamento dei collegamenti. L'applicazione di una connessione composita imbullonata

utilizzando piastre in acciaio e bambù lamellare per la realizzazione di una struttura intelaiata spaziale ibrida, richiede un'indagine dettagliata del suo comportamento.

L'obiettivo di questo studio è dunque quello di analizzare il comportamento meccanico delle connessioni bullonate tra piastre di acciaio e barre di bambù laminate (Glubam) al fine di introdurre un sistema reticolare originale ibrido, costituito da elementi in acciaio con una sezione trasversale cava in corrispondenza del corrente inferiore e travi glubam per il corrente superiore e le barre diagonali. Questa tesi è stata organizzata come segue: in primo luogo, vengono introdotte le principali proprietà fisiche/meccaniche del glubam e dell'acciaio utilizzati nella struttura prototipale. Poi vengono introdotte le proprietà fisiche/meccaniche del legno lamellare e successivamente, è stato analizzato il comportamento di entrambi i tipi di connessione, connessione glubam-acciaio e connessione legno-acciaio, sotto l'azione di carichi statici. Un programma sperimentale è stato dunque progettato ed impiegato per eseguire una serie di test sia su connessioni mono bullonate che su connessioni a più bulloni utilizzando tavole di glubam e piastre d'acciaio. Sono state effettuate prove di tensione monotona per caratterizzare il comportamento della connessione. La modalità di rottura osservata dei provini è stata la scissione longitudinale delle barre di bambù a causa di un processo di delaminazione.

L'analisi dei risultati sperimentali mostra che il bambù laminato, in termini di resistenza parallela alle fibre, ha caratteristiche paragonabili o superiori a quelle del legno lamellare. I campioni in glubam testati hanno una resistenza alla trazione più elevata rispetto ai campioni in legno lamellare.

Indice delle Figure

Figura 1 Houtan Park, Shanghai, Cina. Fonte: https://landscapeperformance.org	23
Figura 2 Houtan Park, Shanghai, Cina, Green space reconstructed in bamboo.....	23
Figura 3 Foresta di bambù. Fonte: https://onlymoso.it/	25
Figura 4 Countries participating in the FAO/INBAR bamboo thematic study.....	27
Figura 5 Alcune specie di bambù. Fonte: https://www.guaduabamboo.com	28
Figura 6 a: Rizoma monopodiale. Fonte: http://poliedra.xyz/botanica/ ;	29
Figura 6 b: Bambù invasivo. Fonte: https://www.globeholidays.net/ /	29
Figura 7 : Rizoma simpodiale a), Chiang Mai b).....	30
Figura 8 Struttura del culmo. Fonte: Bambuseae - it.wikipedia.org	31
Figura 9 Phyllostachys Edulis, Bambu Moso. Fonte: https://www.biomassapp.it/blog	42
Figura 10 Relazione tra resistenza a compressione-densità di alcune specie di bambù.....	44
Figura 11 Effetti dell'umidità rispetto alla resistenza.	44
Figura 12 Usi del bambù. Fonte: https://onlymosoharvest.com/usages/	45
Figura 13 Schema sui tempi di maturazione a confronto tra il bambù ed il legno.....	46
Figura 15 Differenze di modulo elastico tra bambù Moso	47
Figura 16 Resistenza ultima a flessione tra bambù Moso,.....	48
Figura 17 Ponte in bambù, Vietnam.	53
Figura 18 Ponte di bambù sul fiume Serayu, Giava, Indonesia.	53
Figura 19 Bamboo bridge, Bogotá, Simón Vélez.	54
Figura 20 Bridge, Bogotá, Colombia. Simon Velez	54
Figura 21 Ibuku, Green Village Bali. Fonte: http://poliedra.xyz/architettura/	55
Figura 22 Biennale di Architettura di Venezia 2018, Vo Trong Nghia.	55
Figura 23 Jörg Stamm, bamboo Bridge, Colombia. Fonte: http://poliedra.xyz/architettura/ 56	
Figura 24 Cross Water Ecolodge,Guangzhou, Cina, Simon Velez. Fonte:	56
Figura 25 Great Bamboo Wall House, Pechino, Kengo Kuma. Fonte:	56
Figura 26 Bamboo Sports Hall per la Panyaden International School del 2017, Thailandia.57	
Figura 27 International Bamboo Architecture Biennale 2016, village of Baoxi	57
Figura 28 Iglesia sin religión - Simón Vélez.	59
Figura 29 ZERI Pavillon, Hanover, Germany, for the 2000 World Expo.	60
Figura 30 Tipologie di strutture portanti.....	63
Figura 31 Padiglione norvegese Expo 2010 Shanghai in legno e Bambù laminato.....	65
Figura 32 Aeroporto di Madrid in Bambù laminato. Fonte: https://phys.org/news/	66

Figura 33 Details of a bamboo culm (28).	67
Figura 34 Aeroporto Internazionale di Mactan-Cebu (Filippine),	68
Figura 35 Torre panoramica in legno lamellare sul Pyramidenkogel, Keutschach –AT.	70
Figura 36 Bamboo composito, processo di lavorazione in Cina (28).	71
Figura 37 Processo di produzione del bambù composito.	73
Figura 38 Campo di applicazione del bambù composito	75
Figura 39 Bambù Laminato , processo di produzione generale in Cina (28).....	76
Figura 40 Processo di produzione del bambù laminato	78
Figura 41 Applicazione ingegneristica delle capriate di glubam (36).....	78
Figura 42 Resistenza a trazione (28).....	81
Figura 43 Resistenza a compressione (28).....	81
Figura 44 Resistenza a Taglio (28).	82
Figura 45 Resistenza flessionale	83
Figura 46 Modulo e resistenza alla flessione in materiali costruttivi differenti (28)	84
Figura 47 Copertura del Bastione di Saint Antoine a Ginevra.....	88
Figura 48 Richard Buckminster Fuller, Padiglione USA, Expo 67, Montreal.....	88
Figura 49 Sistema reticolare in bambù con giunti in PVC. (47)	89
Figura 50 Passerella in bambù per arie rurali (44)	90
Figura 51 Prototipo della struttura reticolare ibrida in acciaio e glubam. (Cina).....	92
Figura 52 Geometria della struttura spaziale reticolare ibrida	93
Figura 53 Piastre di connessione in acciaio: (a) nodo inferiore; (b) nodo superiore.....	94
Figura 54 Modello tridimensionale delle giunt.....	94
Figura 55 Curva sforzo-deformazione dei materiali: acciaio (sinistra) e glubam (destra)....	95
Figura 56 Distribuzione del carico sulla struttura per la prova statica	97
Figura 57 Spostamenti verticali misurati per diversi valori del carico globale (41)	98
Figura 58 Modi di vibrare identificati tramite EFDD (48).....	100
Figura 59 Identificazione dello smorzamento (48).	101
Figura 60 Strisce di bambù e pannelli unidimensionali in bambù	108
Figura 61 Foto delle lastre in glubam scattate in laboratorio prima dei test.	109
Figura 62 Prove meccaniche su un pannello di bambù laminato	110
Figura 63 Geometria bulloni esagonali	113
Figura 64 Illustrazione schematica del setup di prova	119
Figura 65 Vista frontale e laterale dei prototipi delle connessioni testate.....	120
Figura 66 Macchina di prova utilizzata durante i test sperimentali	121

ABSTRACT

Figura 67 Configurazione generale di prova.....	121
Figura 68 Macchina di prova universale elettronica computerizzata.....	121
Figura 69 Estensimetro meccanico utilizzato durante i test.....	123
Figura 70 Configurazione geometrica del provino G_1_8.....	126
Figura 71 Configurazione geometrica del provino G_1_10.....	126
Figura 72 Configurazione geometrica del provino G_2_8.....	127
Figura 73 Configurazione geometrica del provino G_2_10.....	127
Figura 74 normativa cinese GB50005 2017 originale.	129
Figura 75 Spaziature e distanze minime (Istruzioni CNR-DT 206/2006 par. B 7.8.3.1.2). 130	
Figura 76 Corretto posizionamento dell'installazione del provino.....	132
Figura 77 Posizionamento del dispositivo di spostamento elettronico	133
Figura 79 Prove sui prototipi in glubam a sinistra e in legno lamellare a destra	171
Figura 78 Fenomeni di rottura di alcuni campioni sperimentati.	172
Figura 80 Struttura reticolare in glubam e acciaio r (China) (37).....	181

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Elenco e confronto delle specie di bambù strutturali più comuni (6).	26
Tabella 2 Dimensioni delle principali specie di bambù. Fonte: S. Gauss, op.cit.p.57	26
Tabella 3 Confronto delle proprietà dei diversi materiali	36
Tabella 4 Valori di resistenza a compressione.	39
Tabella 5 Valori della resistenza a compressione del <i>Phyllostachys reticulata</i> (15).	39
Tabella 6 Valori delle tensioni ultima a flessione e del modulo elastico (15).	40
Tabella 7 riassuntivo delle principali proprietà meccaniche del bambù Moso, (18).	48
Tabella 8 Confronto delle caratteristiche meccaniche del bambù composito e laminato con il bambù naturale e altri materiali a base di legno. (28)	80
Tabella 9 Confronto tra densità e prestazioni meccaniche del bambù laminato e del legno lamellare (37) .	85
Tabella 10 Confronto delle frequenze naturali e dei rapporti di smorzamento individuati mediante EFDD e SSI e dalla risposta libera di decadimento (tra parentesi è riportato il valore della deviazione standard) (48).	102
Tabella 11 Coefficienti di smorzamento (in percentuale) per passerelle realizzate in acciaio e legno.	102
Tabella 12 Proprietà meccaniche del pannello di bambù incollato	109
Tabella 13 Caratteristiche meccanica della piastra di collegamento.	112
Tabella 14 Caratteristiche geometriche dei bulloni secondo le UNI 5727-68, DIN 601	113
Tabella 15 Classe di resistenza dei bulloni utilizzati e caratteristiche meccaniche.	114
Tabella 16 Dimensioni delle rondelle utilizzate nella seguente sperimentazione	115
Tabella 17 Proprietà meccaniche del legno lamellare	116
Tabella 18 Matrice delle prove per i provini in Glubam	118
Tabella 19 Matrice delle prove per i provini in Legno lamellare	118
Tabella 20 Interasse e distanze minime dai bordi ed estremità, valori minimi per bulloni secondi la normativa cinese.	128
Tabella 21 Interassi e distanze da bordi ed estremità, valori minimi per bulloni (Istruzioni CNR-DT 206/2006 par. B 7.8.5.1.1).	130

INDICE

Abstract.....	4
Sommario.....	6
Indice delle Figure	9
Indice delle Tabelle.....	12
INDICE.....	13

PARTE 1

1. INTRODUZIONE.....	19
1.1. Perché il Bambù.....	21
1.2. Scopi e Obiettivi	24
2. IL BAMBÙ.....	25
2.1. Distribuzione geografica.....	27
2.2. Caratteristiche e Proprietà del bambù.....	29
2.2.1. Caratteristiche morfologiche	29
2.2.2. Caratteristiche anatomiche	32
2.2.3. Caratteristiche fisiche del bambù	32
2.2.4. Caratteristiche meccaniche del bambù.....	35
3. IL BAMBÙ MOSO	42
3.1. Caratteristiche fisiche e meccaniche	43
3.2. Un materiale versatile.....	45
3.3. Bambù vs Legno	47
4. IL BAMBÙ NELLE COSTRUZIONI	51
4.1. L'architettura in bambù tra tradizione e modernità.....	51
4.2. Limitazioni e Standard internazionali	58
4.3. Sistemi strutturali.....	62
5. BAMBÙ INGEGNERIZZATO	66
5.1. Legno Lamellare.....	68
5.2. Bambù Composito	71
5.3. Bambù Laminato o ingegnerizzato.....	76
5.4. Caratteristiche a confronto.....	80

5.4.1. Bambù Composito vs Bambù Laminato.....	80
5.4.2. Confronto con il legno.....	84

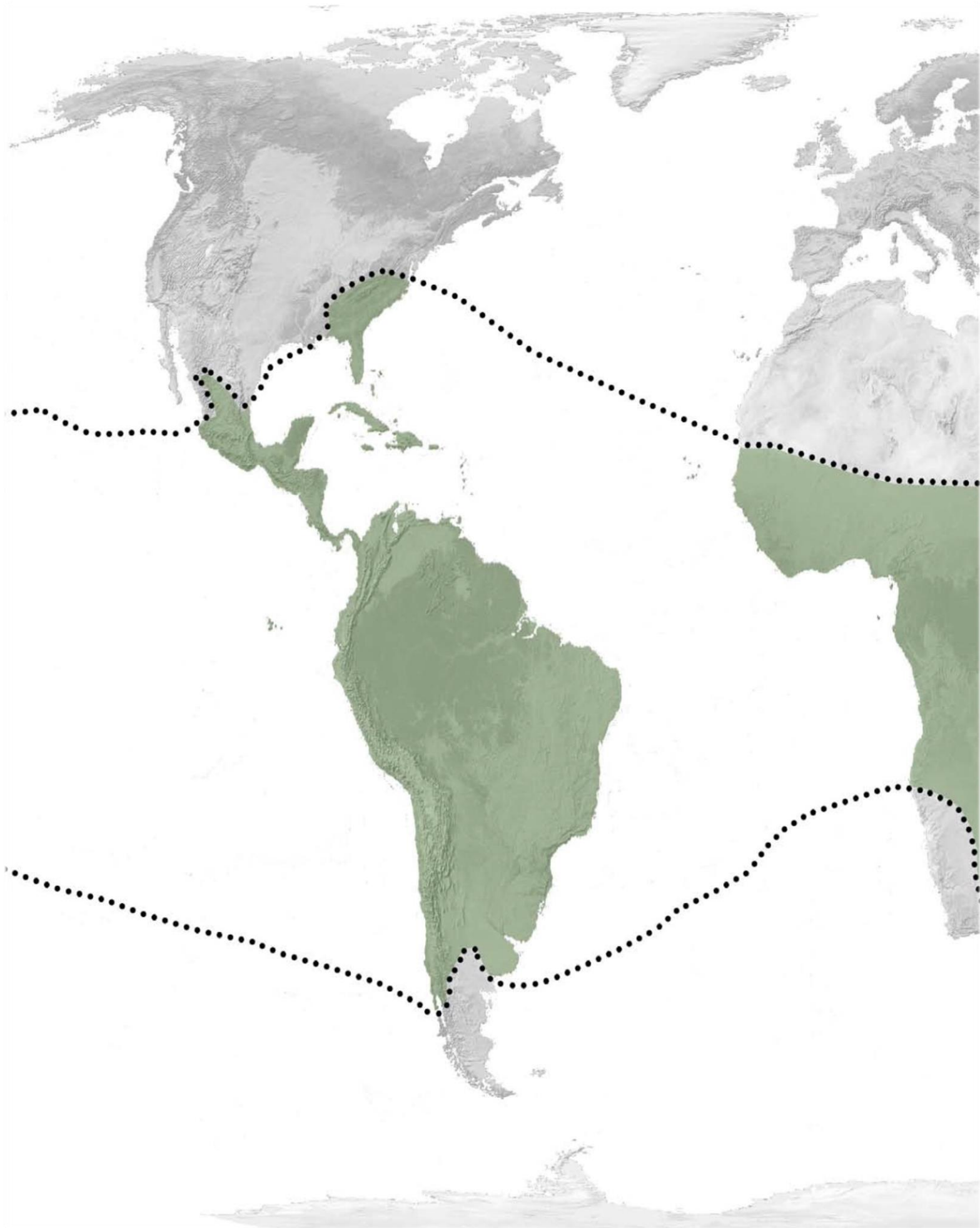
PARTE 2

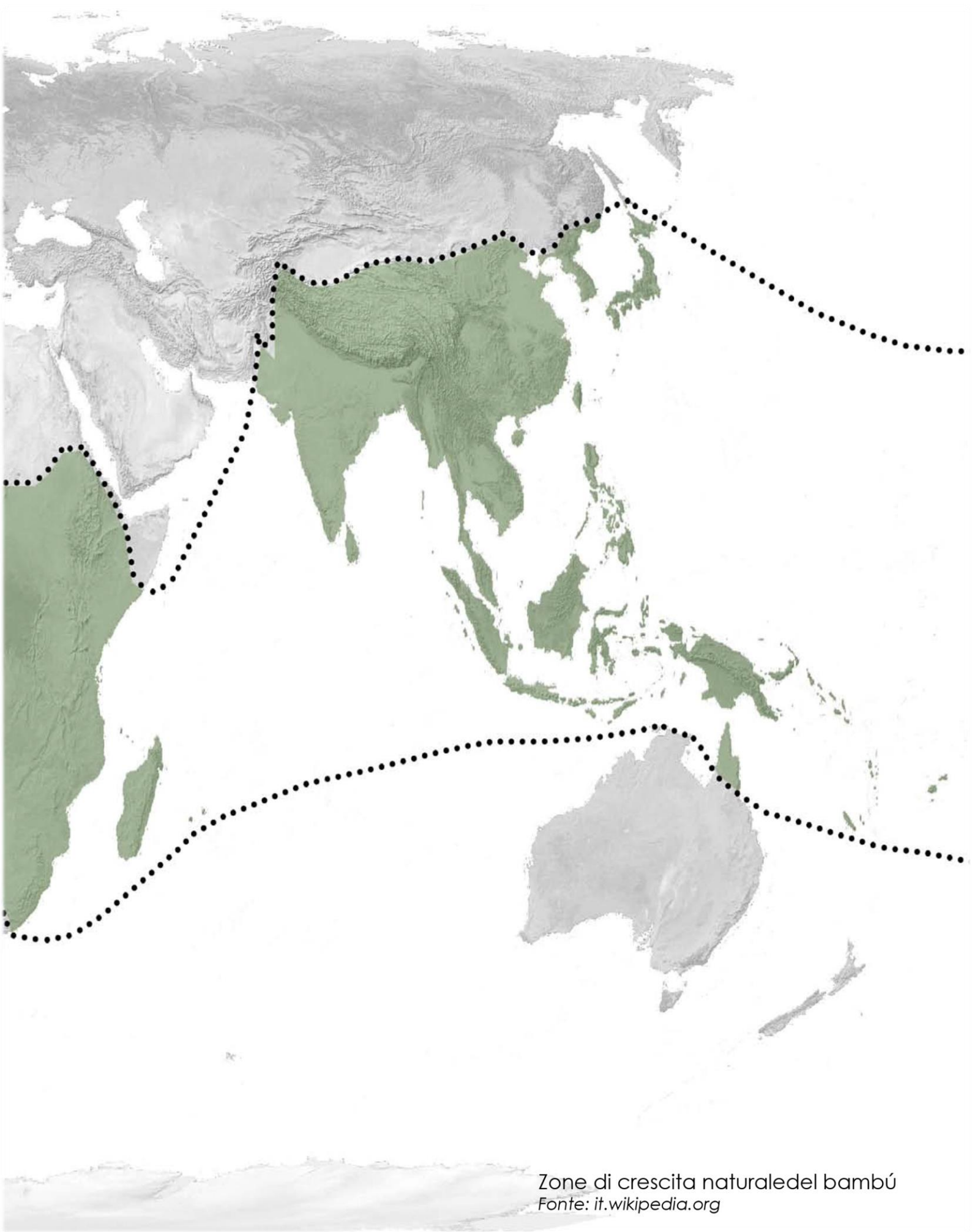
6. SISTEMA ARCHETIPO INNOVATIVO	87
6.1. Strutture spazio-reticolari.....	87
6.1.1. Strutture reticolari in bambù.....	89
6.2. Struttura reticolare ibrida	92
6.2.1. Descrizione della struttura	92
6.2.2. Proprietà meccaniche dei materiali	95
6.2.3. Caratterizzazione del comportamento statico.....	96
6.2.4. Caratterizzazione del comportamento dinamico	99

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DELLE CONNESSIONI

7. Materiali e Metodi di prova.....	106
7.1. Introduzione	106
7.2. Materiali utilizzati.....	107
7.2.1. Glubam	107
7.2.2. Acciaio.....	110
7.2.3. Legno lamellare	115
7.3. Matrice delle prove sperimentali	116
7.4. Setup di prova	118
7.4.1. Attrezzature e dispositivi.....	120
7.4.2. Configurazione dei provini.....	125
7.4.2.1. Riferimenti normativi.....	128
7.5. Modalità di esecuzione della prova.....	132
7.6. Schede di prova.....	136
8. Analisi dei Risultati Sperimentali	152
8.1. Risultati delle prove di trazione sui campioni in glubam	153
8.2. Risultati delle prove di trazione sui campioni in legno	158
8.3. Confronti tra le diverse configurazioni sperimentate	163
8.4. Analisi dei bulloni.....	163

9. Discussione dei risultati sperimentali.....	166
9.1.1. Confronto dei risultati	170
10. Analisi analitica dei risultati.....	173
10.1. Modello di calcolo per sollecitazioni $\perp$ all'asse del connettore	174
10.1.1. Teoria di Johansen	174
11. Considerazioni e sviluppi futuri	180
Opere citate	183
Allegati.....	189
APPENDICE	193





Zone di crescita naturale del bambú
Fonte: it.wikipedia.org

PARTE 1

1. INTRODUZIONE

Lo sviluppo della società moderna necessita di un costante utilizzo di risorse naturali, e le conseguenze a livello ambientale di questo continuo sfruttamento sono sempre più evidenti ed aggravate dal rapido tasso di crescita di molti paesi in via di sviluppo, quali ad esempio Brasile, Cina ed India. In questo scenario, l'edilizia gioca un ruolo decisivo in quanto utilizza in modo estensivo un gran numero di risorse naturali e generalmente impiega materiali che sono difficilmente riciclabili e/o rinnovabili. Il settore delle costruzioni ha dunque una grande voce in capitolo nel discorso legato alla spesa energetica mondiale, sia nella produzione delle materie necessarie alla costruzione, sia durante la vita utile di una costruzione. Pertanto, l'uso razionale delle risorse naturali come materiali da costruzione è fondamentale per migliorare la sostenibilità complessiva della filiera produttiva.

La cultura tipica dell'epoca contemporanea nei cosiddetti paesi sviluppati contiene purtroppo una serie innumerevole di malintesi legati al concetto di benessere dell'individuo. L'immediata percezione di comfort e benessere offerti da un tipo discutibile di progresso ed evoluzione, sono spesso l'immagine di un benessere fittizio che presenta un resoconto pungente in termini di inquinamento ambientale. È necessario dunque porre l'attenzione sui principali metodi costruttivi e tecnologici moderni, che forse a volte hanno sostituito quelli antichi a causa di questioni legate a valutazioni superficiali,

piuttosto che per effettive questioni di qualità. D'altra parte, le competenze e le disponibilità strumentali sono cresciute notevolmente e permettono la ricerca, lo studio e la conoscenza di argomenti che prima erano semplicemente inseriti nel rituale “da tradizione”. Riprendere in mano materiali e tecniche edilizie della tradizione per comprenderli e migliorarli è la fase preliminare e principale alla costruzione di un sistema di analisi e previsione che ne possa consentire l'utilizzo regolamentato. I materiali “tradizionali”, naturali, meno legati a dinamiche industriali e di elaborazione produttiva, non sono meno performanti, ma sono semplicemente meno conosciuti e pertanto non utilizzabili con le dovute garanzie e norme di sicurezza.

Il dibattito ambientale a livello internazionale vede le sue radici nelle riflessioni avviate negli anni Ottanta da importanti gruppi di economisti ed ecologisti, tra i quali si ricordano Herman Daly e Robert Costanza, che con il Simposio “Integrating Ecology and Economic” tenutosi a Stoccolma nel 1984 hanno consolidato i concetti alla base dell'odierna definizione di sostenibilità:

“Lo sviluppo sostenibile persegue contemporaneamente lo sviluppo economico della società, il benessere sociale degli individui e la salvaguardia dell'ambiente, sia attuali che futuri.” (1)

“(...) soddisfa i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri.” (1)

“Il tasso di utilizzazione di qualsiasi risorsa non deve superare il tasso di rigenerazione della risorsa stessa.” (1)

Uno dei primi ad introdurre il concetto sullo sviluppo sostenibile in Italia è stato Enzo Tiezzi, scienziato di fama mondiale e Professore Ordinario di Chimica Fisica presso l'Università di Siena, nonché unico esponente italiano a partecipare al già citato Simposio del 1984, scomparso recentemente nel 2010. *«I sistemi biologici sembrerebbero una manifesta violazione del principio»*

della termodinamica, in quanto *«presentano strutture estremamente ordinate che si evolvono nella direzione di un più elevato ordine, di una minore entropia»* (2) osserva Tiezzi. Lo scienziato ha sempre mostrato la consapevolezza del fatto che il superamento di una logica di sfruttamento dell'ambiente poteva aver luogo soltanto attraverso una nuova interpretazione della natura, che superasse i limiti della visione deterministica veicolata dalla scienza moderna. Tiezzi nella sua principale opera "Tempi storici, tempi biologici" (3) teorizza uno degli aspetti essenziali di questo argomento, affermando che alla base della crisi ambientale odierna vi è il conflitto tra i tempi veloci dello sviluppo della società e i tempi biologici lenti della rigenerazione delle risorse naturali. Per risolvere questo conflitto bisogna ripensare le regole del progresso e della progettazione.

Le figure dell'ingegnere e dell'architetto hanno quindi il compito di prefiggersi come obiettivo da raggiungere l'adempimento dei principi della sostenibilità. L'indagine nell'ambito delle costruzioni deve muoversi in diverse direzioni: sullo studio dei materiali, sulle tecniche di realizzazione degli interventi edilizi, sull'integrazione di tecnologie, sul controllo e sulla gestione delle procedure di valutazione di sostenibilità.

1.1. Perché il Bambù

Nell'elenco dei materiali riconosciuti come sostenibili viene sempre più spesso inserito il bambù, considerabile a buon diritto un materiale edilizio estremamente low-cost, sia da un punto di vista economico che ambientale. Il bambù è un materiale naturale che armonizza ottime prestazioni meccaniche con caratteristiche di grande sostenibilità. Per via della richiesta energetica produttiva e lavorativa praticamente nulla, rappresenta una grande risorsa in termini di sostenibilità economica. Difatti, il suo successo è dovuto in prima

istanza alla grande disponibilità del materiale sia in termini quantitativi che qualitativi poiché è notevole che le foreste di bambù sono molto diffuse e si estendano in un'enorme varietà di climi e situazioni morfologiche, e ancor più eccezionale la rapidità con cui il materiale cresce, matura e subisce processi che gli consentano l'impiego strutturale. La coltivazione e la crescita del bambù richiedono poche cure, manuali e chimiche, ed oltre ad essere un processo facile, può essere considerato anche estremamente veloce, dal momento che si reputano pronte ad impiego edile le piante che hanno raggiunto appena i 3 anni di vita. In secondo luogo, si consideri il processo di post coltivazione, che non necessita di alcun passaggio di derivazione industriale, dal momento che il materiale può essere direttamente impiegato in opera nella stessa forma con cui viene raccolto. Unico tipo di trattamento a cui si sottopone è quello volto ad aumentarne la durabilità, e la stabilità nelle connessioni con altri tipi di materiali, in modo da poter considerare il bambù anche nelle costruzioni di strutture speciali e con una certa impronta dimensionale. Si tratta di dati che hanno estrema importanza soprattutto in relazione al suo "rivale" in termini di sostenibilità, il legno, che piuttosto, perché sia pronto all'impiego, necessita elevate tempistiche di maturazione e processi di lavorazione industriale estremamente più lunghi del bambù, che lo rendono incisivo nei riguardi ambientali, e che pongono l'urgente necessità di soluzione in relazione al disboscamento. La coltivazione del bambù ha tutto il diritto di essere definita una coltivazione benefica. infatti, la sua presenza offre vantaggi ambientali, in termini di assorbimenti di CO₂ e di biomassa. Altre questioni che rendono la coltivazione benefica sono la tenuta del terreno, evitando frane ed erosione, grazie all'apparato radicale estremamente fitto di queste piante. Si indica che queste caratteristiche suggeriscono l'impiego in progetti di riconversione di aree dismesse, come nel caso di Shanghai dove una superficie adibita a discarica e demolizione è stata trasformata in un gigantesco parco di bambù. Oltre alle motivazioni di sostenibilità ambientale, gli vanno

INTRODUZIONE

riconosciute quelle di sostenibilità sociale. L'utilizzo di un sistema costruttivo così essenziale e semplice permette la facilità nella risoluzione di problematiche di emergenza, tenendo conto del bassissimo rapporto tra i tempi richiesti per la costruzione ed il risultato in termini meccanici ed economici.



*Figura 1 Houtan Park, Shanghai, Cina. Fonte: <https://landscapeperformance.org>
a) Before. When the site was largely used as a landfill and lay-down yard for industrial materials;
b) Today. When the green space was constructed.*



*Figura 2 Houtan Park, Shanghai, Cina, Green space reconstructed in bamboo.
Fonte: <http://www.archdaily.com/131747/shanghai-houtan-park-turenscape>*

In tempi recenti è stato “riscoperto” nell’ambiente della ricerca in campo strutturale e rapidamente assume maggiore spessore anche a livello europeo. Probabilmente, il fatto che l’Europa sia esclusa dalla vastissima area di crescita spontanea di questa pianta, ha contribuito significativamente all’adottarsi di un atteggiamento scettico da parte dell’ingegneria, nei confronti di un materiale estraneo alla nostra tradizione.

Questa tesi si propone pertanto l'obiettivo di contribuire alla ricerca sul bambù strutturale, tale che sia reso un elemento proprio della cultura scientifica italiana. Si propone di contribuire alla costruzione di un sistema di conoscenze e regole che gli conferiscano i medesimi diritti dei materiali il cui utilizzo è consentito e disciplinato dalla normativa. Con il fondamento base per cui l'ingegnerizzazione non debba riguardare il materiale, ma la maniera di concepirlo e quindi, di utilizzarlo.

1.2. Scopi e Obiettivi

Lo scopo di questa tesi di laurea è di comprendere la risposta strutturale di un progetto specifico di connessione in bambù sotto carico applicato. Gli obiettivi sono:

- ✓ Rivedere criticamente la letteratura sulle proprietà del bambù e delle connessioni in bambù.
- ✓ Intraprendere una ricerca sperimentale su una connessione ibrida realizzata con travi in glulam e piastre in acciaio sotto l'azione di carichi statici e analizzare i risultati.
- ✓ Trarre conclusioni dalla letteratura e dalle ricerche sperimentali in relazione al comportamento delle connessioni sotto carico.
- ✓ Valutare la fattibilità del progetto di connessione e la sua incorporazione nelle norme edilizie.

2. IL BAMBÙ



Figura 3 Foresta di bambù. Fonte: <https://onlymoso.it/>

Con il termine bambù si indica un grande gruppo di piante sempreverdi che appartengono alla famiglia delle Poaceae (ex Graminaceae) e alla sottofamiglia delle Bambusoideae, originarie delle regioni tropicali e sub tropicali. In natura sono presenti circa cento generi all'interno dei quali si individuano più di mille specie (4); il lavoro di classificazione risulta infatti difficile e variabile tanto da richiedere aggiornamenti costanti (ogni anno). La straordinaria diversità di caratteristiche ambientali in cui può svilupparsi dà vita ad un altrettanto vasta capacità di caratterizzazione di specie, di cui se ne contano circa 1500, con proprietà tanto diverse da renderlo atto a un'estrema poliedricità di impiego. In generale possiamo dividere la

sottofamiglia in due grandi gruppi: i bambù legnosi (Bambuseae), dei quali fanno parte oltre il 90% delle specie, e i bambù erbacei (Olyreae) (5).

Tabella 1 Elenco e confronto delle specie di bambù strutturali più comuni (6).

Scientific name (local name)	Areas found	Diameter (mm)
<i>Guadua angustifolia</i> Kunth	South America	120-160
<i>Dendrocalamus strictus</i> (<i>Calcutta</i>)	Asia	25-80
<i>Bambusa vulgaris</i>	Africa, Asia, South America	80-150
<i>Phyllostachys edulis</i> (<i>Moso</i>)	Asia	120-180
<i>Dendrocalamus asper</i> (<i>Petung</i>)	Asia, South America	80-200
<i>Bambusa blumeana</i> (<i>Spiny/Thorny Bamboo</i>)	Asia, Asia-Pacific	60-150
<i>Gigantochloa apus</i>	Asia	40-100

La grande molteplicità di specie garantisce una variegata disponibilità di dimensioni infatti, la loro altezza può andare da pochi centimetri fino a raggiungere i 40 metri mentre il diametro può arrivare fino 30 centimetri (7).

Tabella 2 Dimensioni delle principali specie di bambù. Diametro (D), dell'altezza (h) e dello spessore della parete del culmo (d). Fonte: S. Gauss, op.cit. p.57

Specie (bambù)	Diametro della canna (cm)							
	H 2 (m)		H 4 (m)		H 6 (m)		H 8 (m)	
	D	d	D	d	D	d	D	d
<i>Bambusa Bamboos</i>	10,8	,5	10,5	1,0	10,2	0,8	9,2	0,7
<i>Gigantochloa opus</i>	6,8	0,9	6,6	0,7	6,0	0,5	-	-
<i>Gigantochloa atter</i>	8,3	1,0	7,6	0,7	6,5	0,5	-	-
<i>Gigantochloa nigrocl'ata</i>	7,0	0,	6,5	0,6	6,0	0,6	5,0	0,5

2.1. Distribuzione geografica

Pur essendo la sua presenza concentrata principalmente nelle regioni dell'Estremo Oriente, si trovano specie spontanee anche in altre zone quali l'Africa, l'America, l'Oceania.

Il bambù è stato classificato dalla Bamboo Forest Botanically come un'erba e non come un albero. Le foreste di bambù nel mondo si estendono dai tropici alle regioni più temperate, Cina, Giappone, Himalaya, Europa E Nord America, con una distribuzione che va dal livello del mare fino a 4000 mt di altitudine. La diffusione più intensa si ha tra i paralleli 46"nord e 47"sud, che comprende le regioni più calde con piogge abbondanti e frequenti, quindi Asia tropicale e subtropicale, America latina e Africa.

In Italia la maggior densità è data dal *phyllostachys*, da non confondere con la comune canna *Arundo donax*, che troviamo in tutta la penisola. Il bambù è un'erba unica grazie alla sua adattabilità, alla sua diversità e alla sua fenomenale crescita. In natura si mostra con molte forme e colori, si possono trovare culmi di colore giallo, nero, a strisce, spinosi o rampicanti (7).



Figura 4 Countries participating in the FAO/INBAR bamboo thematic study



Figura 5 Alcune specie di bambù. Dal basso verso l'alto: Chusquea, Fardesia, Chefalostachyum, Dendrocalamus, Guadua. Fonte: <https://www.guaduaabamboo.com>

2.2. Caratteristiche e Proprietà del bambù

2.2.1. Caratteristiche morfologiche

La pianta di bambù ha una struttura schematizzabile in tre parti: rizoma, culmo e diramazioni. In tutte le specie di bambù è possibile notare una struttura comune composta da:

- 1) Il sistema sotterraneo di rizomi, comunemente detti radici.

Svolgono una funzione di supporto, forniscono i nutrienti alla pianta e permettono l'espansione sul territorio. Il loro sviluppo sotterraneo forma un reticolo che si estende in profondità, anche per parecchi metri, grazie all'apice appuntito e resistente, e risulta compatto e stabile. Le diverse modalità di accrescimento dei rizomi consentono una prima identificazione della pianta:



Figura 6: Rizoma monopodiale a). Fonte: <http://poliedra.xyz/botanica/>; Bambù invasivo b). Fonte: https://www.globeholidays.net/Asia/Japan/Kansai/Kyoto/Sagano_Bamboo_Forest.htm

- Rizoma monopodiale che cresce orizzontalmente con una grande velocità di espansione poiché ogni internodo dà la possibilità di

svilupparsi orizzontalmente con un altro rizoma o verticalmente con un culmo. L'elevata capacità di espansione che caratterizza questo tipo di rizomi fa guadagnare alla pianta l'appellativo di invasiva Figura 6.

- Rizoma simpodiale, corto e tozzo, genera fitti addensamenti di culmi che si sviluppano come un piccolo bosco. Questi rizomi sono poco invasivi *Figura 7*.

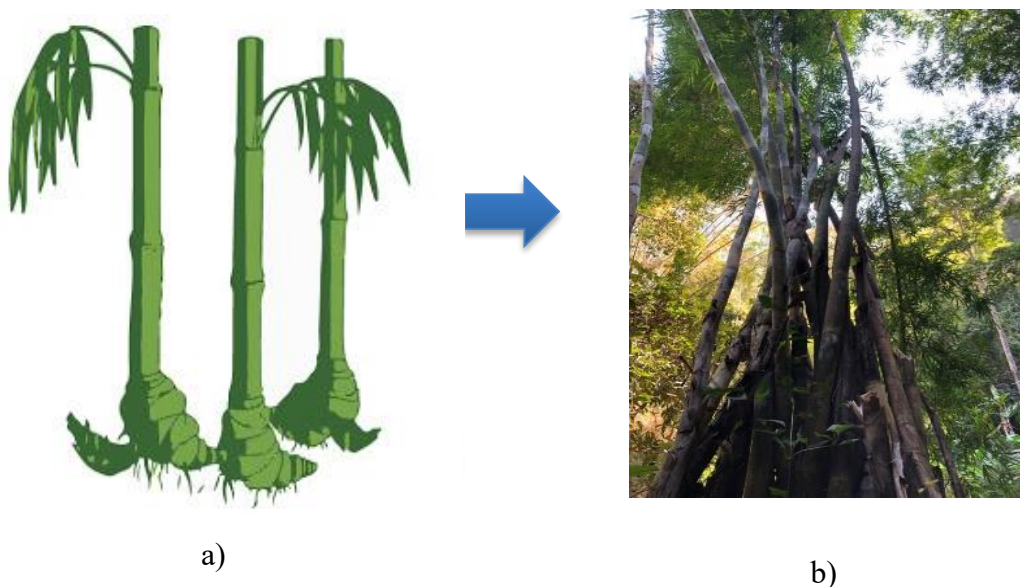


Figura 7 : Rizoma simpodiale a).- Fonte: <http://poliedra.xyz/botanica>. Bambù non invasivo, Chiang Mai b)

2) Il culmo anche detto canna.

Questo elemento rappresenta il nucleo aereo segmentale che spunta dal rizoma, questo termine è usato essenzialmente per le graminacee ed è formato da: collo, nodi e internodi. Il culmo permette l'elevazione della pianta ed è collegato con il rizoma attraverso il collo. È formato da nodi, che sono la parte più resistente e da internodi (diaframmi) cavi nella maggioranza delle specie. Il nodo è il punto di giunzione di due internodi che sono più o meno sporgenti a seconda della specie Figura 8.

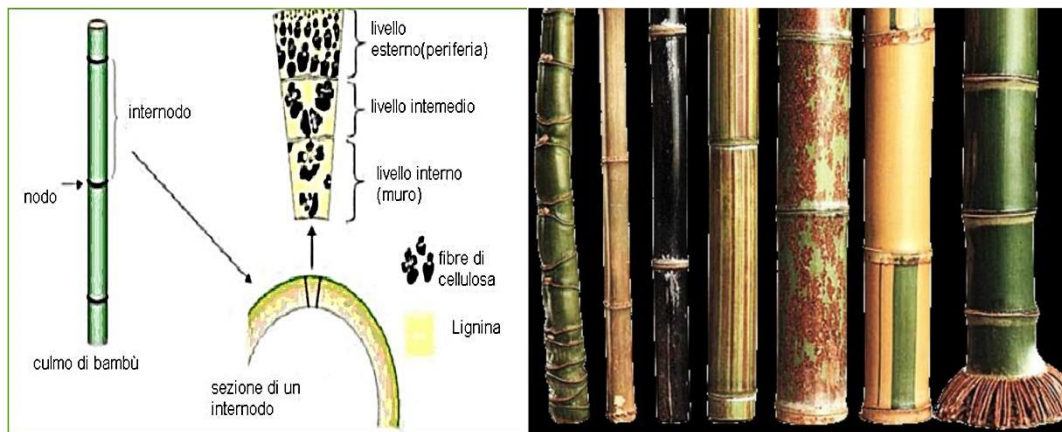


Figura 8 Struttura del culmo. Fonte: [Bambuseae - it.wikipedia.org](http://Bambuseae-it.wikipedia.org)

A differenza degli alberi che si sviluppano in larghezza il culmo si sviluppa in altezza e la sua crescita avviene nelle prime 4-8 settimane a seguito delle quali si assesta sull'altezza che manterrà per il resto della sua vita. Per quanto riguarda il diametro quello caratteristico del culmo maturo è già quello del nuovo germoglio. L'avanzare dell'età del culmo influenzerà alcune delle sue caratteristiche strutturali portando una crescita della densità della parete interna con conseguente inspessimento della stessa.

3) I rami.

Hanno il compito di sostenere il fogliame che svolge l'importante attività di fotosintesi e si occupa dei processi fisiologici che deve sostenere la pianta. Principalmente il loro sviluppo avviene successivamente al raggiungimento dell'altezza massima dei culmi. Il numero di rami è un ulteriore fattore di classificazione delle varie specie.

2.2.2. Caratteristiche anatomiche

La struttura anatomica della pianta di bambù, che determina le sue caratteristiche di resistenza, è costituita da fibre e fasci vascolari.

Le fibre hanno un orientamento preferenziale, lungo la direzione dello sviluppo del culmo, per cui il comportamento della pianta è anisotropo. Mentre, in corrispondenza dei nodi, si inarcano e si sovrappongono tra loro, per questo motivo il bambù è caratterizzato da alti valori di modulo elastico e una maggiore resistenza al taglio. La parte più esterna risulta invece composta da un doppio strato più rigido. Uno interno di spessore maggiore, maggiormente lignificato, ed uno esterno, superficiale, con un ricoprimento polimerico cerato di acidi idrossilici (8).

I tessuti vascolari che compongono le pareti sono rivestiti internamente ed esternamente da una pellicola impermeabile. La pianta del bambù è costituita per il 50-70% da emicellulosa, per il 30% da pentosani e per il 20% da lignina i quali conferiscono al bambù la funzione meccanica di sostegno. La silice (0.5-5%) è concentrata esclusivamente nell'epidermide esterna (lignificata). Questa distribuzione della silice conferisce alla parete esterna una maggiore resistenza rispetto alla parete interna e comporta anche una graduale diminuzione della densità andando dall'esterno all'interno. Per questo motivo il bambù pur essendo resistente è anche leggero.

2.2.3. Caratteristiche fisiche del bambù

Le proprietà fisiche e quindi meccaniche del bambù variano anche significativamente a seconda delle specie e delle condizioni come il clima, l'altitudine, il contenuto di umidità, l'età e il tempo di raccolta. È perciò di

fondamentale importanza determinare lo stato fisico in cui si trova l'elemento inizialmente.

Contenuto di umidità

Una delle caratteristiche fisiche che incidono maggiormente sulle prestazioni del bambù è il *contenuto di umidità (MC, moisture content)*. La natura igroscopica della pianta rende il bambù soggetto a variazioni sensibili di contenuto di umidità nel tempo a seconda delle condizioni di crescita, di raccolta, di stoccaggio e permanenza durante l'utilizzo.

Il contenuto di umidità viene calcolato come:

$$Cu = \frac{Pu - Ps}{Ps}$$

Cu = contenuto d'umidità

Pu = Peso del culmo umido

Ps = Peso del culmo secco

Pu si ottiene dalla pesa del campione che una volta fatto essiccare viene ripeso per ottenere il valore di Ps (9).

L'umidità influisce sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale e sulla sua durabilità. Conoscerne la percentuale permette di selezionare il metodo di conservazione più adatto e di individuare le funzioni per cui è più indicato adoperarlo. È fondamentale perciò garantire costantemente il giusto grado di umidità perché una sua variazione determina una perdita di qualità e prestazioni della pianta. Bisogna fare attenzione, affinché questo non accada, al trasporto, allo stoccaggio ai trattamenti e alla protezione dagli agenti atmosferici. Queste accortezze fanno sì che il comportamento igroscopico del materiale non infici la struttura.

Contenuto d'acqua

Il *contenuto d'acqua* si modifica infatti in relazione alle condizioni atmosferiche ossia umidità relativa e temperatura dell'ambiente in cui nasce e cresce la pianta. La quantità d'acqua è funzione di diversi fattori:

- parte del culmo considerata: gli internodi hanno un contenuto maggiore rispetto i nodi e l'interno è più umido della parte esterna;
- condizioni atmosferiche e stagioni: il contenuto d'umidità raddoppia durante il periodo delle piogge;
- dall'età della pianta: un culmo giovane ha un contenuto costante mentre nel culmo vecchio in punta è inferiore rispetto alla base
- dall'essiccazione: se effettuata all'aria non si registra una grande differenza tra parte alta e bassa del culmo (9).

Risulta essere molto importante la valutazione delle variazioni del contenuto d'acqua dato che da essi dipendono perdite o guadagni in termini di capacità di resistenza: a maggiore contenuto d'acqua è associata una minore capacità resistente e a variazioni di condizioni ambientali sono associate variazioni di comportamento meccanico. Inoltre, il contenuto d'acqua ha forti correlazioni con la velocità di decomposizione del materiale, che diventa più facilmente attaccabile da parassiti e funghi.

Massa volumica

La massa volumica o densità ($massa/volume$) è data dal rapporto della densità del materiale su la densità di un ugual volume di acqua. È variabile e dipende dalla specie, dall'età e anche dalla parte di culmo considerata. Per il bambù è compresa tra valori di 500 e 900 Kg/m mentre il legno possiede una massa volumica compresa tra 300 e 1040 Kg/m³. È possibile correlare la massa

volumica alla resistenza meccanica del materiale considerando che la resistenza ultima a flessione del bambù è 0.14 volte la sua massa volumica. Come il contenuto d'acqua, anche la massa volumica non è costante per tutto il culmo, sugli strati esterni è maggiore del 20-25% rispetto gli strati interni e in alcuni casi è maggiorata del 50%, in conseguenza di ciò anche la resistenza aumenterà progressivamente dall'interno all'esterno. (10)

Densità

La *densità o peso specifico* (ρ) del bambù varia in relazione alla sua composizione, ossia il numero e la struttura dei suoi fasci vascolari. Si ha pertanto un aumento del valore della densità in corrispondenza della zona esterna del culmo ed in corrispondenza della crescita in direzione verticale, dove le fibre ed i fasci diventano più fitti. Il valore medio di densità specifica calcolata per peso del campione seccato/volume del campione verde oscilla tra i 500 ed 800 kg/cm³. La densità del culmo è un valore variabile temporalmente.

2.2.4. Caratteristiche meccaniche del bambù

Le caratteristiche meccaniche del materiale sono strettamente collegate alla sua natura compositiva. La maturazione della capacità resistente si raggiunge con l'invecchiamento della pianta, raggiungendo il picco attorno ai 3-5 anni di vita, parallelamente al processo di formazione ed indurimento dei tessuti cellulari.

Nelle zone in cui si ha una maggiore concentrazione di vasi e fibre, la densità ed il peso specifico crescono, in maniera correlata alle prestazioni del materiale: all'aumentare di queste aumenta la resistenza; la parte superiore di

un culmo avrà prestazioni meccaniche maggiori rispetto alla sua parte inferiore e così la parte esterna della sezione rispetto quella interna.

La microstruttura del bambù, descritta nel paragrafo precedente, è molto particolare: la parte esterna è molto più densa rispetto a quella interna, grazie alla maggior percentuale di silice presente. Questa caratteristica determina la formazione di una “corteccia” particolarmente resistente nella parete esterna della pianta. Inoltre, la densità, che diminuisce gradualmente verso l’interno, fa sì che il materiale sia particolarmente adatto nell’uso delle costruzioni edilizie, dovuto all’elevata resistenza accompagnata da una notevole leggerezza (9).

Il bambù è dunque un materiale dotato di ottime proprietà meccaniche che grazie all’ elevato modulo di elasticità permettono di utilizzarlo anche nella realizzazione di sistemi edilizi con strutture molto complesse. La sua resistenza e leggerezza lo rendono paragonabile alle prestazioni dell’acciaio tanto che è stato definito appunto come “acciaio naturale” (9).

Nella Tabella 3 si nota un ottimo rapporto tra resistenza e peso specifico che rende il bambù un materiale naturale eccezionale. Il valore di R/γ è quello che più si avvicina all’acciaio.

Tabella 3 Confronto delle proprietà dei diversi materiali. Fonte:
<https://www.zerottonove.it/bambu-architettura-ingegneria>.
<http://design.rootiers.it/2010/sites/default/files/materiali%20per%20il%20C.A..pdf>

Materiale	Modulo E [N/mm²]	Resistenza F_{ck} [N/mm²]	Peso specifico γ [daN/m³]	R/γ	E/γ
Calcestruzzo C25/30	31500	25	2400	0,003	10,42
Acciaio	210000	160	7850	0,020	26,75
Legno	11000	7,5	600	0,013	18,33
Bambù	20000	10	600	0,017	33,33

Resistenza a trazione

La resistenza del bambù è dovuta allo spessore della parete che dipende dalla concentrazione di fibre, le quali variano in senso negativo dalla base alla punta. Per questo motivo vengono analizzate tre resistenze caratteristiche del bambù: una sulla base, una a metà altezza e una sulla punta della canna.

Il bambù presenta caratteristiche meccaniche notevoli quando viene sollecitato a trazione. Il suo comportamento è molto simile al comportamento strutturale dell'acciaio, ragion per cui, in edilizia può essere facilmente sostituito all'acciaio. Questa caratteristica rende il bambù adatto per strutture interessate da sforzi flessionali, nell'impiego per ponti sospesi, come armatura nel calcestruzzo e per costruzioni nelle quali le connessioni tra le canne sono realizzate con legature. *“Dalle prove effettuate sulle specie italiane di Phyllostachys Viridiglaucescens (11) si trova una resistenza media a trazione pari a 158 MPa e resistenza massima (minima) a trazione del valore di 172 MPa (145 MPa) per un valore di MC pari al 24,9% ”.* Dalle prove effettuate sul Phyllostachys Viridiglaucescens, si nota che il comportamento del materiale sottoposto alla prova di trazione segue un andamento non perfettamente lineare. La rottura del provino avviene nelle vicinanze del nodo, che caratterizza il comportamento rispetto questo tipo di sollecitazione, opposto rispetto a quella di compressione (12).

Un ulteriore meccanismo di rottura visibile avviene a partire dalla parte interna dello spessore, dove le fibre iniziano il processo di rottura. Le sperimentazioni di Janssen (13) mostrano infatti il rapporto tra il modulo elastico a trazione e lo spessore del culmo, che parallelamente decrescono dall'esterno verso l'interno. Un ulteriore considerazione sul comportamento a

trazione del bambù va fatto in relazione alla massa volumica, per cui si nota un aumento di tipo proporzionale secondo (14):

$$\sigma = 0.307 \rho$$

e per l'età secondo (14):

$$\sigma = 132,76 + 38,29 A - 5.87 A^2$$

dove per A si intendano le classi di età da 1 a 5 per culmi di età compresa da 1 a 10 anni (ogni classe individua un biennio). Il modulo elastico $E_{t,m}$ ottenuto dalle prove di trazione su *Phyllostachys Viridiglaucescens* italiano registra il valore di 22507 MPa (11).

Resistenza a compressione

Il bambù mostra un comportamento differente quando sollecitato a sforzo di compressione poiché, se il carico viene applicato parallelamente alla direzione delle fibre la resistenza è nettamente superiore e la presenza del nodo è trascurabile; nel caso in cui il carico è esercitato in direzione ortogonale allo sviluppo delle fibre è di fondamentale importanza la presenza del nodo.

La *resistenza a compressione* del bambù varia quindi in modo significativo in funzione della direzione dell'applicazione del carico e della localizzazione dell'applicazione del carico relativamente al culmo, che risulta essere maggiormente performante nelle zone dell'internodo. *Dai risultati ottenuti sulle specie di bambù italiane (11), si trova per i campioni di Phyllostachys Viridiglaucescens analizzati, una resistenza a compressione media di 69,27 MPa, massima di 81 MPa e minima di 50 MPa. La rottura del campione avviene a partire dalle estremità e in seguito per propagazione sull'interezza del campione (12).*

Si noti in Tabella 4 la variazione della tensione di rottura a compressione in funzione della geometria, del diametro e dello spessore dei culmi (13):

Tabella 4 Valori di resistenza a compressione [N/mm²] in funzione della geometria del culmo (15).

Diametro	47,8 mm	60,5 mm	70,0 mm
Spessore= 4 mm	-	65,8 N/mm ²	-
Spessore= 5 mm	60,5 N/mm ²	63,5 N/mm ²	53,6 N/mm ²

I valori a compressione della specie di legname più conosciute risultano essere compresi tra i 25 e i 95 N/mm².

Sono disponibili dati della *Phyllostachys reticulata*, riportati nella Tabella 5, che mostrano la relazione tra la tensione di compressione (σ_c) e i diversi strati della parete del culmo, in funzione della massa volumica (ρ) e del contenuto di umidità MC (15).

Tabella 5 Valori della resistenza a compressione del *Phyllostachys reticulata* (15).

Strati della parete	MC	ρ [Kg/m³]			σ_c [N/mm²]		
		min	medio	max	min	medio	max
esterno	10,0-13,5%	837	918	1014	92,9	112,2	130,8
interno	10,0-13,0%	718	775	813	62,9	79,7	95,1
intermedio	10,5-13,6%	629	748	833	52,3	67,2	81,6
Culmo intero	10,4-12,9%	756	866	944	78,2	83,1	96,0

I valori di resistenza ultima a compressione in relazione alle differenti porzioni del culmo dimostrano che esso presenta maggiore resistenza nella parte superiore.

Resistenza a flessione

Lo studio del comportamento a flessione del bambù risulta di notevole importanza nell'analisi del comportamento generale della struttura, in cui elementi strutturali orizzontali e verticali quali travi e pilastri sono genericamente sottoposti a questo tipo di sforzo.

La *resistenza flessionale* della pianta varia a seconda della porzione di culmo considerata e della presenza e posizione dei nodi. Si noti nella Tabella 6 che in corrispondenza del nodo centrale sono presenti valori più alti delle tensioni e del modulo elastico (15).

Tabella 6 Valori delle tensioni ultima a flessione e del modulo elastico in funzione della porzione di culmo analizzato (15).

	σ [N/mm ²]			E [N/mm ²]		
	Inferiore	Medio	Superiore	Inferiore	Medio	Superiore
Nodo entrale	73,0	70,3	71,7	9850	11230	13370
Internodo	73,0	61,3	60,6	11580	12470	14330

I valori derivati dallo studio sui campioni italiani di *Phyllostachys Edulis* (15) riportano il valore di 97,31 MPa per la resistenza a flessione media, con i valori di massima pari a 118,40 MPa e minima 72,10 MPa, in relazione al MU del 47,3%.

Un parametro che influisce sensibilmente sul valore di rottura del materiale è il diametro del culmo, per cui è stata dimostrata (13) una decrescita del valore di resistenza in corrispondenza dell'aumento della geometria del culmo in particolare del diametro e dello spessore dello stesso, ossia risultano meno performanti alla sollecitazione di flessione elementi con un diametro ed uno spessore minori.

Come nei casi precedenti si dimostra (14) la massa volumica del culmo e la sua capacità resistente a flessione siano in relazione tra loro:

$$\sigma = 0,220 \rho$$

$$\sigma_t = 0,206 \rho$$

E per l'età (14):

$$\sigma_r = 89,6 + 22,6 A - 3,18 A^2$$

$$\sigma_t = 83,69 + 33,97 A - 4,98 A^2$$

dove sono distinte la tensione radiale σ_r da quella tangenziale σ_t . La variazione della massa volumica risulta dunque essere ancora una volta proporzionale alla crescita della resistenza ultima a trazione mentre per quanto riguarda le classi di età si evidenzia un netto miglioramento dai 3 ai 6 anni prima e dopo i quali i valori diminuiscono notevolmente (12).

Resistenza a taglio

I valori della *resistenza a taglio* nel bambù sono molto bassi. Durante le prove di flessione la rottura dei culmi non è causata da una mancanza di resistenza a trazione nelle fibre, bensì dalla non coesività delle stesse. La resistenza a taglio aumenta con il diminuire dello spessore delle pareti dalla posizione inferiore a quella superiore lungo il culmo. Le considerazioni da fare circa la resistenza a taglio sono rilevanti ai fini dello studio delle connessioni nella struttura. Il valore della resistenza a taglio risulta estremamente debole rispetto le caratteristiche sopra citate, per cui si stima che la resistenza a taglio equivalga approssimativamente all'8% della resistenza a trazione (15). Inoltre, non esistono prove a taglio su campioni di bambù italiano, si riportano in letteratura valori di resistenza medi attorno ai 12 MPa.

3. *IL BAMBÙ MOSO*



Figura 9 *Phyllostachys Edulis*, Bambu Moso. Fonte: <https://www.biomassapp.it/blog/coltivazione-bambu-gigante-e-un-investimento-conveniente>

Il materiale originale utilizzato per il progetto di questa tesi è il *Bambù Moso*. Il bambù è uno dei materiali da costruzione più antichi del mondo che trova massimo utilizzo nei paesi orientali. Delle oltre mille specie che si estendono per 4,2 milioni di ettari sul territorio cinese circa 3 milioni li ricopre il bambù Moso (16). Il suo nome cinese è “*Mao-Zhu*” mentre quello latino lo identifica come *Phyllostachys Pubescens* o *Edulis*, dove il termine *edulis* indica l'utilizzo dei germogli come alimento.

Il MOSO oltre ad essere la più importante specie di bambù in Cina è conosciuta per la sua caratteristica di accrescimento più veloce al mondo con una crescita massima riscontrata di 119 centimetri in sole 24 ore e 24 metri di altezza in 50 giorni. Il diametro ad 1,30 metri da terra varia dai 6 ai 18 centimetri.

Le ottime caratteristiche fisiche e meccaniche della specie e la sua ampia diffusione sul territorio cinese lo hanno reso una delle specie maggiormente usate già nelle più antiche costruzioni. Questa tipologia di bambù è stata esportata in Europa per la prima volta nel 1880 e negli ultimi anni il sud della Francia e l'Italia sono state indicate come aree adatte ad ospitare piantagioni di questa coltura. Il comportamento strutturale del bambù Moso, poiché si adatta bene anche al clima europeo, desta parecchio interesse.

3.1. Caratteristiche fisiche e meccaniche

Questa particolare varietà di bambù ha una crescita esplosiva, i rizomi, di tipo simpodiale, si espandono sottoterra con un fitto reticolo di radici all'incirca per 5 anni a seguito dei quali si sviluppano i culmi che raggiungono la loro massima altezza entro i due mesi successivi. Possono crescere fino a 25-30 metri ma mediamente arrivano a 15-20 metri. Il diametro della canna è compreso tra 12 e 18 cm. Date le dimensioni dei culmi parliamo di bambù gigante (3). La maturazione ottimale del culmo è stimata tra i 3 e i 5 anni passati i quali inizia un processo di deperimento della pianta che invecchia e perde le sue caratteristiche. Anche se per millenni il bambù è stato utilizzato in quasi tutti i continenti per impieghi strutturali, solo recentemente sono state eseguite ricerche per determinarne le caratteristiche strutturali. Esiste una relazione diretta tra le proprietà meccaniche e la durabilità del materiale. La resistenza a rottura dipende dal peso specifico, dal contenuto di umidità, dallo stato di conservazione e dallo spessore della parete del culmo. Inoltre, alcune proprietà del bambù, quali la densità, il contenuto di umidità, la resistenza meccanica e il modulo elastico, cambiano a seconda dell'età del culmo.

Massa volumica e resistenza a compressione

Il grafico sottostante, in Figura 10, mette in relazione il valore della resistenza a compressione con la densità del materiale. Il valore della densità del P.

Edulis è compreso tra 500 e 700 kg/m³ mentre il valore della resistenza varia dai 30 ai 50 N/mm².

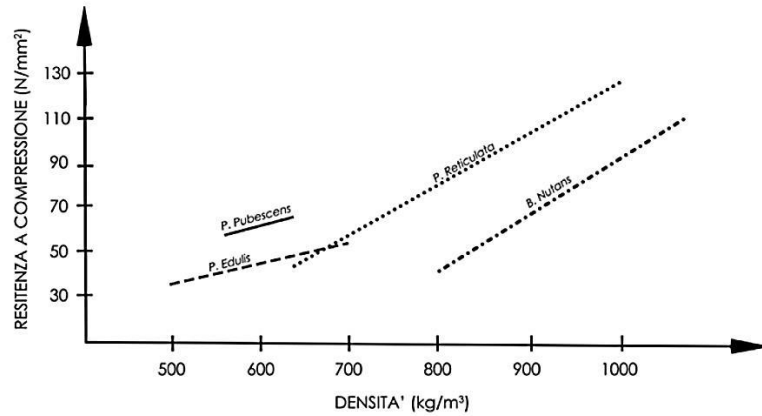


Figura 10 Relazione tra resistenza a compressione-densità di alcune specie di bambù. Fonte : *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*.

Contenuto d'umidità e resistenza ultima

Come si evince dalla Figura 11 il contenuto d'acqua e la resistenza ultima sono inversamente proporzionali. Se l'umidità tende a zero la resistenza del culmo aumenta ma perde elasticità e diventa di difficile lavorabilità.

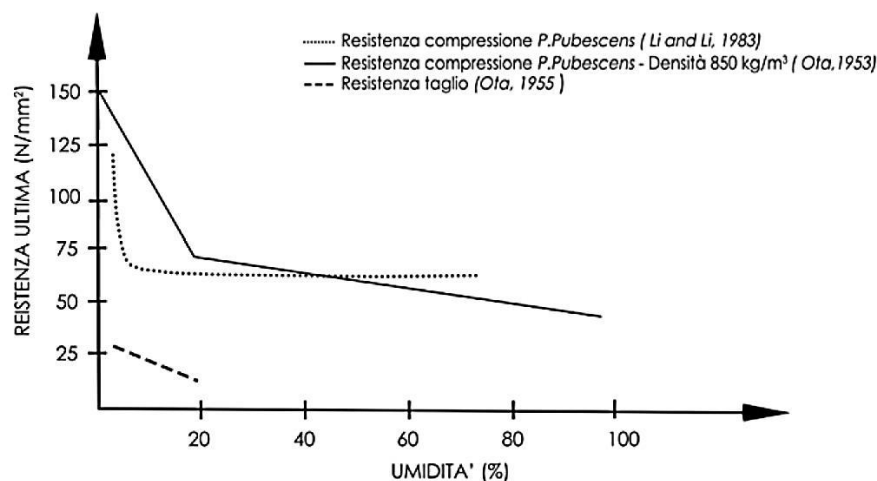


Figura 11 Effetti dell'umidità rispetto alla resistenza. Fonte: *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*

3.2. Un materiale versatile

Il bambù è una pianta estremamente versatile infatti ogni sua parte può essere sfruttata. Numerose sono le sue applicazioni e coprono un'ampia gamma di settori infatti i germogli sono edibili e vengono usati nella cucina orientale; il culmo, avendo un alto potere calorico, è ottimo nelle fasi di avviamento come combustibile per forni o stufe, può essere usato anche per realizzare strumenti musicali, mobili o parquet; i rami ad esempio possono essere adoperati per produrre fibre tessili antibatteriche.

L'aspetto più interessante di questo materiale è la possibilità di usarlo come materiale da costruzione.



Figura 12 Usi del bambù. Fonte: <https://onlymosoharvest.com/usages/>

Grazie alla sua struttura anatomica e alle proprietà fisiche e meccaniche che possiede risponde positivamente alle sollecitazioni esterne.

Riuscire ad impiegare il bambù nell'ambito delle costruzioni risulterebbe vantaggioso in termini di sostenibilità. L'industria delle costruzioni produce un grande quantità di scarti quindi bisogna porre l'attenzione sui materiali

impiegati per limitarli. Il bambù è un materiale ecologico e bio-sostenibile per diversi motivi. In primo luogo, perché non è oggetto di coltivazioni intensive ma cresce in modo autonomo, veloce e costante.



*Figura 13 Schema sintetico sui tempi di maturazione a confronto tra il bambù ed il legno.
Fonte: 14<https://www.almabamboo.com/wp-content/uploads/2016/03/coltivazioni-redditizie.jpg>*

La sua maturazione avviene in 3-6 anni e si stima un aumento della massa di bambù del 10-30% ogni anno dato che il suo ciclo di vita è molto rapido. Per questo motivo la sua reperibilità è elevata ed inoltre, a parità di dimensioni, una coltivazione di bambù assorbe il 40% in più di anidride carbonica ed emette il 35% in più di ossigeno rispetto ad una foresta di legno (17).

Il suo reticolo sotterraneo di rizomi svolge una funzione di stabilizzazione dei pendii e di prevenzione contro l'erosione e il dilavamento del suolo. La sua versatilità limiterebbe la produzione di scarti perché ciò che verrebbe considerato scarto durante i processi di lavorazione di questo materiale per ingegnerizzarlo potrebbe essere impiegato in un altro settore e qualora questo non fosse possibile è un materiale biodegradabile e compostabile quindi facile da smaltire.

3.3. Bambù vs Legno

Riconosciuto il suo valore ecologico e sociale, di seguito vengono illustrati dei grafici per riassumere i valori delle proprietà meccaniche del bambù MOSO messi a confronto con le caratteristiche del legno (18).

Uno studio effettuato da *Van Hall Larenstein* (18) ha preso in considerazione due diversi genere di bambù, il Gadua e il Moso, per compararle con le caratteristiche meccaniche del legno. Al fine di fornire un riferimento, nei grafici vengono confrontati le caratteristiche meccaniche del Moso con due specie di legno estremamente duri, resistenti e duraturi: l'abete rosso di Norvegia e il Meranti rosso scuro. Le proprietà meccaniche del Moso sono state testate secondo lo standard certificato KOMO (19).

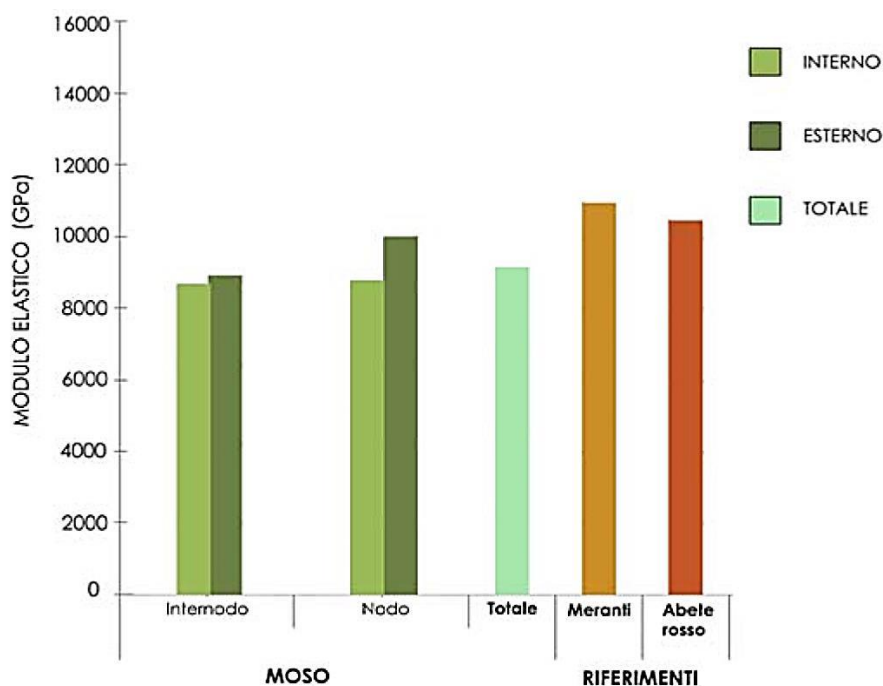


Figura 15 Differenze di modulo elastico tra bambù Moso e alcune essenze di legno.
Fonte: <https://webthesis.biblio.polito.it/11729/1/tesi.pdf>

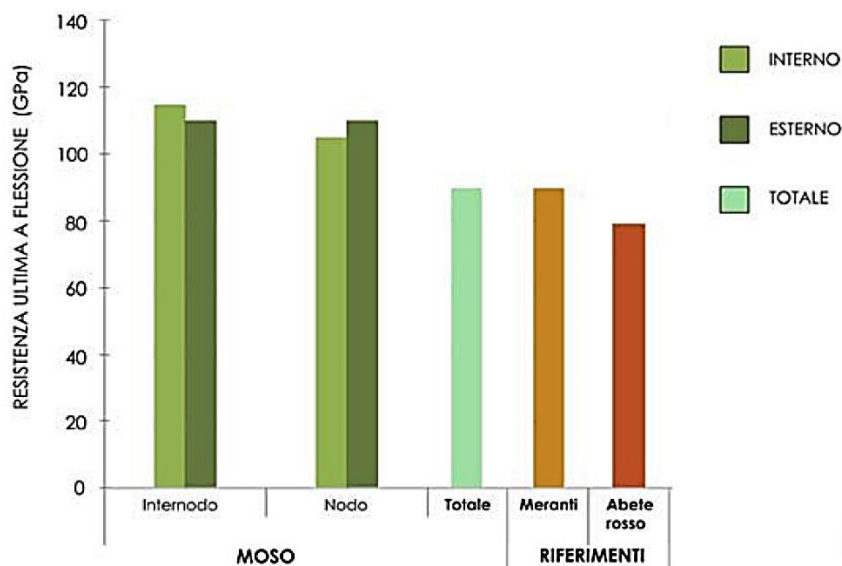


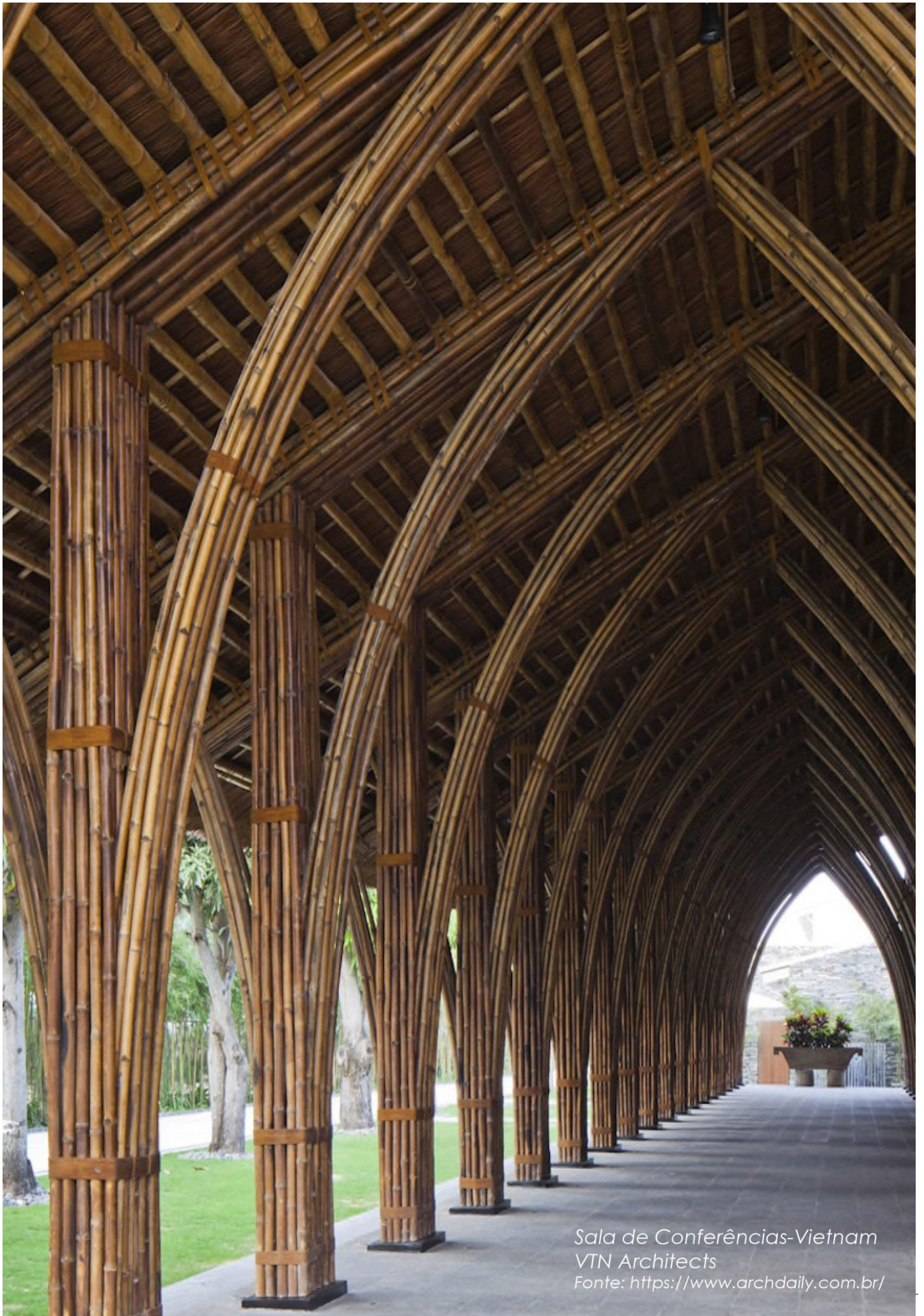
Figura 16 Resistenza ultima a flessione tra bambù Moso, Guadua e alcune essenze di legno.
Fonte: <https://webthesis.biblio.polito.it/11729/1/tesi.pdf>

Comparando questi risultati con le classi di resistenza del legname il Moso appartiene alla classe di resistenza C16 (19). Inoltre, Per quanto riguarda la possibilità di incollare più strati di bambù l'uno sull'altro o con altri materiali, Moso presenta un buon valore di resistenza.

Tabella 7 riassuntivo delle principali proprietà meccaniche del bambù Moso, del legno Meranti e dell'Abete rosso a confronto (18).

	BAMBU'					LEGNO	
	Moso					Meranti	Abete rosso
	Internodo		Nodo		Totale		
	interno	esterno	interno	esterno			
Densità [kg/m ³]	600		620		610	700	460
Janka Hardness [N]	5500	5900	6300	7500	[-]	4250	1700
Modulo Elastico [N/mm ²]	8000	8300	8200	9400	8475	11700	10900
Modulo di rottura [N/mm ²]	118	110	105	110	88	87	79

Possiamo concludere dicendo che *Phyllostachys Edulis* è un genere che dimostra essere un buon concorrente al legno nel mercato delle costruzioni, non solo per quanto riguarda rivestimenti, mobili e accessori ma anche per impieghi strutturali, sia con prodotti allo stato naturale che lavorati o ingegnerizzati, come pannelli incollati e laminati. Ragion per cui si è scelto di utilizzare il bambù Moso laminato, Glubam, per la realizzazione dei prototipi delle connessioni ibride bambà-acciaio analizzate in questo lavoro.



Sala de Conferências-Vietnam
VTN Architects
Fonte: <https://www.archdaily.com.br/>

4. IL BAMBÙ NELLE COSTRUZIONI

4.1. L'architettura in bambù tra tradizione e modernità

Per rendere più intuibile il concetto di versatilità della pianta di bambù, introdotto nel capitolo precedente, di seguito una citazione di “Atal Bihari Vajpayee, ex primo-ministro dell’India” il quale si riferisce al bambù definendo il valore sociale ed economico che esso rappresenta nella vita quotidiana di numerosi abitanti dell’Asia (17):

“La pianta di bambù è l’oro verde dell’uomo povero: una persona può sedersi in una casa di bambù sotto un tetto di bambù, su una sedia ad un tavolo fatti dello stesso bambù, con un cappello di bambù sulla sua testa e sandali di bambù ai piedi. Allo stesso tempo può tenere in una mano una ciotola di bambù, nell’altra bacchetta di bambù che gli servono per mangiare germogli di bambù. Dopo aver consumato il suo pranzo, cucinato in un fuoco alimentato dalla combustione del bambù, il tavolo potrebbe essere pulito con un panno di fibre di bambù, può rinfrescarsi con un ventaglio in bambù, fare la siesta in un letto su di un materasso ed un cuscino fatti tutti di bambù. Al risveglio potrebbe fumare in una pipa di bambù e scrivere con una penna di bambù su carta da bambù, e poi portare in giornale i suoi articoli in cesti di bambù sospesi su di un’asta di bambù, con un ombrello di bambù sulla sua testa. Potrebbe attraversare un ponte sospeso costruito esclusivamente col bambù, bere acqua da una tubatura in bambù, ed asciugarsi il viso con un fazzoletto, ottenuto con le fibre di bambù”.

Le potenzialità del bambù, come materiale naturale per costruzioni suggestive, sono oggi ricercate e studiate da numerosi architetti e costruttori.

Per le sue ottime caratteristiche strutturali, il bambù rappresenta un'ottima soluzione per la costruzione di case, ponti, ponteggi, materiali compositi e laminati. I ponti sono un'ottima dimostrazione della resistenza e della leggerezza del bambù. In Cina, per collegare le sponde dei fiumi venivano realizzati ponti sospesi in bambù utilizzando la parte esterna del culmo, dalla quale ottenevano funi che potevano raggiungere lunghezze superiori a 120 m. Ponti in bambù furono costruiti in India e dal popolo Incas, in Sud America.

Oscar Hidalgo López: *“Cina, India, e Colombia sono i Paesi che hanno sviluppato le migliori tecniche di costruzione con il bambù. Nei primi tre si trovano anche cupole e ponti sospesi. In Colombia, questo materiale è applicato anche per l’alleggerimento di lastre di calcestruzzo di grandi edifici”* (20).

Per l'utilizzo del bambù in ambito architettonico si fa riferimento a due testi fondamentali di cui il primo è il *“Manual de construcción con bambù”* di Oscar Hidalgo López (1930-2014), nel quale si incontrano moltissime illustrazioni sulle tecniche di costruzione con il bambù; il secondo volume di riferimento è il *“IL 31 Bambus/Bamboo”*.

Nel 1989, proprio in Europa, Jörg Stamm, architetto tedesco specializzato in tecnologie delle costruzioni in bambù, progetta in Germania il suo primo ponte pedonale moderno in bambù, ma solo dai primi anni del 2000 iniziarono a comparire opere di architettura rilevanti interamente costruite in bambù.

IL BAMBU' NELLE COSTRUZIONI

L'architettura in bambù tra tradizione e modernità

Soprattutto negli ultimi anni sono diverse le strutture in bambù realizzate dal risultato estetico molto diversificato, testimonianza della flessibilità e stabilità della pianta e della sua rivalutazione, nel campo delle arti creative moderne, come materiale tradizionale e contemporaneo allo stesso tempo.



Figura 17 Ponte in bambù, Vietnam. Fonte: <http://ropesandpoles.blogspot.com/2007/06/5-bamboo-pioneering-projects-from.html>



Figura 18 Ponte di bambù sul fiume Serayu, Giava, Indonesia. Fonte: <https://www.wikiwand.com/it/Ponte>

Stupendi esempi di architettura in bambù sono oggi sviluppati in tutto il mondo, realizzati da differenti studi di architettura ed ingegneria. Di seguito sono riportate le più famose.



Figura 19 Bamboo bridge, Bogotá, Simón Vélez. Fonte: <http://www.simonvelez.net/projects.html>

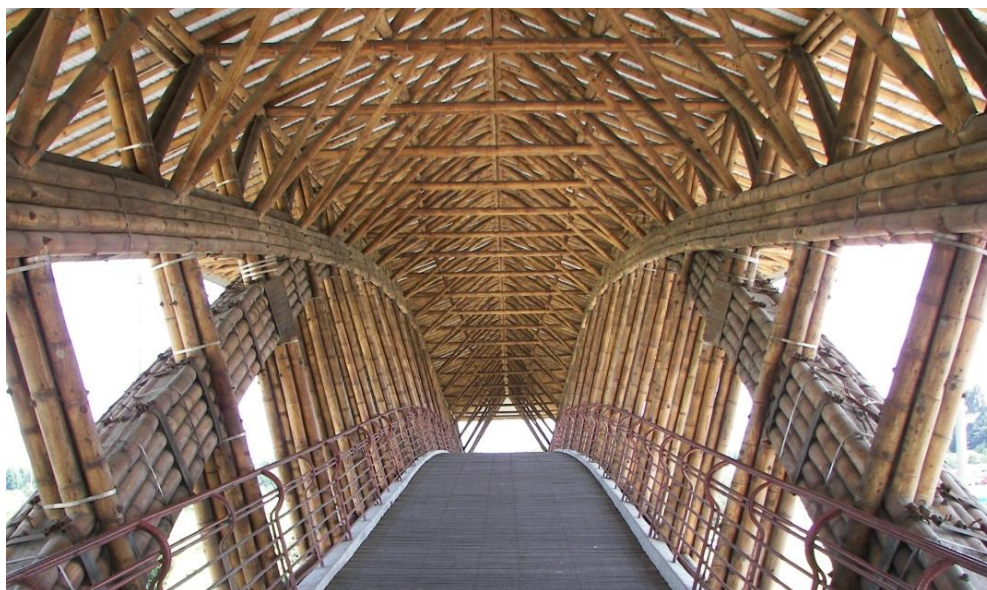


Figura 20 Bridge, Bogotá, Colombia. Simon Velez

IL BAMBU' NELLE COSTRUZIONI

L'architettura in bambù tra tradizione e modernità



Figura 21 Ibuku, Green Village Bali. Fonte: <http://poliedra.xyz/architettura/>



Figura 22 Biennale di Architettura di Venezia 2018, Vo Trong Nghia. Fonte: <https://www.edilsocialnetwork.it/notizie/architettura/itemlist/tag/Simon%20Velez>



Figura 23 Jörg Stamm, bamboo Bridge, Colombia. Fonte: <http://poliedra.xyz/architettura/>



Figura 24 Cross Water Ecolodge, Guangzhou, Cina, Simon Velez. Fonte: <http://www.prefabbricatisulweb>.



Figura 25 Great Bamboo Wall House, Pechino, Kengo Kuma. Fonte: <http://poliedra.xyz/architettura/>

IL BAMBU' NELLE COSTRUZIONI

L'architettura in bambù tra tradizione e modernità



Figura 26 Bamboo Sports Hall per la Panyaden International School del 2017, Thailandia. Fonte: <https://www.albertani.com/case-in-legno-lamellare/tag/bambu/>



Figura 27 International Bamboo Architecture Biennale 2016, village of Baoxi in Cina, Li Xiaodong. Fonte: <https://www.elledecor.com/it/architettura/a22082873/architettura-in-bambu/>

4.2. Limitazioni e Standard internazionali

L'alto valore del rapporto resistenza/peso della pianta di bambù dà la possibilità alle strutture realizzate utilizzando questo materiale, di resistere in modo efficiente alle azioni indotte dal sisma. A parità di carico sopportato, un peso più sostenuto consente alla struttura di essere meno sollecitata dalle accelerazioni sismiche, avendo una massa minore. Tuttavia, bisogna considerare il fatto che nella progettazione antisismica il comportamento del bambù, essendo un materiale fragile, può essere valutato soltanto in campo elastico (21). Risulta dunque di fondamentale importanza tener presente che la relazione tra le tre caratteristiche principali del bambù ovvero leggerezza, flessibilità e resistenza meccanica, non sono sufficienti a garantire la risposta ottimale all'evento sismico ed è pertanto estremamente importante un'accurata progettazione ed un'accurata ricerca nel settore. Non sono ancora ben definite normative e codici sull'uso strutturale del bambù se non prassi di buon senso, su evitare sistemi orizzontali pesanti e fondazioni fragili.

Il punto estremamente critico della progettazione antisismica consiste senz'altro nei giunti, che saranno argomento principale delle indagini condotte in questo documento.

L'opera dell'architetto colombiano Simón Vélez illustrata nella Figura 28 Figura 28 Iglesia sin religión - Simón Vélez. dimostra il potenziale dell'utilizzo del bambù nella sua forma originale. Come accade per il legno, il bambù può essere utilizzato in molteplici applicazioni nell'ambito dell'edilizia sostenibile, ma perché ciò avvenga, sono diverse le sfide che devono essere superate.



Figura 28 Iglesia sin religión - Simón Vèlez.

Fonte: <https://simonvelezanarchitecturalmonograph.wordpress.com/>

In primis, Minke (22) ha identificato gli svantaggi del bambù focalizzandosi sulla scarsa durata, sulla significativa variabilità, sulla agli attacchi di insetti e funghi e sulla limitata conoscenza del comportamento delle connessioni. Van der Lugt, van den Dobbelsteen e Janssen (23) hanno analizzato diverse strutture europee in bambù, tra cui lo ZERI-Pavillon di Hannover Figura 29 e hanno mostrato le tre sfide principali da superare quando si costruisce con il bambù: la forma del materiale, la variabilità del materiale e l'inadeguata guida delle norme edilizie. I problemi relativi alla forma e alla variabilità sono inerenti al carattere naturale del bambù e non possono essere risolti completamente. Tuttavia, possono essere attenuati studiando e catalogando i culmi di bambù in modo simile alla classificazione del legno. In questo modo, lo sviluppo di norme edilizie più approfondite e la standardizzazione del materiale garantirebbe il controllo della qualità, promuoverebbe l'innovazione tecnologica e stimolerebbe l'interesse per l'uso del materiale nelle costruzioni (23) (24) .

Nonostante ciò, le differenze tra i culmi cavi del bambù e il legno sono abbastanza grandi da richiedere una nuova serie di standard e di norme edilizie proprie del bambù. Difatti nel 2004 sono stati pubblicati tre standard

internazionali, ISO 22156, ISO 22157-1 e ISO 22157-2 per l'ingegneria del bambù. Questi standard internazionali hanno utilizzato l'approccio di progettazione dello stato limite per fornire un punto di riferimento, offrendo tuttavia delle informazioni strutturali poco approfondite.



*Figura 29 ZERI Pavillon, Hanover, Germany, for the 2000 World Expo.
Fonte: <https://architizer.com/projects/zeri-pavilion-expo-hannover/>*

In particolare, la normativa ISO/DIS 22156 a partire dalle tensioni ultime del materiale, riporta le tensioni ammissibili per culmi di bambù e specifica la possibilità di considerare adeguato o meno un giunto dal punto di vista sismico per imitazione se ha dimostrato in condizioni simili di resistere a catastrofi (15). La ISO/DIS 22156 *Bamboo structural design*, la ISO/DIS 22157 *Determination of physical and mechanical properties of bamboo* e la ISO/TC 165/WG 9 *Laboratory manual on testing methods for determination of*

physical and mechanical properties of bamboo definiscono dunque i requisiti di resistenza e durabilità della struttura, individuando i test da effettuare, determinando regole che mettono in correlazione le caratteristiche meccaniche con fattori fisici come il contenuto di umidità, la posizione lungo il culmo, la presenza di nodi e internodi ecc.

Sono state inoltre sviluppate diverse norme nazionali e codici edilizi, tra cui il più dettagliato risulta essere il capitolo G-12 delle norme colombiane, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente* (NSR-10) (25).

4.3. Sistemi strutturali

Il sistema strutturale rappresenta la struttura portante di un manufatto (sia questo di civile abitazioni, ponti e viadotti, edifici industriali, ecc.), ovvero l'organismo a cui è relegata la funzione di assorbimento e trasferimento in "sicurezza" al terreno di fondazione delle azioni esterne di cui il manufatto è soggetto durante tutta la sua vita di esercizio.

Tipologie Strutturali

La struttura può essere costituita da singoli elementi strutturali quali pilastri e travi, o dall'assemblaggio di tali elementi (membrature) collegati tra loro da relazioni (vincoli interni o esterni) che ne definiscono il grado di appartenenza (sottosistemi o gruppi omogenei) e la loro gerarchia (elementi principali, secondari etc.).

Fanno parte delle strutture complesse i sistemi intelaiati che formano l'ossatura di un edificio, gli impalcati dei ponti, le travature reticolari, ecc. I telai costituiscono sicuramente, per ragioni storiche e di importanza pratica, la struttura per eccellenza.

Materiali costituenti

In particolare, i materiali da costruzione per le strutture portanti sono classificabili in base alla tecnologia costruttiva utilizzata, tradizionale o moderna.

Tra i materiali per uso strutturale la Normativa Tecnica per le costruzioni 2008 individua quelli in muratura portante [Figura 30 a)], in acciaio [Figura 30 b)], in legno lamellare [Figura 30 c)], in calcestruzzo armato in opera o

prefabbricato [Figura 30 d)] e strutture miste (dall'impiego contemporaneo di due o più materiali)



a)



b)



c)



d)

*Figura 30 Tipologie di strutture portanti: a) Il Castel dell'Ovo, Napoli; b) Aeroporto di Lione Saint-Exupéry, Rodano; c) Aeroporto Internazionale di Mactan-Cebu (Filippine); d) struttura prefabbricata, Bari.
Fonti: <https://slideplayer.it/slide/12984286/> <http://www.ilnuovocantiere.it>*

Caratteristiche generali

Le strutture portanti devono fornire alla costruzione complessiva adeguati livelli di resistenza, efficienza, durabilità e robustezza.

Un efficiente comportamento strutturale, con specifico riferimento alle strutture reticolari, è conseguenza di una concezione della costruzione basata su:

- Semplicità strutturale;
- Leggerezza;
- Uniformità e simmetria;

- Iperstaticità;
- Resistenza e rigidezza flessionali della costruzione nel suo complesso;
- resistenza e rigidezza torsionale della costruzione;

Le costruzioni moderne sono generalmente realizzate prestando particolare attenzione all'uso di materiali e tecnologie costruttive che favoriscano la sostenibilità edilizia assicurando, contemporaneamente, un adeguato comportamento sismo-resistente alla struttura.

Ecco dunque la scelta di analizzare il comportamento strutturale di un sistema reticolare spaziale ibrido in acciaio e bambù, per la realizzazione di strutture portanti leggere e resistenti.

Sono già note le caratteristiche favorevoli delle strutture portanti miste in acciaio e legno lamellare quali ad esempio, la resistenza meccanica, la duttilità, la fragilità, la durabilità proprie dell'acciaio strutturale e l'elevato rapporto resistenza/peso, stabilità strutturale, rigidezza nel piano e ridotto impatto ambientale dei materiali a base di legno i quali influenzano pesantemente lo specifico settore di impiego ideale.

Il bambù lamellare rappresenta un nuovo materiale ingegnerizzato con caratteristiche meccaniche simili o addirittura migliori al legno lamellare, quale ad esempio l'elevata resistenza agli urti. Lo scopo di questo è lavoro è proprio quello di mostrare come il bambù rappresenta una soluzione strutturale efficiente, sostenibile e resistente in alternativa al legno lamellare.

Prima di introdurre l'innovativa struttura spazio-reticolare in bambù e acciaio è bene specificare le proprietà dei due materiali contendenti: Legno lamellare e Bambù Laminato.

II BAMBU' NELLE COSTRUZIONI

Sistemi strutturali

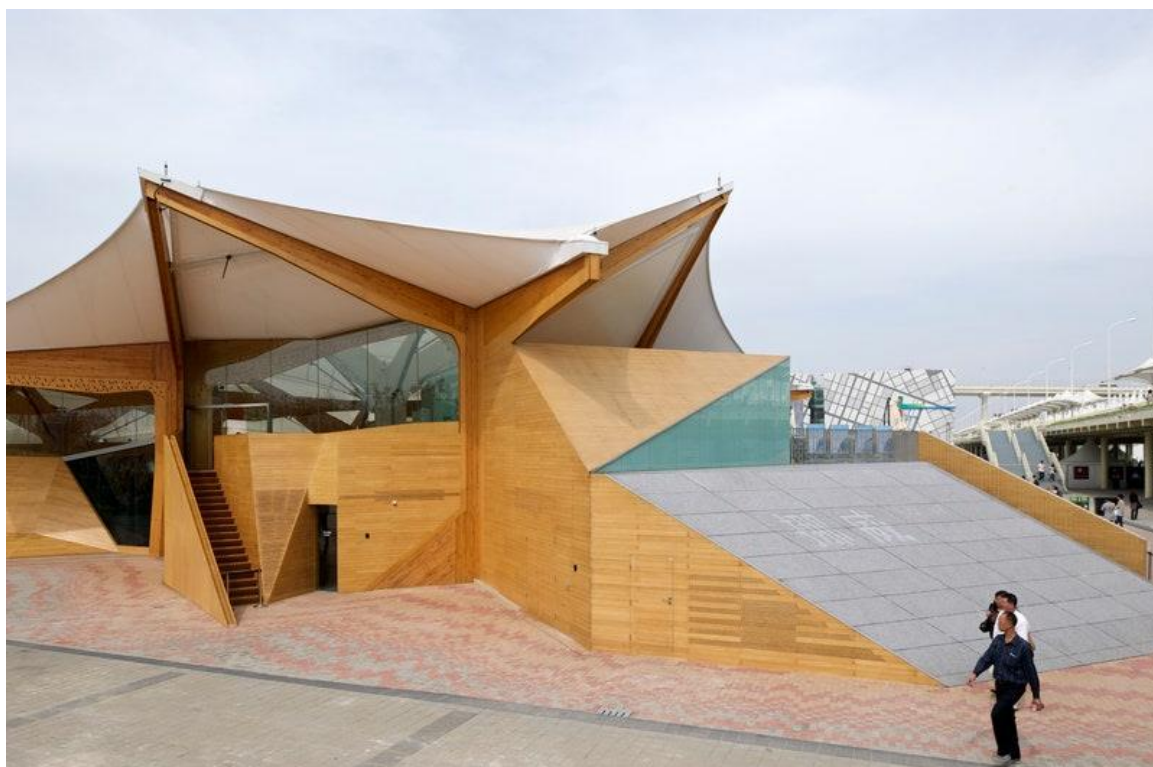


Figura 31 Padiglione norvegese Expo 2010 Shanghai in legno e Bambù laminato. Fonte:
https://www.archdaily.com/57891/norway-pavilion-for-shanghai-world-expo-2010/2361-expo-interior-forest-small?next_project=no

5. *BAMBU' INGEGNERIZZATO*



Figura 32 Aeroporto di Madrid in Bambù laminato. Fonte: <https://phys.org/news/2019-11-visualizing-bamboo-energy-efficient-fire-safe.html>

Bambù è stato ampiamente utilizzato dai paesi asiatici come materiale tradizionale per l'edilizia abitativa, mobili e articoli per la vita quotidiana grazie alle sue elevate proprietà in termini di resistenza e robustezza superficiale, flessibilità e stabilità (26). L'uso strutturale del bambù ed i materiali ingegnerizzati a base di bambù, attraggono sempre più attenzione a causa delle preoccupazioni globali che riguardano lo sviluppo sostenibile. Bambù è un materiale tipo legno in rapida crescita, che ha dimostrato di possedere proprietà fisiche e meccaniche uguali o migliori rispetto ad altri in commercio. Ha guadagnato un crescente interesse negli ultimi anni come un materiale alternativo al legno o materiali a base di legno, e può essere utilizzato come materia principale per la realizzazione dei prodotti prefabbricati a base di legno (27). Il più grande vantaggio di bambù è senza dubbio la sua impareggiabile velocità di maturazione. Oltre ad essere un buon

convertitore di carbonio, il bambù ha anche delle radici molto ampie e robuste, eccellente per il controllo dell'erosione e conservazione della falda.

Limitazioni ingegneristiche del bambù

Mentre il potenziale del bambù è molto promettente, nei mercati occidentali il suo sviluppo è ostacolato dalla mancanza di dati ingegneristici relativi alle proprietà meccaniche e codici di costruzione appropriati. I principali problemi dell'uso tradizionale dei culmi originali del bambù come materiale strutturale includono:

- ✓ Capacità portante inaffidabile a causa della sezione cava;
- ✓ Mancanza di uniformità delle caratteristiche in direzione longitudinale dovute alla sezione;
- ✓ Difficoltà nella progettazione e realizzazione di connessioni affidabili;

Il bambù è un materiale anisotropo, con proprietà meccaniche che variano nelle direzioni longitudinali, radiali e trasversali (28). La materia prima è un'erba gigantesca costituita da un culmo cavo con fibre longitudinali allineate all'interno di una matrice lignina [Figura 33](#).

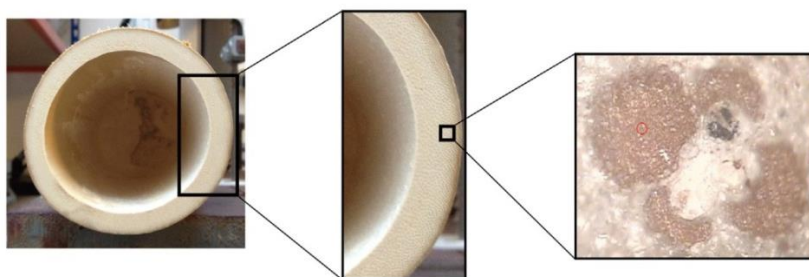


Figura 33 Dettagli sul culmo del bambù (28).

Per far fronte a queste limitazioni è stato possibile realizzare un tipo di bambù ingegnerizzato capace di presentare caratteristiche strutturali molto simili o addirittura migliori rispetto al legno lamellare.

5.1. Legno Lamellare



*Figura 34 Aeroporto Internazionale di Mactan-Cebu (Filippine), interamente realizzato in legno lamellare.
Fonte <https://www.rubner.com/>*

Il legno lamellare è un materiale strutturale molto resistente. Il legno lamellare, realizzato con materie prime quali il legno e la colla, si differenzia dal legno tradizionale non tanto per le proprietà meccaniche in senso stretto, quanto per la sua potenzialità nella realizzazione di sistemi strutturali moderni. La potenzialità del suo utilizzo lo classifica come materiale con caratteristiche molto innovative per quanto riguarda l'edilizia.

Come è noto, l'impiego del legno massiccio tradizionale nell'edilizia comporta aspetti positivi quali:

- ✓ Estetica ed affidabilità.
- ✓ Facilità di impiego e montaggio;
- ✓ Lavorabilità;
- ✓ Economicità in relazione al trasporto, ai mezzi di sollevamento per il montaggio e all'incidenza sui costi per le opere di fondazione;

- ✓ Elevato rapporto tra resistenza meccanica e peso;
- ✓ Buon comportamento in caso di incendio

Allo stesso tempo, è opportuno considerare alcuni aspetti negativi quali ad esempio:

- ✓ Incertezza nella determinazione delle condizioni del materiale (nodi, zone fessurate)
- ✓ Minore affidabilità
- ✓ Incertezza della sua variabilità nel tempo.

Il legno lamellare riduce dunque i difetti propri del legno massiccio con il controllo di nodi e zone fessurate, facendo delle prove di resistenza su provini tratti da elementi prefabbricati. Pertanto, il legno lamellare risulta essere un materiale composito, costituito principalmente di legno naturale, di cui mantiene i pregi e ne esalta le caratteristiche come materiale per le costruzioni ma è anche un prodotto nuovo, realizzato su scala industriale, che attraverso un procedimento tecnologico di incollaggio a pressione permette di realizzare elementi di qualsiasi sezione o lunghezza trovando la sua massima espressione per edifici come palazzetti dello sport, coperture, etc. Le strutture in legno lamellare, pur essendo realizzate con un materiale combustibile, possono avere una resistenza al fuoco pari o superiore a quella di strutture in calcestruzzo armato o in acciaio. Difatti, nel legno lamellare, lo strato superficiale carbonizzato crea un buon isolamento termico, grazie al quale il processo di combustione avviene molto lentamente: ad un aumento molto lento della temperatura corrisponde una variazione pressoché trascurabile della resistenza meccanica delle fibre legnose della sezione interna non carbonizzata e la struttura cede solo quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente diminuita da non riuscire più a compiere il suo ruolo di funzione portante. La resistenza al fuoco di un elemento strutturale in legno lamellare

dipende dalla velocità di carbonizzazione che è possibile calcolare sperimentalmente o analiticamente per diverse specie legnose (29).

La “Pyramidenkogel”, una struttura elicoidale in legno lamellare, potrebbe essere considerata a tutti gli effetti l’architettura panoramica in legno più alta al mondo, costruita è firmata dal gruppo altoatesino Rubner, leader nella costruzione degli edifici a struttura portate in legno.



*Figura 35 Torre panoramica in legno lamellare sul Pyramidenkogel, Keutschach –AT.
Fonte: <https://www.rubner.com/>*

5.2. Bambù Composito

Il bambù Composito (*"Bamboo scrimber"*), indicato anche come bambù a fibre parallele o intrecciate, consiste in fasci di fibre sature di resina schiacciati e compressi in un blocco denso Figura 36. Il processo è vantaggioso, in quanto utilizza approssimativamente l'80% del culmo grezzo originale (30), e produce un elemento strutturale in forma rettangolare con caratteristiche eccezionali quali, buona venatura, durezza e colore simile a quello del legno.

In particolare, il prodotto composito di bambù presenta una durezza Janka¹ che rientra nei parametri suggeriti per applicazioni esterne come pavimentazione dei ponti. Il processo mantiene la direzione longitudinale delle fibre di bambù e utilizza la matrice di resina per collegare i fasci di fibre.



Figura 36 Bamboo composito, processo di lavorazione in China (28).

L'aspetto innovativo del bambù composito sta soprattutto nell'utilizzo di fibra di bambù in sostituzione al legno. Sono le caratteristiche di resistenza, duttilità, flessibilità e adattabilità del prodotto ingegnerizzato di bambù a non far rimpiangere il legno da nessun punto di vista, e a consentire la produzione di un materiale composito eccellente riducendo drasticamente la deforestazione.

¹ Il **test di durezza di Janka** (da Gabriel Janka, 1864-1932) misura la resistenza all'ammaccatura e all'usura di un tipo di legno. La misura consiste nel determinare la forza necessaria a far sì che una sfera di acciaio del diametro di 11,28 millimetri penetri per metà del suo volume all'interno del legno sotto esame. Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Durezza_di_Janka

5.2.1 Evoluzione

Già nel 1987, l'elevata resistenza del bambù composito era stata testata con successo nei laboratori della Nanjing Forestry Università. Successivamente, agli inizi degli anni '90, una tecnologia di ammorbidimento delle fibre è stata utilizzata nell'università di Nanchino ed è stato prodotto il materiale composito di bambù senza rimuovere la pelle esterna del culmo di bambù. Solo alla fine degli anni '90 la produzione industriale del bambù ingegnerizzato è stata avviata grazie alle imprese *Anji* nella provincia dello Zhejiang, i quali hanno innovato e prodotto il materiale composito di bambù utilizzando la pressatura a freddo. Tuttavia, rispetto ai pannelli a base di legno, i livelli della tecnologia di produzione e dell'automazione dei pannelli di bambù composito industrializzati non era alti.

Solitamente lo strato esterno e lo strato interno del bambù venivano rimossi attraverso il processo di piallatura o di scissione, utilizzando in questo modo solo circa il 50-60% della materia di bambù. Dopo più di 10 anni di studi ed indagini, l'Istituto di ricerca dell'industria del legno Chinese Academy of Forestry ha sviluppato una nuova generazione di bambù composito (chiamato anche fibra a base di bambù composito) utilizzando come materia prima piante di bambù aventi un culmo dal diametro piccolo (31) (32). Sono così estratti lunghi fasci di fibre di bambù direttamente dal culmo della pianta attraverso in nuovo processo meccanico che permette la lavorazione del bambù composito senza rimuovere lo strato esterno ed interno del culmo di bambù.

Questa tecnologia è adatta sia per la lavorazione delle piante di bambù caratterizzate da un diametro grande, quali ad esempio il bambù Moso, ma anche per il bambù che presenta un diametro relativamente piccolo. Per cui il rapporto di impiego del bambù è aumentato ad oltre il 90%, il che riduce notevolmente il costo di produzione del bambù composito.

5.2.1. Processo di produzione

Con il continuo progresso della tecnologia, alcuni passaggi del processo di lavorazione del bambù composito originario, che rendevano la produzione dispendiosa sia dal punto di vista economico che ambientale, sono stati rimossi. I principali processi meccanici adoperati per la lavorazione del bambù composito sono dunque: troncatura e scissione delle fibre, essiccazione, immersione, assemblaggio, pressatura a freddo e indurimento a caldo o pressatura a caldo vedi [Figura 37](#).

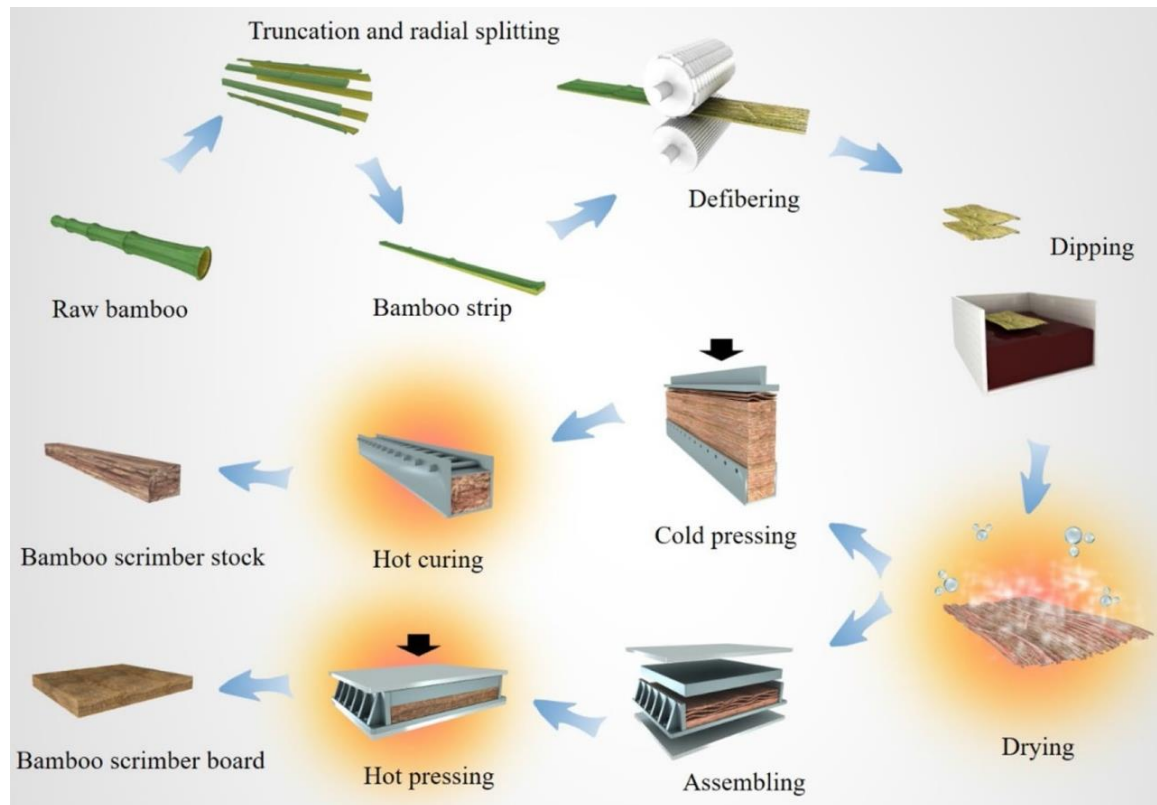


Figura 37 Processo di produzione del bambù composito. Fonte: <https://link.springer.com/article>

I fasci di bambù impregnati di resina vengono prima asciugati e successivamente stampati e modellati ad una pressione di 70–80 MPa. Il processo di pressatura a freddo viene utilizzato principalmente per la produzione del composto di bambù a bordi quadrati con uno spessore di 15-18 cm (33). Per quanto riguarda la pressatura a caldo, viene utilizzata la

tradizionale tecnologia di trasferimento di calore tramite contatto per produrre la lastra con una pressione di 4-6 MPa, molto al di sotto di quella utilizzata per la pressatura a freddo.

Ognuna delle due tecnologie presenta vantaggi e svantaggi. La pressatura a freddo e l'indurimento termico hanno un'efficienza di produzione relativamente elevata e un basso consumo di energia. Tuttavia, a causa della necessità di una pressione elevata, i fasci di bambù vengono frantumati facilmente dai macchinari, con conseguenti proprietà meccaniche inferiori. Inoltre, la densità del bambù composito con la tecnologia di pressatura a freddo potrebbe raggiungere 1,2 g/cm³. A una densità così elevata, esiste la possibilità che la resina non rimanga sulla superficie dei fasci di bambù, il che porta a connessioni troppo sollecitate riducendo ulteriormente la forza di adesione.

Sebbene il metodo di pressatura a caldo abbia compensato in qualche modo la carenza del processo di pressatura a freddo, presenta dei problemi. Da un lato, la lastra necessita di pavimentazione artificiale, che comporta una deviazione massima della densità superiore al 20%. D'altra parte, la tecnologia di pressatura a caldo richiede un grande consumo di acqua ed energia.

5.2.2. Caratteristiche prestazionali

Il bambù composito oltre a mostrare la naturale colorazione e tessitura esterna del legno, ne utilizza anche le tecnologie e attrezzature di lavorazione.

Il bambù composito è caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche e un'eccellente stabilità dimensionale. Il tasso di rigonfiamento dello spessore dopo 24 ore di assorbimento d'acqua è dello 0,4%, molto inferiore alla norma europea EN13329 (che è circa del 20%) (34). L'emissione di formaldeide libera del bambù composito è inferiore a 0,4 mg/L, raggiungendo il requisito di ASTM E1333 (35).



Figura 38 Campo di applicazione del bambù composito: a) infissi di porte e finestre; b) meriale per finiture interne; c) materiali per esterni; d) nelle turbine eoliche. Fonte: Fonte: <https://link.springer.com/article>

Nello studio condotto dal gruppo di ricerca di Sharma B. et al. (28) sono stati utilizzati prodotti di produzione commerciale provenienti dalla Cina. Il prodotto del composito di bambù è composto da *Phyllostachys pubescens* (Moso) con una resina fenolo formaldeide. Il prodotto finale è una sezione di 140 x 140 mm disponibile in diverse lunghezze. Come mostrato in Figura 36 e discusso nella sezione precedente, il processo di produzione del bambù composito utilizza il culmo di bambù originale trattandolo il meno possibile. Il prodotto commerciale risultante viene testato come prodotto finale senza ulteriori modifiche. La densità media del prodotto di bambù composito è di 1160 kg/m³ con un contenuto di umidità del 7%. In confronto, come anticipato nel paragrafo 3, la materia prima del Moso prima ha una densità relativa di circa 0,5-1,0.

5.3. Bambù Laminato o ingegnerizzato

Il legname non è il solo materiale rinnovabile al mondo e architetti e ingegneri hanno iniziato a cercare altrove possibili sostituzioni ai materiali moderni quali acciaio e cemento. Il bambù ingegnerizzato o laminato è un materiale altamente sostenibile e di grande impatto strutturale, e rappresenta un'ottima soluzione ingegneristica ecosostenibile. Di seguito, viene mostrato il processo produttivo del bambù laminato, quali sono le sue qualità primarie e come si confronta con il legno.

Al contrario, il bambù Lamellare (*"Laminated Bamboo"*) mantiene sia le fibre longitudinali che una porzione della matrice del culmo originale.

Il culmo di bambù viene spaccato, piallato, lavorato (processo di sbiancamento o caramellato), laminato e pressato per formare travi lamellari Figura 39.

L'orientamento della striscia all'interno della trave di bambù, e quindi la direzione della densità della fibra radiale, viene inserito in modo casuale Figura 39, velocizzandone così, i tempi di produzione rispetto a quelli dei legni lamellari classici.

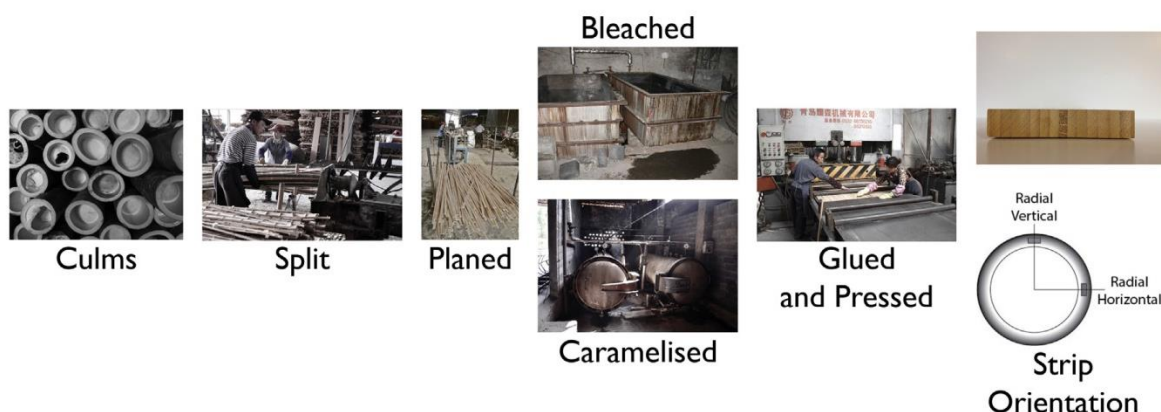


Figura 39 Bambù Laminato, processo di produzione generale in China (28).

I prodotti finali utilizzano solo il 30% circa di materia prima a causa di grandi perdite di materiale quando le strisce vengono progettate per formare la sezione rettangolare (30) . Il prodotto in fogli laminati viene utilizzato principalmente al chiuso per applicazioni di superficie o mobilio, il prodotto in lamellare ha anche utilizzi strutturali esterni.

Di seguito viene illustrato il processo di lavorazione del bambù lamellare eseguito dal gruppo di ricerca di Sharma B. et al. (28).

5.3.1. Processo di produzione

Anche le lastre di bambù laminato, come per il bambù composito, sono prodotte da strisce di bambù Moso utilizzando una resina come mostrato in Figura 39.

I campioni strutturali sono stati progettati utilizzando un foglio di bambù commerciale di dimensioni 2440 x 1220 x 19 mm. Il foglio è stato tagliato e la sezione è stata laminata nelle dimensioni desiderate utilizzando l'adesivo poliuretanico (Purbond HB S309) (28). L'adesivo è stato applicato manualmente con una proporzione di colla di circa 180 g/m² e la lamina pressata con morsetti manuali per applicare la pressione richiesta di 0,6 MPa per 4 ore Figura 40. Sono stati testati due orientamenti: orizzontale radiale e verticale radiale, che si riferiscono all'orientamento della striscia originale all'interno del fascio, come mostrato in Figura 39. Tuttavia, questa terminologia non è ben definita per le sezioni del fascio. Pertanto, i due orientamenti sono qui descritti come orizzontale radiale e verticale radiale e sono mostrati in Figura 40.

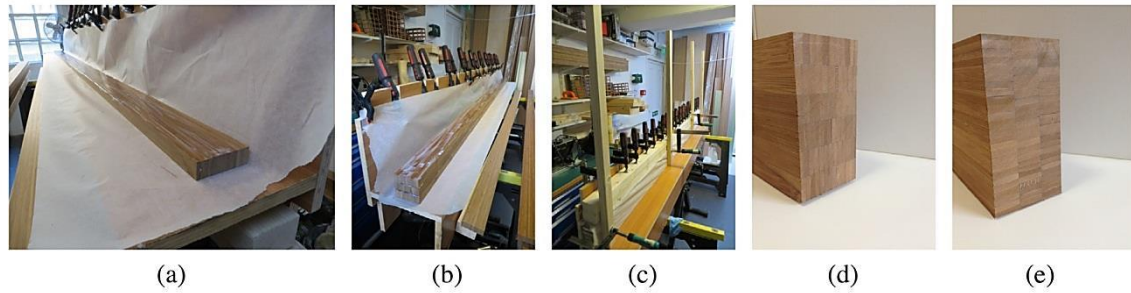


Figura 40 Processo di produzione del bambù laminato: (a) lastra singola; (b) applicazione della colla; (c) campione immobilizzato; (d) orientamento orizzontale radiale delle fibre; (e) orientamento verticale. (28)

5.3.2. Caratteristiche prestazionali

Il bambù laminato utilizzato dal gruppo di ricerca di Sharma B. et al, presenta una densità media di 686 kg/m³ con un contenuto di umidità del 6%. Tutti i campioni sono condizionati in una costante temperatura di 23 °C e un'umidità relativa del 55% per 2 settimane prima di test (28).

Il gruppo di ricerca guidato da Y. Xiao et al. (36) ha condotto un'indagine sull'utilizzo del bambù laminato per la progettazione di capriate e per la costruzione di ponti e case in bambù.

L'immagine in Figura 41 mostra due esempi di applicazione di capriate in bambù utilizzate per la realizzazione di rifugi di soccorso in caso di catastrofe e case residenziali progettate e costruite dal gruppo di ricerca (36).



Figura 41 Applicazione ingegneristica delle capriate di bambù: a sinistra una casa mobile in bambù nel Sichuan dopo il terremoto di Wenchuan del 12 maggio 2008, a destra una villa in bambù all'università di Hunan (36).

Il materiale di base utilizzato per la realizzazione della struttura consta di lastre di bambù laminato, o glubam, di dimensioni 2440 x 1220 x 30 mm. Il processo di laminazione prevede dunque la pressatura a caldo di strisce di bambù di circa 20 mm di larghezza e circa 2 mm. Le proprietà meccaniche sono abbastanza simili a materiali tipici del legno lamellare. Tuttavia, la densità di glubam utilizzato da Y. Xiao et al. (36) è di 880 kg/m³, relativamente più pesante dei tipici materiali in legno.

5.4. Caratteristiche a confronto

5.4.1. Bambù Composito vs Bambù Laminato

Sia il bambù composito che quello laminato sono attualmente impiegati nella realizzazione di molteplici elementi, e mantengono la resistenza intrinseca del bambù lasciando invariato l'orientamento delle fibre longitudinali. Il prodotto ingegnerizzato fornisce inoltre, una sezione uniforme affinché siano possibili connessioni e giunti nelle applicazioni strutturali. Il confronto dei risultati ottenuti dalla sperimentazione sul bambù composito e sul bambù laminato sopra sviluppate, sono riassunti in Tabella 8.

Tabella 8 Confronto delle caratteristiche meccaniche del bambù composito e laminato con il bambù naturale e altri materiali a base di legno. (28)

		Density	Compression		Tension		Shear	Flexural		$\frac{E_b}{\rho}$
		ρ kg/m ³	$f_{c\parallel}$ MPa	$f_{c\perp}$ MPa	$f_{t\parallel}$ MPa	$f_{t\perp}$ MPa	$\tau_{\parallel}$ MPa	f_b MPa	E_b GPa	$10^6 (m^2 s^{-2})$
Laminated bamboo ^a	$\bar{x}$	686	77	22	90	2	16	77-83	11-13	16-19
	COV	0.05	0.05	0.07	0.26	0.13	0.05	0.06-0.08	0.05-0.06	
Bamboo scrimber ^a	$\bar{x}$	1163	86	37	120	3	15	119	13	11
	COV	0.02	0.02	0.05	0.14	0.13	0.11	0.08	0.04	
Raw Bamboo <i>Phyllostachys pubescens</i> ^{b,c}	$\bar{x}$	666	53	-	153	-	16	135	9	14
Sitka spruce ^{d,e}	$\bar{x}$	383	36	-	59	-	9	67	8	21
Douglas-fir LVL ^{f,g}	$\bar{x}$	520	57	-	49	-	11	68	13	25

Caratteristiche a confronto

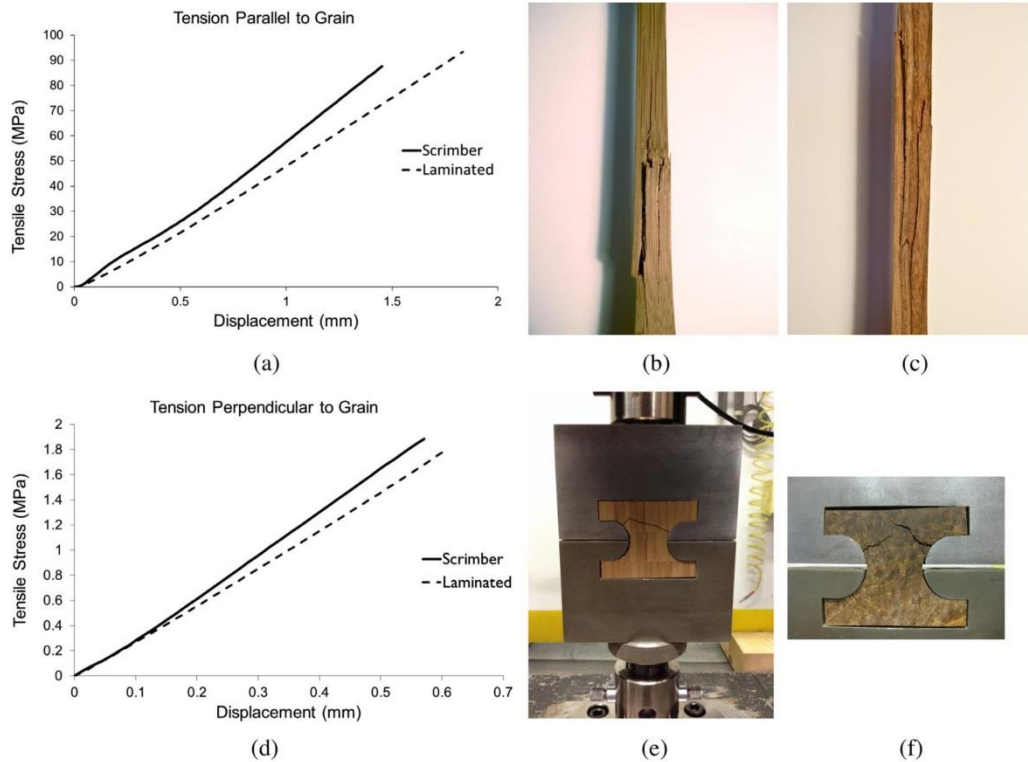


Figura 42 Resistenza a trazione: (a) Risultati della trazione in direzione parallela alle fibre; (b) rottura del campione in bambù Lamellare; (c) rottura del campione in bambù composito. (d) Risultati della trazione perpendicolare alle fibre; (e) bambù Lamellare; (f) bambù composito. (28)

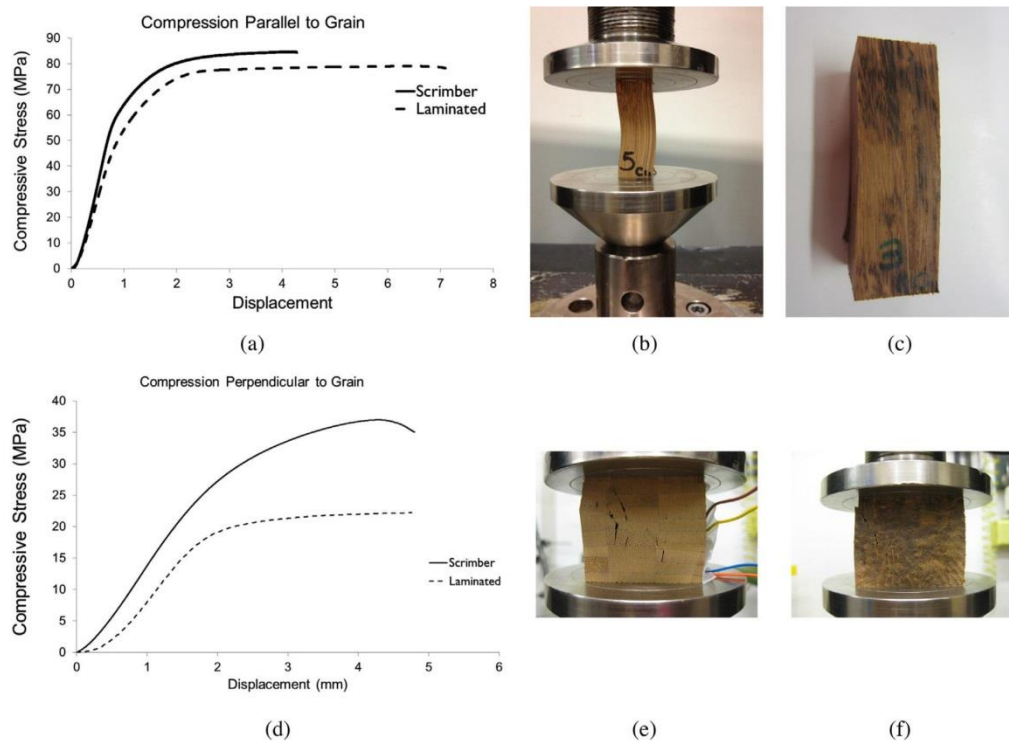


Figura 43 Resistenza a compressione: (a) Risultati Compressione parallela alle fibre; (b) rottura dei campioni bambù Lamellare; (c) bambù composito. (d) Compressione perpendicolare alle fibre; (e) bambù Lamellare; (f) bambù composito (28)

La Figura 42 mostra un confronto tra le rotture rappresentative sia per i test a *trazione* parallela alle fibre che per quelli a trazione perpendicolare alle fibre del materiale (f_{tk}), sia il bambù composito che il bambù Lamellare hanno mostrato un comportamento lineare prima della rottura. La resistenza alla trazione parallela era più di quaranta volte la forza perpendicolare.

Analizzando il comportamento di entrambi i materiali sotto *sforzi di compressione* (f_{ck}) Figura 43 si nota che entrambi hanno mostrato un andamento delle curve bilineare. La modalità di rottura per entrambi i materiali è stata la frattura della matrice e delle fibre di bambù.

Per il bambù composito, il materiale ha mostrato una leggera influenza rispetto alla direzione della linea di incollaggio, registrando un aumento del 5% dello sforzo parallelo alla linea di colla. In confronto, il bambù Lamellare non ha mostrato alcuna dipendenza dalla direzione della linea di colla (Tabella 8).

Il comportamento della *resistenza a taglio* (s_k) in direzione parallela alle fibre sembrerebbe abbastanza simile, tuttavia, il bambù laminato è in grado di sopportare carichi e spostamenti maggiori prima della rottura Figura 44. Il valore della resistenza al taglio media del bambù laminato rispetto a quella del bambù composito risulta essere leggermente più elevato: 16 MPa rispetto a 15 MPa vedi Tabella 8.

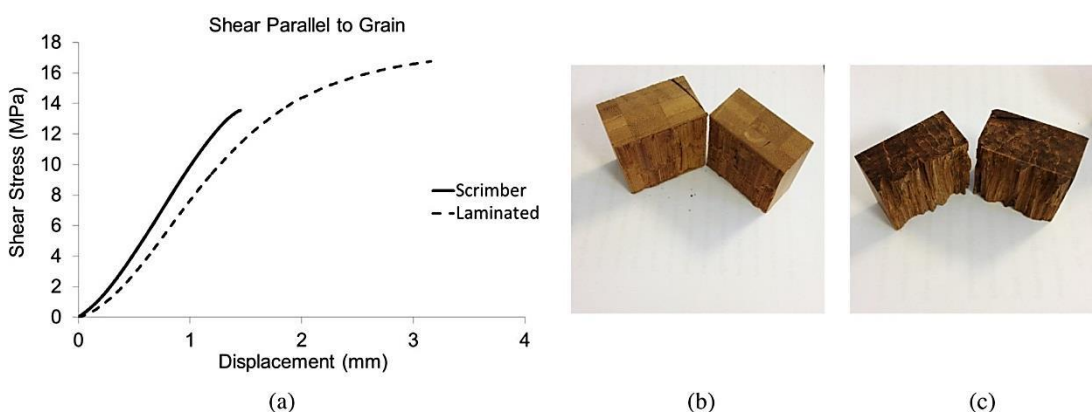


Figura 44 Resistenza a Taglio: (a)Taglio Parallelo alle fibre; (b)bambù laminato; (c)bambù composito (28).

Per quanto riguarda il comportamento flessionale dei due diversi prodotti di bambù, i risultati hanno mostrato che prima della rottura i due campioni hanno raggiunto un notevole spostamento.

Dalla è possibile notare che in entrambi i casi la rottura del provino si verifica nella mezzeria della campata, tuttavia nel bambù laminato questa è influenzata dal taglio longitudinale.

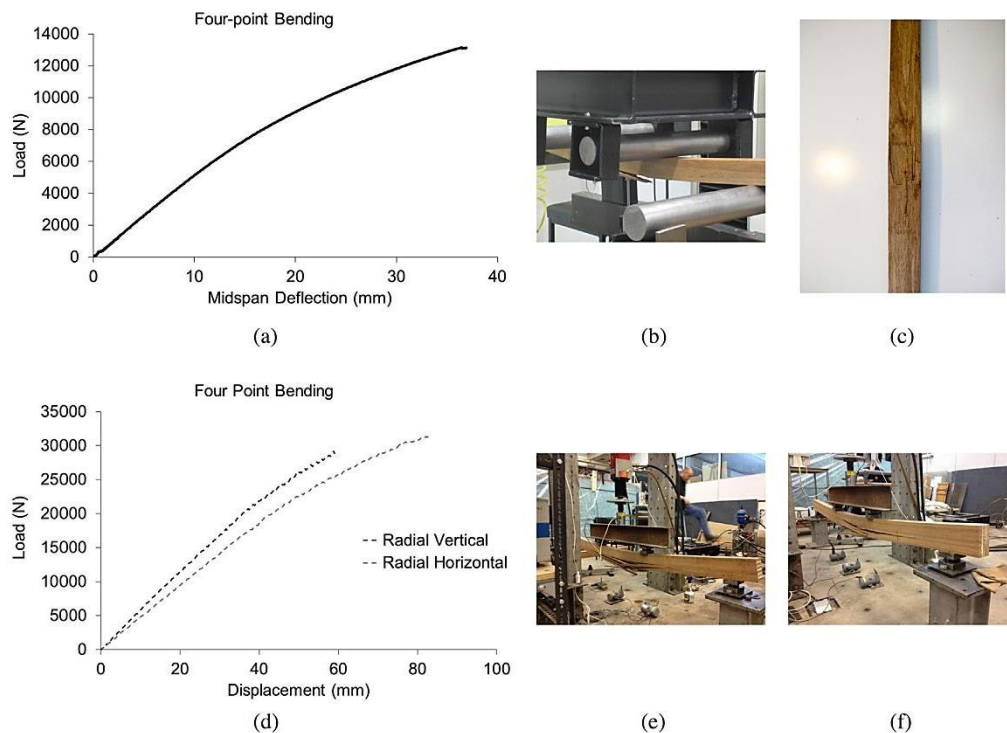


Figura 45 Resistenza flessionale: (a)(b) e (c) bambù composito, risultanti e rottura del campione; (d) Risultati sul bambù Lamellare (d) rottura dei campioni in direzione radiale orizzontali e radiale verticale in (e). (28)

In conclusione è possibile affermare che sia il bambù composito che quello ingegnerizzato sono caratterizzati da un comportamento meccanico di trazione, compressione e taglio parallelo alle fibre, molto simile. Tuttavia Il bambù Laminato, ha una maggiore capacità di deformazione del carico post-picco, attribuibile alla comprimibilità della matrice.

In direzione perpendicolare alla verso delle fibre, i materiali si comportano circa allo stesso modo, con l'eccezione della resistenza a compressione la quale risulta essere circa il doppio nel bambù composito Tabella 8.

5.4.2. Confronto con il legno

In Tabella 8 sono riassunte le caratteristiche meccaniche dei derivati strutturali del bambù confrontate con le caratteristiche dei derivati del legno.

I risultati dello studio condotto un gruppo di ricerca (28) indicano che il bambù ingegnerizzato ha proprietà meccaniche confrontabili con altri materiali strutturali derivati dal legno.

In particolare, grazie alla forza longitudinale delle fibre di bambù, sia il bambù composito che il bambù laminato hanno una maggiore resistenza in termini di sforzi paralleli alle fibre. Similmente al legname, la resistenza perpendicolare alle fibre risulta essere significativamente inferiore alla resistenza in direzione parallela. Un vantaggio del bambù laminato è la sua resistenza alla flessione in rapporto alla densità Tabella 8.

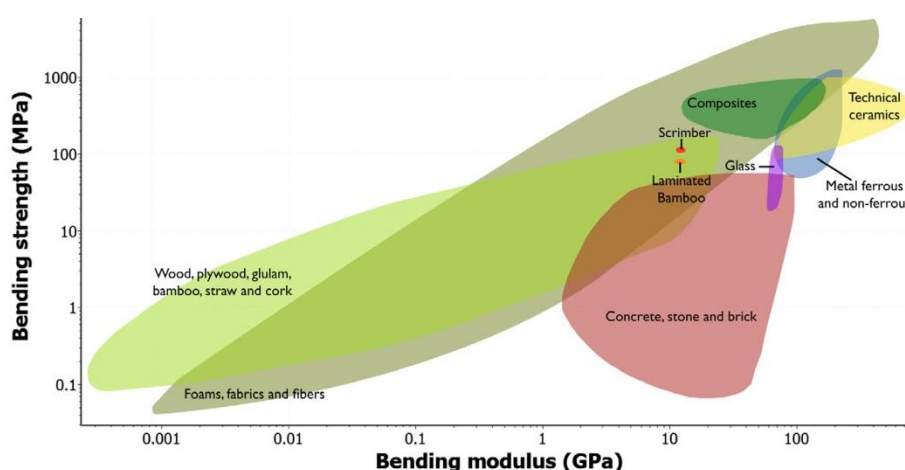


Figura 46 Modulo e resistenza alla flessione in materiali costruttivi differenti (28)

Un ulteriore confronto delle proprietà di flessione per vari materiali da costruzione a compositi di bambù trasformato è mostrato in Fig. 9. Il bambù

composito e il bambù Lamellare in flessione hanno proprietà simili al legname naturale e lamellare, utilizzati oggi in tutto il mondo in campo edile. Ciononostante, anche se i risultati di diversi studi indicano che i prodotti in bambù ingegnerizzati hanno proprietà e caratteristiche meccaniche simili o addirittura migliori rispetto ai materiali in legno, a causa del comportamento anisotropo, tipico del bambù, l'impiego del bambù ingegnerizzato in strutture portanti, quali ad esempio in sistemi reticolari, necessita di indagini sperimentali approfonditi, in particolare sul comportamento strutturale delle connessioni.

Il presente lavoro come già anticipato tratterà una ricerca sperimentale sul funzionamento strutturale delle connessioni di una struttura reticolare ibrida in bambù ingegnerizzato ed acciaio, verranno quindi realizzati provini in glubam (bambù laminato) e acciaio e provini in legno lamellare ed acciaio, per poi confrontarne i risultati. Di seguito una tabella riassuntiva che mostra le principali caratteristiche meccaniche dei due materiali analizzati.

Tabella 9 Confronto tra densità e prestazioni meccaniche del bambù laminato e del legno lamellare (37).

Materiale	Densità (kg / m³)	Modulo di Rottura (MPa)	Modulo Elastico (GPa)	taglio (MPa)	Resistenza alla trazione (MPa)	Resistenza alla compressione (MPa)
Bambù laminato	695	112.6	11	7.1	106.7	71.2
Legno lamellare	520	68	13	11	49	57

L'uso e lo sviluppo del bambù e di sistemi strutturali a base di bambù, quali ad esempio strutture reticolari, rappresenta una vera e propria rivoluzione per l'edilizia moderna, in quanto risulta possibile la costruzione di edifici commerciali e residenziali, adottando una soluzione economica, affidabile ed ecosostenibile.



*Struttura reticolare in glulam e acciaio realizzata
come copertura dell'ingresso della facoltà di
ingegneria civile presso la Nanjing Tech University*

PARTE 2

6. *SISTEMA ARCHETIPO INNOVATIVO*

6.1. Strutture spazio-reticolari

Le strutture reticolari spaziali si caratterizzano per la loro grande versatilità e per la possibilità di ripartire in modo uniforme i carichi sulle singole aste e sui vincoli esterni. Esse sono costituite da elementi strutturali base (aste o frames), opportunamente collegate alle estremità da nodi o giunti di convergenza che nel calcolo statico sono spesso assimilate a vincoli di tipo cerniere. Le aste che costituiscono una travatura reticolare sono soggette a solo sforzo normale di trazione o di compressione mentre tutte le altre caratteristiche della sollecitazione (taglio, flessione, torsione) sono del tutto assenti.

La struttura reticolare spaziale è un tipo molto speciale di struttura, che può essere metallica o di legno lamellare. Si differenzia dalla classica carpenteria per via del suo comportamento tridimensionale in particolare lo schema statico è rappresentato da travature reticolari spaziali costituite caratteristicamente da correnti superiori ed inferiori e da elementi verticali, chiamati montanti e diagonali, che rappresentano i collegamenti dei nodi. Per queste caratteristiche con le strutture reticolari spaziali si possono ottenere geometrie complesse con un peso strutturale molto ridotto se paragonati alle strutture metalliche convenzionali o a qualsiasi altro tipo di soluzione (38). Nel tipo più semplice, le strutture reticolari spaziali sono formate da travi reticolari incrociate perpendicolarmente tra loro. Altre soluzioni consistono nell'unione di più aste

in corrispondenza degli spigoli di figure spaziali di forma poliedrica come piramidi o tetraedri (Figura 47).

Grazie anche alla grande leggerezza, le strutture spazio-reticolari, possono coprire superfici di notevole ampiezza (39). In particolare, possono essere utilizzate per realizzare superfici piane oppure curve, fino a raggiungere una forma sferica, come accade nelle cupole geodetiche di Fuller (Figura 48).

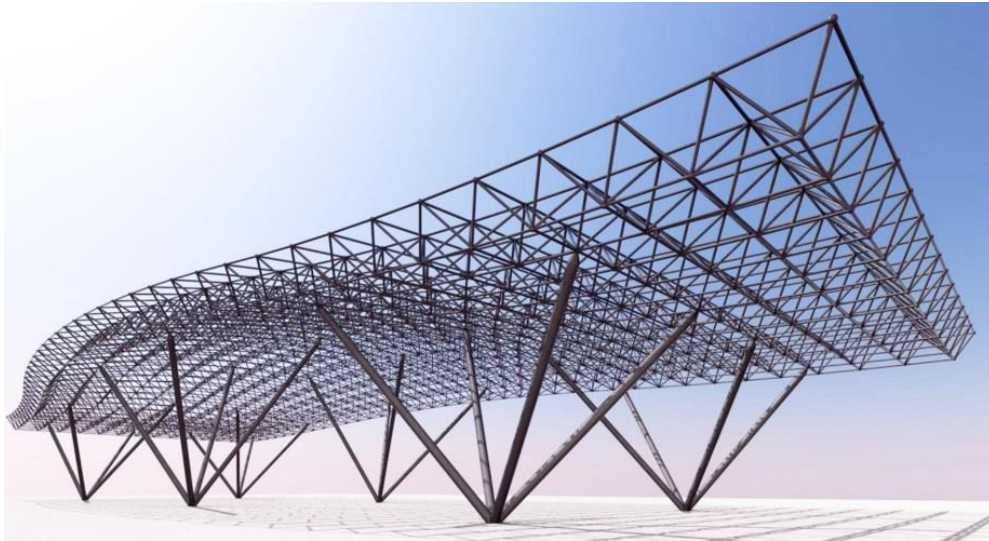
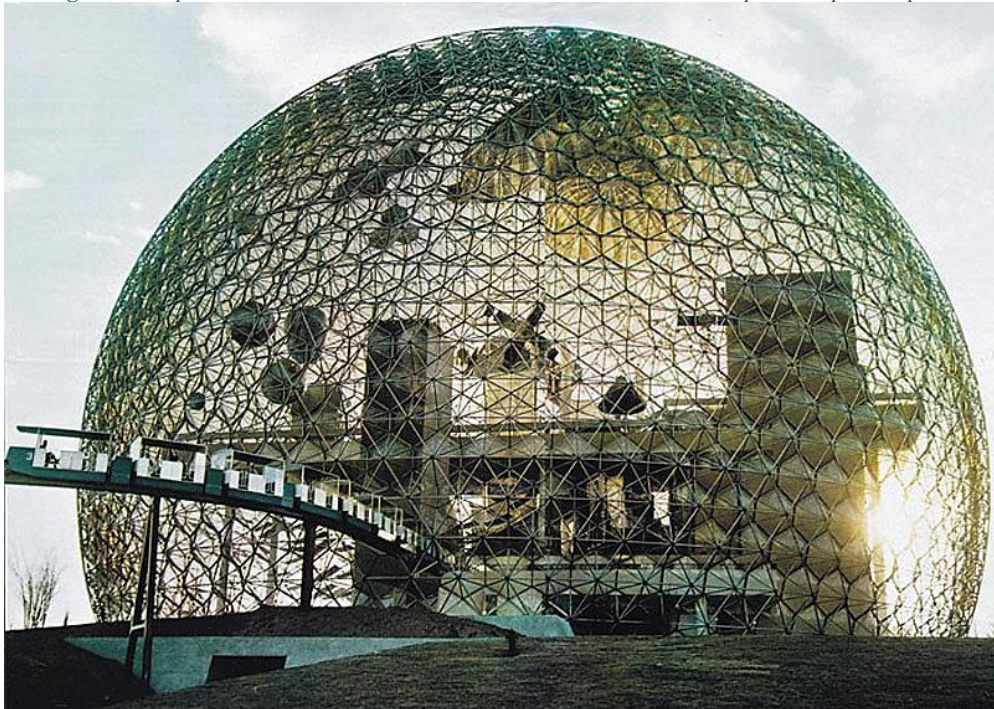


Figura 47 Copertura del Bastione di Saint Antoine a Ginevra. Fonte: <http://www.politesi.polimi.it/>



*Figura 48 Richard Buckminster Fuller, Padiglione USA, Expo 67, Montreal.
Fonte: <https://www.pinterest.cl/pin/358176976605394641/>*

6.1.1. Strutture reticolari in bambù

Il bambù viene comunemente definito acciaio vegetale o acciaio verde (40), per le sue ottime caratteristiche in termini di elasticità e resistenza rispetto al peso specifico. Il bambù presenta una buona resistenza a trazione (tanto che alcuni studi lo propongono come rinforzo sostitutivo delle barre di acciaio nel cemento armato (41) ed una resistenza a compressione superiore a quella del calcestruzzo.

Le ottime caratteristiche fisico-meccaniche del bambù hanno dato origine a diversi studi negli ultimi anni aventi l'obiettivo di esplorarne il potenziale come materiale da costruzione. Comunemente, strutture di bambù quali ad esempio edifici per l'edilizia rurale e passerelle pedonali si trovano principalmente in Asia, sud America e Africa (42). Albermani *et al.* (43) e da Paraskeva *et al.* (44) hanno investigato la possibilità di realizzare costruzioni in bambù in forma di strutture reticolari. In particolare, Albermani *et al.* (43) hanno sviluppato una struttura reticolare spaziale assemblata mediante speciali giunti in PVC Figura 49, che è stata testata sotto carichi statici (max 10 kN).



Figura 49 Sistema reticolare in bambù con giunti in PVC. (47)

I risultati ottenuti indicano che il sistema di giunzione in PVC proposto può essere utilizzato per la costruzione di strutture reticolari in bambù aventi eccellenti caratteristiche strutturali ed estetiche (43). Paraskeva *et al.* (44) hanno progettato una passerella per aree rurali con una luce di 8 m realizzata impiegando culmi di bambù connessi mediante piastre in acciaio e unioni bullonate (Figura 50). La struttura è stata sottoposta a carichi statici raggiungendo una capacità massima di circa 2,50 kN/m, ritenuta sufficiente per passerelle pedonali situate in aree rurali. I risultati mostrano che l'elemento debole della struttura reticolare in bambù esaminata sono le connessioni (44). Inoltre, esistono diverse realizzazioni di passerelle pedonali in bambù (principalmente ponti ad arco) ad esempio in Colombia (45) e Indonesia (46).

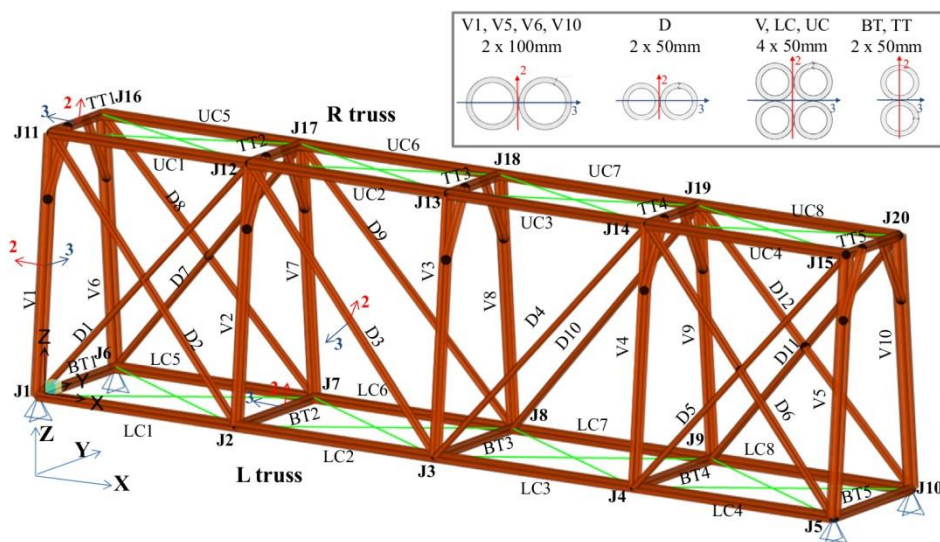


Figura 50 Passerella in bambù per aree rurali (44)

Le strutture reticolari spaziali sono una tipologia strutturale ormai largamente diffusa nell'architettura e nell'edilizia, in particolare dove sorge l'esigenza di coniugare grandi luci e leggerezza. Queste strutture sono comunemente

realizzate in acciaio o legno. Il Glubam, viste le ottime proprietà meccaniche, può anche essere una valida alternativa per la realizzazione di strutture reticolari spaziali. Partendo da questa considerazione, il presente lavoro esamina un prototipo di struttura composita in acciaio e glubam, composta da un traliccio spaziale il cui corrente superiore e le barre diagonali sono realizzati da elementi in glubam mentre il corrente inferiore è realizzato da barre in acciaio a sezione cava. Questa configurazione consente di sfruttare in modo ottimale il buon comportamento a trazione dell'acciaio e la minore propensione all'instabilità in compressione delle barre in glubam. Nel seguito sono riepilogati ed analizzati i risultati sperimentali ottenuti dalla caratterizzazione statica e dinamica del prototipo di struttura reticolare spaziale in acciaio e glubam riportati in (37), (47) e (48), con lo scopo principale di fornire alcune informazioni essenziali alla comprensione ed alla progettazione di questa particolare tipologia strutturale.

6.2. Struttura reticolare ibrida

6.2.1. Descrizione della struttura

Il prototipo della nuova struttura reticolare in acciaio e Glubam, è stato sviluppato nei laboratori della Nanjing Tech University (Cina) Figura 51. La geometria spaziale della struttura ibrida si compone di 2×8 piramidi identiche, costituite da barre in glubam, con sezione quadrata, il cui vertice è posto al corrente inferiore, come illustrato in Figura 51.

La base di ogni modulo è di $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$, mentre l'altezza è di 849 mm . La dimensione totale del prototipo è quindi di $2400 \text{ mm} \times 9600 \text{ mm} \times 849 \text{ mm}$. Il peso totale della struttura è di circa 460 kg , mentre il peso medio per unità di lunghezza ed unità di superficie sono rispettivamente 55 kg/m e 22 kg/m^2 .

Le dimensioni di questo prototipo si possono considerare rappresentative di applicazioni per coperture di piccola luce o per ponti pedonali di ridotta campata.



Figura 51 Prototipo della struttura reticolare ibrida in acciaio e glubam. Nanjing Tech University (Cina)

Struttura reticolare ibrida

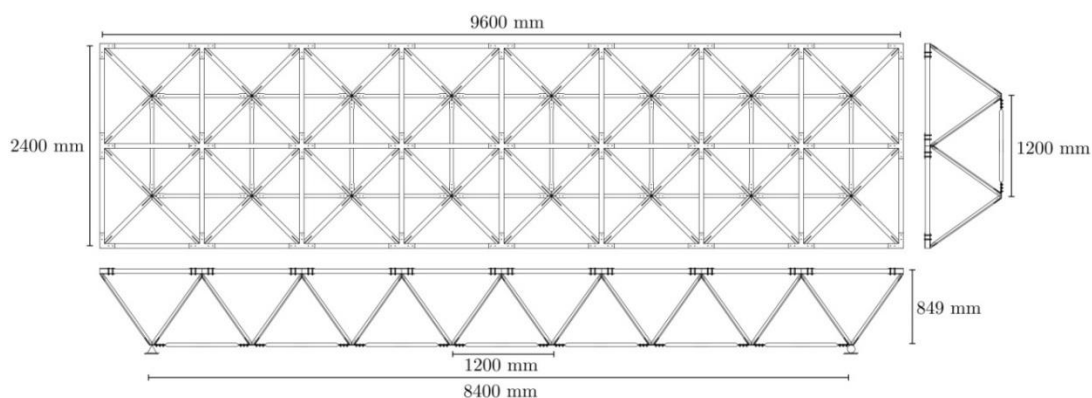


Figura 52 Geometria della struttura spaziale reticolare ibrida

La geometria modulare del sistema facilita non solo la produzione industriale ma anche l'assemblaggio in sito. Mentre il corrente superiore e le barre diagonali sono realizzati in glubam, il corrente inferiore è in acciaio. Gli sforzi di trazione sui correnti inferiori sono affidati ad elementi in acciaio con sezione cava e parete sottile. D'altra parte, la condizione limite più rilevante per le barre diagonali e le barre del corrente superiore è l'instabilità sotto le forze di compressione. Gli elementi in glubam sono particolarmente funzionali in questa posizione, avendo maggiore inerzia e minore snellezza.

Le barre in glubam sono prodotte dalla Greezu Jiangxi (Cina). Le barre di glubam presentano una sezione trasversale di dimensioni 56 mm × 56 mm, composta da 9 quadrati, formati a loro volta da tre lamine di bambù incollate tra loro mediante pressatura. Ogni striscia di bambù, che misura circa 19 mm × 6 mm, ha subito a tal fine un processo di carbonatazione prima della laminazione. La sezione trasversale del profilato in acciaio presenta un diametro esterno di 42 mm ed uno spessore della parete di 4 mm. Il tubo è realizzato in acciaio tipo HRB400.

Tutti gli elementi che compongono il sistema spaziale reticolare sono assemblati mediante connessioni realizzate tramite piastre d'acciaio aventi spessore pari a 6 mm. Le giunzioni superiori ed inferiori sono state progettate con due tipi di connessioni differenti Figura 53.

Tutte le connessioni sono realizzate utilizzando dei bulloni aventi classe di resistenza 4.8 ed un diametro di 10 mm. In particolare, dal modello tridimensionale in Figura 54 si può notare che i correnti superiori sono bloccati da due piastre in acciaio a forma di croce e fissate, per ciascuna direzione, con due bulloni in acciaio (Figura 54(a)). Gli elementi diagonali in glubam sono collegati alla struttura mediante delle piastre in acciaio diagonali, incrociate e saldate a delle piastre in acciaio a forma di croce, fissate, per ogni direzione, con tre bulloni. Le barre inferiori in acciaio sono bullonate a delle piastre a forma di croce (Figura 54(b)).

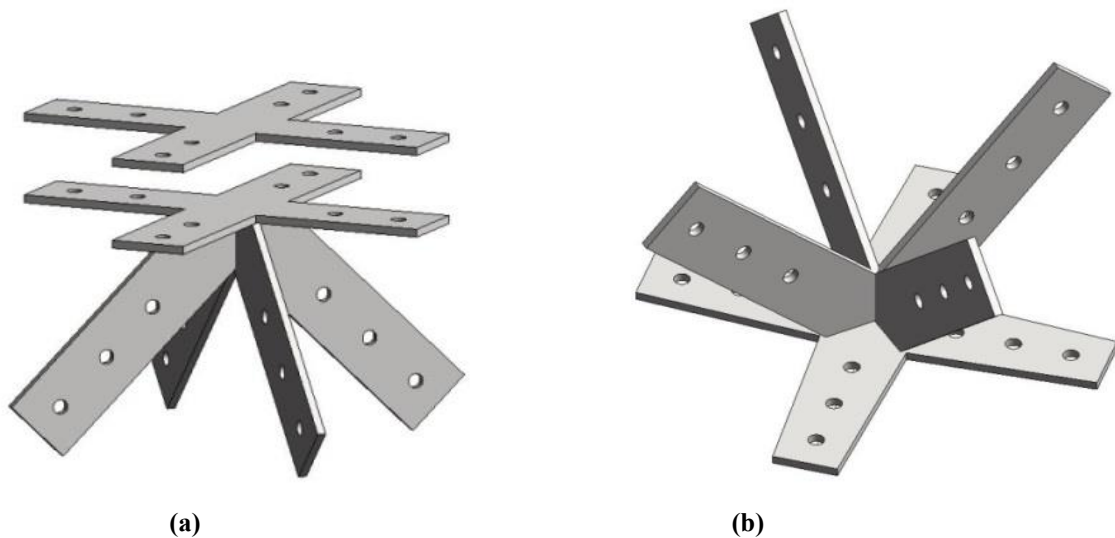


Figura 53 Piastre di connessione in acciaio: (a) nodo inferiore; (b) nodo superiore.

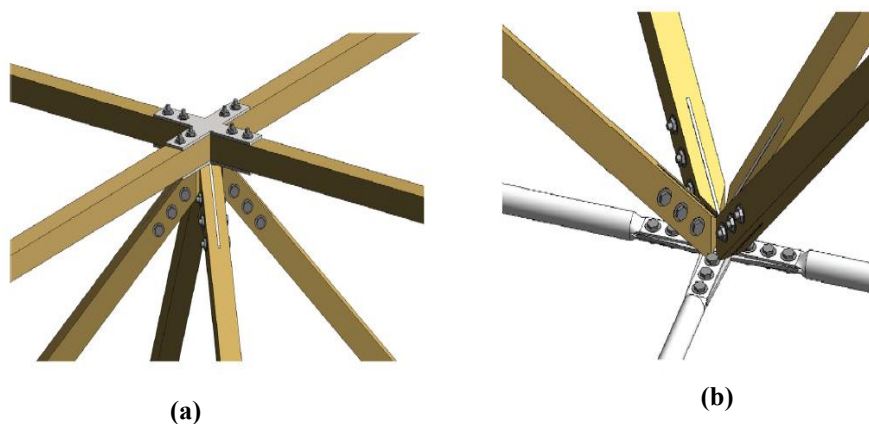


Figura 54 Modello tridimensionale delle giunti: (a) montaggio del giunto superiore; (b) montaggio del giunto inferiore (37).

6.2.2. Proprietà meccaniche dei materiali

Considerando che non esistono norme specifiche per l'esecuzione di prove sperimentali su elementi in glubam, le prove sono state condotte secondo la normativa ASTM (49) e le prescrizioni cinesi in merito agli elementi in legno riportate in (50) e (51). Per determinare la relazione sforzo-deformazione e la resistenza a trazione dei correnti inferiori in acciaio, sono stati utilizzati quattro provini, coerentemente con le prescrizioni cinesi relative alla caratterizzazione degli elementi in acciaio riportate in (52) e (53).

In Figura 54 sono riportati i grafici delle curve di sforzo-deformazione per i due materiali. La resistenza media a trazione dell'acciaio impiegato è pari a 513 MPa mentre quella di snervamento è di 420 MPa, il modulo elastico è invece di 212 GPa. Il glubam presenta una resistenza media a compressione di 67,72 MPa ed un modulo elastico di 10,1 GPa. Infine, le densità dei materiali sono risultate essere di 7850 kg/m³ per l'acciaio e 737 kg/m³ per il glubam.

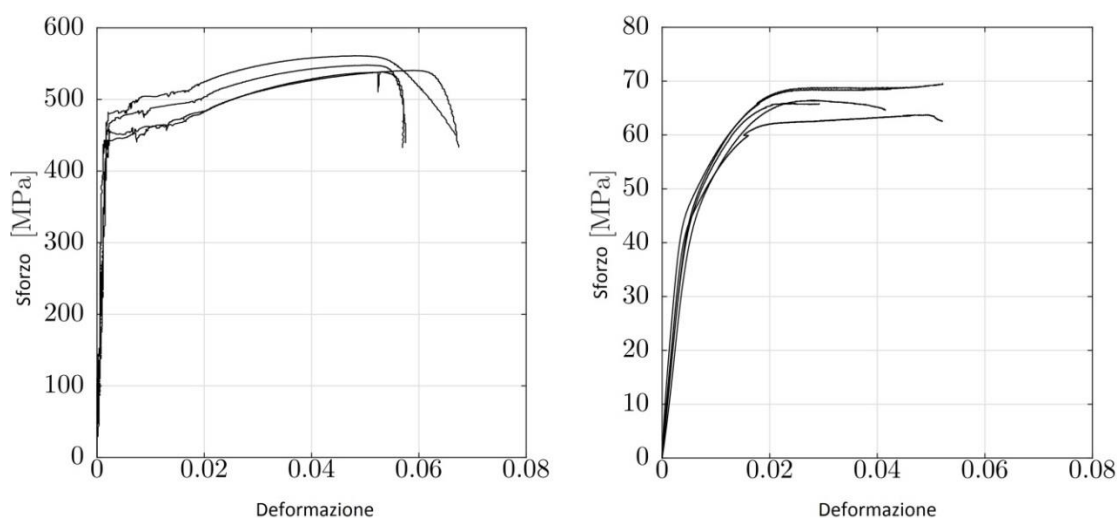


Figura 55 Curva sforzo-deformazione dei materiali: acciaio (sinistra) e glubam (destra)

6.2.3. Caratterizzazione del comportamento statico

La Figura 56 illustra la configurazione dei carichi impiegata per la prova statica. La struttura reticolare è vincolata ai quattro estremi tramite supporti in acciaio: da un lato la struttura è incernierata mentre, sul lato opposto, i due supporti sono costituiti da due rulli mobili. In corrispondenza delle cerniere è consentita solo la rotazione libera attorno all'asse Y (direzione trasversale). I rulli consentono invece la rotazione libera attorno all'asse Y e lo spostamento libero lungo l'asse X (direzione longitudinale).

La prova statica è stata effettuata sottoponendo la struttura a diversi livelli di carico globale, $F = \{21,1; 42,3; 63,4; 84,5; 106,1; 128,0\}$ kN. Il carico è stato applicato alla struttura sui nodi del corrente superiore convertendo il carico globale in un carico equivalente nodale calcolato secondo la relativa area di influenza. Il carico i -esimo su ciascun nodo, F_i , è stato valutato in accordo alla seguente equazione:

$$F_i = \alpha_i \frac{F}{64} = \alpha_i P_1 \quad (1)$$

dove:

- α_i è un moltiplicatore che assume diversi valori in funzione della posizione del nodo:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & \text{per nodo angolare} \\ 2 & \text{per nodo perimetrale} \\ 4 & \text{per nodo centrale} \end{cases} \quad (2)$$

- P_1 è pari a $F/64$.
- 64 è la sommatoria degli α_i su tutti i nodi.

Come mostrato in Figura 56, il carico verticale è stato applicato a ciascuno dei nodi del corrente superiore in accordo ad Eq. (1), utilizzando blocchi di acciaio posti dentro dei sacchi di plastica. Variando il numero di blocchi di acciaio nei sacchi è stato possibile variare il carico nodale. Per le connessioni

centrali, il carico è stato trasferito attraverso delle pulegge fissate al suolo, al fine di garantire la sicurezza durante il processo di carico, come mostrato in Figura 56 (c).

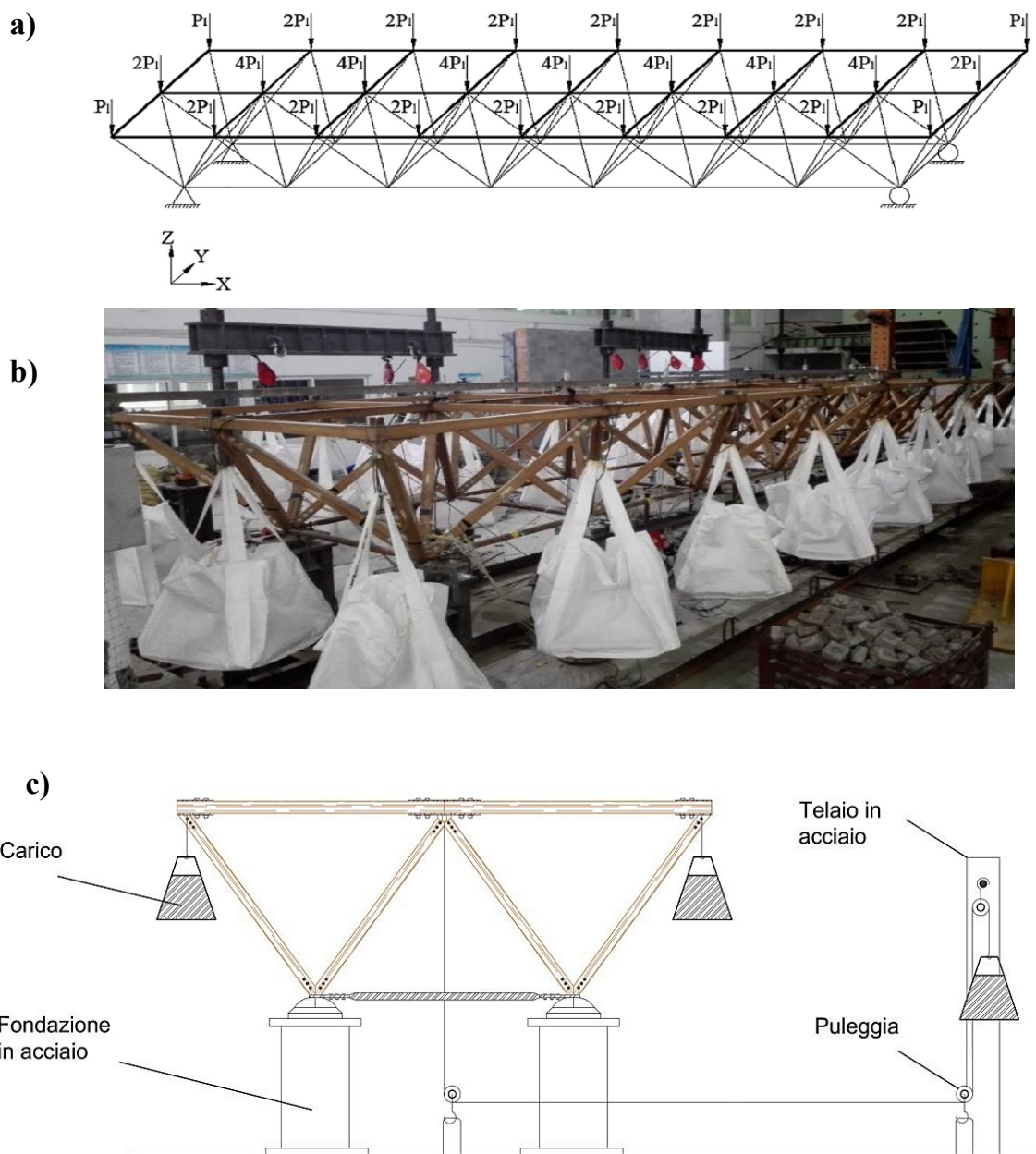


Figura 56 Distribuzione del carico sulla struttura per la prova statica: (a) posizionamento dei carichi; (b) vista della struttura durante la prova; (c) set-up di carico

I valori degli spostamenti verticali dei nodi del corrente superiore e del corrente inferiore sono mostrati in Figura 57 per i diversi livelli di carico

globale. Il prototipo della struttura reticolare è stato caricato fino a $F=106,1$ kN. In seguito a ciò, la struttura non ha evidenziato segni di collasso incipiente, sebbene sia stato registrato un massimo spostamento residuo di 20 mm per il corrente superiore e di 30 mm per il corrente inferiore all'ultimo gradino di carico ($F=48$ kN). La Figura 57 (b) mostra che, superato un livello di carico complessivo di 42,3 kN, si verifica un forte danneggiamento della connessione del nodo del corrente inferiore posto a 4800 mm dalla cerniera che determina un'aumento localizzato dello spostamento.

Il livello di carico massimo raggiunto corrisponde a circa $4,7 \text{ kN/m}^2$ e può essere considerato rappresentativo delle condizioni di carico di una copertura piana o di una passerella pedonale secondo la normativa italiana (54). Infatti, la domanda in termini di carico per una copertura piana non praticabile di categoria H1 localizzata in zona 1 per la neve e il vento corrisponde a circa $2,8 \text{ kN/m}^2$ e per un ponte pedonale corrisponde a circa 5 kN/m^2 .

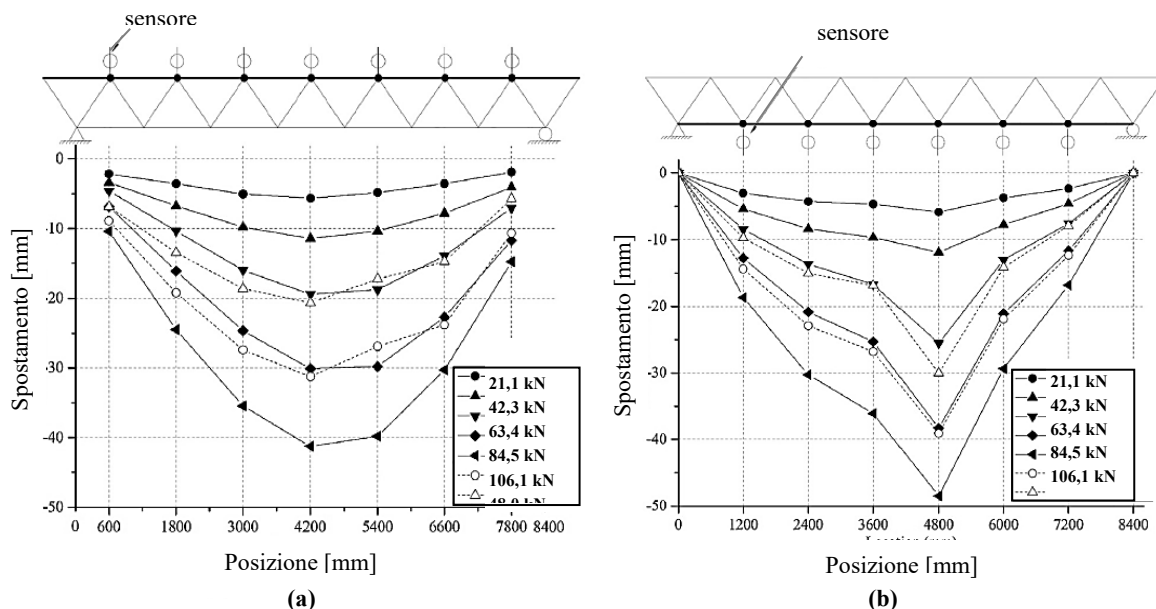


Figura 57 Spostamenti verticali misurati per diversi valori del carico globale: (a) spostamenti verticali dei nodi superiori; (b) spostamenti verticali dei nodi inferiori (41).

6.2.4. Caratterizzazione del comportamento dinamico

Al fine di stimare lo smorzamento viscoso della struttura reticolare in esame, la risposta dinamica è stata registrata attraverso l'installazione di accelerometri piezoelettrici unidirezionali Lance-LC0115 (Lance Technologies Inc., QinHuangDao, Hebei, P.R. China), le cui caratteristiche sono le seguenti: sensitività 5 V/g; intervallo di frequenze da 0,1 Hz a 1500 Hz; risoluzione di 4×10^{-6} g. La frequenza di campionamento è di 1 kHz. Le accelerazioni sono state misurate in due differenti condizioni, ovvero: (i) vibrazioni ambientali, al fine di effettuare un'analisi modale operativa e (ii) oscillazioni libere, per stimare lo smorzamento attraverso il metodo del decremento logaritmico.

Analisi modale operativa in presenza di vibrazioni ambientali

In questo scenario, la risposta della struttura è stata misurata in presenza di vibrazioni ambientali (vibrazioni dovute sia al movimento di piccoli veicoli all'interno del laboratorio, sia al passaggio di veicoli pesanti sulle strade vicino ad esso). Le registrazioni hanno avuto una durata pari a 20 minuti.

Ad eccezione dei primi tre nodi all'inizio ed alla fine del corrente superiore, tutti i nodi liberi sono stati dotati di un accelerometro. La componente verticale e la componente orizzontale ortogonale all'asse longitudinale della struttura reticolare sono state registrate impiegando diverse configurazioni, in cui alcuni sensori sono stati spostati mentre altri sono stati lasciati nella loro posizione originale per tenere traccia delle fasi del segnale. La risposta della struttura reticolare sotto vibrazioni ambientali è stata elaborata mediante identificazione nel dominio del tempo e della frequenza, al fine di identificarne i parametri modali. Nello specifico, sono state impiegate le tecniche *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) e *Stochastic*

Subspace Identification (SSI). Ulteriori dettagli teorici su queste tecniche sono forniti in (55) (56) (57) (58). In Figura 58 (a-b) sono raffigurate le prime due forme modali identificate. Il primo modo corrisponde ad un modo flessionale mentre il secondo ad un modo torsionale. In Figura 58 sono riportate le frequenze proprie del sistema ed i rapporti di smorzamento dei primi due dei cinque modi di vibrare identificati. In generale, si osserva un'ottima corrispondenza tra i valori della frequenza e dallo smorzamento ottenuti mediante le due tecniche.

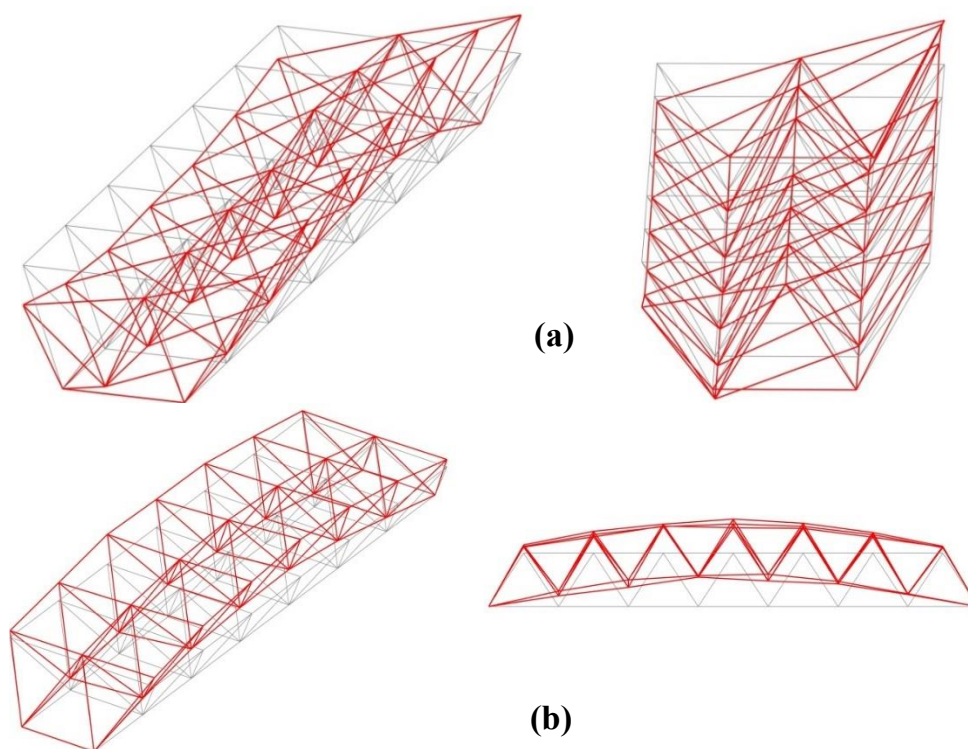


Figura 58 Modi di vibrare identificati tramite EFDD: (a) primo modo (21,8 Hz); (b) secondo modo (33,58 Hz) (48).

Identificazione dello smorzamento mediante analisi delle vibrazioni libere

Sono state analizzate le oscillazioni libere della struttura indotte dalla rimozione di una massa di 35 kg (mediante taglio del cavo di sospensione), sospesa originariamente nella mezzera del corrente inferiore. L'accelerazione

è stata registrata nel punto A (Figura 59). La risposta libera della struttura reticolare è stata dapprima esaminata mediante analisi spettrale con lo scopo di stimare le frequenze naturali, successivamente è stata impiegata la tecnica del decremento logaritmico (59) per calcolare i coefficienti di smorzamento associati. Per isolare il modo di vibrare rilevato nell'analisi spettrale è stata utilizzata una tecnica di filtraggio passa-banda basata sul filtro di Butterworth. Il coefficiente di smorzamento corrispondente è stato valutato dal logaritmo della ampiezza istantanea, ottenuta attraverso la trasformata di Hilbert.

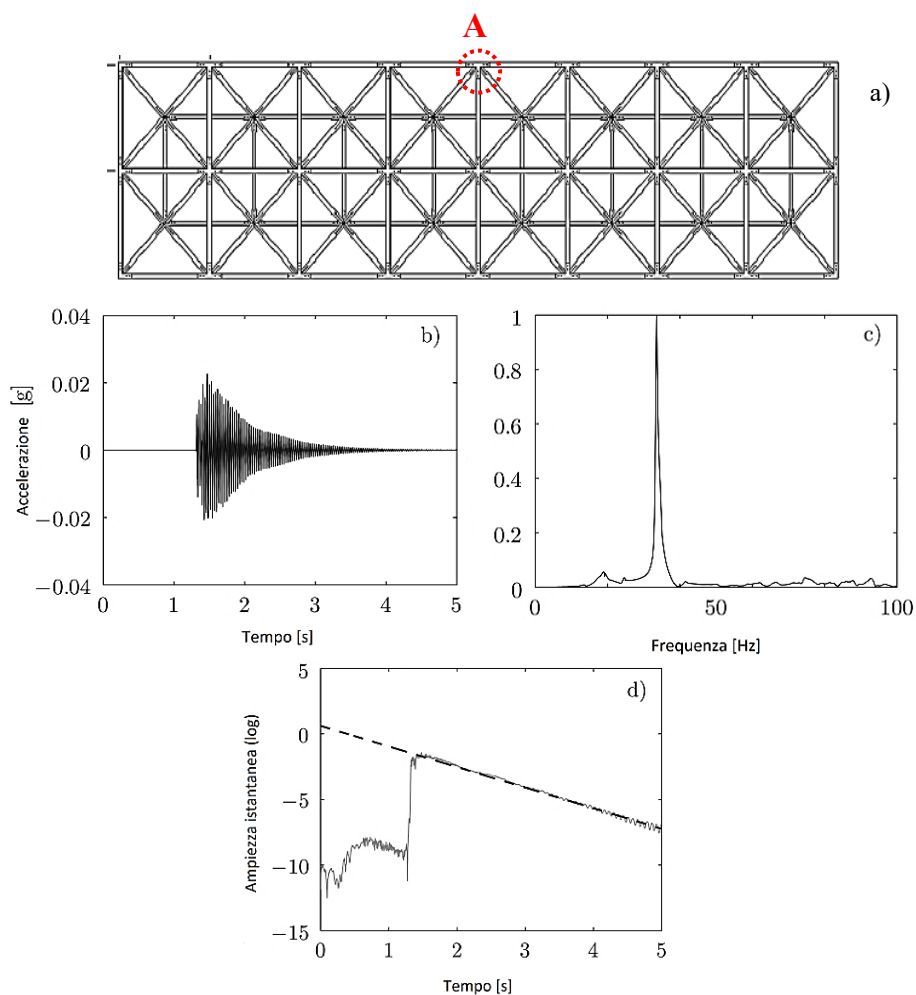


Figura 59 Identificazione dello smorzamento a partire dall'analisi delle vibrazioni libere della struttura registrate nel punto A: b) accelerazione dopo l'applicazione del filtro passa-banda; c) spettro della frequenza normalizzato della risposta accelerometrica dopo l'applicazione del filtro passa-banda; d) ampiezza istantanea in scala logaritmica (48).

L'analisi della risposta libera del sistema smorzato ha permesso di individuare le frequenze proprie ed i corrispondenti coefficienti di smorzamento per il primo ed il secondo modo di vibrare. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Figura 58 è mostrata l'identificazione dello smorzamento relativamente al primo modo torsionale (secondo modo globale). L'elaborazione delle registrazioni disponibili ha fornito i risultati riportati nelle ultime due colonne in Tabella 10.

Tabella 10 Confronto delle frequenze naturali e dei rapporti di smorzamento individuati mediante EFDD e SSI e dalla risposta libera di decadimento (tra parentesi è riportato il valore della deviazione standard) (48).

Valore della deviazione standard (%)						
Modi	VIBRAZIONI AMBIENTALI				RISPOSTA LIBERA	
	EFDD		SSI			
	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
1	21,8	1,532	21,74 (0,2099)	1,686 (0,4141)	20,48	1,454
2	33,58	0,813	33,54 (0,0971)	0,7068 (0,315)	33,57	0,744

Sintesi dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione dinamica

In Tabella 11 sono riassunte le percentuali dei coefficienti di smorzamento suggeriti da norme e linee guida per la progettazione di ponti pedonali in acciaio e legno. I valori si riferiscono al modo fondamentale di vibrare.

Tabella 11 Coefficienti di smorzamento (in percentuale) per passerelle realizzate in acciaio e legno.

Materiale	Sètra (60)		Hivoss (61)		ISO	Eurocodici ^a	fib (62)	
	min	medio	min	medio	medio	medio	min	medio
Acciaio	0,2	0,4	0,2	0,4	0,5	0,2/0,4 ^b	0,5	1,0
Legno	1,5	3,0	1,0	1,5	-	1/1,5 ^c	0,8	1,5

Struttura reticolare ibrida

^a EC1 (63) , EC3 (64) , EC5 (65) .

^b 0,2 % per connessioni saldate; 0,4 % per connessioni imbullonate.

^c 1% nel caso di connessione meccanica assente; 1,5% altrimenti.

Secondo le norme Europee, per strutture in acciaio il coefficiente di smorzamento è pari a 0,2% per connessioni saldate mentre è di 0,4% per connessioni bullonate. D'altra parte, per strutture in legno, esso è posto pari all'1% in assenza di connessioni metalliche e all'1,5% altrimenti. Dalla Tabella 11 è possibile osservare che le passerelle in acciaio presentano valori di smorzamento inferiori rispetto alle costruzioni in legno.

Il coefficiente di smorzamento modale della struttura reticolare composita in glulam ed acciaio riportato nel presente studio è pari circa a 1,5% (per il modo fondamentale di vibrare). Questo risultato è compatibile con il valore riferito alle passerelle in legno, come si può dedurre dalla Tabella 11. In particolare, il coefficiente di smorzamento misurato per la frequenza fondamentale quasi coincide con quello per le strutture in legno in presenza di connessioni metalliche suggerito dagli Eurocodici (Tabella 11). Inoltre, questo valore è in accordo con le indicazioni riportate in (61) e le raccomandazioni *fib* (62). Valori maggiori sono suggeriti dal Sètra (60). In base alle evidenze sperimentali qui riportate, nonché ai valori proposti nelle norme e nelle linee guida esistenti in merito alle costruzioni in legno ed in acciaio, si raccomanda pertanto un valore del coefficiente di smorzamento viscoso pari al 1,5%, relativamente al modo fondamentale di strutture reticolari in glulam con connessioni bullonate.

È importante sottolineare che i rapporti di smorzamento identificati in questo studio si riferiscono ad un sistema privo di elementi non strutturali, quali ad esempio quelli necessari a realizzare la copertura (nel caso di tetti) o la superficie di camminamento (nel caso di passerelle). Tuttavia, è bene sottolineare che gli elementi non strutturali possono avere un'influenza significativa sul comportamento dissipativo globale, aumentando

generalmente il valore dei coefficienti di smorzamento. Per tali ragioni, i coefficienti di smorzamento riportati in questo studio possono considerarsi una stima cautelativa.

Il valore del rapporto dello smorzamento viscoso per il modo fondamentale è stato stimato pari a circa 1,5%, in linea con l'intervallo di valori suggerito da diverse normative e linee guida per ponti pedonali con struttura in legno con unioni bullonate.

Un archetipo di questa struttura reticolare composita in glulam ed acciaio è stato progettato per realizzare la copertura dell'ingresso della facoltà di ingegneria civile della Nanjing Tech University (Cina) (66).

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO DELLE CONNESSIONI

7. Materiali e Metodi di prova

7.1. Introduzione

Nel presente capitolo verrà presentato il programma sperimentale progettato ed impiegato per effettuare una serie di test monotoni su connessioni ibride mono bullonate e a più bulloni. In particolare, verranno presentate le prove statiche effettuate su delle connessioni in acciaio e glubam, realizzate mediante l'uso di piastre metalliche imbullonate a delle travi in bambù ingegnerizzato (glubam). Le medesime prove si ripeteranno su delle connessioni realizzate in legno lamellare e piastre in acciaio. Verrà dunque testato il comportamento meccanico di entrambe le connessioni affinché possa essere dimostrata la capacità strutturale delle connessioni in bambù ingegnerizzato, per la realizzazione di un sistema reticolare innovativo, rispetto al legno lamellare, le cui caratteristiche sono già note poiché ampiamente diffuso nelle costruzioni moderne ma economicamente ed ecologicamente più svantaggioso.

Le prove sono state eseguite nei laboratori di Ricerca presso il campus internazionale della Zhejiang University (ZJU-UIUC Institute) con sede in Haining, Cina. Dopo una prima fase di ricerca e di confronto tra le proprietà fisiche meccaniche del bambù ingegnerizzato e del legno lamellare, sono stati accuratamente progettati i provini in glubam ed in legno secondo le specifiche normative di quest'ultimo, essendo quelle del bambù laminato ancora in fase di sviluppo. Verrà, inoltre, presentata una sintesi commentata delle rielaborazioni dei dati acquisiti nel corso della campagna sperimentale cui

seguirà un'analisi volta alla determinazione dei parametri indispensabili alla caratterizzazione del comportamento meccanico dei giunti in esame. In particolare, le caratteristiche di resistenza evidenziate dalle prove sperimentali verranno confrontate con quelle calcolate analiticamente.

7.2. Materiali utilizzati

In questo paragrafo si descrivono i materiali utilizzati per la realizzazione delle connessioni della struttura ibrida reticolare spaziale.

7.2.1. Glubam

La tendenza odierna per lo sviluppo ecosostenibile è interessata all'uso del bambù come materiale strutturale, per la realizzazione di ponti strutturali e costruzioni moderne. Tuttavia, l'uso tradizionale dei culmi del bambù, a causa delle limitazioni sopra riportate, non è la sola e neppure la più efficace applicazione. In Cina, dove le piante di bambù abbondano, è stato dunque sviluppato un nuovo tipo di bambù laminato, marchiato Glubam (67) (68). La notevole complessità nell'utilizzo del bambù direttamente come culmo in ambito strutturale deriva da diversi fattori, ovvero: (i) grande variabilità in termini di proprietà meccaniche e (ii) difficoltà nella realizzazione di connessioni e giunzioni affidabili. Questi problemi hanno portato allo sviluppo di materiali ingegnerizzati a base di bambù (28). Nel corso degli ultimi dieci anni, Xiao et al. (67) hanno sviluppato e studiato un nuovo tipo di bambù lamellare commercializzato con la denominazione Glubam®. Si tratta sostanzialmente di un prodotto che trae ispirazione dal legno lamellare. Xiao et al. (68) hanno analizzato nel dettaglio il processo di produzione, l'impatto ambientale e le proprietà meccaniche del Glubam, documentandone l'affidabilità e le potenzialità di utilizzo nelle applicazioni strutturali.

Tipicamente i fogli in bambù laminato, che costituiscono gli elementi strutturali in glubam, sono disposti per l'80% in direzione longitudinale e il 20% in direzione trasversale. Noto il processo di produzione, definito nel capitolo 1, le prestazioni meccaniche del glubam sono influenzate dunque dalle proprietà meccaniche delle strisce di bambù e dalla loro disposizione nonché dai processi di incollaggio e di pressatura. L'asse principale del provino in glubam sarà dunque determinato dalla direzione delle fibre del pannello di bambù incollato con più fogli di bambù laminato.

I fogli di bambù ed i pannelli unidirezionali in bambù laminato utilizzati in questo studio sono illustrati in Figura 60.

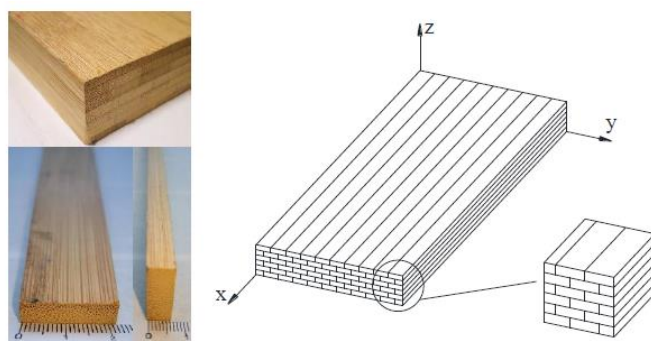


Figura 60 Strisce di bambù e pannelli unidirezionali in bambù

Si tratta di pannelli aventi dimensioni di 40 mm × 1220 mm × 2440 mm disponibili in commercio e prodotti a Hunan, Cina. Gli elementi di base di tale pannello sono strisce di bambù con sezione di 7 mm × 22 mm e lunghezza fino a 2440 mm. Prima di assemblare il provino sono state studiate sperimentalmente le proprietà meccaniche dei pannelli di bambù, secondo la norma ASTM D143-14 (ASTM D143 2014) come mostrato in Figura 62. I valori sono riportati nella Tabella 12. La densità a secco in forno del pannello di bambù incollato unidirezionale è 631 kg/m³, con deviazione standard di 41,2 kg/m³ (coefficiente di variazione 0,065). Il contenuto di umidità misurato (MC) dei campioni durante la prova è stato di circa il 9,5±5 %.

Modalità di esecuzione della prova



Figura 61 Foto delle lastre in glubam scattate in laboratorio prima dell'esecuzione dei test.

La Figura 61 rappresenta una foto scattata in laboratorio prima dell'esecuzione dei test. In particolare, sono mostrate le geometrie delle lastre in glubam, prima e dopo essere state tagliate per realizzare il provino da utilizzare nelle prove delle connessioni glubam-acciaio.

Tabella 12 Proprietà meccaniche del pannello di bambù incollato

Classe di resistenza GL36h			
Trazione // alla fibratura	$f_{t,0,g,k}$	80	(N/mm ²)
Compressione // alla fibratura	$f_{c,0,g,k}$	45.3	(N/mm ²)
Compressione $\perp$ alla fibratura	$f_{c,90,g,k}$	33.7	(N/mm ²)
Flessione	$f_{m,g,k}$	92	(N/mm ²)
Taglio	$f_{v,g,k}$	7.5	(N/mm ²)
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	631	(kg/m ³)

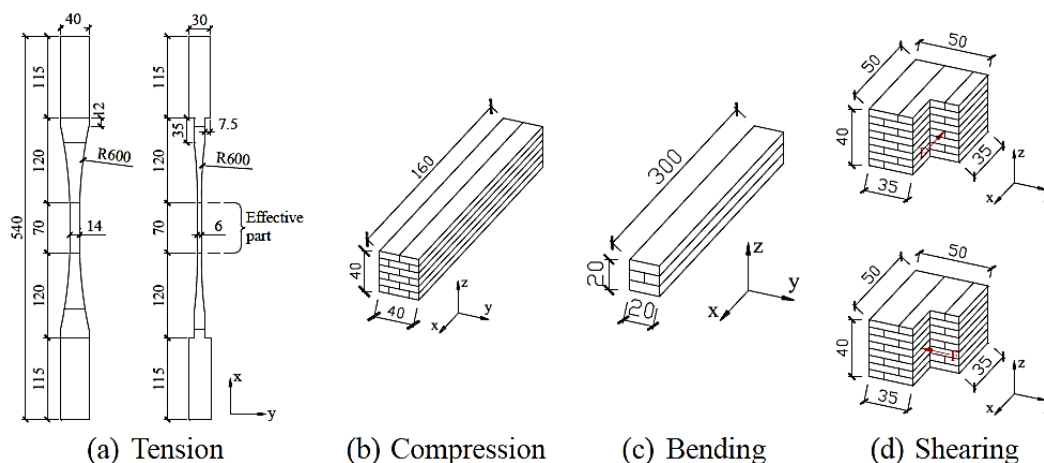


Figura 62 Prove meccaniche di trazione, compressione, flessione e taglio su un pannello di bambù laminato di spessore di 40 mm [mm]

7.2.2. Acciaio

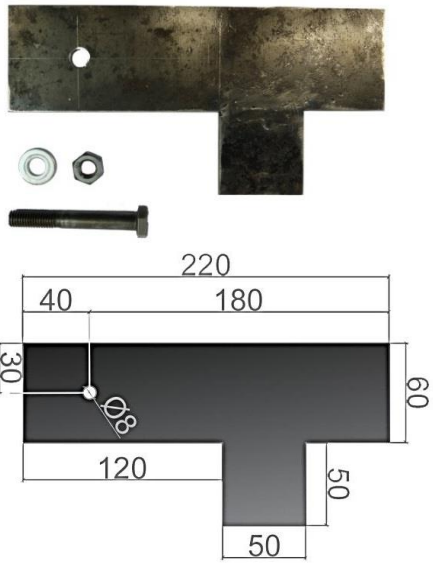
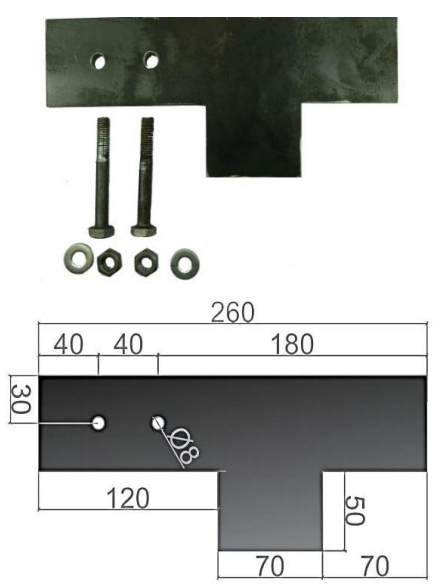
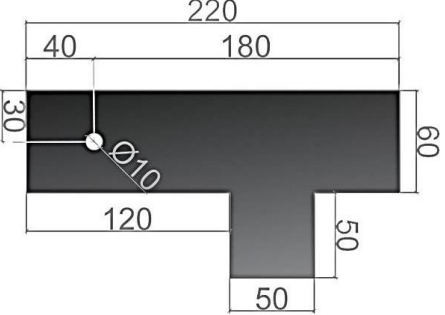
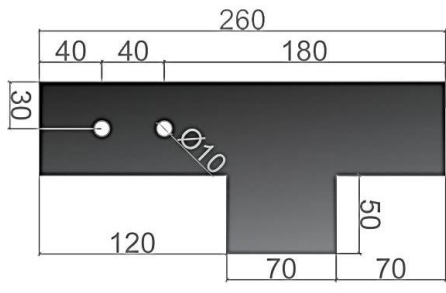
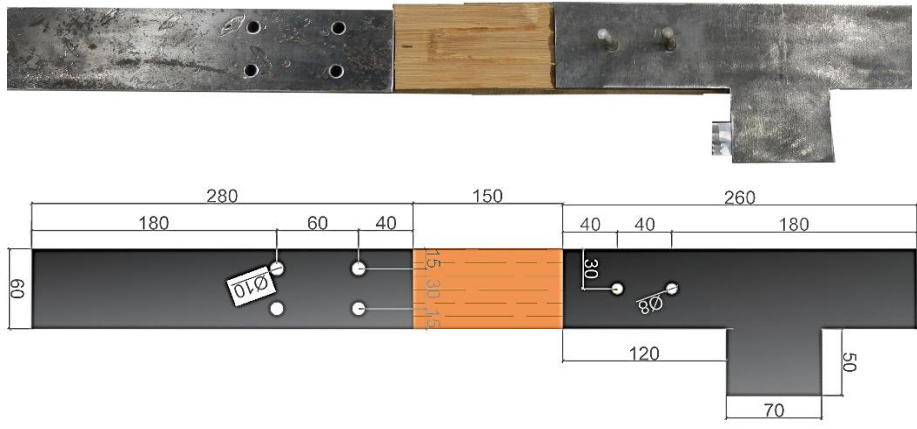
L'acciaio utilizzato per i componenti metallici della connessione, quali piastre e bulloni di collegamento è l'acciaio Q235. L'acciaio Q235 è un acciaio strutturale al carbonio normale in conformità con gli standard cinese GB, corrisponde con l'acciaio ASTM A572 (ASTM), S235JR (En), si suddividono 4 gradi di qualità in base alla barra d'acciaio o al diametro dell'acciaio: Q235A, Q235B, Q235C, Q235D.

La lettera *Q* è la prima lettera dell'ortografia cinese *Qu Fu Dian*, che si Yield Point. Il termine 235 si riferisce alla resistenza minima allo snervamento 235MPa testata con diametro dell'acciaio ≤ 16 mm.

L'acciaio Q235 ha una buona plasticità tenacia e saldabilità, nonché una certa resistenza e buone prestazioni di flessione a freddo. Questo tipo d'acciaio viene solitamente laminato in vergella o acciaio tondo, in acciaio quadrato, piatto, ad angolo, trave, altri tipi di sezioni e piastre in acciaio.

I componenti metallici in acciaio e le relative geometrie, utilizzati nei collegamenti dei prototipi sono illustrati nella tabella seguente.

Modalità di esecuzione della prova

G_1_8	G_2_8
	
G_1_10	G_2_10
	
	

Le piastre in acciaio sono state dimensionate secondo le normative correlate alla progettazione dei collegamenti in legno e acciaio. Nei paragrafi successivi la progettazione dei provini nel dettaglio. Per verificare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio Q235, prima di essere utilizzato come piastre di collegamento nei prototipi di connessione della struttura ibrida, sono state eseguite delle prove a trazione su dei provini in acciaio, conformemente progettate alle prescrizioni delle norme europee.

Si riportano di seguito le caratteristiche dell'acciaio utilizzato:

- Acciaio **Q235B** in conformità con lo standard cinese (GB / T700-2006) (50)
- Resistenza caratteristica a rottura f_u : da 370 MPa a 500 MPa
- Resistenza caratteristica a snervamento $f_{y,k}$: 235 MPa
- Coefficiente di sicurezza allo SLU (elastico): $\gamma_m = 1,05$
- Massa volumica caratteristica: $\rho_k = 7,85 \text{ g/cm}^3$

Nel capitolo 8 sono illustrate le prove di trazione sull' acciaio.

Piastre

Le piastre metalliche in acciaio, progettate in rispetto alle prescrizioni delle norme europee, sono state prelevate da un fabbro della città di Haining e rispettano le caratteristiche dell'acciaio Q235, descritto nel paragrafo 7.2.2.

Tabella 13 Caratteristiche meccanica della piastra di collegamento.

Acciaio Q235B			
Resistenza caratteristica a rottura	f_u	375	MPa
Resistenza caratteristica a snervamento	$f_{y,k}$	235	MPa
Coefficiente di sicurezza allo SLU (elastico)	γ_m	1,05	-
Massa volumica caratteristica	ρ_k	7850	kg/m ³

In Tabella 13 sono riassunte le caratteristiche meccaniche delle piastre. Mentre la geometria si riporta nei paragrafi successivi.

Bulloni

I bulloni utilizzati in questo studio sono costituiti da:

- Vite con testa esagonale e gambo filettato in parte della sua lunghezza;
- Dado di forma esagonale;
- Rondella (o rosetta)

Le caratteristiche geometriche che individuano il bullone sono lunghezza e diametro (nominale). La lunghezza è importante perché deve essere tale da assicurare l'attraversamento degli elementi da collegare, ma non deve essere eccessiva per evitare sprechi e necessità di tagliare i pezzi in eccesso.

La scheda tecnica dei bulloni fornita dal rivenditore di Haining è riportata nell'allegato 1.1.

Dalla Figura 63 è possibile comprendere meglio le caratteristiche geometriche ed in Tabella 14 sono riassunte le geometrie dei due tipi di bulloni.

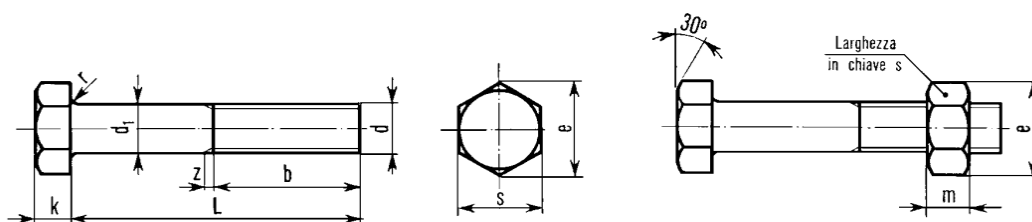


Figura 63 Geometria bulloni esagonali

Tabella 14 Caratteristiche geometriche dei bulloni secondo le UNI 5727-68, DIN 601

[mm]	d1	s	e	k	m	L	Passo filet. (P) [mm ²]	Area nom. (A) [mm ²]	Area res. (As) [mm ²]
M8	8	13	14,20	5,5	6,5	80	1,25	50	36.6
M10	10	17	18,72	7	8	80	1.5	79	58.0

In accordo con UNI EN ISO 898-1, sono individuate due categorie di vite (a bassa ed alta resistenza) e diverse classi di resistenza del materiale. La classe di resistenza rappresenta le caratteristiche meccaniche dell'acciaio di cui è costituito il bullone ed è identificata da due numeri: il primo rappresenta 1/100 del valore nominale del carico unitario di rottura, f_u espresso in N/mm^2 , mentre il secondo numero rappresenta 10 volte il rapporto tra la tensione di snervamento e quella di rottura.

Nella *Tabella 15* è possibile leggere la classe di resistenza dei bulloni utilizzati e le relative caratteristiche meccaniche.

**Tabella 15 Classe di resistenza dei bulloni utilizzati e caratteristiche meccaniche.
Secondo l'Eurocode 3**

Classe di resistenza 4.8 acciaio Q235			
Tensione di rottura	f_{ub}	400	MPa
Tensione di snervamento	f_{yb}	320	MPa
Coefficiente di sicurezza allo SLU (elastico)	γ_m	1,05	-
Massa volumica caratteristica	ρ_k	7850	kg/m^3

Si noti che per quanto riguarda i simboli utilizzati per indicare la tensione di rottura permane la solita differenza tra normativa italiana (che usa f_t) e l'Eurocodice 3 (che usa f_u). L'Eurocodice aggiunge inoltre il pedice b per sottolineare che le caratteristiche sono riferite al bullone (e quindi usa, in definitiva, i simboli f_{yb} e f_{ub}).

La rondella

Al fine di evitare che avvenga la penetrazione della testa del bullone all'interno del legno o del glubam durante la posa in opera della connessione si inserisce una rondella che ha la funzione di aumentare la superficie di contrasto facendo diminuire così le tensioni di contatto.

Modalità di esecuzione della prova

La rondella viene prodotta in acciaio rivestita da una zincatura, ed ha una forma tale da permettere il perfetto alloggiamento della testa esagonale del bullone.

Il foro della rondella deve essere tale da permettere il passaggio del bullone senza ostacolarne il passaggio e di conseguenza vengono prodotte 2 diverse dimensioni di rondella da utilizzare in funzione dei due diversi diametri dei bulloni utilizzati.

Per ogni diametro di bullone è stata utilizzata la corrispondente rondella caratterizzata dalle dimensioni riportate in *Tabella 16* :

Tabella 16 Dimensioni delle rondelle utilizzate nella seguente sperimentazione

Diametro Vite d [mm]	Diametro foro Rondella d_i [mm]	Diametro esterno della rondella d_e [mm]	Spessore Rondella s [mm]
8	8,4	16	1,6
10	10,5	20	2

7.2.3. Legno lamellare

Affinché possa essere dimostrata la capacità di resistenza a trazione delle connessioni in glubam come materiale sostitutivo al legno, sono state condotte delle prove monotone comparative di connessioni realizzate in legno lamellare e piastre d' acciaio.

Il legno lamellare utilizzato nelle seguenti prove è un materiale strutturale molto resistente e solido, caratteristiche proprie del legno naturale di cui è composto, Abete. È dunque un materiale composito, prodotto incollando delle tavole di legno a loro volta già classificate per uso strutturale, molto utilizzato nelle pratiche costruttive odierne.

Sono stati così ordinati ad un'azienda cinese situata a Nanchino, dei blocchi costituiti da pezzi di travi in legno lamellare ottenute incollando tavole di abete selezionate, aventi classe di resistenza BS18 (o l'equivalente designazione per la norma UNI EN 1194 alla classe GL36).

Secondo le specifiche UNI EN 1194:2000, EN 14080:2013 "strutture di legno-legno lamellare incollato" di seguito, elencate in *Tabella 17*, le caratteristiche meccaniche del legno lamellare utilizzato:

Tabella 17 Proprietà meccaniche del legno lamellare

Classe di resistenza GL36h			
Trazione // alla fibratura	$f_{t,0,g,k}$	26	(N/mm ²)
Trazione $\perp$ alla fibratura	$f_{t,90,g,k}$	0.6	(N/mm ²)
Compressione // alla fibratura	$f_{c,0,g,k}$	31	(N/mm ²)
Compressione $\perp$ alla fibratura	$f_{c,90,g,k}$	3.6	(N/mm ²)
Flessione	$f_{m,g,k}$	36	(N/mm ²)
Taglio	$f_{v,g,k}$	4.3	(N/mm ²)
Modulo elastico medio //	$E_{0,g,med}$	14700	(N/mm ²)
Modulo elastico caratteristico //	$E_{0,g,0.5}$	11900	(N/mm ²)
Modulo elastico medio $\perp$	$E_{90,g,med}$	490	(N/mm ²)
Massa volumica	$\rho_{g,k}$	450	(kg/m ³)

7.3. Matrice delle prove sperimentali

In ogni analisi sperimentale è prevista la redazione di un programma di prove da compiere in laboratorio, "Matrice delle Prove".

Modalità di esecuzione della prova

La matrice delle prove fissata per questa sperimentazione prevede prove di resistenza a trazione // alla direzione delle fibre del materiale, su due tipologie differenti di materiale:

- Prove di trazione su campioni in Glubam *Tabella 18*.
- Prove di trazione su campioni in Legno Lamellare *Tabella 19*.

Per ogni materiale sono analizzate quattro diverse configurazioni di prototipi in base al numero e alla tipologia del connettore. Affinché l'analisi dei dati risultasse maggiormente attendibile, per ogni prototipo è stata esaminata la risposta strutturale di 3 campioni diversi (A, B, C) di medesima configurazione Figura 64.



Figura 64 campioni A, B e C del prototipo G_1_10

Sono stati dunque, accuratamente progettati ed assemblati 24 provini, classificati e codificati secondo le caratteristiche del materiale, dimensione e

numero dei bulloni. Di seguito la matrice dei test per una più chiara interpretazione del programma di prova stilato.

Tabella 18 Matrice delle prove per i provini in Glubam

Codice	Materiale	n° bulloni	Diametro dei bulloni [mm]	n° test	Tipo di prova
G_X_Y	GLUBAM	X	Y		
G_1_8	Bambù laminato	1	8	3	monotona
G_2_8	Bambù laminato	2	8	3	monotona
G_1_10	Bambù laminato	1	10	3	monotona
G_2_10	Bambù laminato	2	10	3	monotona

Dove **G** sta per *Glubam* e nella tabella in basso **T** per *Laminated Timber*.

Tabella 19 Matrice delle prove per i provini in Legno lamellare

Codice	Materiale	n° bulloni	Diametro dei bulloni [mm]	n° test	Tipo di prova
T_X_Y	TIMBER	X	Y		
T_1_8	Legno Lamellare	1	8	3	Monotona
T_2_8	Legno Lamellare	2	8	3	monotona
T_1_10	Legno Lamellare	1	10	3	monotona
T_2_10	Legno Lamellare	2	10	3	monotona

7.4. Setup di prova

Lo scopo principale di questa ricerca è quello di studiare le prestazioni meccaniche dei provini di collegamento sotto carichi monotoni di trazione in direzione parallela alla fibratura del bambù ingegnerizzato.

Modalità di esecuzione della prova

Prima di addentrarsi nell'esecuzione vera e propria dei test sperimentali è opportuno precisare alcuni argomenti fondamentali, quali macchinari e attrezzature utilizzate, geometria dei prototipi delle connessioni e protocollo di prova, necessari all'attualizzazione dei test.

In Figura 65 è mostrata la configurazione schematica del setup di prova mentre la Figura 66 rappresenta il campione prototipale della connessione ibrida, glubam- acciaio o legno-acciaio, progettata dall'autore .

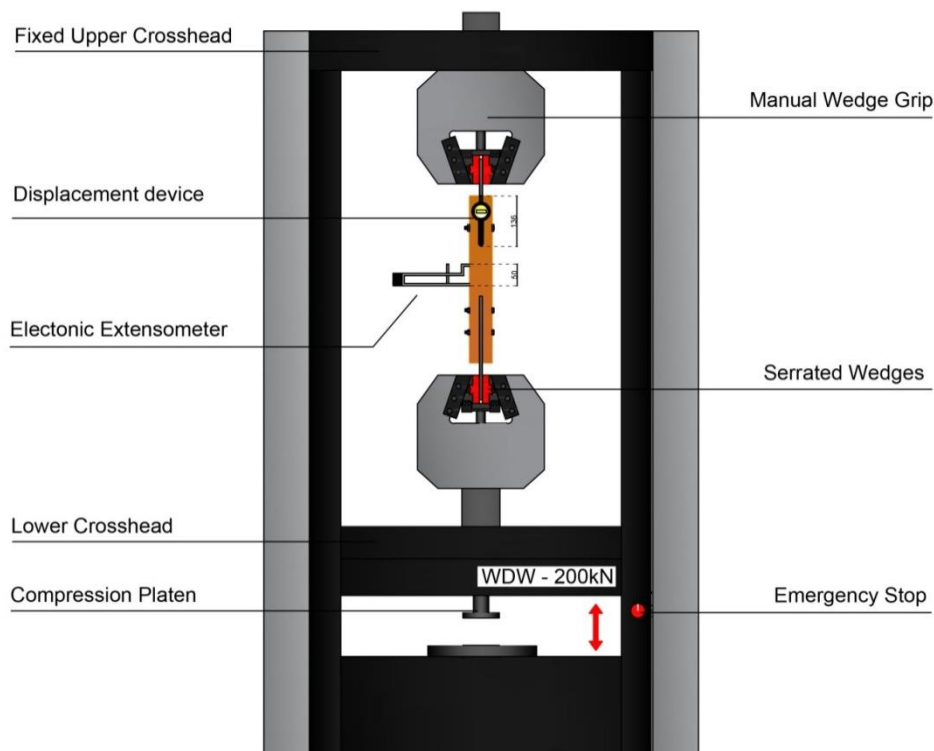


Figura 65 Illustrazione schematica del setup di prova

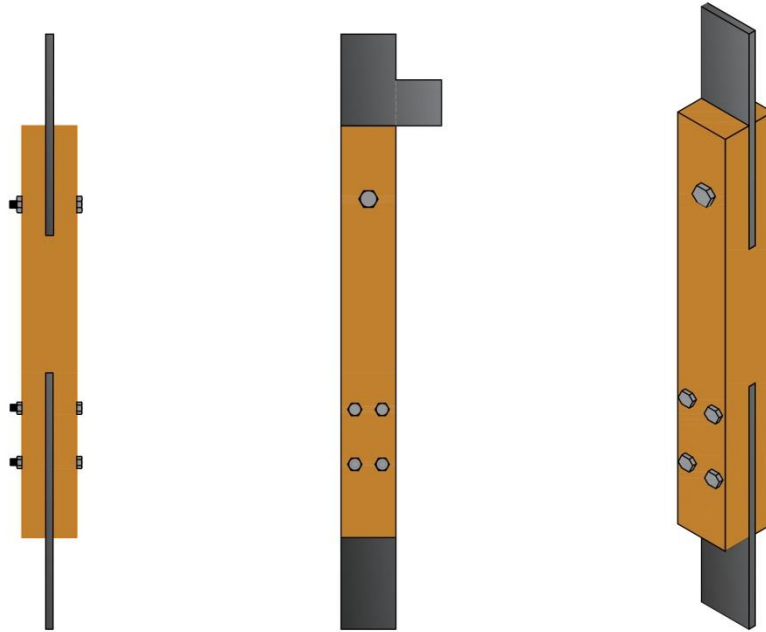


Figura 66 Vista frontale e laterale dei prototipi delle connessioni testate.

7.4.1. Attrezzature e dispositivi

Il test è stato condotto in conformità alla norma ASTM D5652-95 (69). L'attrezzatura di carico consiste in una macchina di con una capacità di carico massima di 200 kN. Durante la prova, è stato utilizzato un dispositivo di elettronico per rilevare lo spostamento localizzato direttamente nella connessione. I dati di prova e le relative informazioni possono essere ragionevolmente e completamente conservati grazie al sistema di controllo e di registrazione del computer della macchina di prova

In Figura 67 A sinistra, Macchina di prova utilizzata durante i test sperimentali eseguiti in questo studio. In basso i due monitor per la registrazione e l'elaborazione di dati.

Modalità di esecuzione della prova

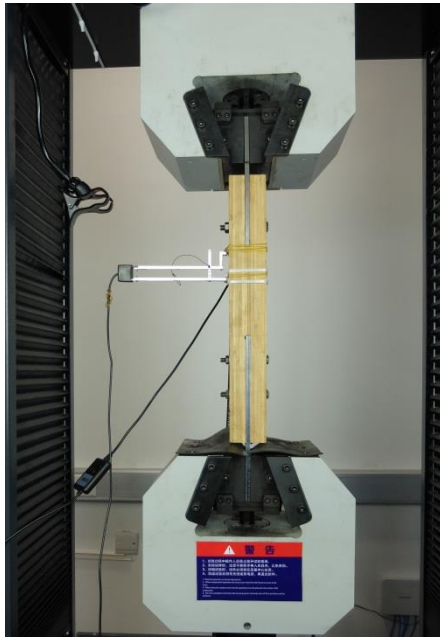


Figura 67 A sinistra, Macchina di prova utilizzata durante i test sperimentali eseguiti in questo studio. In basso i due monitor per la registrazione e l'elaborazione di dati.

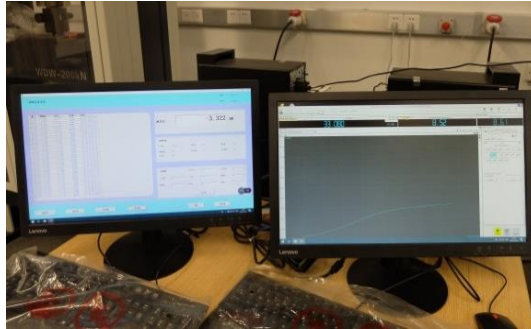


Figura 68 Configurazione generale di prova

Macchina di prova

Figura 69 Macchina di prova universale elettronica computerizzata WDW fino a 200 KN di capacità.



Per l'esecuzione dei test sperimentali, è stata utilizzata una macchina elettronica di prova universale computerizzata, progettata e prodotta secondo gli standard ASTM, ISO, DIN. È una macchina di prova di precisione controllata da computer, adatta per un'ampia gamma di materiali per prove

meccaniche quali: compressione, flessione e trazione. È caratterizzata da un'alta stabilità e un'alta precisione, dotata di sistema computerizzato PC e di una stampante, per l'elaborazione e la visualizzazione dei risultati dei test sotto forma di grafici e matrici di dati. La macchina è inoltre completa di moduli e accessori intercambiabili a seconda del tipo di test da effettuare, del tipo di materiale e della superficie del provino.

La macchina di prova universale elettronica computerizzata WDW ha una portata massima di 200 KN. La velocità può essere impostata tra 0,01-500 mm/min direttamente dal computer. Alti livelli di velocità possono essere supportati grazie ad un eccellente servomotore.

Il telaio superiore fisso e quello inferiore mobile sono composti da una base ed un tronco spesso, che garantiscono l'estrema stabilità e rigidità longitudinale e trasversale del componente superiore ed inferiore della macchina di prova. Lo spazio disponibile per la prova di trazione è di 600mm. Maggiori informazioni sulle caratteristiche della macchina di prova sono riportati nell'allegato 1.2.



Dispositivo di spostamento

- Campo di misura: 40 mm.
- Risoluzione: 0,001 mm.
- Funzione incrementale.
- Funzione tolleranze.
- Massimo e minimo.

È stato utilizzato un rilevatore di spostamento digitale in plastica e acciaio, ai fini di identificare lo spostamento locale della connessione testata. Il dispositivo è stato collocato direttamente sulla connessione superiore con la

Modalità di esecuzione della prova

punta in acciaio (rilevatore di spostamento) collocato sull'estremità della piastra superiore. Le unità di misura della lunghezza rilevata dall'apparecchio elettronico erano mm e in.

Extensometer

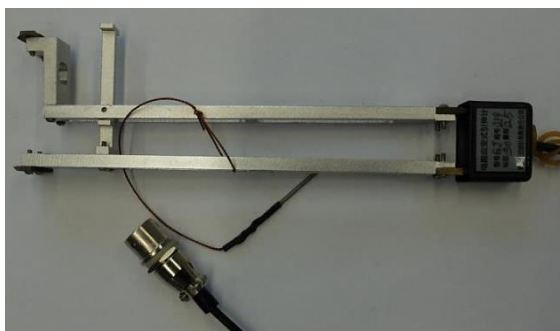


Figura 70 Estensimetro meccanico utilizzato durante i test

La prova di trazione è un test importante per caratterizzare le proprietà meccaniche di un materiale. Lo strumento più utilizzato per valutare le deformazioni è l'estensimetro meccanico a contatto (extensometer)

che fornisce la deformazione media sul tratto utile del provino; l'efficacia dell'acquisizione termina una volta che il materiale arriva nella zona di necking (strizione). L'estensimetro è composto da due coltelli disposti su un'incastellatura a una distanza di lunghezza che è la base di misura dello strumento. L'elongazione del provino è determinata dallo spostamento del coltello mobile rispetto a quello fisso. È presente anche un trasduttore di misura in grado di convertire lo spostamento tra i coltelli in un segnale di tensione amplificato.

L'estensimetro meccanico agisce come una scatola nera: restituisce la deformazione media ignorando lo stato tensionale locale presente in ogni punto del provino. In caso di deformazione uniforme è sufficiente acquisire la deformazione media nel tratto utile, questa risulta essere una condizione limitata rispettabile solo in assenza di necking.

In figura 69 l'estensimetro meccanico utilizzato durante l'esecuzione delle prove monotone di questo studio.

Calibro digitale

È stato utilizzato un calibro digitale professionale a corsoio specifico per misurazioni di precisione fino a 150 mm (6 pollici).

- Materiale: acciaio inox e plastica
- Lunghezza becchi: 40 mm
- Doppia misurazione in mm/pollici
- Display LCD con 5 cifre (2 decimali)
- Tolleranza Display: 0.01 mm
- Tolleranza Misurazione: 0.01 mm
- Distanza massima misurata: 150 mm
- Rotellina micrometrica



Il calibro digitale è uno strumento indispensabile per effettuare diversi tipi di misurazioni e verifiche in svariati settori applicativi. In questo studio è stato utilizzato per misura le sezioni delle piastre metalliche e dei bulloni prima e dopo l'applicazione del carico. Prima di utilizzare il calibro per la misurazione della sezione è stata allentata la vite di sicurezza e dopo l'accensione del display LCD premendo il tasto "ON" è stato selezionato il sistema di misurazione in "mm ". si chiudono dunque i becchi del calibro, esercitando una normale pressione sul corsoio, fino ad ottenere la misurazione desiderata.

Apparecchiatura fotografica

Per confrontare il meccanismo di rottura del provino con gli elaborati grafici delle curve forza-spostamento in tempo reale, e per avere una visualizzazione reale da esaminare durante un eventuale imprecisione dei risultati registrati dalla macchina di prova, sono state utilizzate diverse apparecchiature fotografiche durante l'esecuzione dei test:

- GoPro hero 8
- Fotocamera FUJIFILM x 20
- Camera smartphone Huawei P20 Pro
- Camera smartphone Huawei P10
- BSD1182 x 135W Kit di supporto per luci con illuminazione continua

7.4.2. Configurazione dei provini

Per la progettazione e fabbricazione dei provini in glubam, a causa dell'originalità della connessione ibrida e quindi della mancanza di specifiche normative sul bambù laminato in applicazioni strutturali, si è fatto riferimento alle normative in vigore sui materiali lignei. In particolare, sono state consultate e confrontate le indicazioni riportate nella norma UNI EN 1995-1-1:2005, *Progettazione delle strutture di legno*, e le specifiche cinesi applicate al caso di connessione acciaio-legno bullonate. Come già anticipato nella Matrice dei test, del paragrafo 7.3, sono state analizzate due configurazioni di provini diverse: connessioni mono bullonate e connessioni con due bulloni.

Di seguito, nelle Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74 , le configurazioni geometriche dei prototipi testati, in funzione del numero e delle dimensioni dei bulloni. Sono state adottate le stesse geometrie anche per la realizzazione dei provini in legno lamellare.

Nel paragrafo successivo sono illustrate nel dettaglio le normative per la progettazione dei singoli componenti che costituiscono il campione sperimentato.

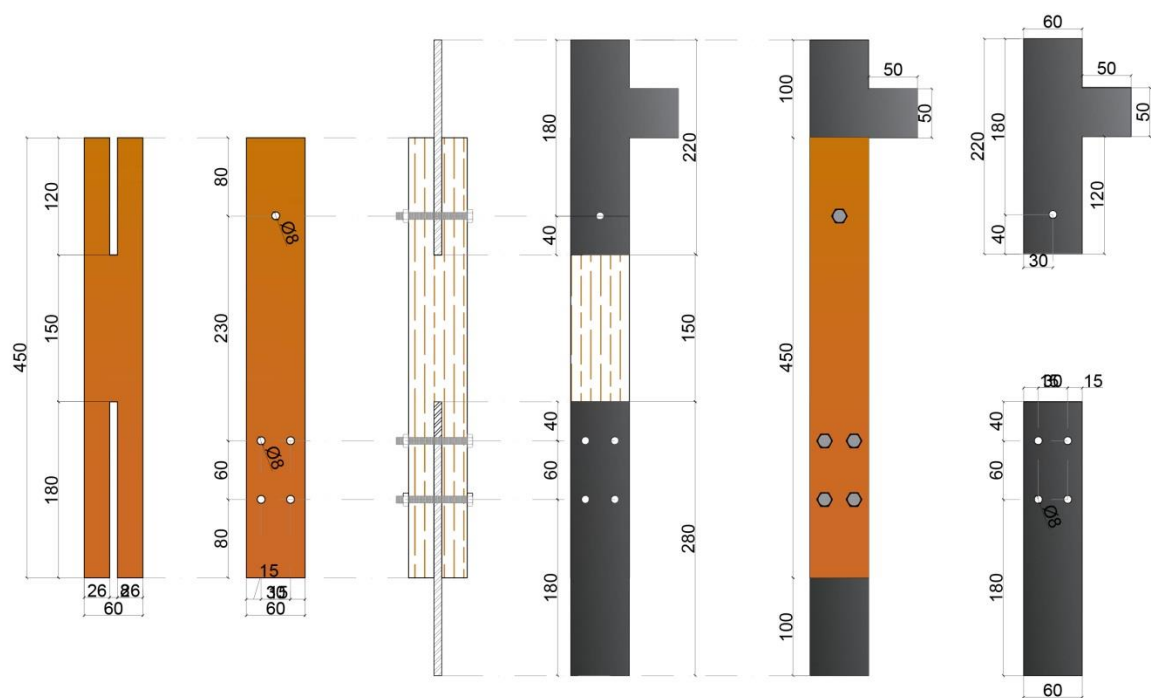


Figura 71 Configurazione geometrica del provino G_1_8.

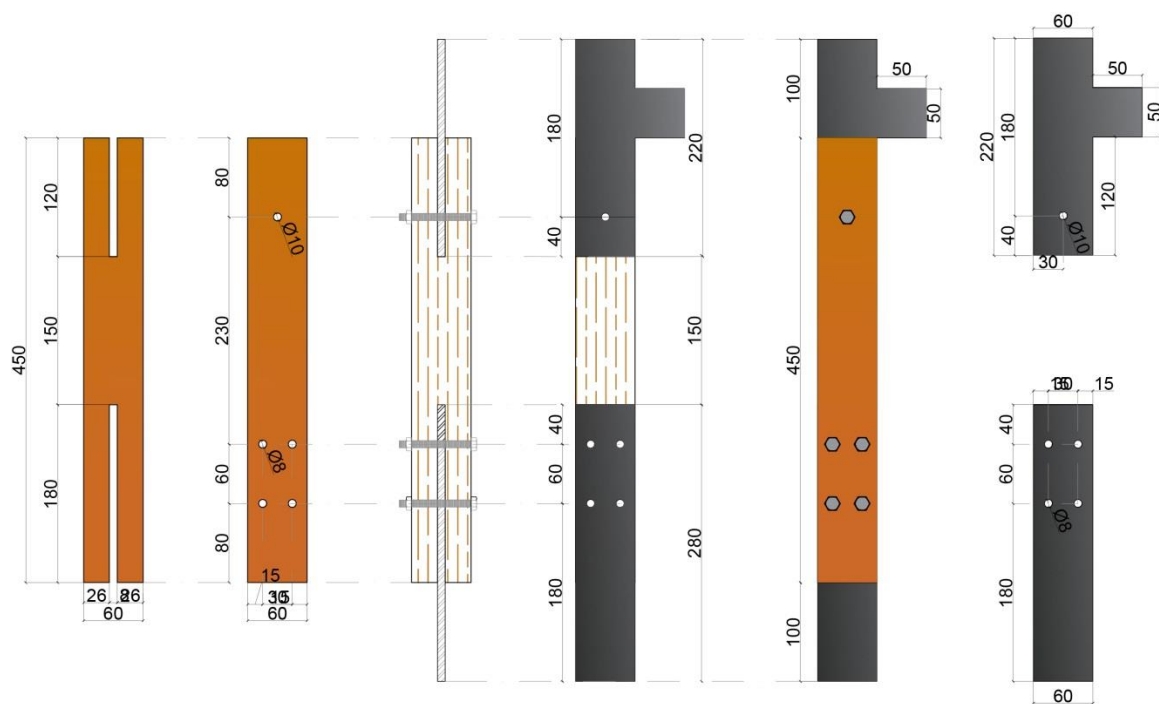


Figura 72 Configurazione geometrica del provino G_1_10.

Modalità di esecuzione della prova

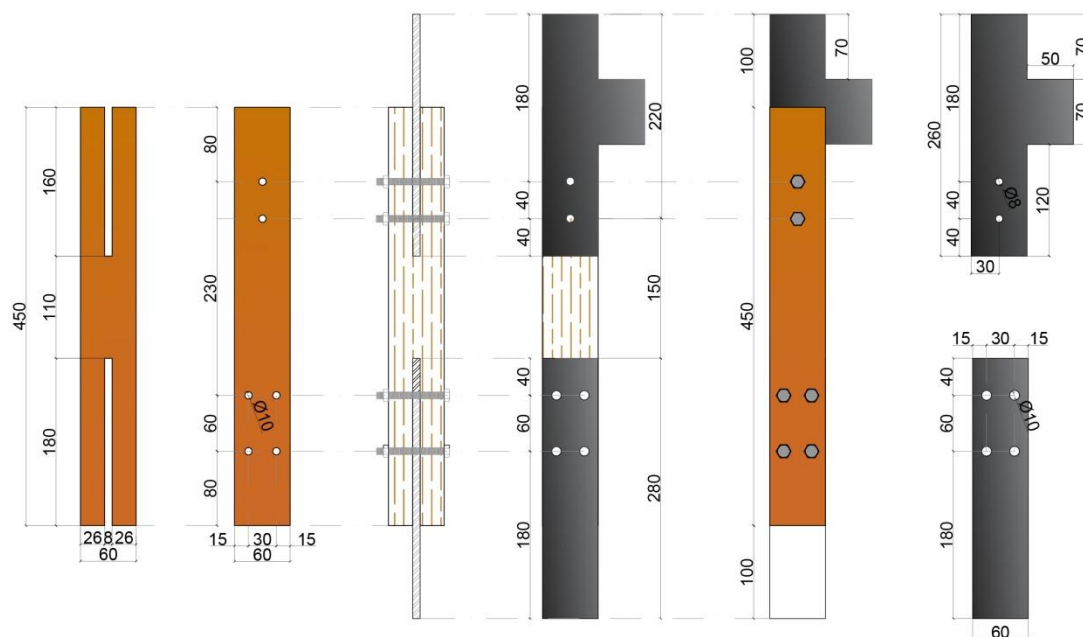


Figura 73 Configurazione geometrica del provino G_2_8.

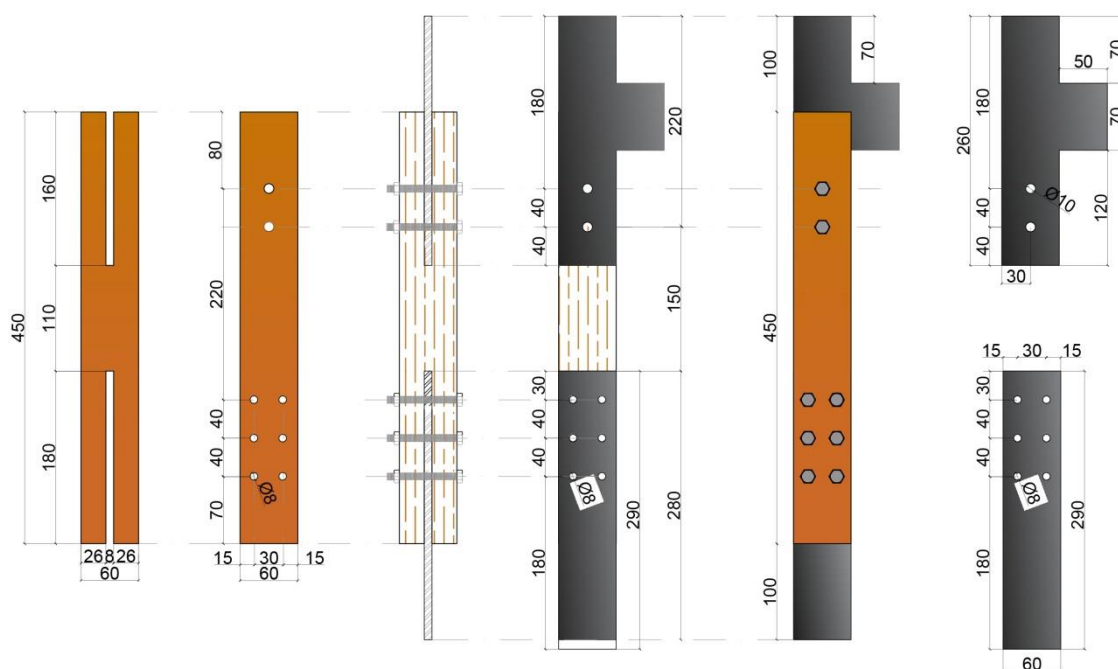


Figura 74 Configurazione geometrica del provino G_2_10.

7.4.2.1. Riferimenti normativi

La progettazione degli elementi che compongono le connessioni composite in legno-acciaio / glulam-acciaio, si è basata sulla lettura e sul confronto delle normative vigenti nel campo delle costruzioni in legno con collegamenti in legno- acciaio. di seguito i valori minimi di interassi e distanze da bordi ed estremità adottati per la definizione geometrica dei provini.

Le specifiche cinesi per la progettazione delle strutture in legno GB50005 2017 prevedono i seguenti valori minimi di interasse e distanze da bordi ed estremità da rispettare nella progettazione delle connessioni imbullonate in legno e acciaio soggette a carico di trazione parallelo alla direzione delle fibre del campione:

Tabella 20 Interasse e distanze minime dai bordi ed estremità, valori minimi per bulloni secondi la normativa cinese.

GB50005 2017				d =8 mm	Valori assunti	d =10 mm	Valori assunti
Distanza dall'estremità	e₁	min	7d	56	80	70	80
Passo lungo l'asse //F	s	min	4d	32	40	40	40
Distanza dal bordo	e₂	min	1.5d	12	30	15	30
Passo lungo l'asse ⊥F	r	min	2d	16	-	20	-

La Figura 75 è raffigurata una copia della normativa cinese GB50005 2017.

6.2.1 销轴类紧固件的端距、边距、间距和行距最小尺寸应符合表 6.2.1 的规定。当采用螺栓、销或六角头木螺钉作为紧固件时，其直径不应小于 6mm。

表 6.2.1 销轴类紧固件的端距、边距、间距和行距的最小值尺寸

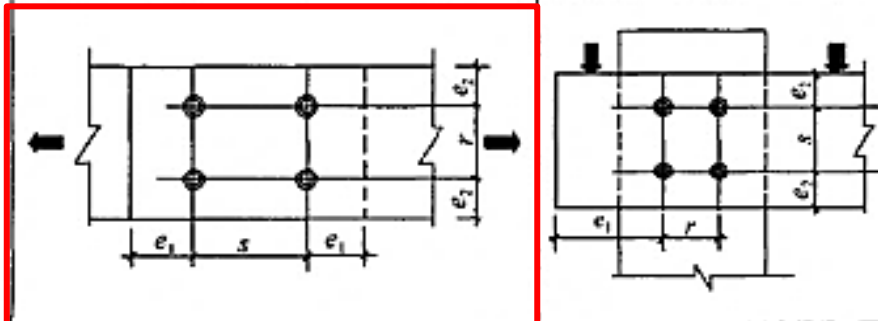
距离名称	顺纹荷载作用时		横纹荷载作用时	
最小端距 e_1	受力端	$7d$	受力边	$4d$
	非受力端	$4d$	非受力边	$1.5d$
最小边距 e_2	当 $l/d \leq 6$	$1.5d$	$4d$	
	当 $l/d > 6$	取 $1.5d$ 与 $r/2$ 两者较大值		
最小间距 s	$4d$		$4d$	
最小行距 r	$2d$		当 $l/d \leq 2$	$2.5d$
			当 $2 < l/d < 6$	$(5l + 10d)/8$
			当 $l/d \geq 6$	$5d$
几何位置示意图				

Figura 75 normativa cinese GB50005 2017 originale.

Nella seguente tabella sono forniti i valori minimi di interassi e distanze da bordi ed estremità secondo le istruzioni per la progettazione Istruzioni CNR-DT 206/2006 , mentre la simbologia è esplicitata nella Figura 75.

Tabella 21 Interasse e distanze da bordi ed estremità, valori minimi per bulloni (Istruzioni CNR-DT 206/2006 par. B 7.8.5.1.1).

Interasse o distanza (figg. 3.21)	Angolo α fra forza e direzione della fibratura	Interasse e distanze da bordi ed estremità, valori minimi
a_1 (parallelo alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + 3 \lfloor \cos \alpha \rfloor) d$
a_2 (ortogonale alla fibratura)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$4d$
$a_{3,f}$ (estremità sollecitata)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max \begin{cases} 7d \\ 80\text{mm} \end{cases}$
$a_{3,c}$ (estremità scarica)	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	$\max \begin{cases} (1 + 6 \sin \alpha) d \\ 4d \end{cases}$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	$\max \begin{cases} (1 + 6 \lfloor \sin \alpha \rfloor) d \\ 4d \end{cases}$
$a_{4,f}$ (bordo sollecitato)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$\max \begin{cases} (2 + 2 \sin \alpha) d \\ 3d \end{cases}$
$a_{4,c}$ (bordo scarico)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

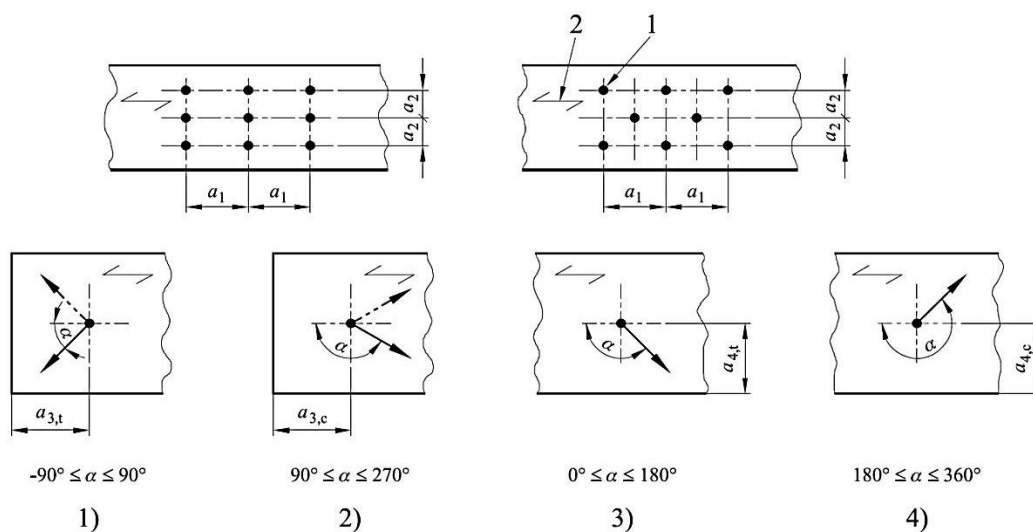


Figura 76 Spaziature e distanze minime (Istruzioni CNR-DT 206/2006 par. B 7.8.3.1.2).

Dove

Modalità di esecuzione della prova

a_1 è la spaziatura fra i chiodi di una fila, parallelamente alla fibratura;
 a_2 è la spaziatura fra le file di chiodi, perpendicolarmente alla fibratura;
 $a_{3,c}$ è la distanza fra chiodo ed estremità scarica;
 $a_{3,t}$ è la distanza fra chiodo ed estremità sollecitata;
 $a_{4,c}$ è la distanza fra chiodo e bordo scarico;
 $a_{4,t}$ è la distanza fra chiodo e bordo sollecitato;

- 1) Estremità sollecitata
- 2) Estremità scarica
- 3) Bordo sollecitato
- 4) Bordo scarico
- 1 Mezzo di unione
- 2 Direzione della fibratura

7.5. Modalità di esecuzione della prova

Dopo aver definito il numero di prove necessarie per valutare il comportamento strutturale delle connessioni sotto carico statico di trazione, è stato redatto un protocollo di prova da compilare direttamente in laboratorio, prima, durante e al termine dell'esecuzione di ogni prova.

Un esempio di protocollo di prova è riportato nell'allegato 1.2

L'installazione del provino e dei vari rilevatori di spostamento nella macchina di prova hanno una grande influenza sui risultati dei test.

Il protocollo di prova oltre a memorizzare in tempo reale qualsiasi avvenimento durante il test, funge da guida per la corretta modalità di installazione ed esecuzione della prova, dettando le fasi da rispettare.

Il campione è stato posizionato in modo stabile nella macchina di prova mediante due accessori di presa. L'asse del campione deve essere allineato con il centro delle teste superiore ed inferiore della macchina di prova. L'estremità superiore è la giunzione testata a trazione del campione mentre, l'estremità inferiore è l'estremità fissa.

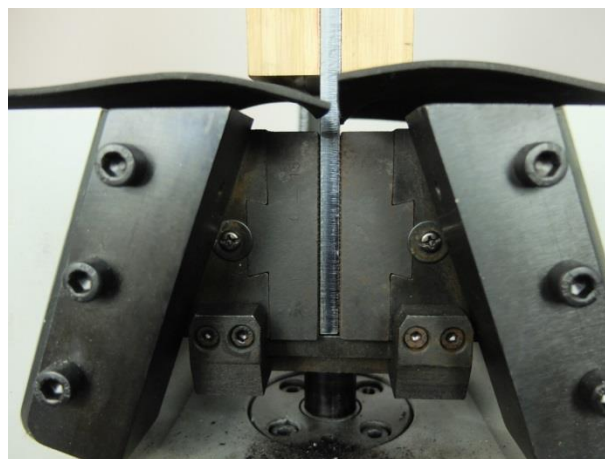


Figura 77 Corretto posizionamento dell'installazione del provino

Modalità di esecuzione della prova

Il test è stato condotto in conformità alla norma ASTM D5652-95 (69). L'attrezzatura di carico consiste in una macchina di prova universale per pannelli a base di legno, con una capacità di carico massima di 200 kN Figura 65. Durante la prova, lo spostamento locale della connessione, in funzione del carico era costantemente monitorato da un dispositivo elettronico installato su tutti i provini, in prossimità dell'estremità superiore della piastra in acciaio Figura 77.



Figura 78 Posizionamento del dispositivo di spostamento elettronico

Le piastre sono state appositamente progettate con aletta laterale sporgente di una misura sufficiente per l'applicazione del rilevatore di spostamento locale in acciaio. Sono state, inoltre, incollate due supporti per garantire la stabilità del dispositivo.

I due monitor collegati contemporaneamente alla macchina di prova e al dispositivo elettronico, registravano uno lo spostamento generale della macchina in relazione alla forza di trazione applicata dalla cella di carico, l'altro il cedimento locale della connessione superiore.

Affinché si avesse corrispondenza tra i vari dati di output, la macchina, il rilevatore locale ed i video delle tre viste del provino in corrispondenza della connessione superiore, venivano attivati nello stesso istante.

Sono state dunque effettuate un totale di 24 prove monotone a temperatura costante, con lo scopo di determinare le caratteristiche di resistenza a trazione del bambù ingegnerizzato per sforzo assiale positivo parallelo alle fibre dello stesso. Il carico è stato applicato con una velocità di caricamento costante pari a 2 mm/min fino a provocare la rottura del provino. Velocità tale da assicurare che il tempo di caricamento prima di raggiungere il cedimento non fosse inferiore a 5 minuti e non superiore a 20 minuti. I dati di prova e le relative informazioni sono state completamente conservati grazie al sistema di controllo e di registrazione del computer della macchina di prova. Sulla base dei dati output di forza e spostamento è stata creata una rappresentazione grafica ovvero i grafici Forza- spostamento, per la lettura e la comparazione diretta con i risultati teorici.

Le analisi dei dati e dei grafici di forza-spostamento risultanti, saranno riportati e discussi nel capitolo successivo.

Di seguito, sono visualizzate le schede di Prova dei test effettuati sulle connessioni in glubam ed in legno.

Per i provini in glubam sono presentate tutte le schede delle singole prove, ovvero per ogni configurazione di prototipo sono visualizzate le tre prove, ad esempio per il prototipo G_{18} saranno presentati i test G_{18A} , G_{18B} ,

Modalità di esecuzione della prova

G_{I_8C} . Mentre per le connessioni in legno, si è scelto di mostrare una scheda di prova per ogni prototipo.

Si ricorda inoltre, che la denominazione G_{XY} si riferisce alle connessioni in glulam, mentre T_{XY} a quelle in legno lamellare.

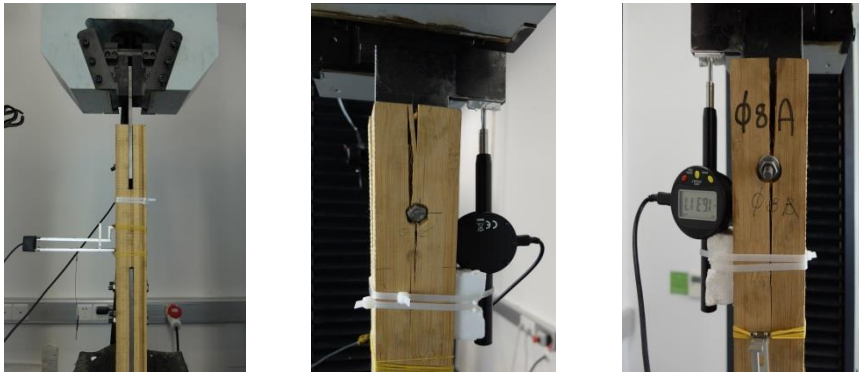
7.6. Schede di prova

Test **G_1_8_A**

Test setup
before loading



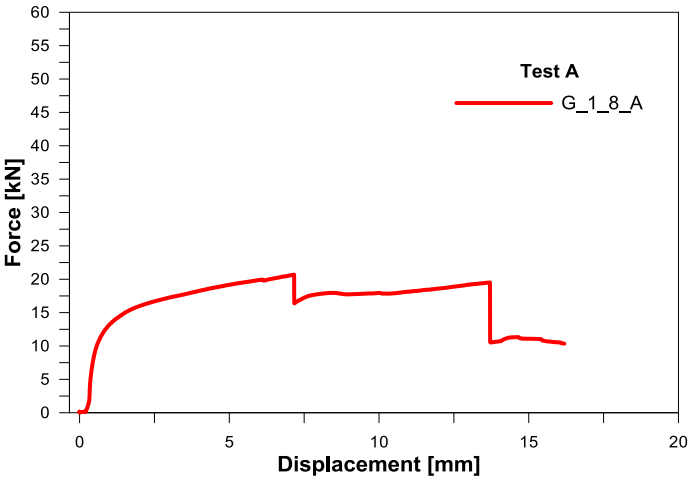
Test configuration
after loading



Analysis of results

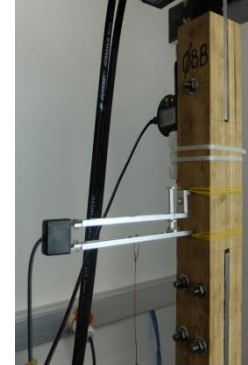
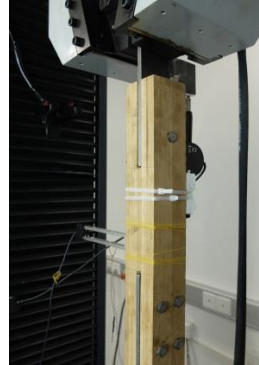
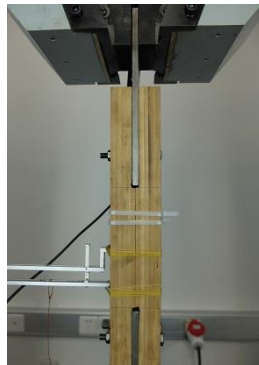


Data analysis

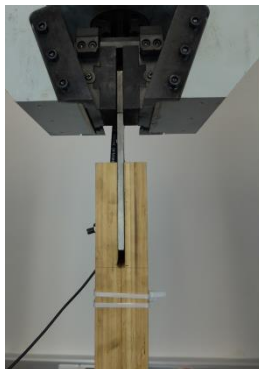


Test G_1_8_B

Test setup
before loading



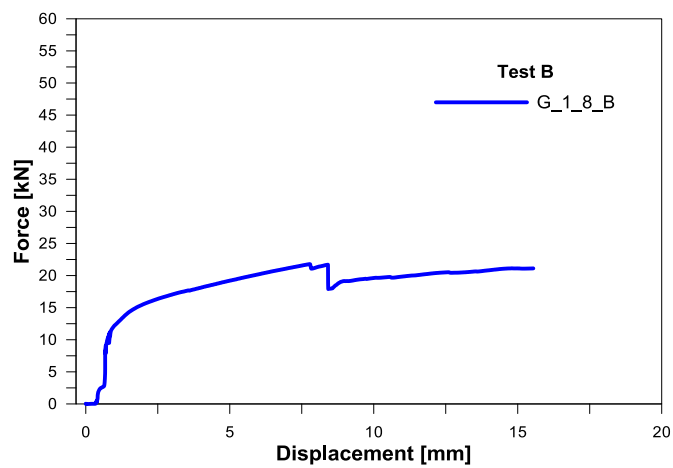
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis



Test **G_1_8_C**

Test setup
before loading



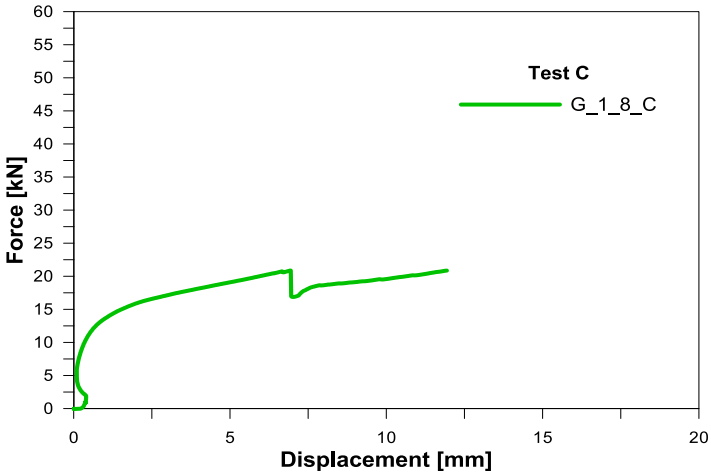
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

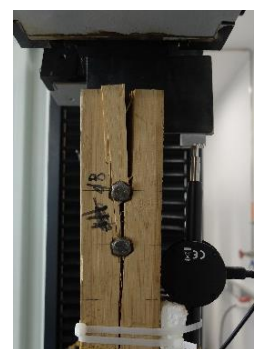
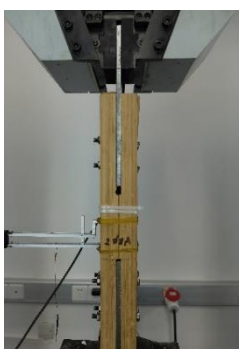


Test G_2_8_A

Test setup
before loading



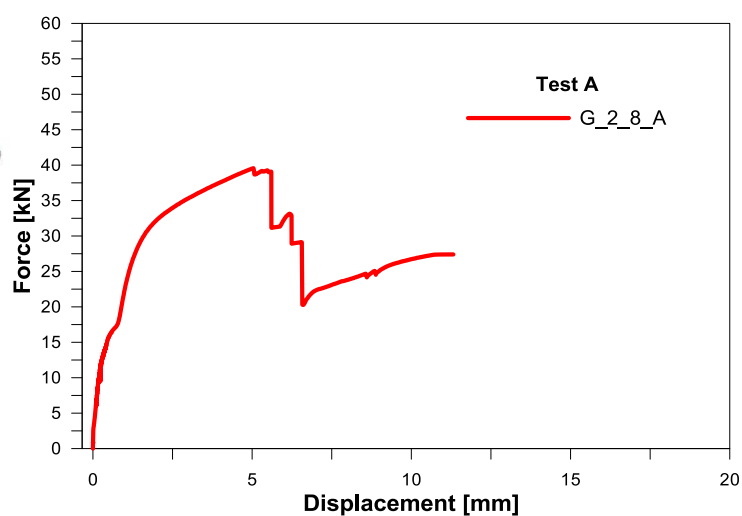
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

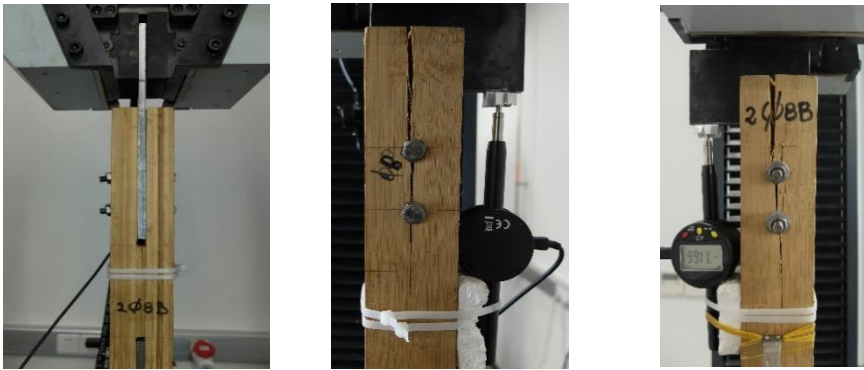


Test **G_2_8_B**

Test setup
before loading



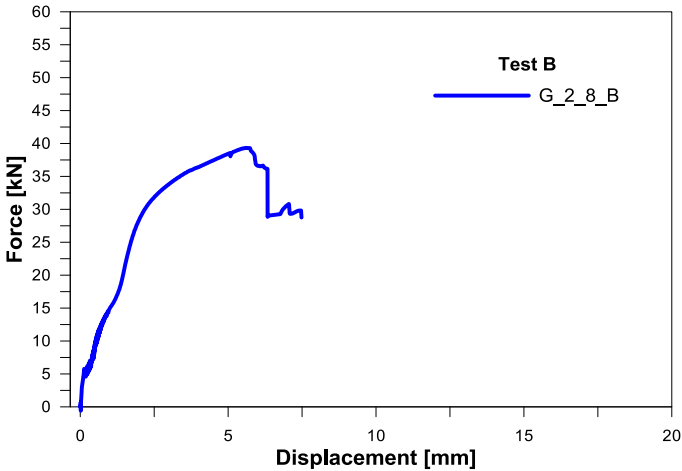
Test configuration
after loading



Analysis of results

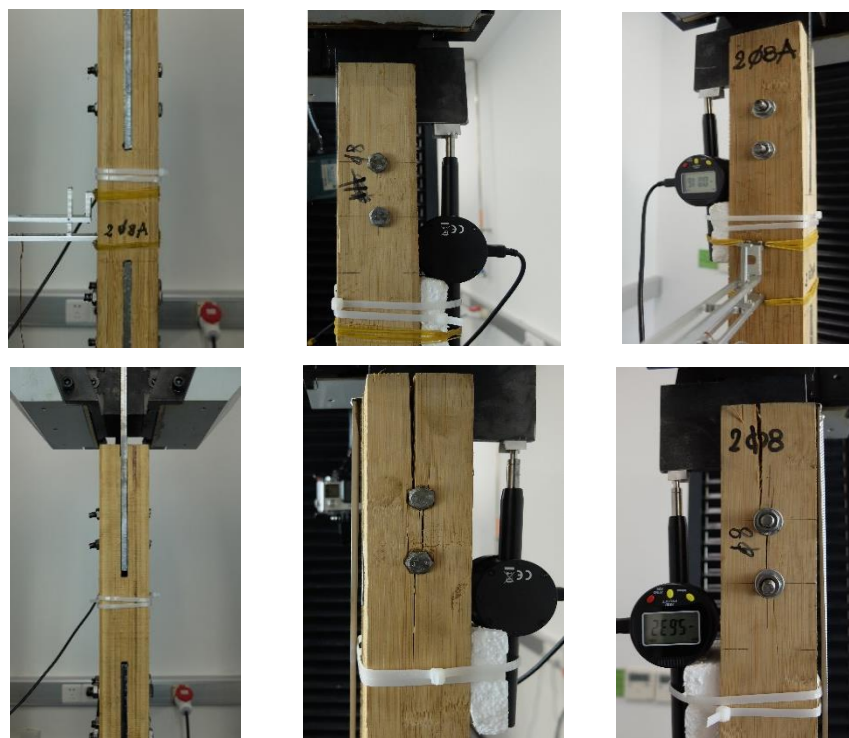


Data analysis



Test G_2_8_C

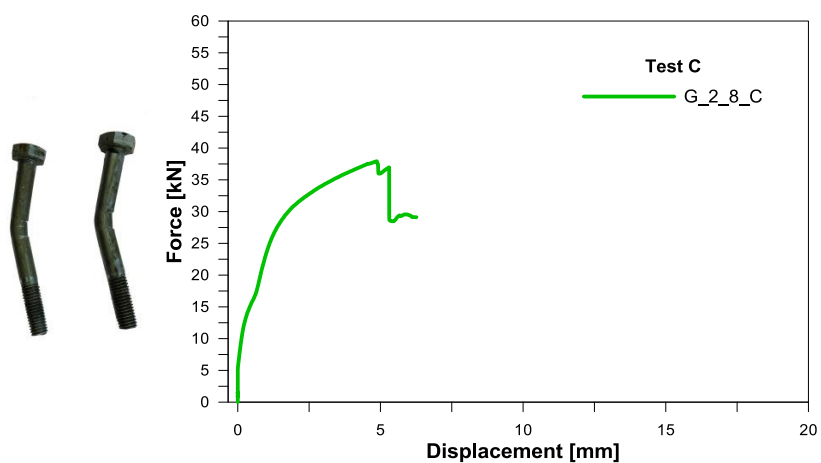
Test configuration
after loading



Analysis of results

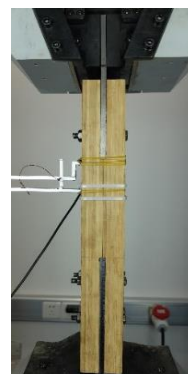


Data analysis



Test G_1_10_A

Test setup
before loading



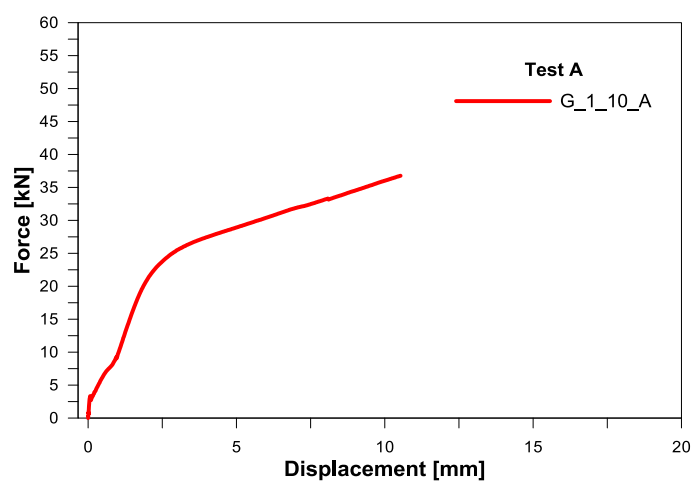
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

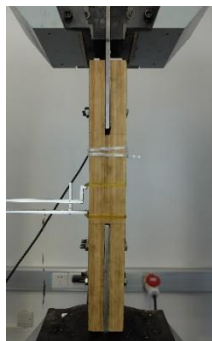


Test G_1_10_B

Test setup
before loading



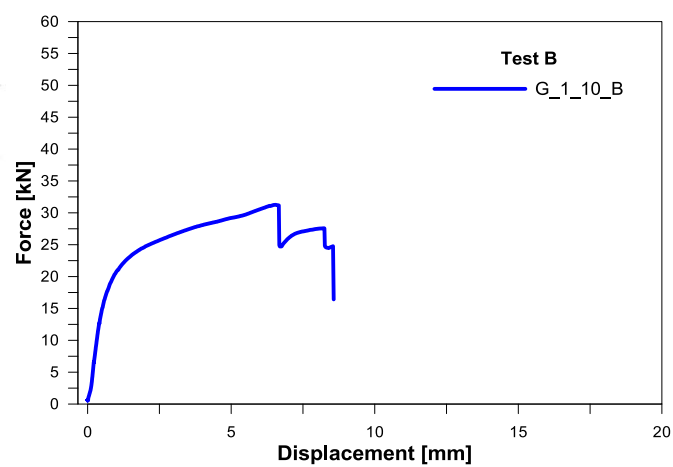
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

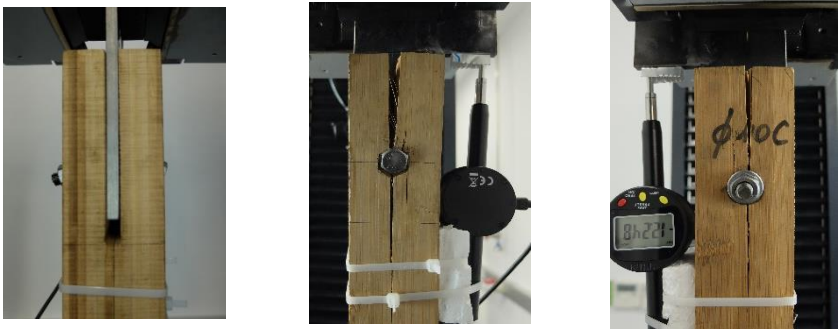


Test **G_1_10_C**

Test setup
before loading



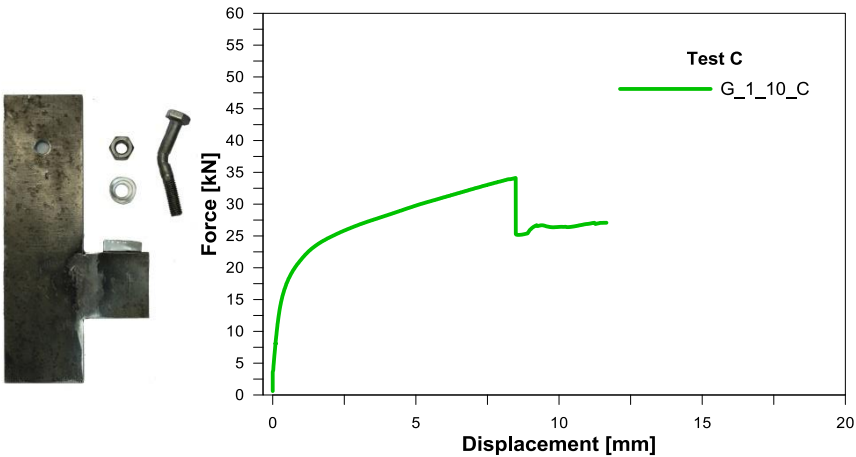
Test configuration
after loading



Analysis of results

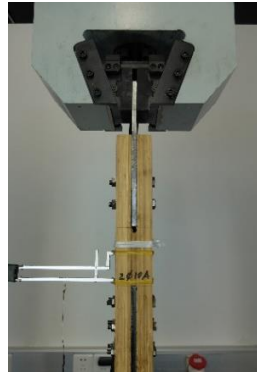


Data analysis

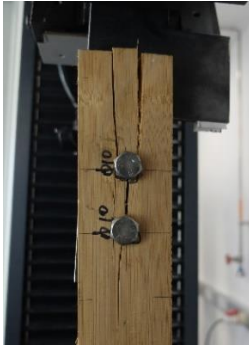


Test G_2_10_A

Test setup
before loading



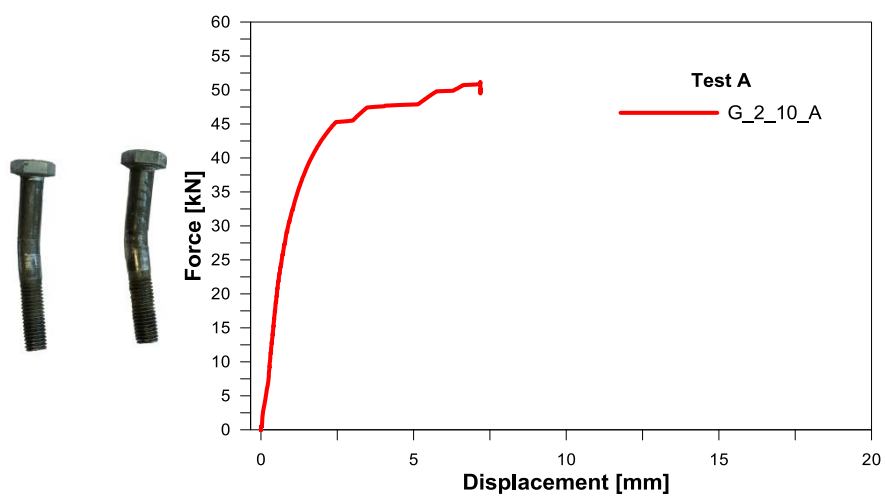
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

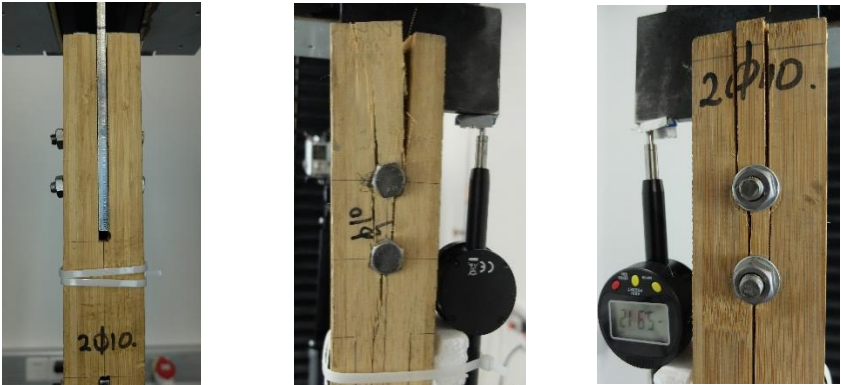


Test G_2_10_B

Test setup
before loading



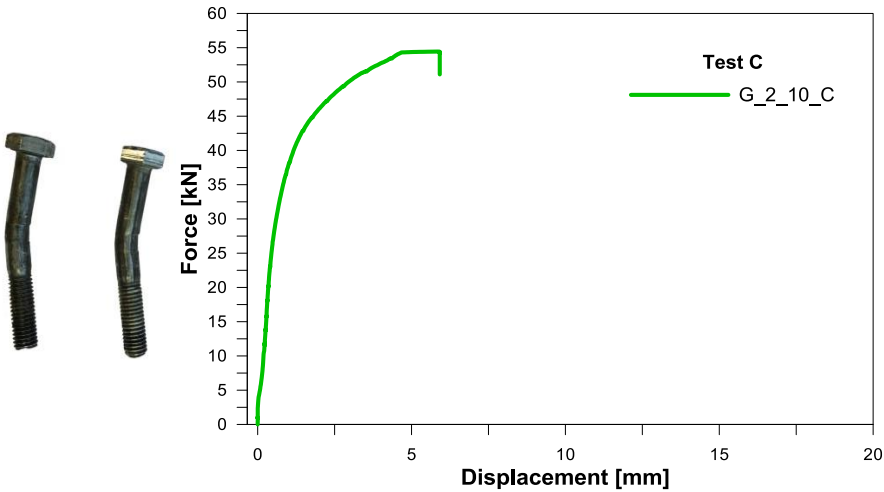
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis

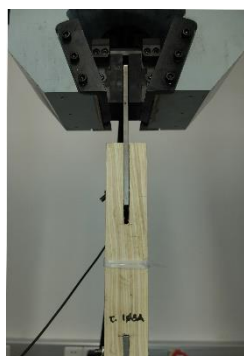


Test T_1_8

Test setup
before loading



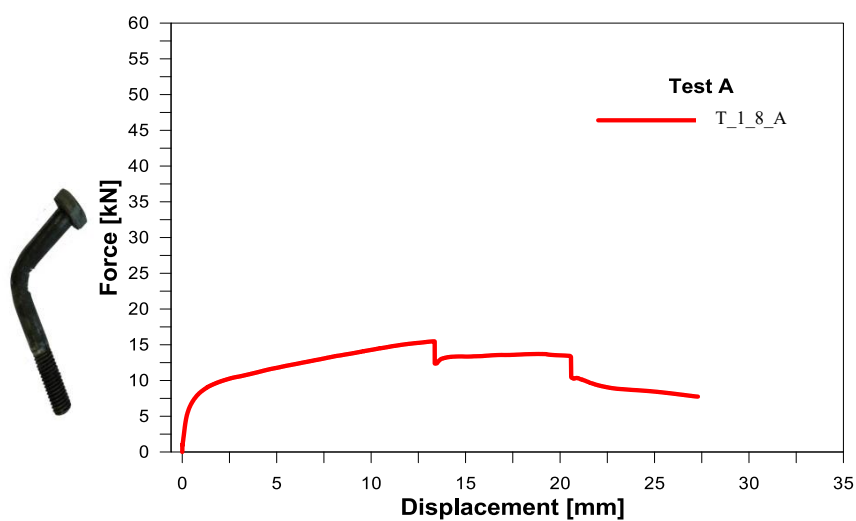
Test configuration
after loading



Analysis of results

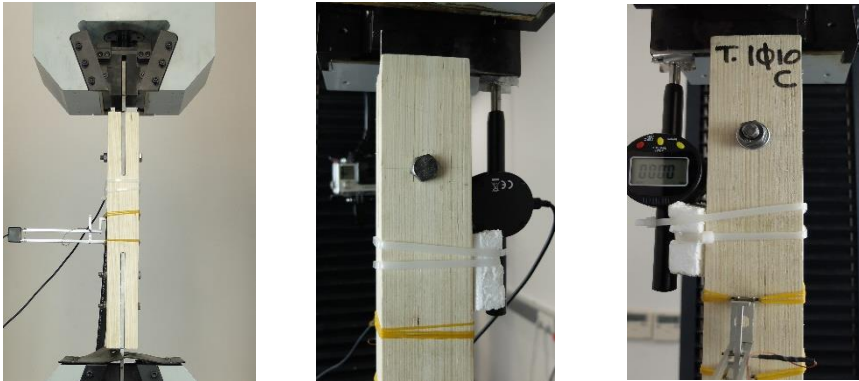


Data analysis

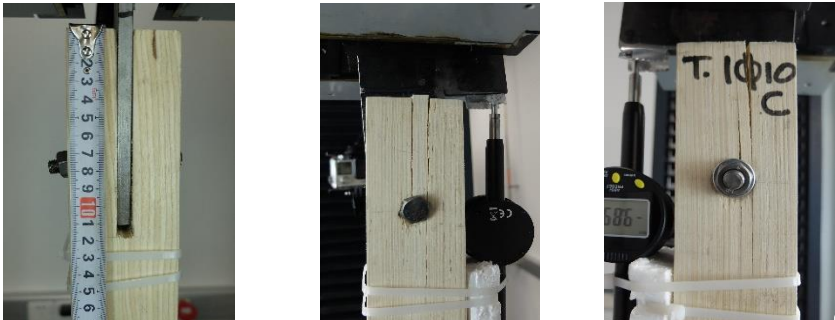


Test **T_1_10**

Test setup
before loading



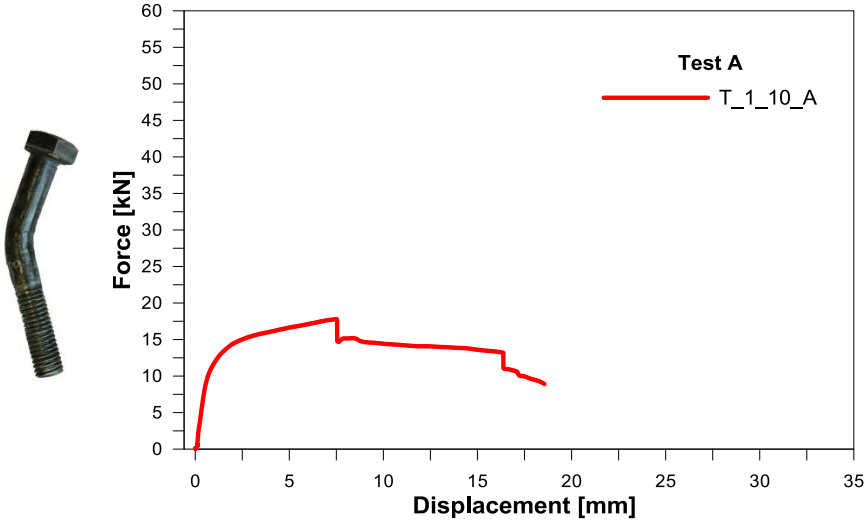
Test configuration
after loading



Analysis of results

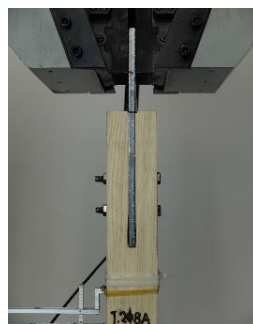


Data analysis



Test T_2_8

Test setup
before loading



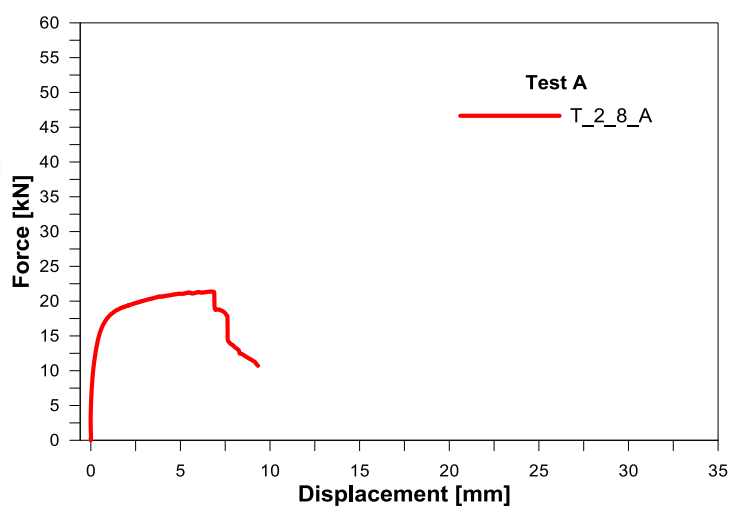
Test configuration
after loading



Analysis of results

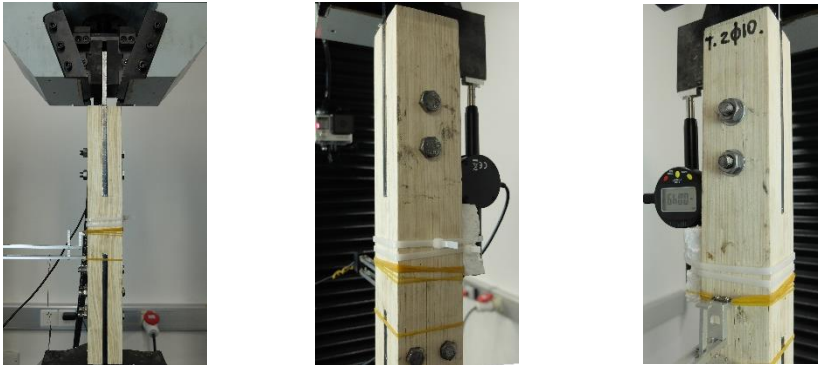


Data analysis



Test T_2_10

Test setup
before loading



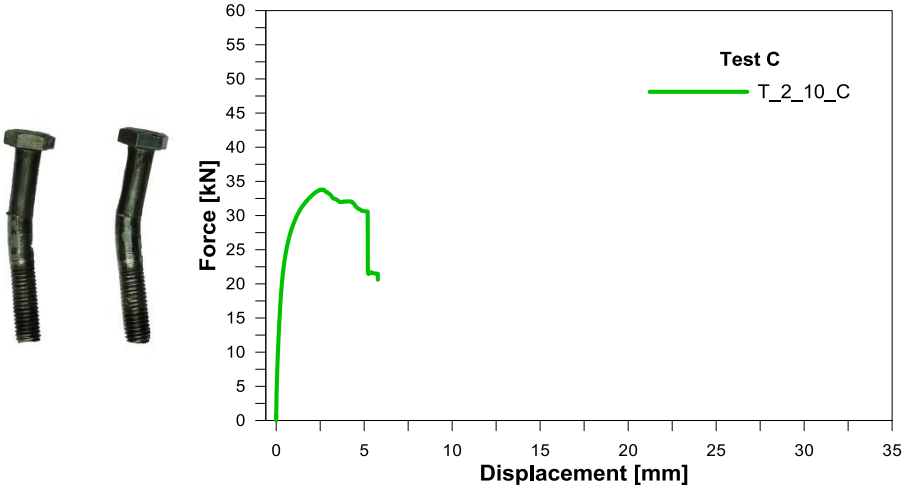
Test configuration
after loading



Analysis of results



Data analysis



8. Analisi dei Risultati Sperimentali

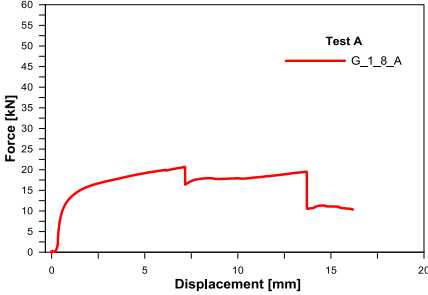
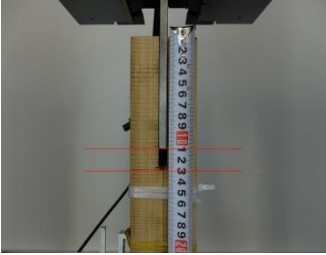
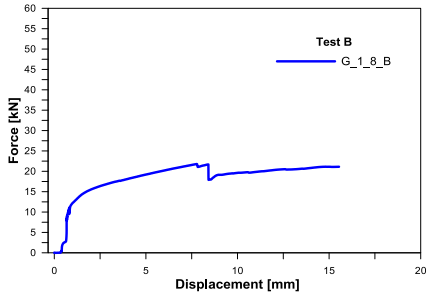
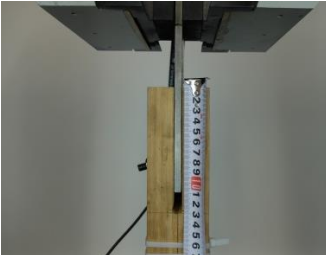
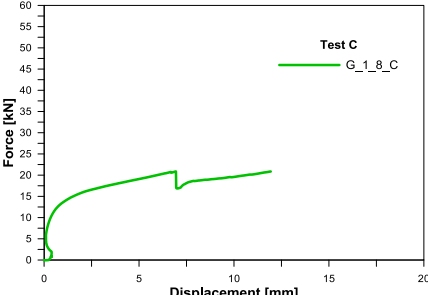
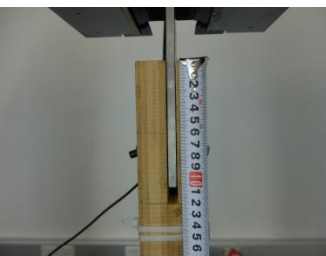
Come già enunciato, la prova di trazione consiste nel sottoporre il provino della connessione ad un carico gradualmente crescente fino a provocarne la rottura. A causa dello sforzo di trazione, il campione esaminato subisce una deformazione, che verrà misurata dopo la rottura grazie ai dati forniti dalla macchina. La prova è effettuata per individuare le caratteristiche di resistenza, deformabilità ed elasticità del materiale in bambù ingegnerizzato, *glubam*. Tali elementi sono individuabili in un diagramma, detto “diagramma Forza-spostamento”.

In questo capitolo, verranno mostrate le scoperte strutturali del bambù laminato confrontate alle caratteristiche meccaniche delle strutture in legno lamellare, già note. Più specificatamente il comportamento meccanico delle connessioni ibride in *glubam*-acciaio sottoposto a trazione sarà illustrato nei paragrafi successivi.

La risposta meccanica delle connessioni sarà basata sulle diverse tipologie di configurazioni in relazione al diametro ed al numero dei bulloni.

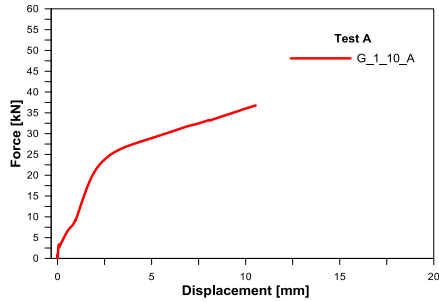
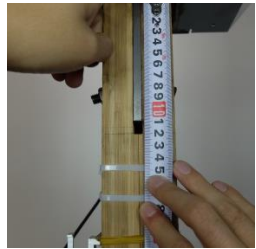
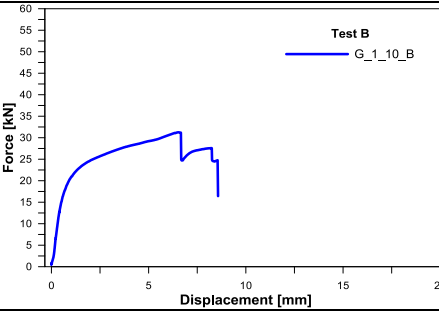
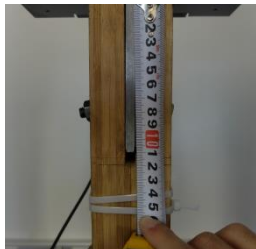
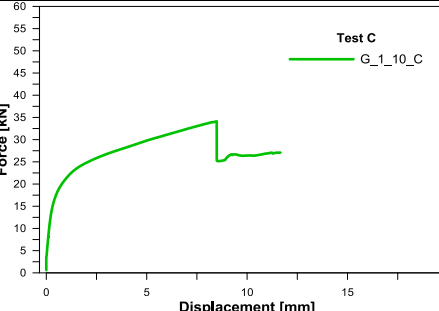
Oltre al confronto, dei diagrammi forza - spostamento delle prove effettuate su campioni in *glubam* con quelle del legno, saranno illustrate le deformazioni dei bulloni in funzione della tipologia di connessione analizzata e in relazione allo spostamento della stessa.

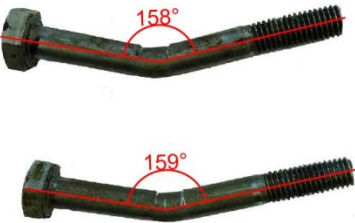
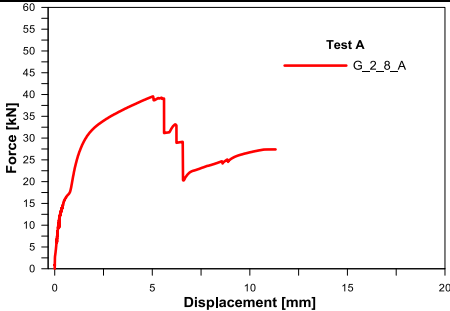
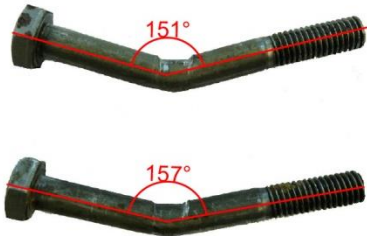
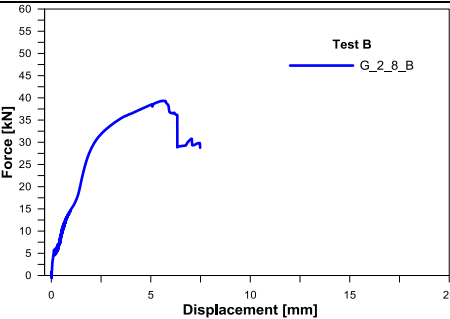
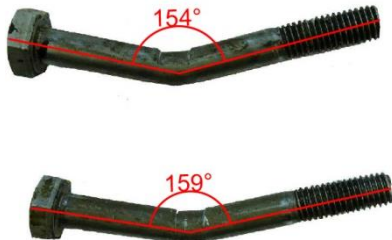
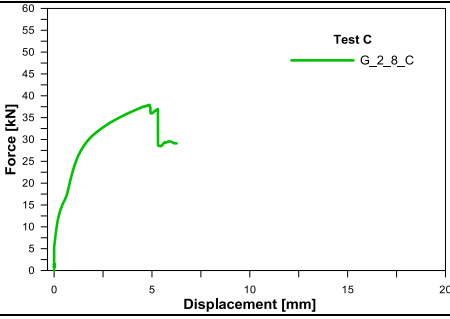
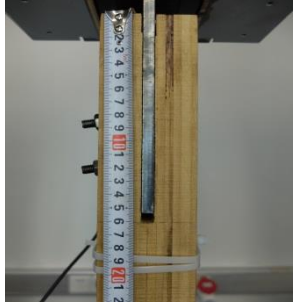
8.1. Risultati delle prove di trazione effettuati sui campioni in glubam

G_1_8	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				20,70	6,91	16,19
B				21,79	8,22	15,54
C				20,86	7,33	11,93

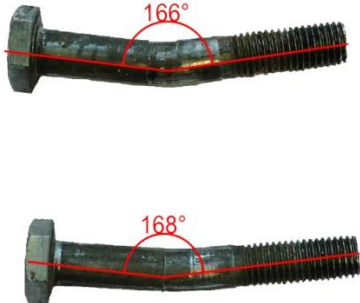
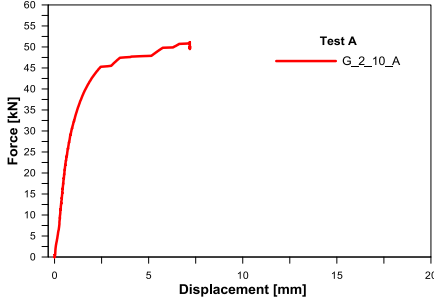
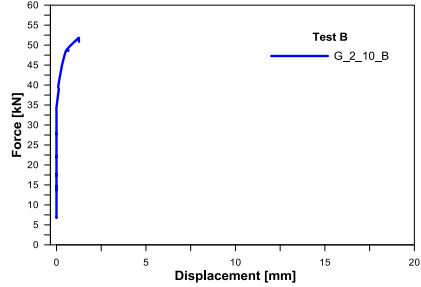
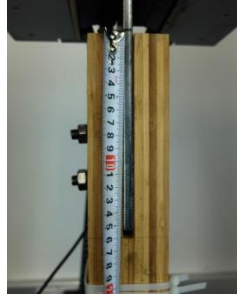
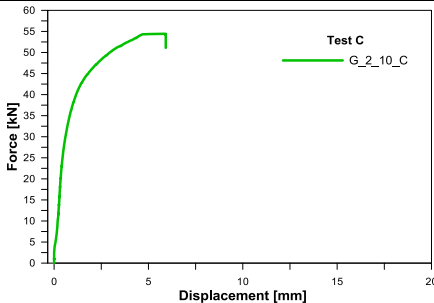
Dove F_{max} è la forza di carico massimo applicata dalla macchina, s rappresenta lo spostamento locale in corrispondenza della F_{max} , S_{max} è lo spostamento massimo della connessione prima di giungere a rottura.

ANALISI DEI RISULTATI

G_1_10	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				36,76	10,53	10,53
B				31,26	7,20	8,60
C				34,12	8,20	11,65

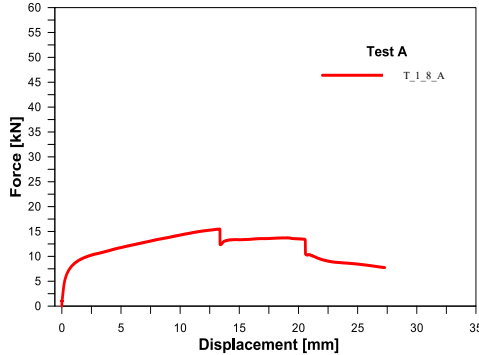
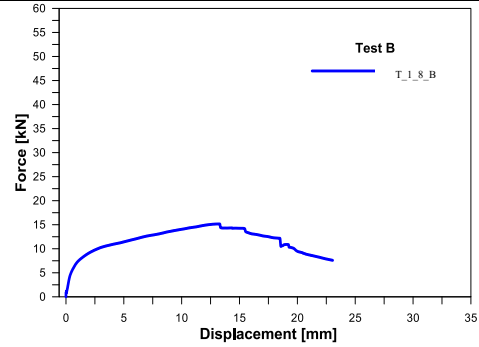
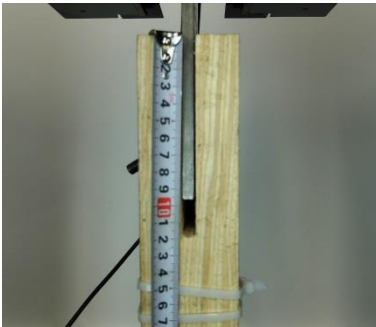
G_2_8	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				39,56	5,10	11.32
B				39,33	6,52	7.48
C				37,93	4,63	6,26

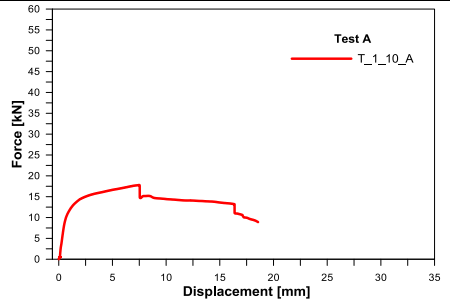
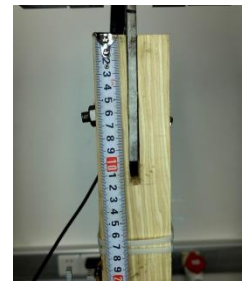
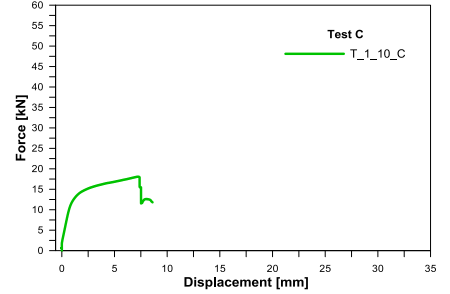
ANALISI DEI RISULTATI

G_2_10	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				51,13	7,20	7,20
B				51,85	1,25	1,25
C				54,53	5,92	5,92

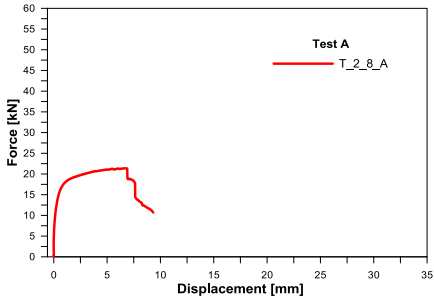
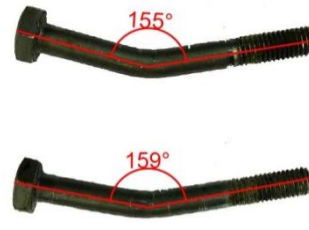
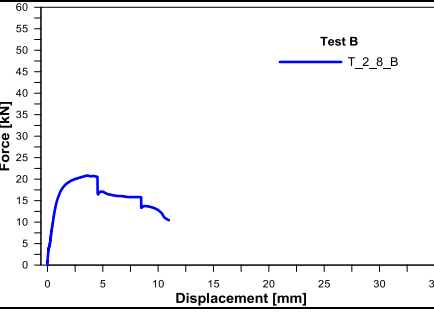
8.2. Risultati delle prove di trazione effettuati sui campioni in legno lamellare

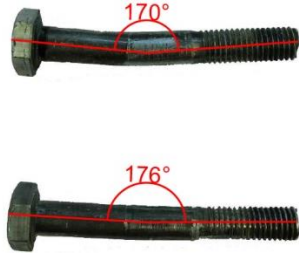
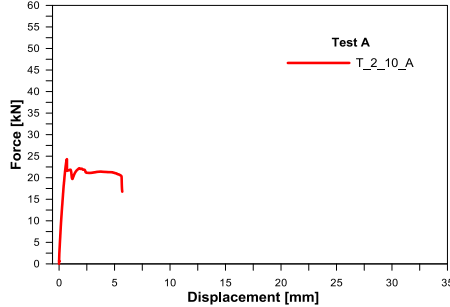
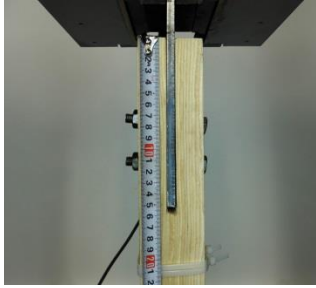
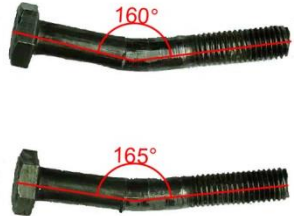
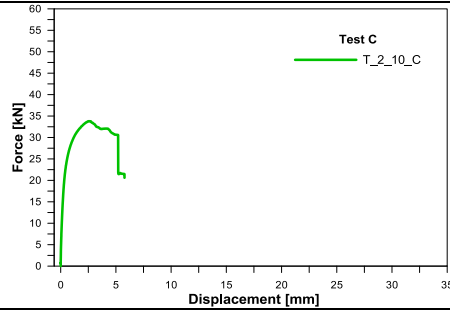
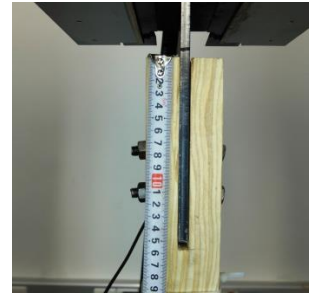
ANALISI DEI RISULTATI

T_1_8	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A	 A 115°	 Test A T_1_8_A		15,50	13,10	29,29
B	 B 116°	 Test B T_1_8_B		15,16	12,71	23,05

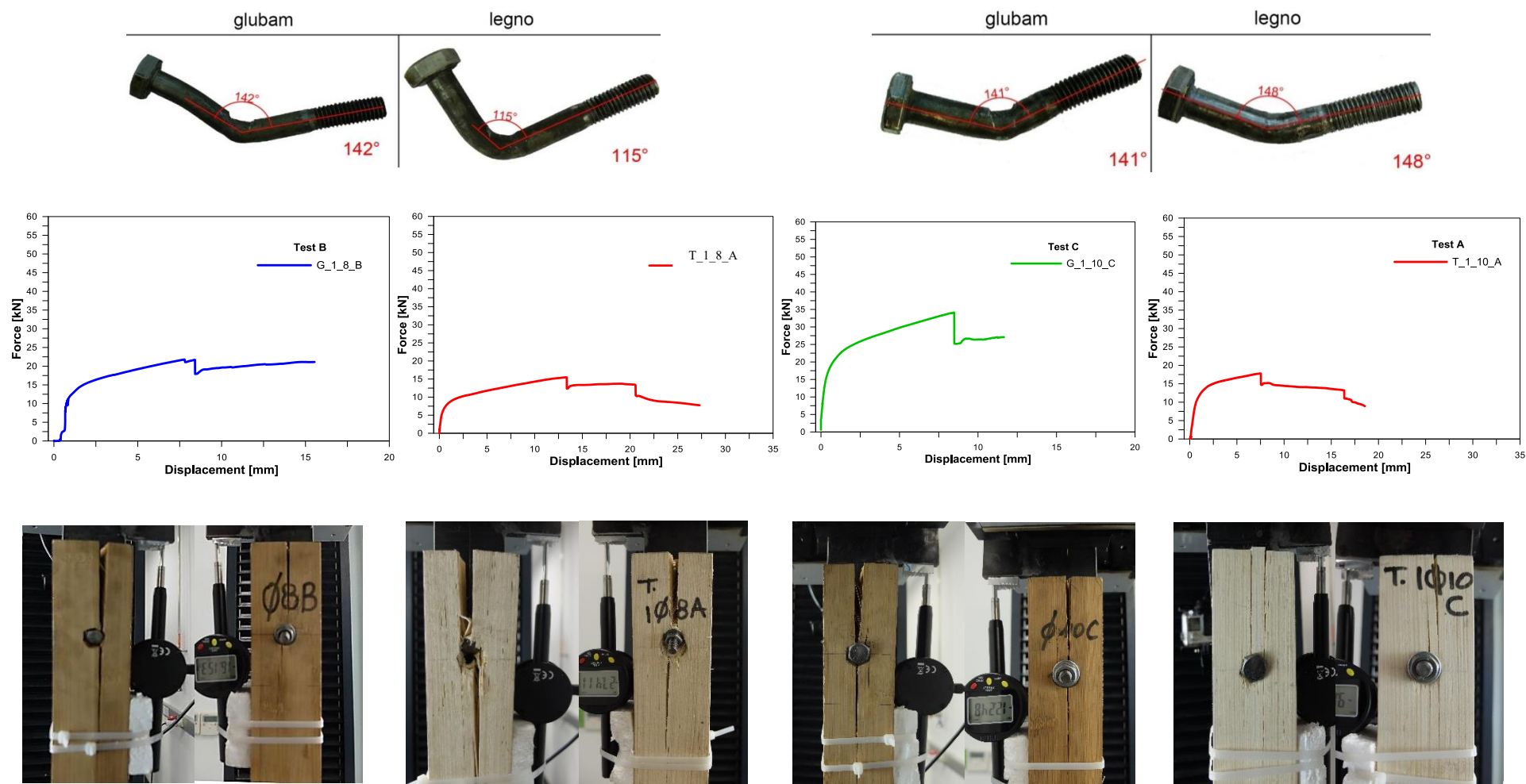
T_1_10	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				17,80	7,49	18,56
B				18,07	7,47	8,60

ANALISI DEI RISULTATI

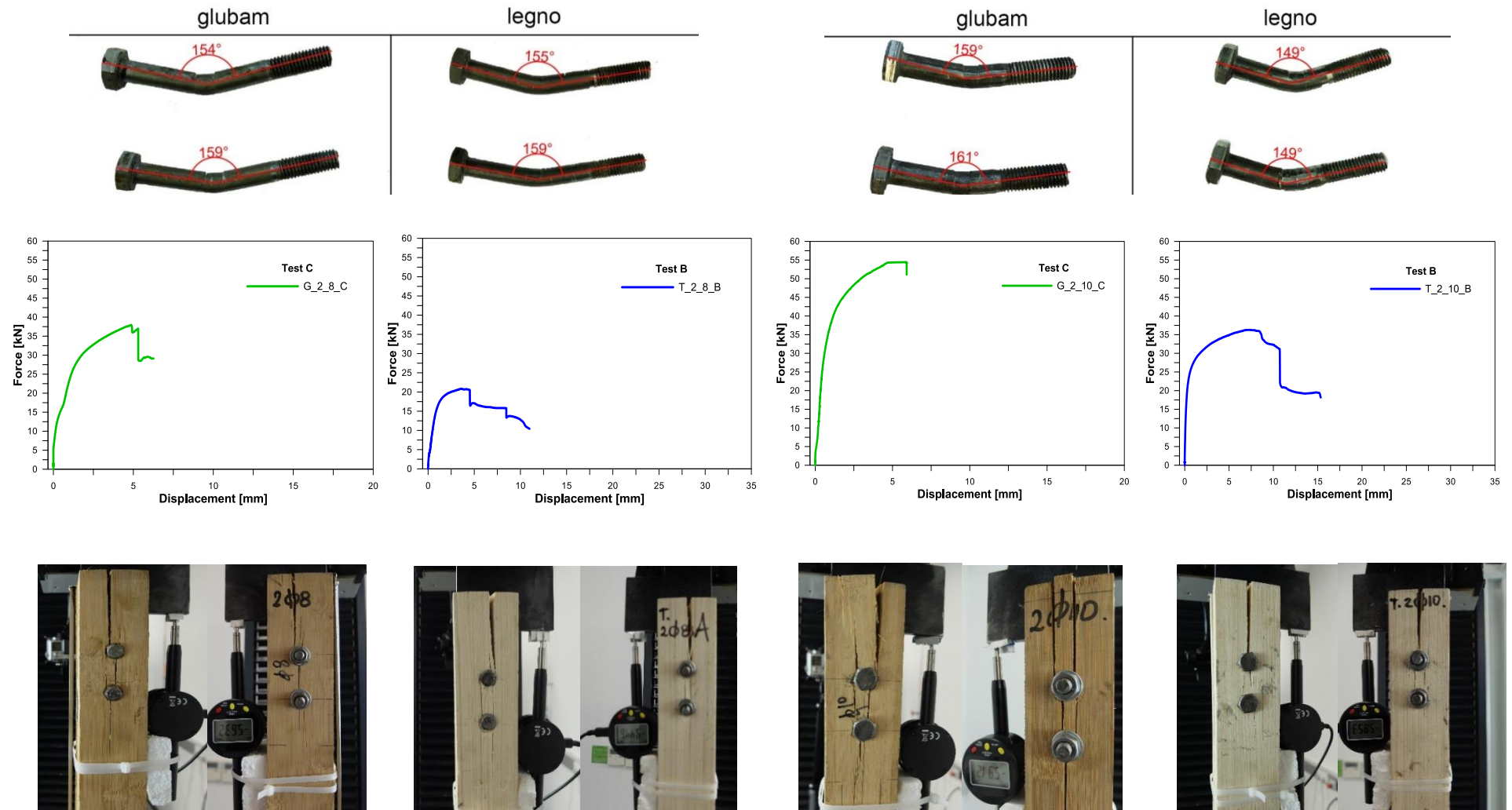
T_2_8	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				21,36	7,20	9,32
B				20,83	5,02	10,97

T_2_10	ANALISI DEI BULLONI	DIAGRAMMA FORZA-SPOSTAMENTO	PROVINO DOPO LA ROTTURA	F max [kN]	s [mm]	S max [mm]
A				24,32	1,02	5,69
B				33,8	2,80	5,77

8.3. Confronti tra le diverse configurazioni sperimentate



ANALISI DEI RISULTATI



8.4. Analisi dei bulloni

ANALISI DEI RISULTATI

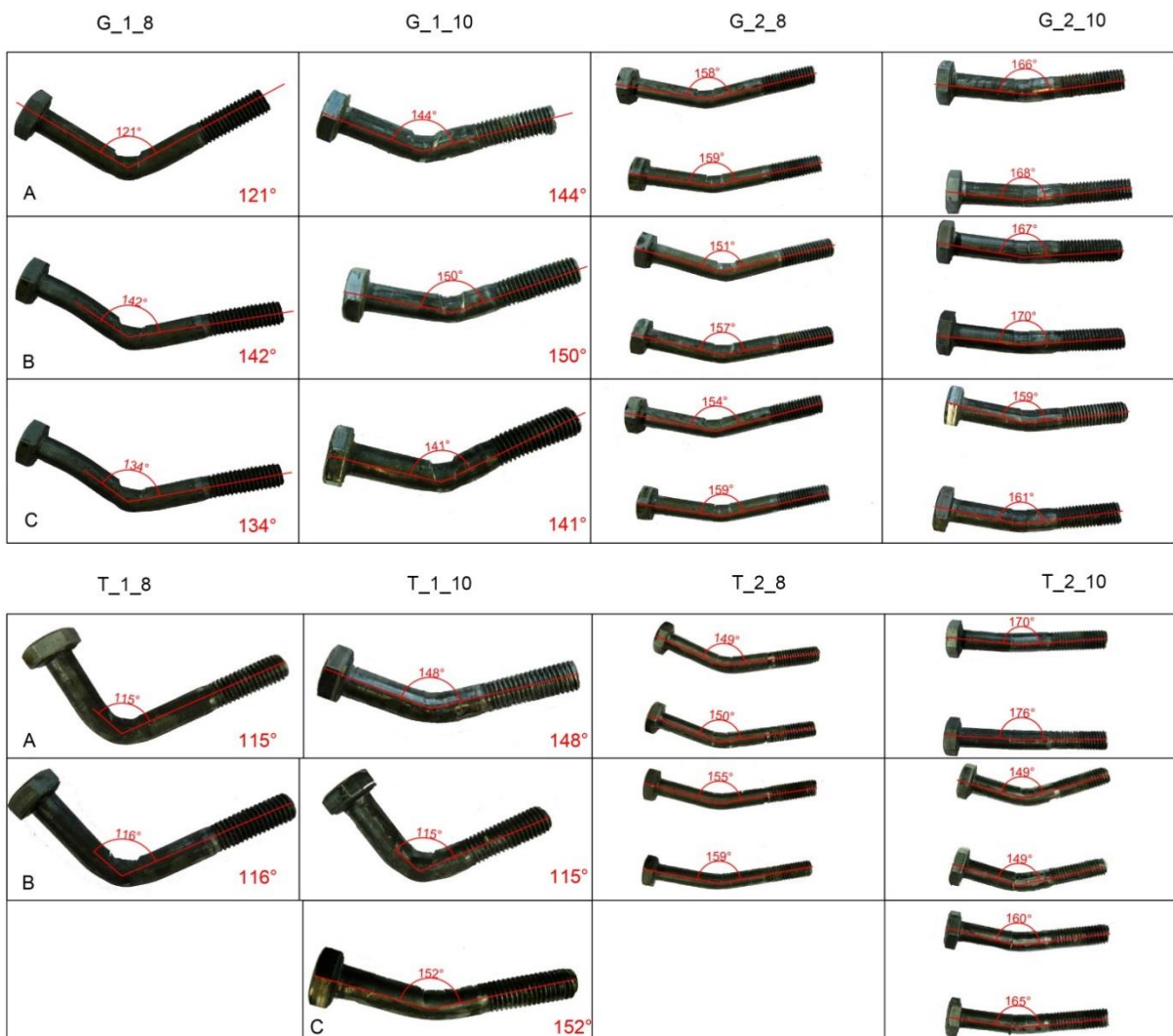
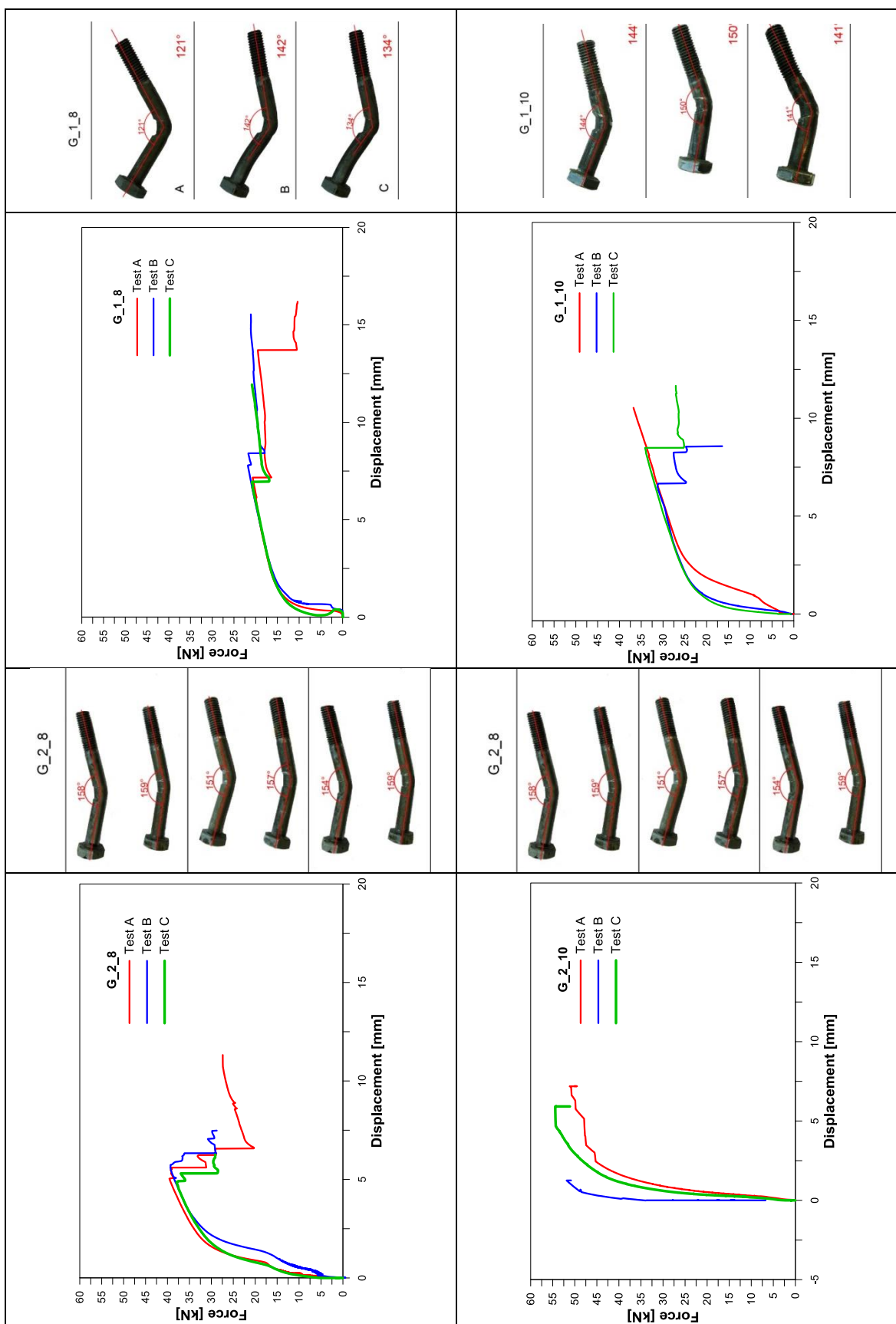


Figura 79 Foto dei bulloni estratti dai provini dopo la prova

La Figura 78 mostra le foto dei bulloni estratti dai provini alla fine della prova. Tutti i provini mostrano una piegatura che è generata dallo scorrimento relativo tra la piastra metallica e la barra in glubam o legno. La piegatura è stata successivamente misurata tramite riconoscimento sulla fotografia.

In particolare, dalla tabella illustrata nella pagina successiva, si evince che a maggiori spostamenti corrispondono maggiori rotazioni dei bulloni.



In generale, si osserva un angolo di piegatura che cresce con lo spostamento ultimo. I provini in glubam mostrano infatti uno spostamento relativo inferiore rispetto agli equivalenti in legno.

L'angolo di piegatura diminuisce all'aumentare del diametro e del numero dei bulloni. Questo effetto è dovuto ad un aumento della rigidità del bullone che produce una diminuzione dello spostamento complessivo. Inoltre, nel caso di due bulloni, la rotazione maggiore si osserva nel bullone superiore indicando una diversa ridistribuzione del carico tra i due bulloni.

9. Discussione dei risultati sperimentali

Nel presente capitolo si analizzano i risultati delle prove della presente sperimentazione. Attraverso dei confronti, effettuati tenendo conto delle diverse variabili che entrano in gioco nella determinazione delle resistenze, si è cercato di valutare la corrispondenza dei dati sperimentali con quelli riconosciuti dalle esperienze riportate in letteratura.

9.1.1. Confronto dei risultati

Per mezzo delle curve forza-spostamento, è stato messo in risalto nel capitolo 8.1 e 8.2, il comportamento strutturale della connessione realizzata in lastre di glubam collegate a delle piastre in acciaio tramite bulloni, in seguito ad un carico di trazione applicato, dimostrando che in termini di resistenza meccanica, presenta valori addirittura superiori alle connessioni in legno.

Nella presente sperimentazione, come già riferito nel capitolo 7, sono state effettuate 12 prove di trazione della connessione in glubam e acciaio e 12 prove di trazione per quella in legno, basate sulla fissata matrice delle prove (par. 2.3.).

Dopo aver riportato i risultati delle prove eseguite nonché i grafici, presi come campione, delle singole prove è stato possibile effettuare dei confronti.

In questo paragrafo si illustreranno 2 diagrammi $F - s$ costituiti ognuno dalle prove tipo effettuate per ciascuna tipologia di connessione, il primo per i test sul glubam, il secondo per i test sul legno lamellare. In modo tale da riassumere quanto evinto dai risultati.

Sia il diagramma delle prove effettuate sul glubam che quello sul legno sono caratterizzate da una forza di carico di trazione // alle fibre del materiale e direzione dell'asse del connettore ortogonale alle fibre.

ANALISI DEI RISULTATI

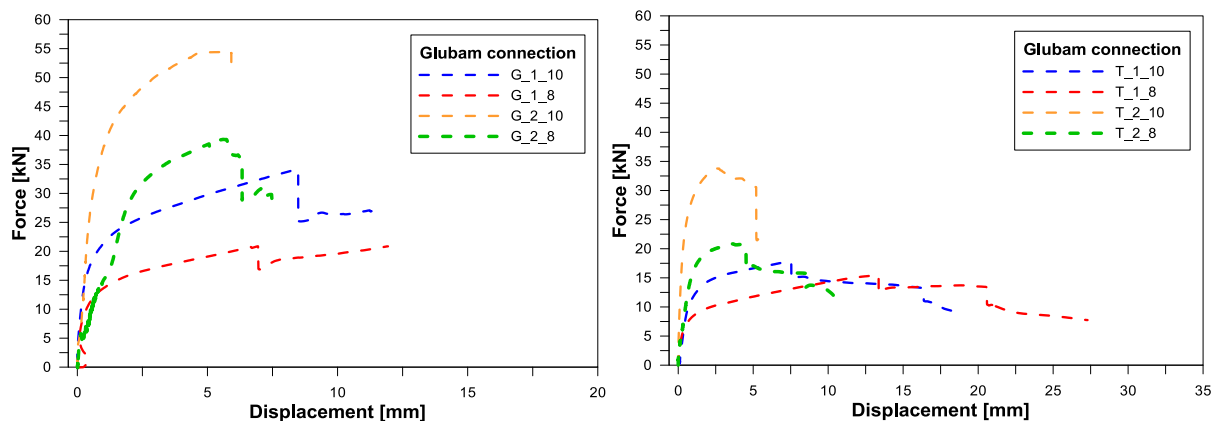


Figura 80 Prove sui prototipi in glulam a sinistra e in legno lamellare a destra

La prima cosa osservabile è che i valori di resistenza a trazione delle connessioni in glulam sono maggiori rispetto a quelli osservabili nelle connessioni in legno. Lo spostamento locale della connessione imbullonata, registrato dopo la rottura del provino, risulta minore nelle connessioni in bambù.

Da una prima analisi di tali risultati sono evidenti le prestazioni meccaniche, in termini di resistenza, del glulam rispetto al legno lamellare.

Un altro aspetto evidente è la differenza di valore massimo raggiunto nelle diverse prove. Questo dipende in massima parte dalle caratteristiche del bambù laminato e del legno in generale, tra le quali l'anisotropia del materiale e la presenza di difetti.

In particolare, nella realizzazione di elementi in legno lamellare nonostante la conformazione in tavole incollate (che vengono scelte opportunamente) sono comunque presenti nodi che possono variare la resistenza del materiale, e frequentemente si può verificare il caso in cui visivamente (dall'esterno) non si registri la presenza di nodi mentre siano in realtà presenti nelle tavole interne.

È stata inoltre analizzata la modalità di rottura del provino dopo il raggiungimento del carico massimo.



Figura 81 Fenomeni di rottura di alcuni campioni sperimentati. A sinistra i provini in glubam, a destra quelli in legno lamellare.

Dalle evidenze sperimentali, la modalità di rottura osservata è stata la scissione longitudinale delle barre di bambù in corrispondenza del connettore, causa di un processo di delaminazione.

Nella Figura 80 è possibile osservare, oltre che al fenomeno di *splitting* (fenditura) presente in entrambi i materiali, l'estrazione di uno o più “tasselli” di legno o bambù in corrispondenza dei singoli connettori.

Il confronto con il modello analitico del comportamento della connessione sperimentata è illustrato nel capitolo successivo.

10. Analisi analitica dei risultati

In Italia la progettazione e costruzione di opere di ingegneria civile sono regolate da un corpus legislativo costituito da leggi e decreti la cui applicazione generalmente è obbligatoria. Scopo comune a tutte le norme tecniche è quello di garantire che le costruzioni posseggano i livelli di sicurezza minimi. A tal fine ogni progetto che comprende strutture in c.a., c.a.p., o metalliche deve essere depositato a cura del costruttore, in un archivio esistente presso l'Ufficio del Genio Civile competente per territorio, Obbligo esteso anche alle strutture in legno nel rispetto delle indicazioni specifiche sulle costruzioni di legno e sui materiali e prodotti a base di legno presenti nei paragrafi 5.3 e 11.6 delle Norme Tecniche per le costruzioni D.M. 14/09/05.

Il bambù è un materiale in fase di indagine e sperimentazione nelle costruzioni europee. Sta riscontrando apprezzamento nel mondo dell'architettura in quanto materiale dotato di resistenza e flessibilità. Come già illustrato nel capitolo 1 paragrafo 4.2, dal punto di vista normativo, non vi sono norme tecniche di riferimento né a livello nazionale UNI né a livello europeo CEN e le stesse Norme Tecniche per le Costruzioni non fanno riferimento alle costruzioni in bambù. In ambito ISO, invece sono disponibili due norme sul materiale e una norma di tipo comportamentale per i laboratori, la ISO 22156 "Bambù– Progettazione strutturale" e la ISO 22157-1 "Bambù– Determinazione delle proprietà fisiche e meccaniche. La norma ISO 22156, pubblicata nel 2004 e riconfermata nel 2012, si basa sul calcolo agli stati limite e sulla prestazione della struttura ma considera solo i requisiti di resistenza meccanica, manutenzione e durabilità della costruzione.

Poiché per le strutture in generale, le zone a cui bisogna prestare maggiore attenzione progettuale sono i nodi e le "Conessioni", in attesa della

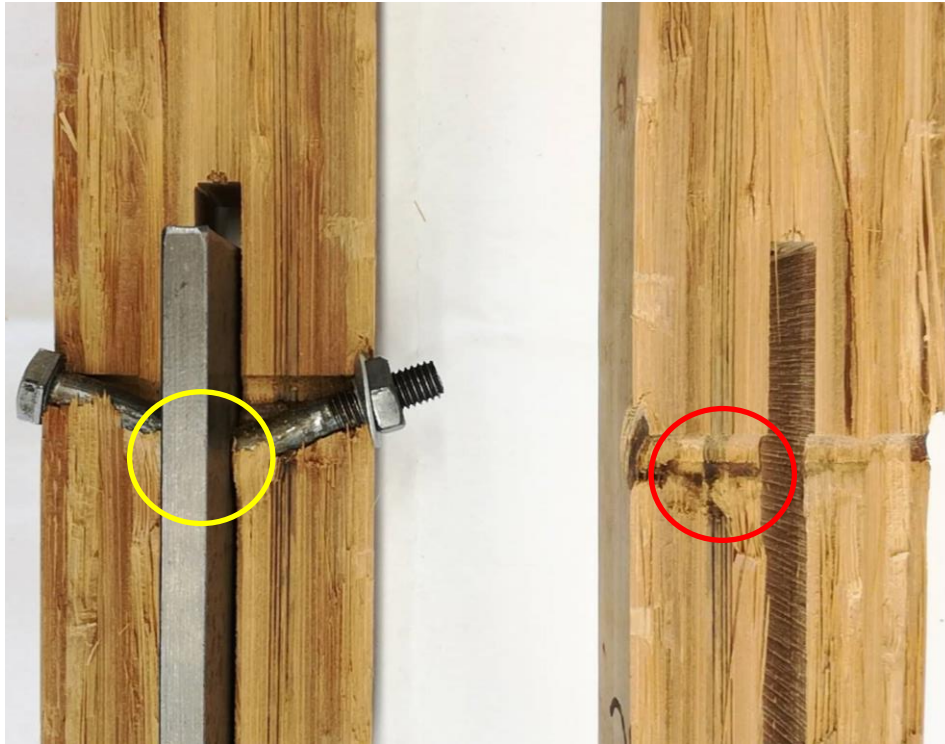
pubblicazione di norme specifiche europee, è stato scelto di valutare il comportamento meccanico delle connessioni in glulam e acciaio sulla base dei metodi di prova codificati dalle normative applicabili al legno. I prodotti in legno, come illustrato nel capitolo 2, rappresentano i tipi di materiale che più si avvicinano per tipologia di manufatti e destinazione d'impiego ai prodotti in bambù lamellare.

10.1. Modello di calcolo per sollecitazioni perpendicolari all'asse del connettore

Il modello di calcolo delle connessioni con bulloni sollecitati perpendicolarmente al loro asse si basa sulle modalità di collasso osservate sperimentalmente. Nel caso di sistemi di connessione di tipo “puntuale” con elementi meccanici a gambo cilindrico, la resistenza del collegamento è legata al rifollamento delle pareti del foro, dovuta all'azione meccanica degli elementi metallici sul legno, ed allo snervamento del gambo di acciaio del connettore. Per la determinazione della resistenza del singolo mezzo di collegamento a partire dalle principali grandezze meccaniche e geometriche degli elementi che lo costituiscono, si ricorre a una formulazione basata sull'analisi limite del collegamento elementare, considerando un comportamento rigido-plastico per i materiali coinvolti (legno e metallo). Tale formulazione è nota come EYM (European Yield Model) ed è stata proposta inizialmente da Johansen nel 1949.

10.1.1. Teoria di Johansen

Le evidenze sperimentali che portarono Johansen a formulare la teoria del EYM mostrarono che i meccanismi di rottura che si verificavano in una connessione lignea imbullonata, sono associati a fenomeni di rifollamento di una delle due parti lignee collegate e di snervamento (a flessione) del gambo del connettore metallico, con formazione di una o più cerniere plastiche.



Nella zona contrassegnata dal “cerchio rosso” si può notare il rifollamento del bambù, mentre nella zona contrassegnata con il “cerchio giallo” è evidente la formazione della cerniera plastica nel connettore in acciaio

La *resistenza al rifollamento* è una caratteristica meccanica del materiale legnoso che descrive uno stato di sforzo limite determinato dallo schiacciamento localizzato delle fibre legnose per effetto del carico concentrato del connettore sulle pareti del foro di alloggiamento: le deformazioni plastiche causano l’ovalizzazione del foro e la conseguente rottura della connessione. La resistenza al rifollamento dipende da alcune caratteristiche geometriche e meccaniche, come la massa volumica del legno, il diametro del connettore, la direzione della forza applicata rispetto alla direzione della fibratura.

Per quanto riguarda la teoria di Johansen le equazioni della capacità portante della connessione con connettori a gambo cilindrico sono ricavate da semplici considerazioni di equilibrio allo stato limite con l’ipotesi di comportamento

rigido-plastico per entrambi i materiali. Tale approccio proposto per la prima volta da Johansen, e successivamente perfezionato e validato sperimentalmente da diversi studiosi, è oggi alla base del calcolo della resistenza dei collegamenti di diverse normative tecniche sia nazionali che internazionali (DIN 1052:2004, EN 1995:2004, documento N.I.Co.Le., istruzione CNR-DT 206-2006).

Le unioni composite in legno e acciaio sono realizzate attraverso l'assemblaggio del materiale legnoso a delle tra piastre di acciaio.

L'Eurocodice 5 per le unioni acciaio-legno distingue due casi di in funzione della piastra metallica:

- Nel caso di “piastre spesse”, piastre aventi spessori maggiori o uguali al diametro del connettore ($t \geq d$), lo spessore della piastra è tale da fornire una sorta di vincolo rigido (incastro) al connettore metallico e quindi normalmente si avrà la formazione di una cerniera plastica nel connettore in corrispondenza dell'interfaccia legno-acciaio.
- Nel caso di “piastre sottili”, ($t \leq 0,5d$), invece, lo spessore della piastra non è sufficiente per fornire un vincolo rotazionale al connettore; in tal caso si ipotizza nullo il momento flettente nel connettore in corrispondenza dell'interfaccia legno-acciaio.

Le formule proposte dall'Eurocodice 5 relative alla capacità portante si riferiscono sempre al singolo piano di taglio (sezione resistente) del singolo mezzo di unione.

I valori di progetto sono da determinarsi in funzione del coefficiente parziale di sicurezza per la proprietà del materiale γ_m (per il legno lamellare incollato $\gamma_m = 1,35$) e del coefficiente di correzione K_{mod} che tiene conto dell'effetto sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità degli elementi.

I modi di rottura che possono aver luogo in un collegamento sono sostanzialmente i seguenti:

- Modo f : rifollamento di una delle due parti lignee connesse;
- Modo g e h: rifollamento di una delle due parti lignee connesse e contemporaneo snervamento del connettore metallico con formazione di una o più cerniere plastiche.

La capacità portante caratteristica per ciascuna sezione resistente e per ogni mezzo di unione in unioni a due sezioni resistenti con elemento centrale di acciaio sarà assunta come il minore dei valori ottenibili mediante le formule:

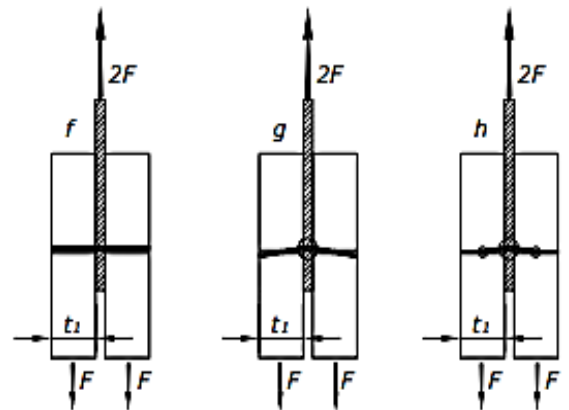
legno-acciaio-legno in piastra grossa o sottile
(t_s qualsiasi)

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

(f)

(g)

(h)



Dove:

- t_1 e t_2 sono gli spessori del legno o del pannello, o profondità d'infissione del mezzo di unione;
- $f_{h,1,k}$ e $f_{h,2,k}$ le resistenze caratteristiche a rifollamento degli elementi di legno caratterizzati dallo spessore rispettivamente t_1 e t_2 ;
- d , diametro del connettore;

- $M_{y,k}$ rappresenta il valore caratteristico del momento di snervamento del connettore;
- R_k valore caratteristico della resistenza a taglio della connessione per singolo piano di taglio;
- $B = f_{h,1,k}/f_{h,2,k}$ rapporto tra le tensioni caratteristiche di snervamento.
- $F_{ax,R,k} / 4$ rappresenta l'effetto fune, il termine additivo alle formulazioni di Johansen, resistenza caratteristica all'estrazione assiale dell'elemento di collegamento.

Effetto fune

La resistenza ultima di alcuni tipi di unioni, quali ad esempio quelle realizzate tramite bulloni, risulta spesso maggiore rispetto alla resistenza calcolata utilizzando le equazioni di Johansen prima esposte. Per tali tipi di unioni, infatti, una volta raggiunti uno dei meccanismi di rottura misti descritti dal modello di Johansen, si instaura un ulteriore meccanismo di trasmissione degli sforzi talvolta indicato come effetto fune. Una volta raggiunto il modo di rottura il connettore inizierà a essere sollecitato anche a trazione, oltre che a flessione e taglio come avveniva prima del raggiungimento dello snervamento a flessione.

Inoltre all'aumentare del valore dell'azione applicata, il connettore, se opportunamente vincolato alle due estremità, tenderà a comprimere gli elementi lignei collegati. Questa sorta di "precompressione" trasversale comporta un aumento delle forze d'attrito in prossimità dell'interfaccia tra gli elementi lignei, forze che, assieme alla componente dello sforzo normale nel connettore in direzione della sollecitazione esterna applicata, contribuiranno ad una accresciuta resistenza dell'unione rispetto a quella calcolata facendo uso delle equazioni di Johansen che, come si è potuto vedere, non tengono conto di questa ulteriore possibilità di trasmissione degli sforzi.

Determinare esattamente l'aumento di resistenza fornito all'unione da un tale tipo di meccanismo sarebbe stato molto difficile e su questo argomento si sono sviluppate due teorie di calcolo citate rispettivamente nella DIN 1052 e nella EN 1995-1-1 (che altro non è che la parte 1.1 dell'Eurocodice 5, inoltre sono state riprese integralmente nel documento N.I.Co.Le. e nell'istruzione CNR-DT 206-2006) e che possono essere così sintetizzate:

- a) Inserimento di un fattore amplificativo sui valori di resistenza ottenuti utilizzando le equazioni di Johansen rispettivamente nei modi di rottura g e h;
- b) Aggiunta di un termine esplicito additivo ai valori di resistenza ottenuti utilizzando le equazioni di Johansen rispettivamente nei modi di rottura g e h.

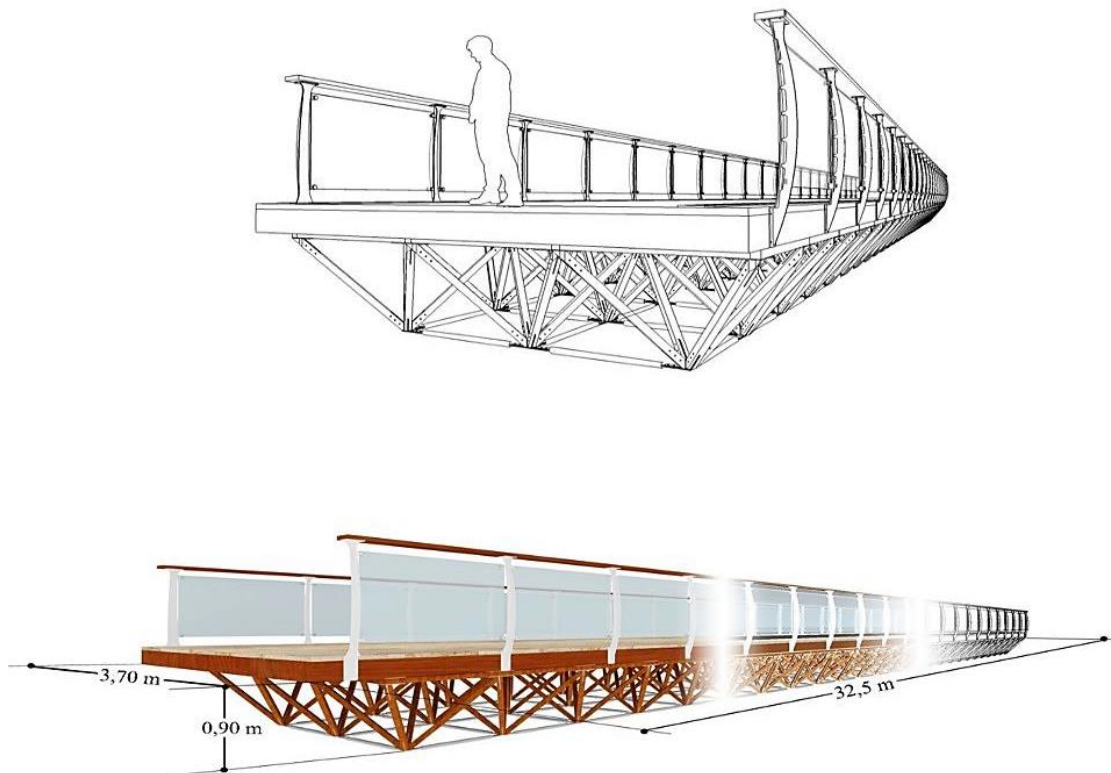
La formulazione b) stabilisce che il termine additivo può essere assunto pari al massimo a $F_{ax,RK} / 4$ essendo $F_{ax,RK}$ la resistenza caratteristica all'estrazione assiale dell'elemento di collegamento. Tuttavia, tale contributo deve essere limitato ad una certa frazione della resistenza calcolata alla Johansen, in particolare il 25% per i bulloni.

11. Considerazioni e sviluppi futuri

La precedente disamina qualitativa delle potenzialità del bambù come materiale strutturale ha fornito un quadro delle sue notevoli proprietà meccaniche.

Le curve carico-deformazione, insieme alle modalità di guasto registrate hanno convalidato l'affidabilità statica in termini di resistenza delle connessioni in bambù laminato. L'analisi dei risultati sperimentali mostra che il bambù laminato, in termini di resistenza parallela alle fibre, ha caratteristiche superiori a quelle del legno lamellare. I campioni in glubam testati oltre a presentare una resistenza alla trazione più elevata, registra spostamenti locali delle connessioni in glubam-acciaio minori rispetto ai campioni in legno lamellare.

I riscontri positivi letti dai risultati delle prove sperimentali soddisfano l'obiettivo principale di questo studio, ovvero l'introduzione di un'innovativa struttura spazio reticolare composta da elementi in glubam e da elementi tubolari in acciaio, attraverso la sperimentazione meccanica della connessione ibrida.



Il sistema strutturale concepito è particolarmente adatto alla produzione industriale, consente di ottimizzare i costi complessivi di produzione e garantisce una elevata sostenibilità ambientale.

Un prototipo di questa struttura composita è stato realizzato in laboratorio con l'obiettivo di caratterizzarne il comportamento sotto l'azione di forze statiche e dinamiche. La capacità statica misurata è risultata compatibile con l'utilizzo di questa struttura in coperture e ponti pedonali di piccola-media luce. Il valore del rapporto dello smorzamento viscoso per il modo fondamentale è stato stimato pari a circa 1,5%, in linea con l'intervallo di valori suggerito da diverse normative e linee guida per ponti pedonali con struttura in legno con unioni bullonate.



Figura 82 Struttura reticolare in glulam e acciaio realizzata come copertura dell'ingresso della facoltà di ingegneria civile presso la Nanjing Tech University (China) (37).

Un archetipo di questa struttura reticolare composita in glulam ed acciaio è stato progettato per realizzare la copertura dell'ingresso della facoltà di ingegneria civile della Nanjing Tech University (Cina) (66), come mostrato in Figura 82. La copertura realizzata presenta la stessa configurazione del prototipo analizzato in laboratorio. La superficie della struttura reticolare è pari a $12\text{ m} \times 3,6\text{ m}$ e la distanza tra i supporti è di 8,4 m. La copertura è stata ultimata nell'aprile 2016. La struttura è costantemente monitorata e nell'arco di tre anni è stata esposta a carichi di natura diversa, quali ad esempio quelli dovuti alla neve (Figura 82).

Al fine di produrre un modello numerico in grado di predire il comportamento globale di questa nuova tipologia di strutture, questo lavoro sperimentale rappresenta il primo passo per caratterizzare il comportamento della connessione metallica in regime statico. Obiettivo futuro, riguarda invece prove sperimentali per caratterizzare il comportamento della connessione in bambù ed acciaio anche in regime ciclico.

Opere citate

1. **Domenico Asprone, Andrea Prota, Gaetano Manfredi, DIS.** *La valutazione della sostenibilità in Edilizia*. Università di Napoli “Federico II” : Ingegno, Informazione Tecnica Progettuale, Web, 2012.
2. **E.Tiezzi.** *Fermare il tempo. Un' interpretazione estetico-scientifica della natura*. Milano : Raffaello Cortina editore, 1996.
3. **Tiezzi, Enzo.** *Tempi storici, tempi biologici*. s.l. : Garzanti , 1984.
4. **BAN BAMBOO.** Il Bamboo, la pianta e gli utilizzi. [Online] [Riportato: 22 Febbraio 2020.] http://www.banbamboo.com/il_bamboo.html.
5. **Bambuseto.** [Online] [Riportato: 21 Febbraio 2020.] <https://www.bambuseto.it/il-bambu/>.
6. **Kaminski, Lawrence e Trujillo.** Structural use of bamboo. *heStructuralEngineer*. August 2016. pp. 40-43.
7. **D.N., Tewari.** *A monograph on bamboo*. Dehradun, India : International Book Distributors, 1992.
8. **Anokye, B. R. A.** Bamboo Properties and Suitability as Replacement for wood. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*. 2016. Vol. vol. 2(1), pp. 64-80.
9. **Bambùtigre.** il mondo del bambù. [Online] <https://www.bambutigre.it>.
10. **Liese, W.** Bamboo preservation and soft rot. s.l. : Fao report to the Government of India, 1959. Vol. Tome n. 1106.
11. **Fabiani, M.** Bamboo structures: italian bamboo as likely resource for green building. *Phd thesis*. Università politecnica delle Marche : s.n.
12. **Alma Master Studiorum.** Il Bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per prospettive sostenibili. *amslaurea.unibo.it*. [Online] <https://amslaurea.unibo.it/>.
13. **Jassen, J. J. A.** Mechanical properties of bamboo. Boston, Kluwer Academy Publishers : s.n., 1991.
14. **Fangchun, Z.** Studies on Physical and Mecanical Properties of Bamboo wood. s.l. : Journal of Nanjing Techn, 1981.

15. **Laverde, M. Càrdenas.** Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive. Napoli : Sistemi editoriali, 2008.
16. **Jinhe, Fu.** Chinese Moso Bamboo: Its importance. *Bamboo* 22. 2000.
17. **camibio.** [Online] 4 Aprile 2019.
<https://www.camibio.it/author/commercialecamibio-it/page/2/>.
18. **Larenstein, Van Hall.** University of Applied : s.n., 2010.
19. **CERTIFICAZIONE KOMO.** standard internazionale. [Online] sito www.komo.nl.
20. **López, Oscar Hidalgo.** Manual de construcción con bambú. *Estudio Técnico Colombiano LTDA.* Bogotá : s.n., 1981.
21. **Miranda, M. De.** BAMBOO: a construction material against earthquakes and hurricanes. *Lettura al Workshop con O.H. Lopez.* Firenze : s.n., 2005.
22. **G., Minke.** Building with bamboo: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser : s.n., 2012.
23. **Van der Lugt, P, Van den Dobbelsteen, AAJF e Janssen, JJA.** An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures. s.l. : *Constr Build Mater* 20:648–656, 2006.
24. **Gatoo A., Sharma B., Bock M., Mulligan H. and Ramage M.** Sustainable structures: bamboo standards and building codes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* . s.l. : Engineering Sustainability, 2014. Vol. 167(5), pp. 189–196.
25. **Correal J.F.** Bamboo design and construction, in Sharma, B. and Harries, K. A. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials.* s.l. : Woodhead Publishing, 2016.
26. **SELECTED PHYSICAL AND MECHANICAL-PROPERTIES OF GIANT TIMBER BAMBOO GROWN IN SOUTH-CAROLINA.** **AWC, LEE, XS, BAI e PN, PERALTA.** s.l. : *Forest products journal*, 1994, Vol. 44.
27. *Effect of board density and layer structure on the mechanical properties of bamboo oriented strandboard.* **I, Sumardi, Ono, K e S, Suzuki.** Japan : *Journal of Wood Science*, 2007, Vol. 53.
28. **Sharma, B, et al., et al.** Engineered bamboo for structural applications,. *Constr. Build. Mater.* 81. 2015.

29. Legno Lamellare. *wikipedia*. [Online] [Riportato: 5 febbraio 2020.] https://it.wikipedia.org/wiki/Legno_lamellare.
30. **Lugt, Pablo van der**. Dutch Design meets Bamboo as a Replicable Model. *Design Interventions for Stimulating Bamboo Commercialization*. Delft, Netherlands: VSSD : s.n., 2008.
31. **Y, Yu, et al., et al**. Fabrication, material properties, and application of bamboo scrimber. *Wood Sci Technol*. 2015. Vol. 49, 83-96.
32. **Y, Yu, et al., et al**. The reinforcing mechanism of mechanical properties of bamboo fiber bundle reinforced composites. *Polym Compos*. 2018. Vol. 40, 40(4):1463–1472.
33. **W, Yu**. Current status and future development of bamboo scrimber industry in China. s.l. : China Wood , 2012. Vol. 1, 11-14.
34. **EN UNI 13329**. Rivestimenti laminati per pavimentazioni - Elementi con uno strato superficiale a base di resine termoindurenti amminoplastiche - Specifiche, requisiti e metodi di prova. 2017.
35. **ASTM E1333-14** . Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentrations in Air and Emission Rates from Wood Products Using a Large Chamber. 2014.
36. **Xiao, Y, Chen, G e Feng, L**. Experimental studies on roof trusses made of glulam. *Mater Struct*. 2014.
37. **Xiao, Y e Wu, Y**. Steel and glulam hybrid space truss. 2018.
38. **Tetrasteel**. Strutture reticolari spaziali: pensare a tre dimensioni, . su www.tetrasteel.com. 2019.
39. Elementi strutturali e sistemi costruttivi. *Docplayer*. [Online] [Riportato: 1 Marzo 2020.] <http://www.docplayer.it>.
40. **Birocchi, Maurizio**. BeLeafMagazine. 2017.
41. **Archila, H, et al., et al**. Bamboo reinforced concrete: a critical review. *Mater. Struct*. 2018.
42. **Sharma, B, et al., et al**. Engineered bamboo: state of the art. . *Proc Institu Civ Eng Constr Mater*. 2014.
43. **Albermani, F, Goh G, Y e Chan, SL**. Lightweight bamboo double layer grid system. *Eng Struct*. 2007.

44. **Paraskeva, T., Grigoropoulos, G. e Dimitrakopoulos, E.G.** Design and experimental verification of easily constructible bamboo footbridges for rural areas, . *Eng. Struct.* 143. 2017.
45. **Stamm, J.** Bamboo bridges as an alternative to rainforest destruction. . *Colombia: Bamboo in Disaster Avoidance*; . 2002.
46. **IBUKU.** Luxury bamboo design. [Online] www.ibuku.com.
47. **Li, Zhi, et al., et al.** Experimental study of an unsymmetrical prefabricated hybrid steel-bamboo roof truss. *Engineering Structures*. 2019.
48. **Quaranta, G, Demartino, C e Xian, Y.** *Experimental dynamic characterization of a new composite glulam-steel truss structure*. 2019.
49. **ASTM D143-2009.** Standard test methods for small clear specimens of timber. 2009.
50. **GB/T_1928-2009.** *General requirements for physical and mechanical tests of wood (in Chinese)*. China, 2009.
51. **JG/T_199-2007.** *Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo used in building (in Chinese)*. China, 2007.
52. **GB/T_2975-1998.** *Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing (in Chinese)*. China, 1998.
53. **GB/T_228.1-2010.** *Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature (in chinese)*. China, 2010.
54. **NTC18.** Norme tecniche per le costruzioni. *Gazzetta ufficiale della repubblica italiana // Ministero delle infrastrutture e dei trasporti*. 2018.
55. **Brincker, R., Ventura, C. e Andersen, P.** Damping estimation by frequency domain decomposition. *Proceedings of 19th International Modal Analysis Conference*. Orlando, FL (USA)., Or : s.n., 2001.
56. **Brincker, R., Zhang, L. e Andersen, P.** Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mater. Struct.* . 2001.
57. **Nisticò, N., et al., et al.** Experimental dynamic testing and numerical modeling of historical belfry. *Int. J. Archit. Herit.* . 2016.
58. **Van Overschee, P e de Moor, B.L.** Subspace Identification for Linear Systems. *Kluwer Academic Publishers*. 1996.
59. **Shin, K. e Hammond, J.** Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration. *Engineers, Wiley*. 2008.

60. **Sétra**. *Technical Guide - Footbridges: Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Loading*. 2006.
61. **Heinemeyer, C., et al., et al.** Design of Lightweight Footbridges for Human Induced Vibrations. *Background Document in Support to the Implementation, Harmonization and Further Development of the Eurocodes*,. 2009.
62. **FIB**. *Guidelines for the Design of Footbridges*. 2005.
63. **CEN**. *Eurocode 1: Actions on Structures*. 2003.
64. —. *Eurocode 3: Design of Steel Structures*. 2005.
65. —. *Eurocode 5: Design of Timber Structures*. 2005.
66. **Xiao, Y, Y, Wu e QW, Yang**. Development of a steel and glulam space truss system. *Eighth international conference on steel and aluminum structure, Hong Kong*. 2016.
67. **Xiao, Y, et al., et al.** Development of a new type of GluBam. *Modern Bamboo Struct.* 2008.
68. **Xiao, Y, Yang, RZ e Shan, B.** Production, environmental impact and mechanical properties of glulam. *Constr Build Mater.* 2013.
69. **ASTM D5652-95**. Standard Test Methods for Bolted Connections in Wood and Wood-Base Products.
70. **Inbar**. International Network for Bamboo and Rattan. [Online] 2019. www.inbar.int.
71. **De Flander, K.** The role of bamboo in global modernity: from traditional to innovative construction material. Thesis: Wageningen University. Wageningen Netherlands : s.n., 2005.
72. **Xiao, Y, Q, Zhou e B., Shan**. Design and construction of modern bamboo bridges. *J Bridge Eng.* 2009.
73. **Li, Z, et al., et al.** Studies of nail connectors used in wood frame shear walls with ply-bamboo sheathing panels. *J Mater Civ Eng.* 2014.

Allegati

1. Schede tecniche

1.1. Scheda tecnica della bullonatura utilizzata, fornita dal fornitore.

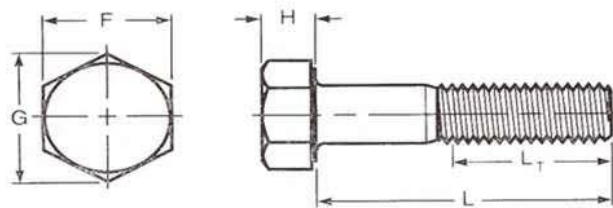
产品参数/Parameter

亿鼎

基本参数

名称	本色外六角
品牌	亿鼎螺丝
材质	Q235
标准	国标
表面处理	表面不做处理
规格说明	M6—M30

尺寸规格



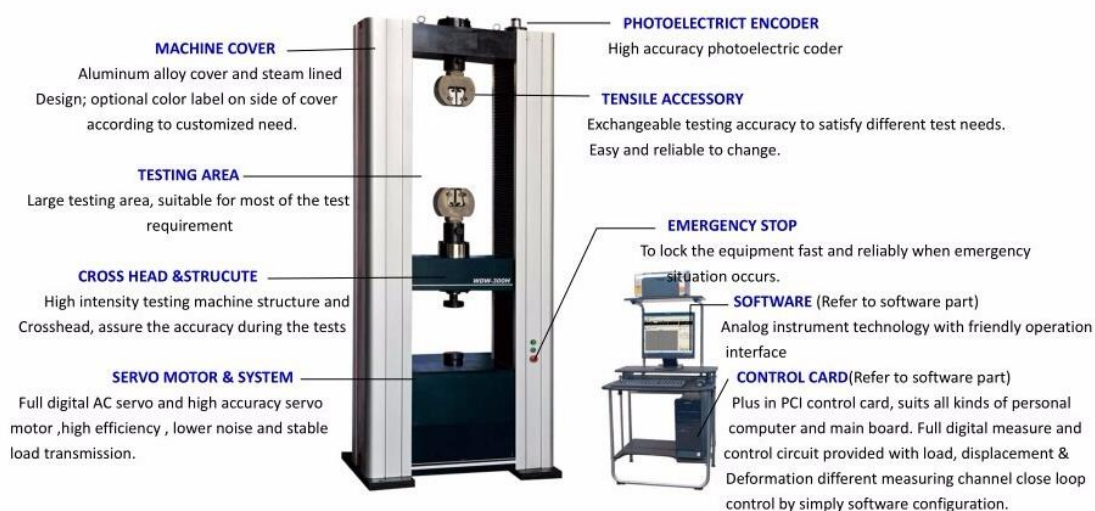
半牙

全牙

举例16*100

表示螺杆直径为16毫米，长度L为100毫米，以此类推

1.2. Macchina di prova universale elettronica computerizzata WDW fino a 200 KN di capacità



Brevi informazioni

La macchina elettronica di prova universale computerizzata è progettata e prodotta secondo gli standard ASTM, ISO, DIN ecc. È una macchina di prova di precisione controllata da computer, adatta per un'ampia gamma di materiali per prove di compressione, flessione e trazione. Ha un'alta stabilità e un'alta precisione, dotato di sistema PC e stampante per grafici, visualizzazione dei risultati dei test, controllo dei test come programma impostato, stampa ed elaborazione dei dati. Completo di modulo per test su metallo, molla, tessuto, gomma, plastica e altri materiali e test di scorrimento. È ampiamente usato in molti campi utilizzati in molti settori come fabbriche industriali, imprese minerarie e scuole superiori.

Applicazione:

Adatto a materiali non metallici come gomma, plastica, nastro, filo, fune, membrana impermeabilizzante, pannello a base di legno e test di proprietà meccaniche su materiali metallici di piccole dimensioni e carico ridotto. L'apparecchio relativo può essere completo trazione, compressione, flessione, taglio, strappo, pelatura, rigidità statica, rigidità dell'anello, forza di estrazione e altri test delle prestazioni.

Misurazione della forza

La precisione del carico soddisfa o supera il grado 0,5 ASTM E4, ISO7500-1, EN10002-2, BS1610, DIN51221

Misura di spostamento

Encoder oltre 2000 impulsi / giro per garantire uno spostamento accurato, l'encoder è installato con la vite a ricircolo di sfere e la vite a ricircolo di sfere per guidarlo ruotando direttamente.

Impostazione della

velocità La velocità può essere impostata tra 0,01-500 mm / min dal computer e un eccellente servomotore può supportare l'alta velocità e la velocità può essere estesa con un'offerta speciale.

Telaio

Utilizzando quattro viti ottiche guida, vite a ricircolo di sfere ϕ 40mm ad alta precisione. Il telaio rigido alto è composto da trave e base spesse, che possono garantire

al telaio un'eccellente rigidità longitudinale e trasversale e una buona precisione complessiva. Sotto la guida della precisione del controllo interno del 5% della coassialità, il giunto trasversale può essere allineato con precisione nel test assiale e il movimento lineare del raggio può essere garantito, in modo da garantire che l'influenza della forza laterale sul il campione sotto carico è minimo. Pertanto, è possibile ottenere prestazioni di prova migliori.

Controller

Forza, spostamento, risoluzione della misurazione della deformazione fino a 1/300000 di fondo scala; La frequenza di campionamento AD può arrivare fino a 300 Hz; Può realizzare il controllo ad anello chiuso di parametri come forza di prova, deformazione del campione e spostamento del fascio. Può essere utilizzato per realizzare le prove di velocità-forza di prova costante, velocità di spostamento costante, deformazione di velocità costante, ciclo di carico costante di velocità ciclo di deformazione di velocità costante e così via. Varie modalità di controllo possono essere commutate senza problemi. E transizione graduale Algoritmo avanzato di controllo PID adattivo del neurone.

Scheda tecnica		
Modalità		WDW-200
Max. forza di prova		200kN
Intervallo di misurazione della forza di prova		2% -100%
Grado di precisione della macchina di prova		1 / 0,5
Precisione della forza di prova		≤ ± 1%
Risoluzione di spostamento della traversa		0,01 millimetri
Regola la gamma di velocità		0.005-500mm/min
Spazio per prove di trazione		più di 600 mm
Spazio del test di compressione		800 mm
Attacco a trazione		Mascella piatta 0-7,7-14,14-20 Mascella rotonda ø 4- ø 9 ø 9- ø 14 ø 14- ø 20
Distanza tra le colonne		600 millimetri
Peso		1400kg
Ambiente di lavoro		Temperatura ambiente 45 umidità 20% -80%
Consegna standard		
1	Prova l'host Chenda	1
2	Servomotore AC Giappone	1
3	Regolatore di velocità	1
4	Cella di carico Unite State	1
5	Vite a sfere di precisione Taiwan	2
6	Sistema di decelerazione	1
7	Sistema di controllo del computer	1
8	Codificatore ottico	1
9	Computer Lenovo	1
10	Stampante Stampante a getto d'inchiostroa colori HP	1
11	Software di sistema di Windows	1
12	Strumenti di accompagnamento	1
13	Accessorio a trazione	3
14	Accessorio di compressione	1
15	Accessorio di piegatura	1
16	Informazioni tecniche	1

2. Protocollo di prova

Protocol of the tests for the characterization of the monotonic and cyclic behavior of the connection to be used in the hybrid steel-glubam truss system

Test n°: 4

Diameter bolt: $\phi 8$

Data: 17/12/19

Note: 1 $\phi 8A$

- | | | |
|--|---------------------|-------------------------------------|
| 1. Turn on the thermal camera (it needs 10 min to stabilize) | | ☒ |
| 2. Turn on universal testing machine | | ☒ |
| 3. Create folder in Computer : (<i>es. test n°_gg.mm.qq</i>) | | ☒ |
| 4. Photo specimen (decomposed and assembled <i>es. bolts $\phi 10$, plat, glubam bar, all together.</i>) | | ☒ |
| 5. Position the specimen | | ☒ |
| 6. Mark on the specimen the initial lengths | | ☒ |
| 7. Position displacement device | | ☒ |
| 8. Position the 2 cameras (straight and with a good view of the connection tested) | | ☒ |
| 9. Position the lights | | ☒ |
| 10. Check the displacement device [mm] | | ☒ |
| 11. Check the machine | | ☒ |
| 12. Photo specimen before test | | ☒ |
| 13. Stopwatch | | ☒ |
| 14. Start FV (Front Video) and SD (Side Video) together [40 sec before the machine starts] | h: 10:39 | ☒ |
| 15. Start universal testing machine and displacement together [40 sec after the video] | h: +40s | ☒ |
| 16. thermal camera TC_P1 (ThermalCamera_Photo1 before plasticization) | d: 4.67mm | ☒ |
| 17. thermal camera TC_P2 (ThermalCamera_Photo2 during) | d: 12.70mm | ☒ |
| 18. thermal camera TC_P3 (ThermalCamera_Photo3 after) | d: 14.63mm | ☒ |
| 19. .Breaking the specimen | | ☒ |
| 20. Stop universal testing machine and displacement together | d: 16.27mm h: 10:51 | ☒ |
| 21. Save and check the results in format [txt.] and [xls,] | | ☒ |
| 22. Photo specimen after test (<i>es. In machine, without machine, decompose</i>) | | ☒ |

Note: _____

APPENDICE A

In quest'appendice sono riportati i singoli grafici di tutte le **“Prove di trazione”** per la caratterizzazione meccanica delle connessioni in glubam e acciaio nella presente sperimentazione.

Diagramma Forza–Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 8 mm

Prova A

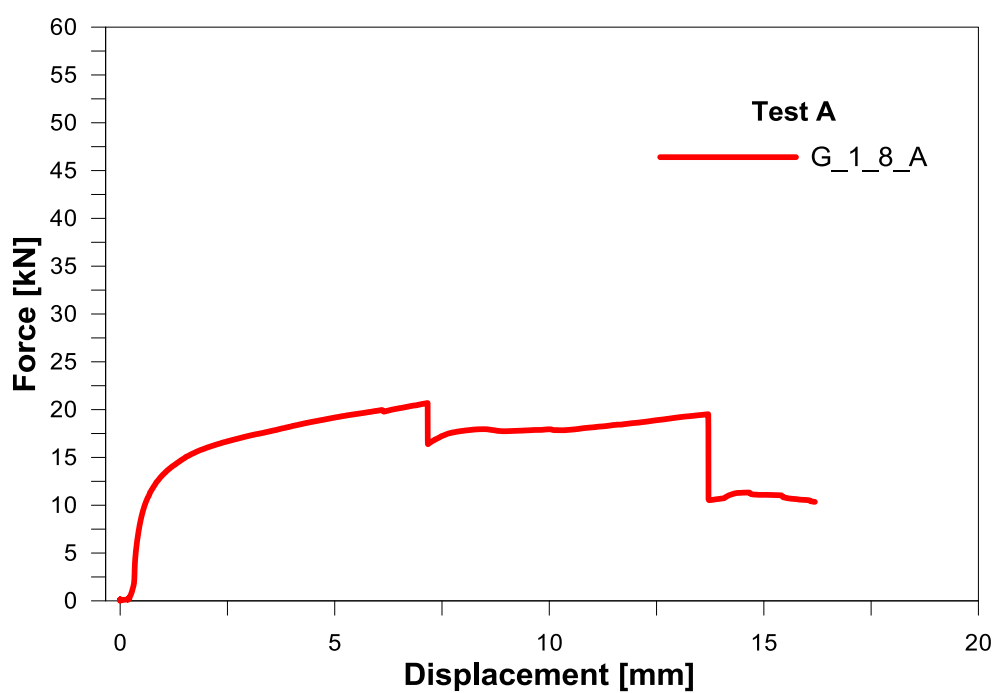


Diagramma Forza–Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 8 mm

Prova B

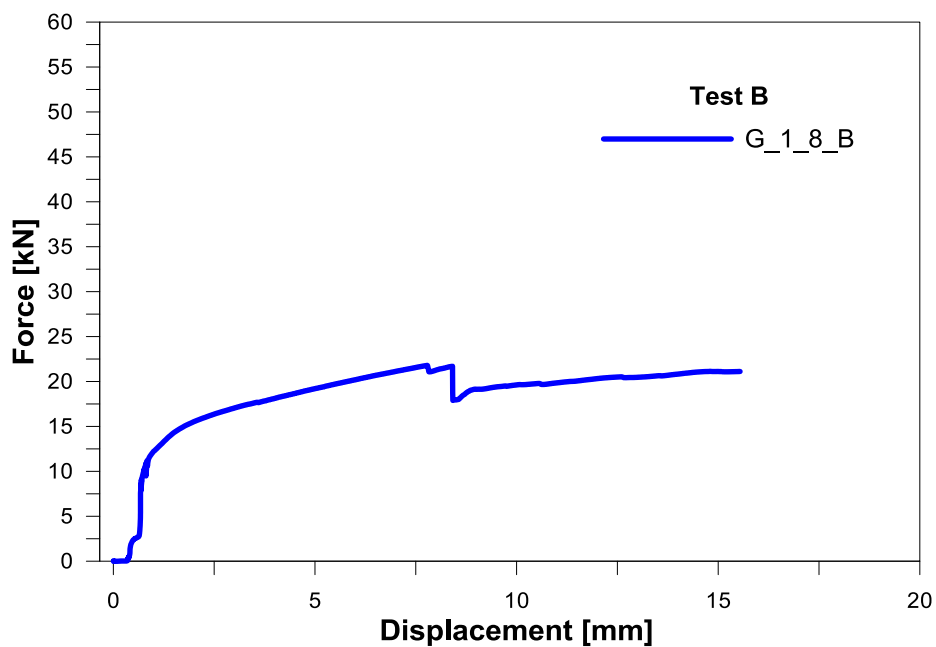


Diagramma Forza–Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 8 mm

Prova C

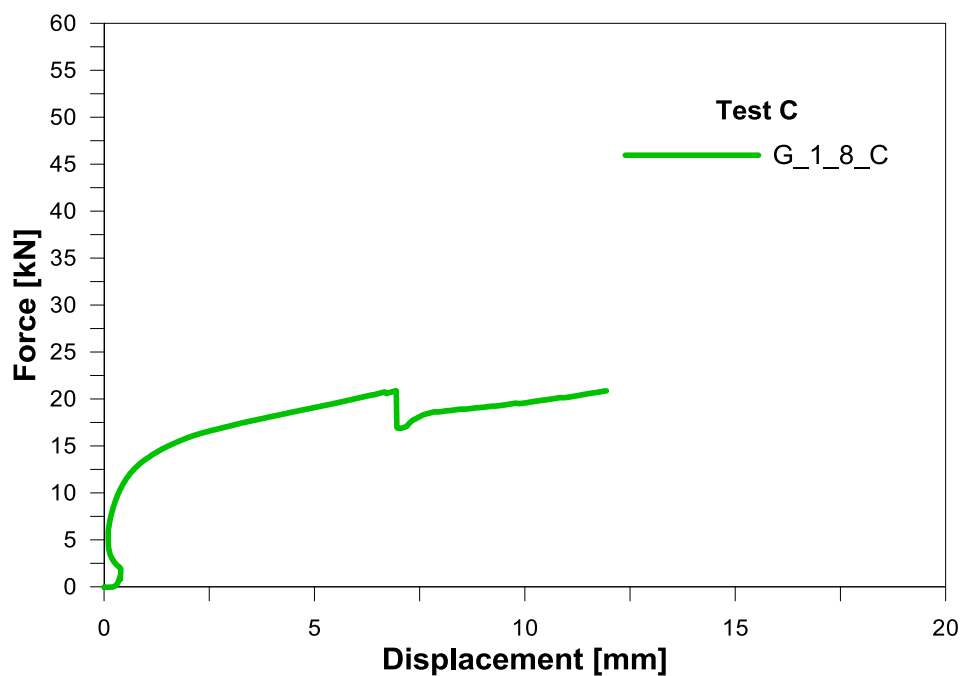


Diagramma Forza–Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 10 mm

Prova A

Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 10 mm

Prova B

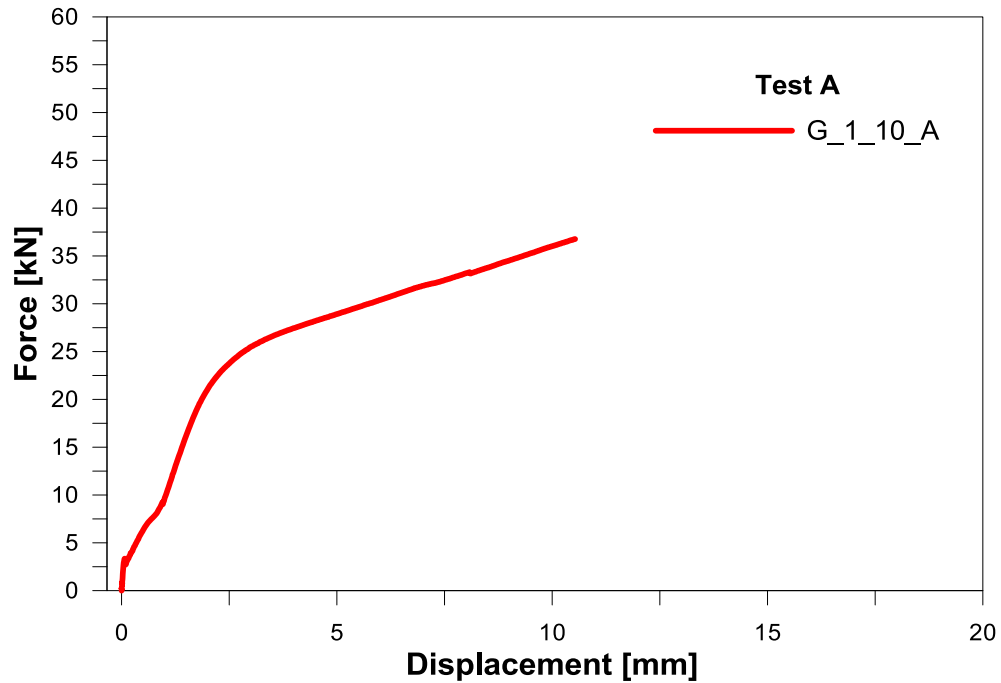


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _1 bullone ϕ 10 mm

Prova C

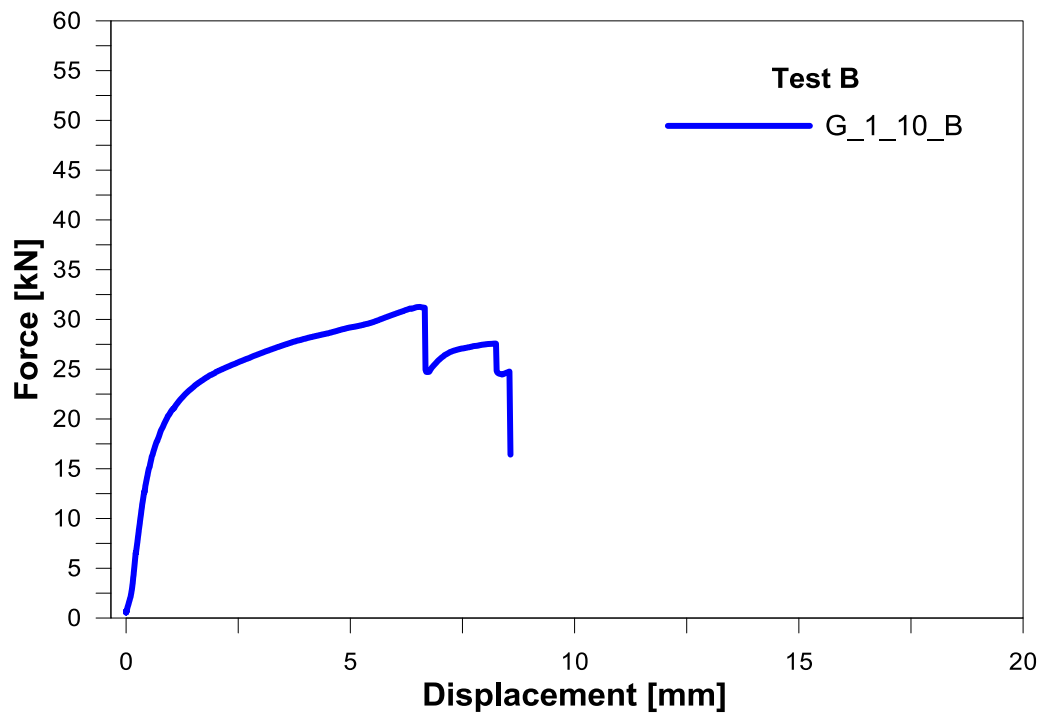


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 8 mm

Prova A

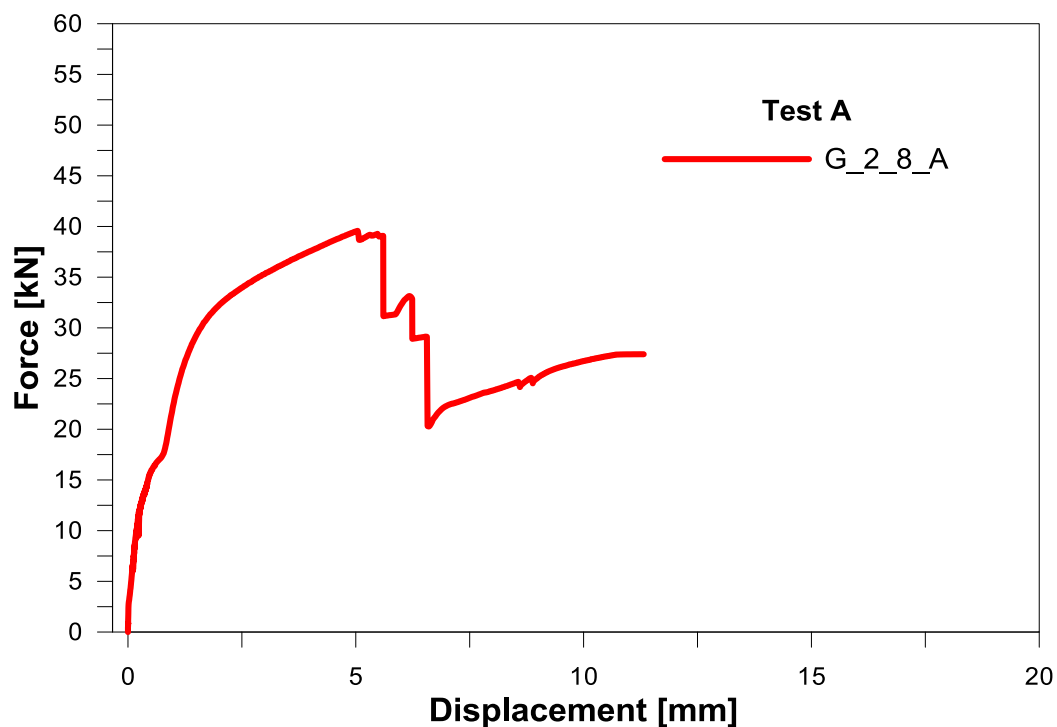


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 8 mm

Prova B

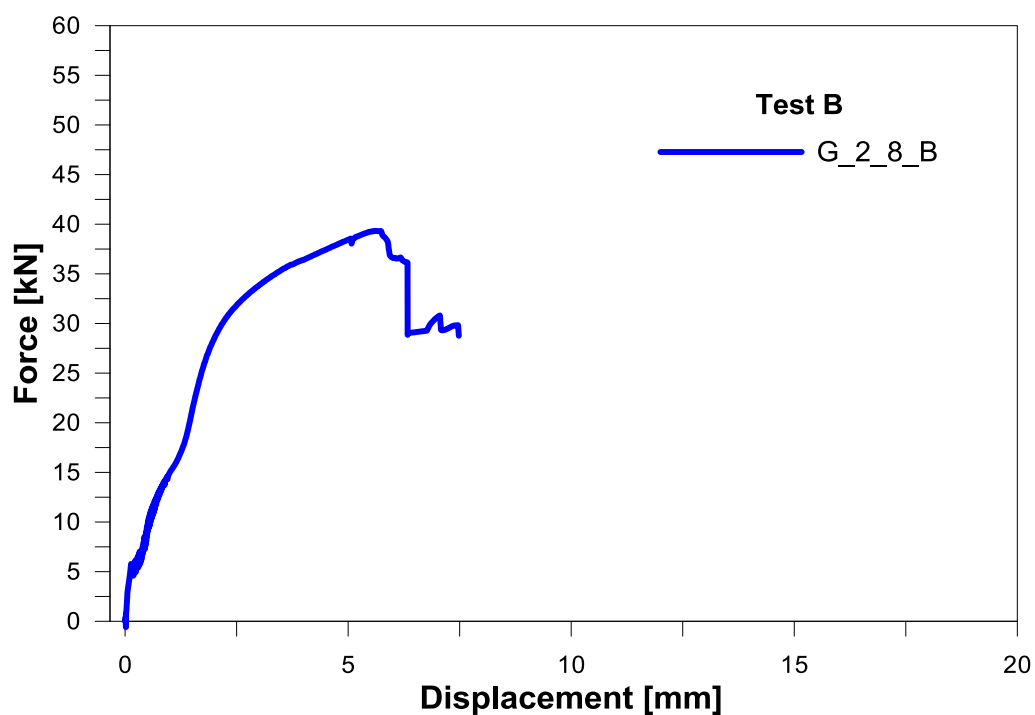


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 8 mm

Prova C

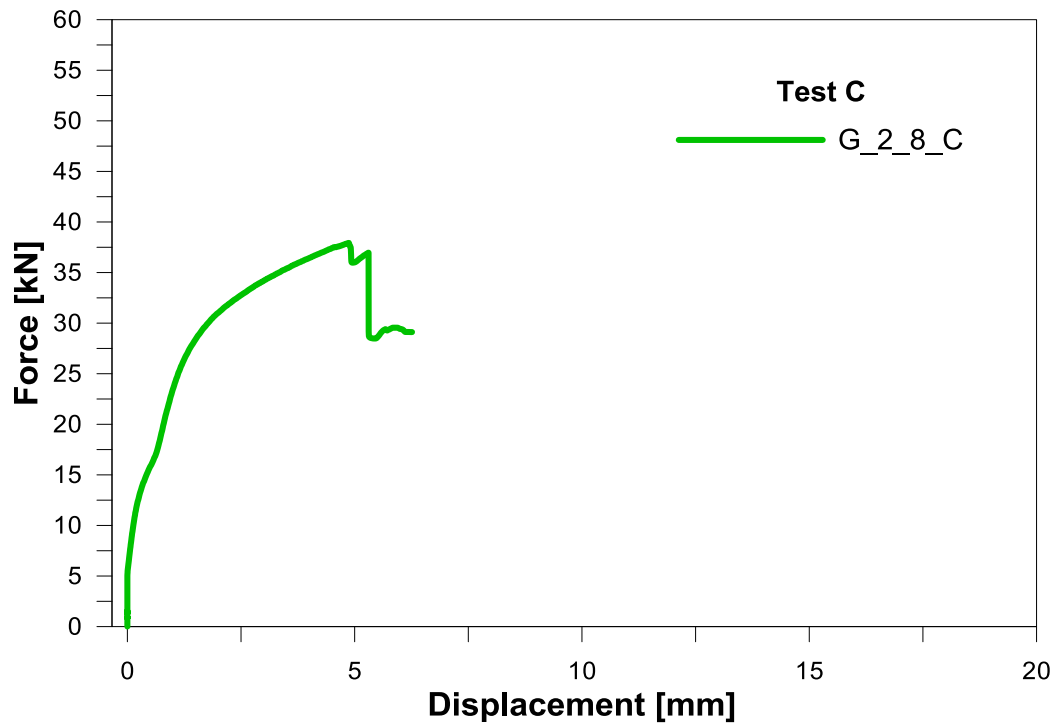


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 10 mm

Prova A

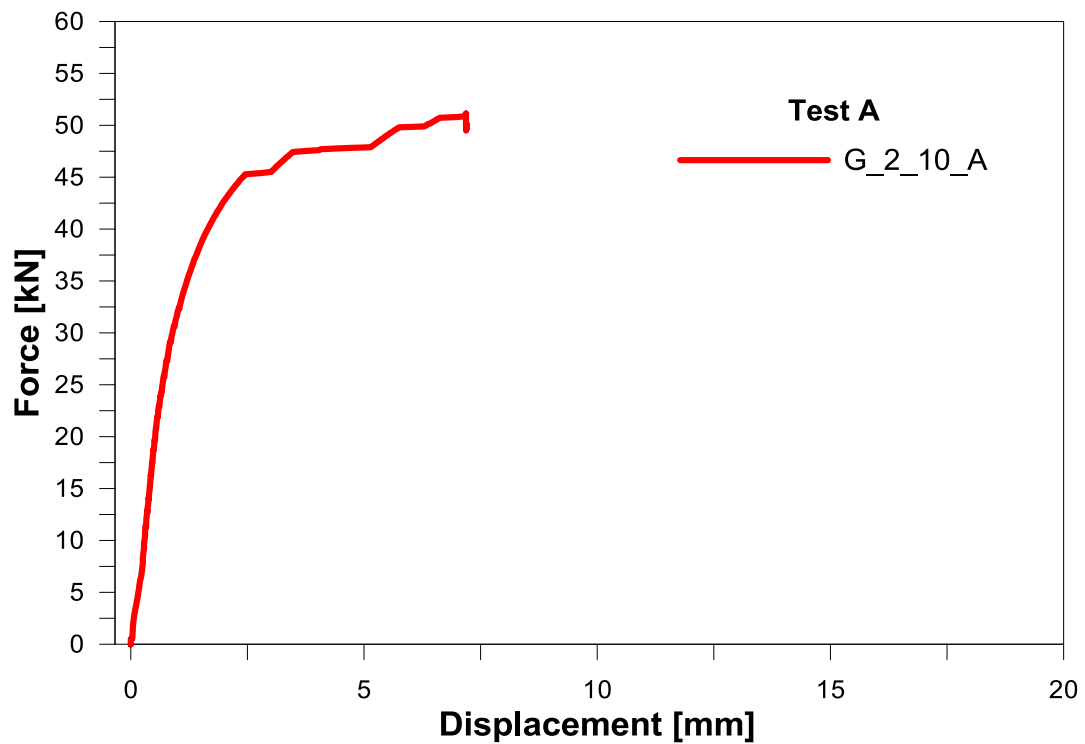


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 10 mm

Prova B

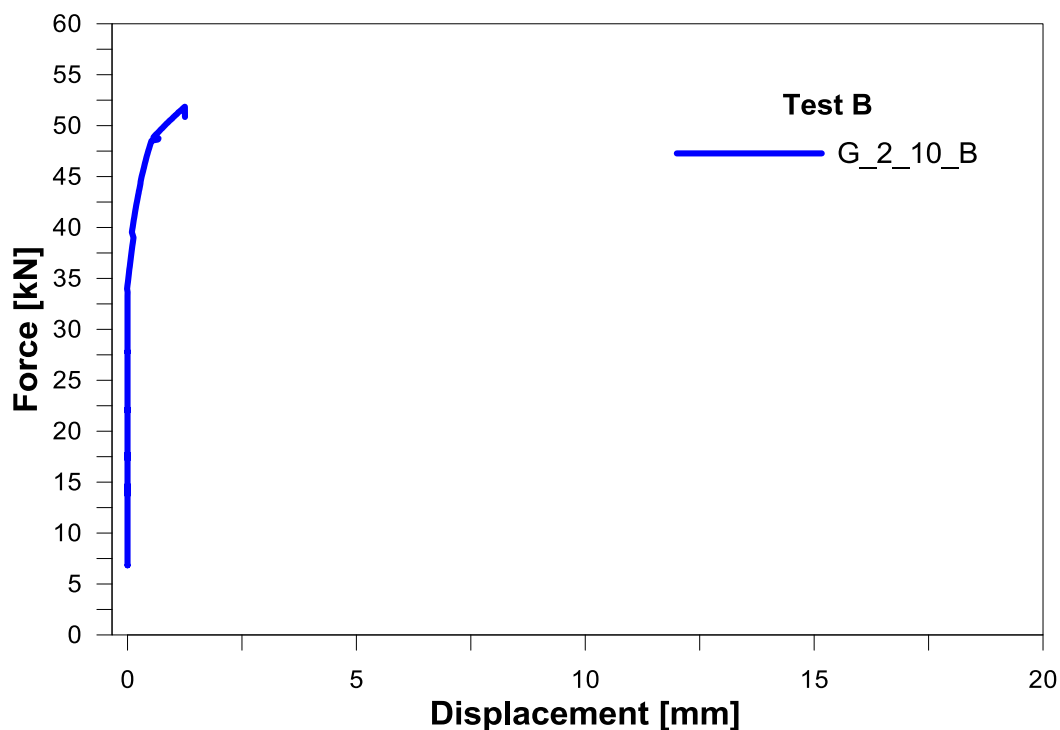


Diagramma Forza-Spostamento_ Trazione // alle fibre _2 bulloni ϕ 10 mm

Prova C

