POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in ARCHITETTURA COSTRUZIONE CITTÀ

Tesi di Laurea Magistrale

IL BAMBÚ. SPERIMENTAZIONE DEL BAMBÚ SPLITTATO NELLA REALIZZAZIONE DI UNA SERRA TUNNEL



Relatore

BOCCO Andrea

Co-Relatore

CERETTO Walter

Candidato

LEVETTO Francesco

"Dovremmo smettere di tacere soltanto quando abbiamo qualcosa da dire che valga più del silenzio"

JOSEPH ANTOINE TOUISSANT DINOUART

INDICE

Abstract [It]	p. 3
Abstract [En]	p. 5
IL BAMBÚ Caratteristiche generali Caratteristiche fisiche Caratteristiche meccaniche Bambú vs Legno Progetto strutturale Bambú splittato Giunti	p. 8 p. 10 p. 16 p. 22 p. 30 p. 36 p. 40 p. 44
PROGETTO: SERRA IN IL BAMBÚ SPLITTATO Serre per impiego agricolo Modello virtuale di arco Modello reale di arco Modello di serra con singoli archi Modello virtuale con 3 archi Modello reale con 3 archi Simulazione protipo di serra tunnel Conclusione	p. 52 p. 54 p. 58 p. 64 p. 74 p. 80 p. 86 p. 100 p. 108
APPENDICE Prove di laboratorio	p. 112 p. 112

BIBLIOGRAFIA ... p. 118 SITOGRAFIA ... p. 120 ARTICOLI SCIENTIFICI ... p. 121 RINGRAZIAMENTI ... p. 123

ABSTRACT [It]

L'agricoltura biologica è un metodo di coltivazione che sta crescendo molto in questi ultimi anni. Uno dei suoi pilastri su cui si basa è la lotta ai cambiamenti climatici causati dalle emissioni inquinanti.

Nonostante sia presente una normativa europea (Regolamento CE n° 834/2007)¹ a regolare questa tipologia di coltivazione, essa non prende in considerazione il fatto che per proteggere le colture utilizzando le serre, immettiamo nell'ambiente una quantità enorme di anidride carbonica per la loro realizzazione.

La CO_2 è un inquinante molto dannoso per il nostro pianeta, soprattutto legato all'aumento della temperatura planetaria con le relative conseguenze.

Per fermare questo aumento bisogna ridurre la produzione di anidride carbonica il più velocemente possibile.

Stando ai dati di ricerca, per ogni chilogrammo emesso dall'uomo si ha una perdita di circa 15 chilogrammi di ghiaccio dai ghiacciai con conseguente perdita di riserva idrica.²

Le convenzionali serre hanno una struttura portante interamente in acciaio che, fuso e lavorato per realizzare i pezzi necessari alla costruzione, producono un enorme quantitativo di CO₂.

Questa tesi si pone l'obbiettivo di cercare un'alternativa alla comune struttura della serra realizzata in acciaio utilizzando il bambú nella forma splittata, testando quanto sia la capacità portante della struttura.

La tesi è articolata in due macro capitoli: il primo di ricerca, sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del bambú, facendo anche un confronto con il legno, esplorando i riferimenti normativi per la realizzazione di strutture con questo materiale.

Il secondo riguarda lo sviluppo della sperimentazione sia attraverso l'utilizzo di un software (GSA) sia con modelli fisici, partendo da singoli archi e per poi arrivare al modello di serra tunnel completo. Successivamente, nella conclusione, si danno alcuni spunti per poter portare avanti la sperimentazione in futuro.

1. TONIONI MIRA, La normativa dell'agricoltura biologica, Cure-naturali. it,http://www.cure-naturali.it/la-normativa-dell-agricoltura-biologica/4249

2. Bignami Luigi, I ghiacciai hanno superato il punto di non ritorno, Focus, 24 marzo 2018, https://www.focus.it/ambiente/natura/riscaldamento-globale-ghiacciai-superato-il-punto-di-non-ritorno

ABSTRACT [En]

Biologic farming is a cultivation method that is growing a lot in recent years. One of its pillars on which it is based in the fight against climate change caused by polluting emissions.

Despite the presence of European legislation (EC Regulation No. 834/2007) to regulate this type of cultivation, it does not take into consideration the fact that to protect the crops using greenhouses, we introduce an enormous quantity of carbon dioxide into the environment for their realization.

CO₂ is a very harmful pollutant for our planet, above all linked to the increase in planetary temperature with its consequences.

To stop this increase, the production of carbon dioxide must be reduced as quickly as possible.

According to research data, for every kilogram emitted by man, there is a loss of about 15 kilograms of ice from the glaciers with a consequent loss of water reserve. Conventional greenhouses have a supporting structure entirely of steel for which, in the production of parts, an enormous quantity of CO₂ is produced.

This thesis aims to find an alternative to the common structure of the greenhouse made of steel using the bamboo in the split form, experiencing how much the load-bearing capacity of the structure was.

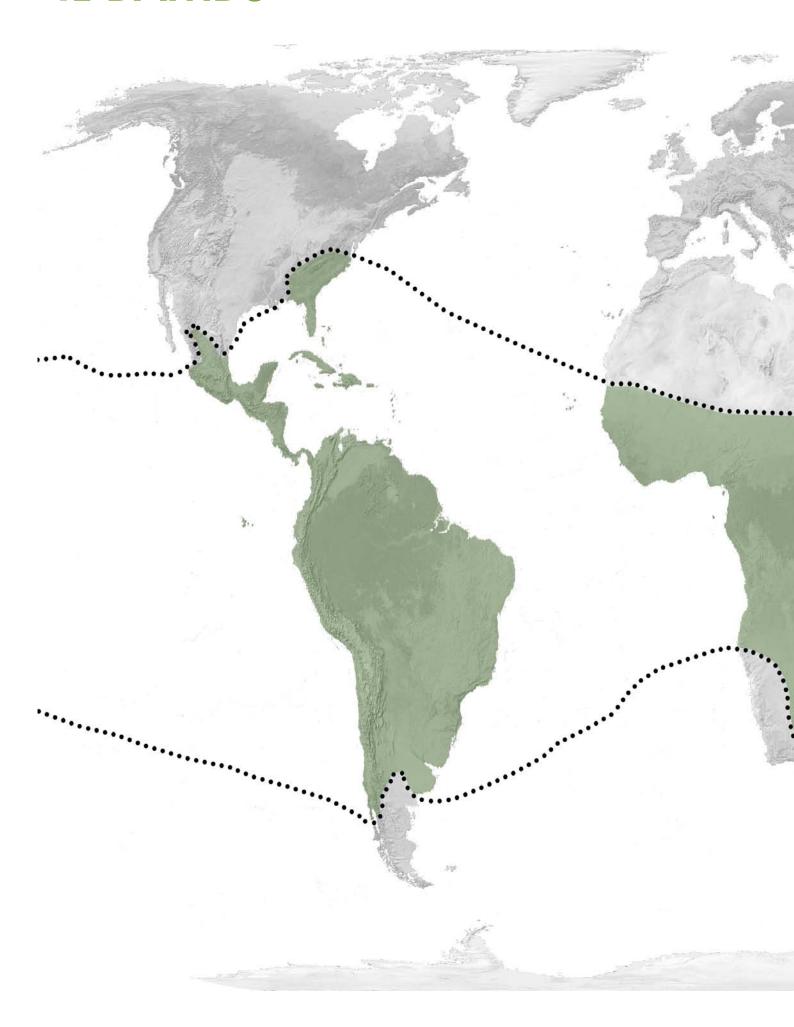
The thesis is divided into two macro chapters: the first of research, on the physical and mechanical characteristics of bamboo, also making a comparison with wood, exploring the normative references for the construction of structures with this material.

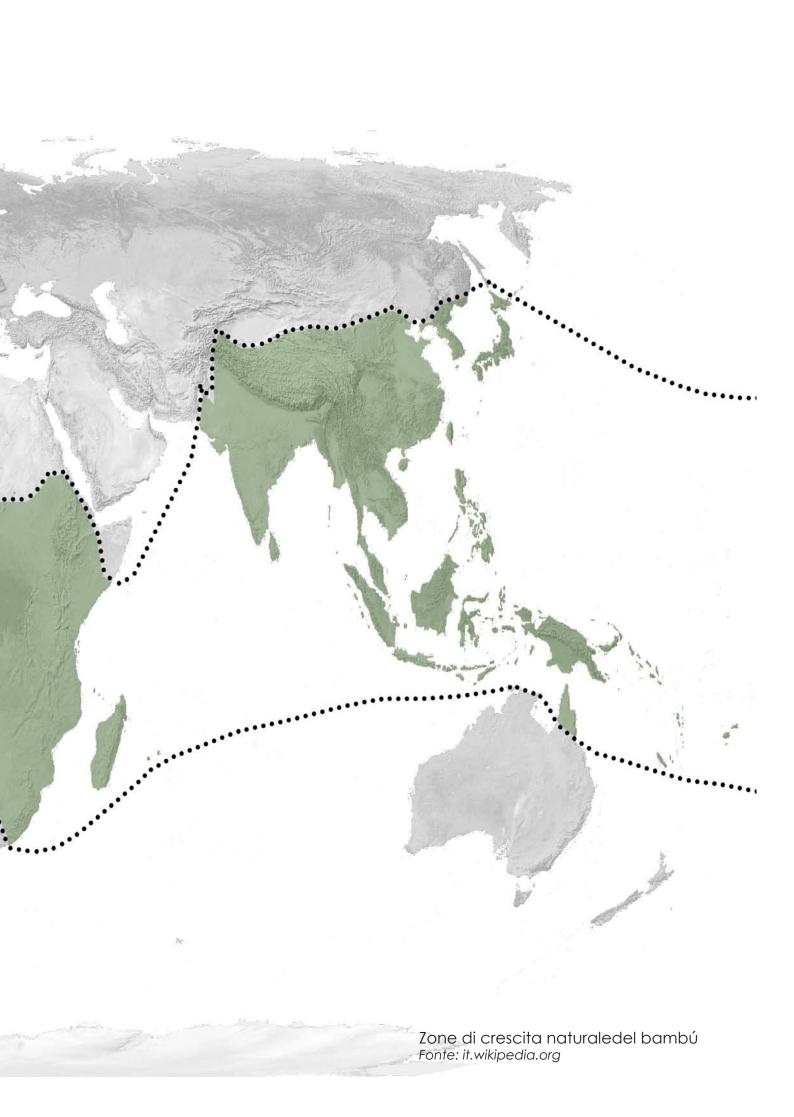
The second concerns the development of experimentation both through the use of software and physical models, starting from single arcs and then arriving at the complete tunnel greenhouse model. Subsequently, in conclusion, some ideas are given to be able to carry out experimentation in the future.

1. Tonioni Mira, La normativa dell'agricoltura biologica, Cure-naturali.it, http://www.cure-naturali.it/ la-normativa-dell-agricoltura-biologica/4249

2. BIGNAMI LUIGI, I ghiacciai hanno superato il punto di non ritorno, Focus, 24 marzo 2018, https://www.focus.it/ambiente/natura/riscaldamento-globale-ghiacciai-superato-il-punto-di-non-ritorno

IL BAMBÚ





Caratteristiche generali

Il bambú è una pianta graminacea che cresce spontanea in tutti i continenti, eccetto Europa e Antartide.

Al mondo ne esistono circa 1250 specie, anche se poco meno di 100 hanno caratteristiche adatte per impieghi strutturali.

Si differenzia dagli alberi in quanto non cresce in larghezza con il passare degli anni, ma si sviluppa in altezza. Questo vuol dire che esce dal terreno avendo un determinato diametro che manterrà per tutta la vita e crescerà solo verticalmente.

Cresce come sistema di radici che produce culmi. Questi possono raggiungere la loro altezza massima (oltre 20 m) in brevi periodi, anche solo 3 mesi, e alcune specie possono crescere 1 metro al giorno.

I culmi per essere impiegati in strutture devono raggiungere un certo grado di maturazione: da circa 3 anni fino ai 6, a seconda della specie.

Per questo tempo, mentre cresce, il bambú assimila CO_2 dall'ambiente, un ettaro di piantagione può assorbire 5 tonnellate di biossido di carbonio all'anno.



COMPOSIZIONE

IL RIZOMA

1. Mauricio Càrdenas Laverde, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 Il rizoma è la struttura di sostegno sotterranea del culmo e assorbe le sostanze nutritive della pianta.

Grazie alla rete molto fitta che forma nei primi 50-100 cm del sottosuolo, impedisce smottamenti di terreni e pendii e costituisce una solida fondazione resistente a venti forti ed erosione da parte delle acque.

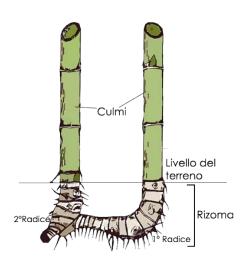


Fig.1 Sviluppo rizoma. Fonte: bambueco.com

Esistono due tipi principali di rizoma: monopodiali e simpodiali. I rizomi monopodiali crescono orizzontalmente e spesso con velocità e vigore e sono tipici delle specie che crescono in zone temperate. I rizomi simpodiali, corti e tozzi, danno origine ad un boschetto compatto con i culmi molto vicini fra loro, tipici di specie che crescono in zone tropicali (Fig.2).



Fig.2 Tipologie di rizoma: rizoma simpodiale e rizoma monopodiale.

Fonte: bambuseto.it

I CULMI

I culmi, cioè la parte che fuoriesce dalla terra, sono formati da tre diverse unità: il collo e una sequenza di nodi e internodi. Il collo è la parte che unisce il rizoma al culmo. I nodi sono i punti di unione degli internodi e sono la parte più resistente del culmo. Gli internodi sono la porzione di pianta compresa tra due nodi, vuota nella maggior parte delle specie.

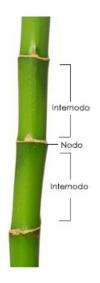


Fig.3 Culmo e sue parti. Fonti : colourbox.com

I culmi possono essere, a seconda dell'età, differenziati in:1

- -culmi giovani di massimo un paio di anni, sono utilizzati per produrre cesti rustici, stuoie e oggetti d'artigianato.
- -culmi maturi età che va dai 3 agli 8 anni che vengono utilizzati come materiale da costruzione (recinti, mobili, fibre industriali, agglomerati, pannelli e pavimenti) o nel settore agricolo e zootecnico.
- -culmi secchi età compresa tra 10 e 12 anni che vengono impiegati come materiale da combustione.

I RAMI

I rami nascono sopra la circonferenza del nodo e hanno il ruolo fondamentale di sostenere il fogliame.

Sono impiegati per la realizzazione di truciolati per il loro alto contenuto di fibre.

IL FOGLIAME

E' la parte della pianta che elabora gli alimenti assorbiti dal rizoma. Esso viene impiegato come foraggio per bestiame o per preparare bevande, profumi e medicine.



Fig.4 Culmo con rami e fogliame. I rami crescono sopra alla linea del nodo e la foglia ha una forma allungata.

Fonti: nl.depositphotos.com

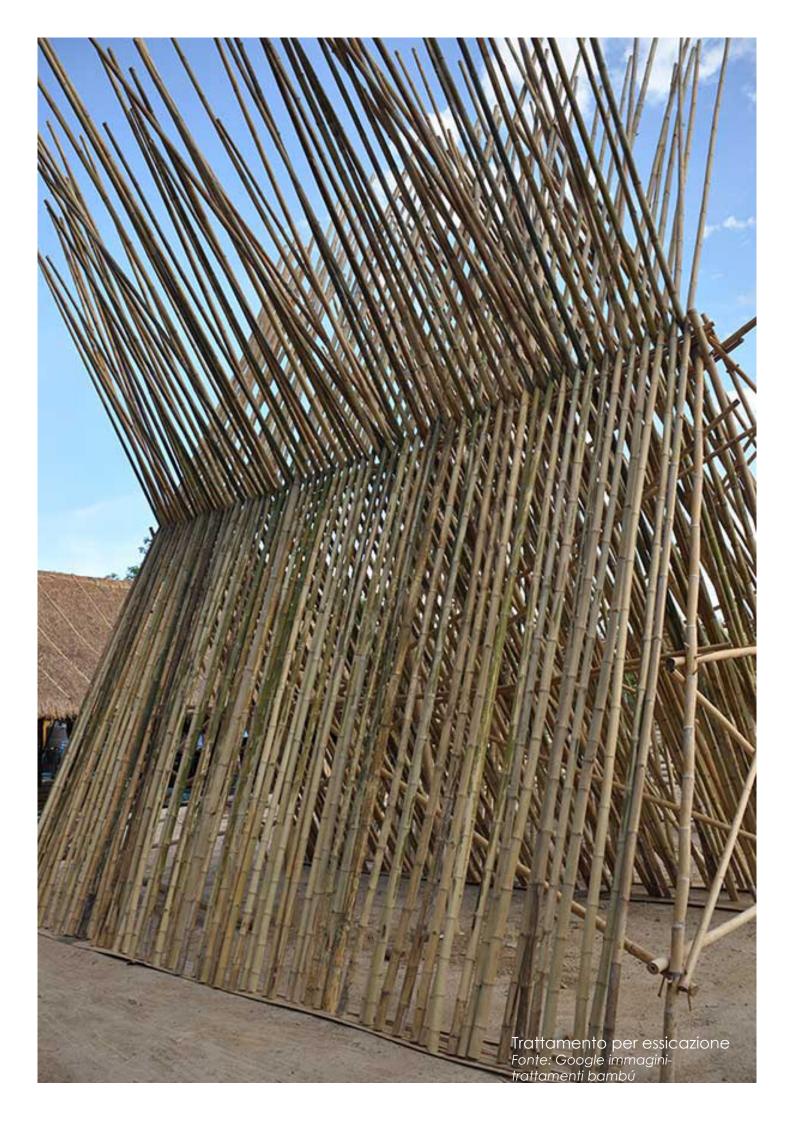
Caratteristiche fisiche

Anche se per millenni il bambú è stato utilizzato per impieghi strutturali in quasi tutti i continenti, ricerche per determinarne le caratteristiche strutturali sono state eseguite solo recentemente.

Esiste una relazione diretta tre 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.

Alcune proprietà del bambú cambiano con il passare del tempo e quindi a seconda dell'età del culmo; queste comprendono la densità, il contenuto di umidità, la resistenza meccanica e il modulo elastico.

Si è notato come molte di queste proprietà raggiungono un picco a una particolare età e decrescono se il culmo non viene raccolto. 1. J.J.A. JANSSEN, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991



FATTORI CHE INFLUENZANO LE PROPRIETÀ MECCANICHE

ETÀ DEL CULMO

L'età svolge un ruolo fondamentale per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche della pianta.

L'età ottimale del raccolto varia a seconda della specie e della localizzazione della piantagione.

Correal e Arberaléz, trovarono una relazione significativa tra età e densità, e tra età e resistenza a compressione. Questo è dovuto all'inspessimento delle fibre, fenomeno che accade con la maturazione della pianta; al contrario, non è stata trovata una relazione tra resistenza al taglio ed età: il bambú non sviluppa mai fibre trasfersali che dovrebbero fare da "legante".

Limaye, notò che il modulo elastico varia a seconda dell'età². In questo studio, però, il range considerato è abbastanza limitato, in quanto Limaye osservò il comportamento di piante con un'età massima di 2/3 anni, quando quelle utili per la realizzazione di costruzioni hanno un grado di maturazione superiore.

Inoltre, la variazione del modulo elastico è abbastanza significante per il bambú verde, ma relativamente ridotta per quello secco.

Tuttavia, altre ricerche hanno dimostrato che il modulo elastico cresce da 1 a 5 anni del culmo, poi inizia a decrescere.3

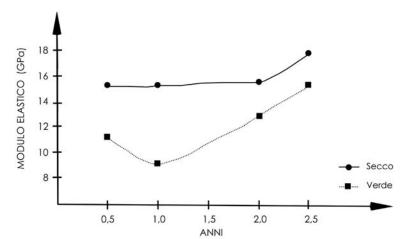


1.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge,2016

2.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge,2016

3.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge,2016

cita Low, I.M., CHE, Z.Y., LATELLA, B.A., SIM, K.S., Mechanical and fracture properties of bamboo. Key Engineering Materials 312, 2006.



Graf. 1 Effetto degli anni sul modulo elastico in culmi verdi e secchi Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials cita Limaye (1952).

DURABILITA'

La durabilità dipende dalla specie, infatti alcune ricerche dimostrano come, ad esempio, la Guadua angustifolia, abbia un'intrinseca resistenza agli attacchi di insetti e funghi a differenza di altre specie.

Questa resistenza è dovuta alla poca presenza di amido all'interno del culmo, il cui quantitativo dipende sia dall'età (nel primo anno non si ha presenza di amido ma solo successivamente), dalla stagione (soprattutto in quella secca se ne ha un notevole aumento per permettere la crescita di nuovi germogli), dalla parte del culmo (maggiore presenza nelle parti alte e minore in quelle basse) e, come già detto, dalla specie.

Naturalmente e senza alcuna manutenzione un culmo di bambú resiste, in generale, per:⁴

- -1/3 anni all'aperto e a contatto col suolo,
- -4/6 anni sotto una copertura e non a contatto col suolo,
- -10/15 anni al completo riparo da qualsiasi agente esterno che potrebbe deteriorarlo.

Per prolungare la vita dei culmi di bambú è possibile utilizzare alcuni metodi di trattamento: di tipo chimico, attraverso soluzioni che prevedono l'utilizzo di arsenico, boro, rame, eccetera; di tipo tradizionale, come affumicamento, immersione in acqua salta o cottura (Fig.5).

Nonostante i trattamenti chimici sono più standardizzabili e permettano un grado di conservazione superiore a quelli tradizionali, sono, dal punto di vista dell'impiego di risorse e ambientale, meno sostenibili.⁵

4. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008

5. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli, 2008



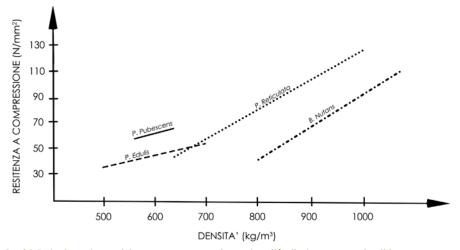


Fig. 5 Trattamenti per prolungare la vita dei culmi. A sinistra trattamento per immersione a destra metodo *Boucherie*.

Fonti: GaduaBambú.com e Flickr.com

MASSA VOLUMICA

Per il bambú varia tra 500 e 900 kg/m³ a seconda della specie, mentre nel legno tra i 300 e i 1040 kg/m³.6

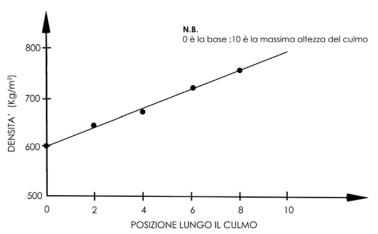


Graf.2 Relazione tra resistenza a compressione densità di alcune specie di bambú.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials.

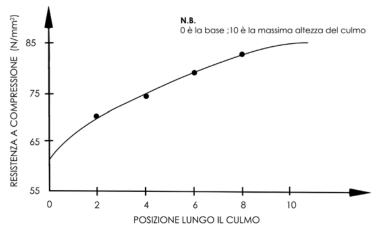
6.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge, 2016

Uno studio effettuato da Zhou, dimostra come la massa volumica è influenzata sia dalla porzione di culmo sia dall'età. La densità aumenta dal basso verso l'alto e dall'interno all'esterno del culmo, infatti, come si può notare nel secondo grafico sottostante, la resistenza a compressione aumenta nella parte superiore (*Graf.4*). Al contrario, il contenuto di umidità è minore nella parte inferiore del culmo e maggiore in quella superiore (*Graf.5*).



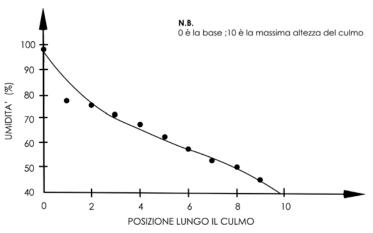
Graf.3 Densità lungo l'altezza del culmo.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials cita Zhou, F., Studies on physical and mechanical properties of bamboo wood (1981).



Graf.4 Resistenza a compressione lungo l'altezza del culmo.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials, cita Zhou, F., Studies on physical and mechanical properties of bamboo wood (1981).



Graf.5 Umidità lungo l'altezza del culmo.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials, cita Zhou,F., Studies on physical and mechanical properties of bamboo wood (1981).

Le ricerche di Ota (1950) e in seguito quelle di Zhou (1981) hanno dimostrato come il valore di densità delle fibre sia correlato allo sforzo di compressione, flessione e trazione; questo perché più è denso il culmo più è alto il contenuto di cellulosa.⁷

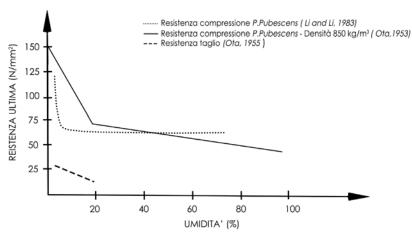
La massa volumica media è pari a 650 kg/m³⁸.

CONTENUTO DI UMIDITA'

Il contenuto di umidità è la quantità d'acqua all'interno di un culmo, calcolabile sottraendo al peso del culmo umido, il peso del culmo secco e dividendo il risultato per quest'ultimo.

Il valore può risultare superiore al 100% se almeno il 50% del peso è dato dall'acqua.9

Determinare il contenuto di umidità è fondamentale per avere un'idea della durabilità e dei valori di resistenza meccanica: infatti, la resistenza è inversamente proporzionale al contenuto di acqua (Graf.6).



Graf.6 Effetti dell'umidità rispetto alla resitenza.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials.

Il culmo è più resistente se il contenuto di umidità tende ad azzerarsi, ma allo stesso tempo diventa meno elastico e lavorabile.

- 7.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge, 2016
- 8. CHIACCHIERA PAOLO E GHIRARDOT-TI DAVIDE, Costruzione in bambú secondo i manuali di Yona Friedman, Politecnico di Torino, relatori Bocco Andrea e Ceretto Walter, Torino, 2016
- Mauricio Càrdenas Laverde, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli, 2008

Caratteristiche meccaniche

La ricerca di dati per caratterizzare le resistenze meccaniche del bambú ha più di 90 anni. Sono stati usati approcci diversi, a volte con risultati non del tutto soddisfacenti, in quanto l'adozione di procedure di prova del legname non è appropriata per capire le proprietà dei culmi.

Le recenti norme ISO 22156 e 22157 (2004), danno un'impostazione generale su come effettuare dei test che vengano riconosciuti.

Nei paragrafi seguenti vengono presi in considerazione dati raccolti da J.J.A. Janssen e F.A. MC Clure. 1. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,-Boston,1991 e F.A. MCClure, Bambú as a Building Material, Washington, DC: Peace Corps, Information Collection and Exchange, 1982.



LA TRAZIONE

Per quanto riguarda la trazione parallelamente alle fibre, il bambú presenta caratteristiche meccaniche eccezionali se paragonato ad altri materiali utilizzati nelle costruzioni.



Le forze applicate sono uguali e contrarie e vanno dal baricentro verso l'esterno.

La trazione può essere influenzata dalla massa volumica, in quanto meno denso è il materiale più la resistenza diminuisce; questo è dovuto al fatto che si riduce il numero delle fibre.

La parte più esterna del culmo (molto fibrosa) è più resistente rispetto alla parte interna.

Anche l'età influenza la trazione: dagli esperimenti eseguiti da Zohu Fangchun su culmi da 1 a 10 anni provenienti da regioni differenti, trovando la resistenza ultima a trazione per ognuno dei 5 range d'età in cui sono stati suddivisi.²

VALORE MEDIO N/mm²	159.79	193.77	189.72	193.18	177.50
Damaoshhan	137.11	185.46	187.50	187.00	172.88
Shimen	163.92	191.22	194.82	184.46	169.98
Yixing	186.18	209.41	197.67	201.65	185.39
Xiashu	151.96	189.00	178.89	199.60	181.74
ETA' IN ANNI DISTRETTO					
CLASSI DI ETA'	J	2	3	4	5

Tab.1 Valori di resistenza ultima a trazione in N/mm^2 in funzione delle classi di età del culmo.

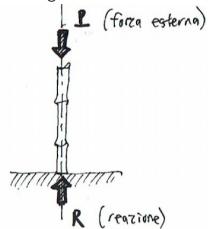
Fonte: Il Bambú come materiale da costruzione.

Come si può notare dalla tabella (Tab.1), la resitenza massima si ha, tra la seconda e la quarta fascia di età, da 3 a 8 anni.

2. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli, 2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991

LA COMPRESSIONE

Nel caso della compressione le forze applicate sono uguali e contrarie ma convergono verso il baricentro.



La resistenza a compressione, come nel caso precedente, è influenzata dall'età del culmo, dalla massa volumica, ma anche dal contenuto di umidità e dalla porzione di culmo considerata.

Come si può notare dalla tabella,3 con il crescere dell'età e

Tab.2 Valori di resistenza ultima a compressione nelle differenti porzioni di culmo.

Fonte : Il Bambú come materiale da costruzione.

LEGENDA:

S=superiore M=medio I=inferiore

		CAMP.VERDI			
	POSIZIONE	MC [%]	$\sigma_{\rm c} = [N/mm^2]$	σ _o [N/mm²]	
	S	125	35.2	64.8	
,	M	121	35.4	63.5	
1	1	116	38	66.5	
	Medio	121	36.2	64.9	
	S	91	43.8	64.2	
2	M	88	45.7	74.8	
2	1	46	54.8	69.7	
	Medio	85	47.1	69.5	
	S	98	43.7	87.9	
3	M	83	44.8	83.9	
3		79	48.9	85.6	
	Medio	87	45.8	85.4	
i i	S	81	49.4	53.5	
4	M	90	54.2	59.4	
4	1	84	45.1	61.3	
	Medio	85	48.6	58.1	
	S	80	47.3	69.2	
-	M	74	47.6	71.8	
5	1	77	50.2	64.1	
	Medio	77	48.4	68.4	

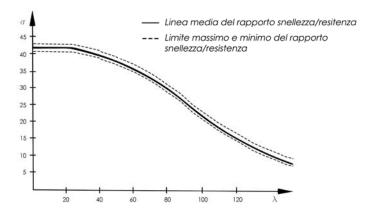
con il crescere della posizione lungo il culmo, dal basso verso l'alto, si ha un incremento della resistenza, con un valore massimo raggiunto intorno al terzo anno di età.

Successivamente, si può notare una lieve decrescita della tensione ultima.

Una prova importante per quanto riguarda la compressione è il test di buckling che permette di capire quanto un elemento snello, sottoposto a carico di punta, possa resistere alla compressione. La snellezza, che provocai nstabilità dell'asta compromette la resistenza a questo tipo di carico. Nel grafico seguente si può notare come la relazione tra snellezza e resistenza abbia un andamento molto simile alla curva euleriana teorica (Graf.7).⁴

^{3.} MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli, 2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991

^{3.} MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991



Graf.7 Relazione tra resitenza ultima di buckling e la snellezza.

Fonte: Il Bambú come materiale da costruzione.

IL TAGLIO

I risultati al taglio nel bambú manifestano valori relativamente bassi. Dai una serie di sperimentazioni condotte da J.L. Atrops, si è dimostrasto come la resistenza decresca con l'aumentare della lunghezza di superficie di taglio.⁵

resistenza a taglio			
	MIN.	MAX	
STRISCIA	16.9 N/mm ²	23.1 N/mm ²	
CULMO	14.7 N/mm ²	22.2 N/mm ²	

Tab.3 Valori di resistenza a taglio per strisce e culmi di bambú.

Fonte: Il Bambú come materiale da costruzione.

6. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991

5. Mauricio Càrdenas Laverde, Il Bambú come materiale da costruzione, Si-

che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry

Sciences), Kluwer Academic Publi-

stemi editoriali, Napoli,2008

shers, Boston, 1991

La resistenza al taglio è circa l'8% della resistenza a trazione e la rottura avviene per la mancanza di fibre in direzione perpendicolare a quelle utili per compressione e trazione; per questo motivo gli internodi sono meno resistenti al taglio rispetto ai nodi.⁶

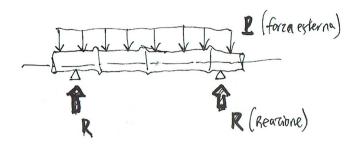
Anche in questo caso la resistenza è influenzata dal contenuto di umidità e dall'età. La resistenza aumenta con l'aumentare dell'età e al diminuire dell'umidità.

	ETA' IN ANNI	MC %	σ _t N/mm²
Ī	1	109	6.75
	2	85	7.65
	3	85	7.93
	4	75	9.82

Tab.4 Valori diel taglio in funzione del contenuto di umidità e dell'età. Fonte : Il Bambú come materiale da costruzione.

LA FLESSIONE

I culmi di bambú soggetti a flessione presentano una notevole resistenza, paragonabile alle essenze legnose utilizzate nelle costruzioni.



Da alcuni dati di sperimentazioni riportate da J.J.Janssen nel suo libro, che mettono in relazione la resistenza ultima a flessione, diametro e spessore dei culmi, si è potuto notare come all'aumentare del diametro del culmo la sua resistenza a flessione diminuisce, nonostante lo spessore aumenti (Tab.5).⁷

DIAMETRO [mm]	67	70	73.2	76.4	79.6	82.8	85.9
Spessore 5 mm	61.9	55.4	51.9	44.8	43	39.7	36.7
Spessore 6 mm	60.2			49	41.5	38.9	30.4

Tab.5 Relazione tra resistenza a flessione, diametro e spessore dei culmi. Fonte : Il Bambú come materiale da costruzione.

Sono state svolte da V.D. Lymaye che mettono in relazione la resistenza ultima a flessione con la massa volumica, l'età del culmo e l'umidità e posizione lungo il culmo.

ETA"	ρ kg/m³		σ	N/mm ²	Е	N/mm²
	VERDE	STAGIONATO	VERDE	STAGIONATO	VERDE	STAGIONATO
1	521	633	61.4	96.5	9410	13940
2	632	728	56.5	83.0	8830	11370
3	607	680	58.9	92.1	9430	13080
4	613	734	67.4	76.1	10840	11010
5	655	773	79.5	100.2	13010	15390

Tab.6 Valori della tensione ultima a flessione e modulo elastico in funzione della posizione lungo il culmo per campioni di bambú verde e bambú stagionato.

Fonte : Il Bambú come materiale da costruzione.

Si è notato come massa, età e contenuto di umidità influenzino la resistenza flessionale. Si deduce, quindi, che per l'impiego strutturale è bene adottare culmi di età di almeno 3 anni e che bambú stagionati offrono prestazioni nettamente superiori rispetto a quelli verdi sino al quarto anno d'età.8

8. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991

^{7.} MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991

9. MAURICIO CARDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991

10. Ministero de Vivienda, Costrucción y Saneamiento, Norma Técnica E.100 Bambú, Settembre 2012, paragrafo 8.5

11. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 che cita 1. J.J.A. Janssen, Mechanical Propreties of Bambú (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers,Boston,1991

IL MODULO ELASTICO

Il modulo elastico è la grandezza propria di ogni materiale che esprime il rapporto tra tensione e allungamento.

I moduli elastici sono tre poiché tre sono i principali tipi di tensione (compressione, trazione e taglio). Quelli che risultano più rilevanti ai fini delle prove di laboratorio, fatte anche su altri materiali, sono quelli a compressione e trazione. Questi valori, come già esaminato, sono fortemente influenzati dalla presenza di umidità nel culmo.⁹

Umidità MC %	Modulo Elastico "E" N/mm²	Compressione σ_c N/mm ²	Trazione σ ₁ N/mm²	Taglio σ _v N/mm²
0.0	22500	238	63.20	9.99
7.5	21500	201	54.80	9.30
38.2	15500	175	35.80	6.36
81.2	11760	150	43.30	6.98

Tab.7 Relazione tra le varie caratteristiche meccaniche e l'umidità.

Fonte: Il Bambú come materiale da costruzione.

Il modulo di elasticità medio, riportato dalla normativa peruviana, è di 9500 N/mm². 10

LA TORSIONE

Da test effettuati da K.M. Ueda su bambú di specie Phyllostachys edulis "splittato" è stato ricavato il valore prestazionale a torsione.

I valori ricavati, variano dai 1000 ai 1130 MPa con un valore medio di 1090 MPa.¹¹

NUMERO ESPERIMENTO	Modulo di Rigidezza "G" N/mm²
1	1050
2	1180
3	1100
4	1080
5	1060
6	1020
7	1130
Media	1090

Tab.8 Valori della rigidezza torsionale. Fonte : Il Bambú come materiale da costruzione.

Bambú vs Legno

COMPARAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DI BAMBÚ E LEGNO

I generi che verranno prese in considerazione e comparate con il legno sono il Gadua e il Moso. Uno studio effettuato da Van Hall Larenstein-University of Applied Sciences nel 2010, ha preso in considerazione questi due generi di bambú per paragonarne le caratteristiche meccaniche con il legno.

La specie *Phyllostachys* (Moso) è la specie di bambú comunemente utilizzata nella produzione industriale in tutto il mondo. La Cina ne è il più grande produttore ed è la specie utilizzata per la fabbricazione di quasi tutti i prodotti occidentali in bambú.¹

Guadua Angustifolia è difficilmente reperibile nei mercati industriali occidentali (UE e USA) ma, essendo una specie che sta avendo una notevole esportazione dal Sud America, sta diventando una delle principali specie utilizzate nel campo delle costruzioni.²

- 1. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011
- 2. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011



Bambú essicato Guadua angustifolia Fonte: http://Google immagini- Guadua angustifolia



Legno Meranti Fonte: http://Google immagini- Meranti legname

CARATTERISTICHE MACROSCOPICHE

La struttura anatomica della pianta determina le sue caratteristiche di resistenza e l'impiego in edilizia.

Essa è composta di fasci vascolari, fibre che si sviluppano unicamente in senso longitudinale, ossia lungo la direzione di sviluppo del culmo. Questa disposizione varia in corrispondenza dei diaframmi nodali dove si sovrappongono ed intersecano, dando vita alla diversa struttura di tale componente. Queste fibre sono "immerse" nel parenchima, tessuto connettivo tra gli elementi longitudinali, composto prevalentemente da lignina.

Per quanto riguarda le specie prese in esame, le Phyllo-

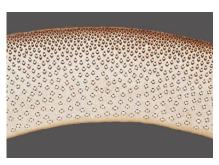


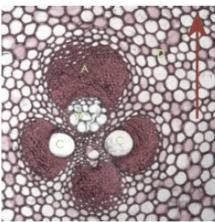


Fig.6 Differenze macroscopiche dei fasci vascolari rispettivamente di Moso e Guadua. Fonte : Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú; Guadua vs Moso.

stachys hanno una grana più sottile rispetto alle Guadua poiché i suoi fasci vascolari sono più piccoli. In entrambii generi di bambú, la concentrazione dei fasci vascolari aumenta andando dall'interno del culmo verso l'esterno.³ L'aumento di fibre nella parte esterna comporta una maggior resistenza di quest'area del culmo.⁴

CARATTERISTICHE MICROSCOPICHE

Il tessuto conduttore (floema e metaxilema) nel cuore dei fasci vascolari è circondato, in entrambe i generi di bambú prese in considerazione, da guaine di sclerenchima⁵. Le differenze possono essere riscontrate nel fatto che Moso



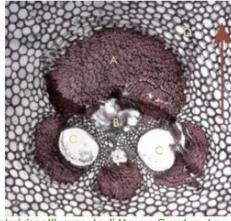


Fig.7 Differenze microscopiche dei fasci vascolari rispettivamente di Moso e Guadua. La freccia indica verso l'esterno della parete del culmo.

Fonte : Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso.

- 3. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011
- 4. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011

5. SLERENCHEMINA: è un tessuto vegetale che assieme al collenchima, formano un tessuto adulto di tipo meccanico. Questi tessuti hanno la funzione di sostenere la pianta, contrastando le varie forze a cui essa è sottoposta. Formato da cellule che in genere sono morte, con parete cellulare ispessita e solitamente lignificata, quindi non più plastica.

LEGENDA:

- A. Guaine di sclerenchima
- B. Floema
- C. Metaxilema
- D. Parenchima

ha quattro fogli di sclerenchima di simili dimensioni, mentre Guadua presenta due guaine (a sinistra e a destra) di uguale dimensione, mentre quella che circonda la via intracellulare è molto più piccola, e quella che circonda il floema è notevolmente più spessa.⁶ Questa permette di essere più resistente alla segagione rispetto a Moso.

6. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011

DENSITA', MODULO ELASTICO E RESISTENZA A FLESSIONE

Le proprietà meccaniche di Guadua e Moso sono state testate secondo lo standard certificato KOMO.^{77a}

Le prove, effettuate da *University of Applied Sciences* dei Paesi Bassi, sono state eseguite su strisce singole (non laminate), al fine di ottenere dati sul bambú nella sua condizione naturale.

Al fine di fornire un riferimento, i risultati del test sono stati confrontati con due specie di legno: l'abete rosso di Norvegia e il Meranti rosso scuro, scelti perché comunemente usati nel mercato olandese.

I risultati del test a flessione mostrano le caratteristiche delle varie specie prese in esame con relativi moduli di elasticità e di rottura.

7. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011

7a. CERTIFICAZIONE KOMO: "La certificazione KOMO è uno standard internazionale di qualità che fornisce garanzie sia per la domanda che per l'offerta nel settore edile. [..] contribuisce alla qualità e alla sicurezza, dichiara l'idoneità all'uso [..]". Cit. da sito www.komo.nl

DENSITÀ

La densità è stata misurata per Moso con un contenuto di umidità del 10,3% e per Guadua del 12,6%.8

I due generi di bambú hanno densità simili, con una valori che variano tra 550-650 kg/m³ per Moso e 650-690 kg/m³ per Guadua; questa leggera differenza è probabilmente causata dal contenuto di umidità superiore in Guadua. In entrambe le specie, i nodi hanno una densità maggiore rispetto agli internodi, ma questa non risulta significativa. La densità di entrambi i bambú è inferiore al Meranti rosso (710 kg/m³), ma comunque superiore all'abete norvegese (480 kg/m³).

8. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011

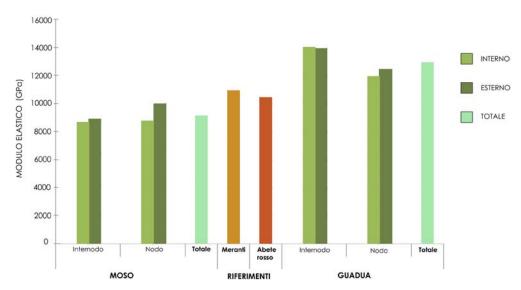
MODULO ELASTICO

I moduli di elasticità e di rottura sono stati misurati sia per gli internodi che per i nodi, e con l'esterno della parete del culmo splittato posizionato alternativamente prima verso l'alto e poi verso il basso.

Il bambú di Guadua ha un modulo di elasticità significativamente più alto di Moso, del Meranti e dell'abete rosso della Norvegia.

Quando la parete esterna del culmo è stata posizionata verso l'alto, il modulo elastico è risultato più elevato.⁸

^{8.} STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011



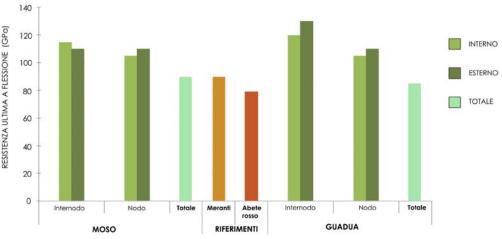
Graf.7 Differenze di modulo elastico tra bambú Moso, Guadua e alcune essenze di le-

Fonte: Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso.

RESISTENZA A FLESSIONE

Moso e Guadua hanno una resistenza alla flessione simile tra loro e prossima a quella del Meranti, e superiore all'abete.

Guadua ha una resistenza alla flessione maggiore quando l'esterno della parete del culmo è posizionato verso l'alto, mentre Moso ha una resistenza alla flessione abbastanza omogenea, difatti non c'è una grande differenza tra nodi e internodi e l'influenza del posizionamento della parete interna ed esterna del culmo è minima.



Graf.8 Resistenza ultima a flessione tra bambú Moso, Guadua e alcune essenze di legno. Fonte: Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso.

RESISTENZA ULTIMA A FLESSIONE (GPa)

9a. CLASSE DI RESISTENZA "C": il legno massiccio di conifera viene definito con le classi di resistenza C seguite da una cifra che ne identifica la classe (CXX). Con l'aumentare del valore, aumenta il grado di resi-

9. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bam-

bú: Guadua vs Moso, GaduaBamhttps://www.guaduabambú.

com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guad-

ua-vs-moso, 21 gennaio 2011

Per riferimenti vedere: GG MM 2014, Progettazione di strutture in legno, Eurocodice 5.

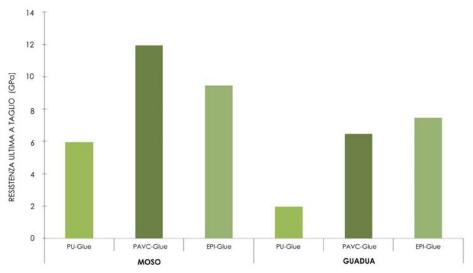
Comparando questi risultati con le classi di resistenza del legname, Moso appartiene alla classe di resistenza C16 e Guadua alla classe di resistenza C35.99a

Da questo è evidente che Guadua sia più resitente a sostenere carichi di Moso mentre quest'ultimo inizi a deformarsi prima.

INCOLLAGGIO

Per quanto riguarda l'incollaggio del materiale, ovvero la possibilità di incollare più strati di bambú l'uno sull'altro o con altri materiali, Moso presenta un buon valore di resistenza, anche se non con tutte le colle (la resa ottimale avviene con colle PVAC ed EPI).¹⁰

10. STÉPHANE SCHRÖDER, Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso, GaduaBambú, https://www.guaduabambú.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bambú-guadua-vs-moso, 21 gennaio 2011



Graf.9 Prove a taglio di provini incollati con differenti colle.Fonte: Confronto tra le proprietà meccaniche di Bambú: Guadua vs Moso.

Possiamo concludere dicendo che *Phyllostachys* e *Guadua angustifolia* sono due generi che possono essere concorrenti 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.

Progettazione strutturale

NORMATIVA

Gli standard sono la base per l'accettazione a livello internazionale di un materiale sul mercato e per consentirne l'impiego nell'ambito delle costruzioni.

La prima normativa sul bambú è del 1973, anno in cui è stato emanato l'Indian Standard 6847.1

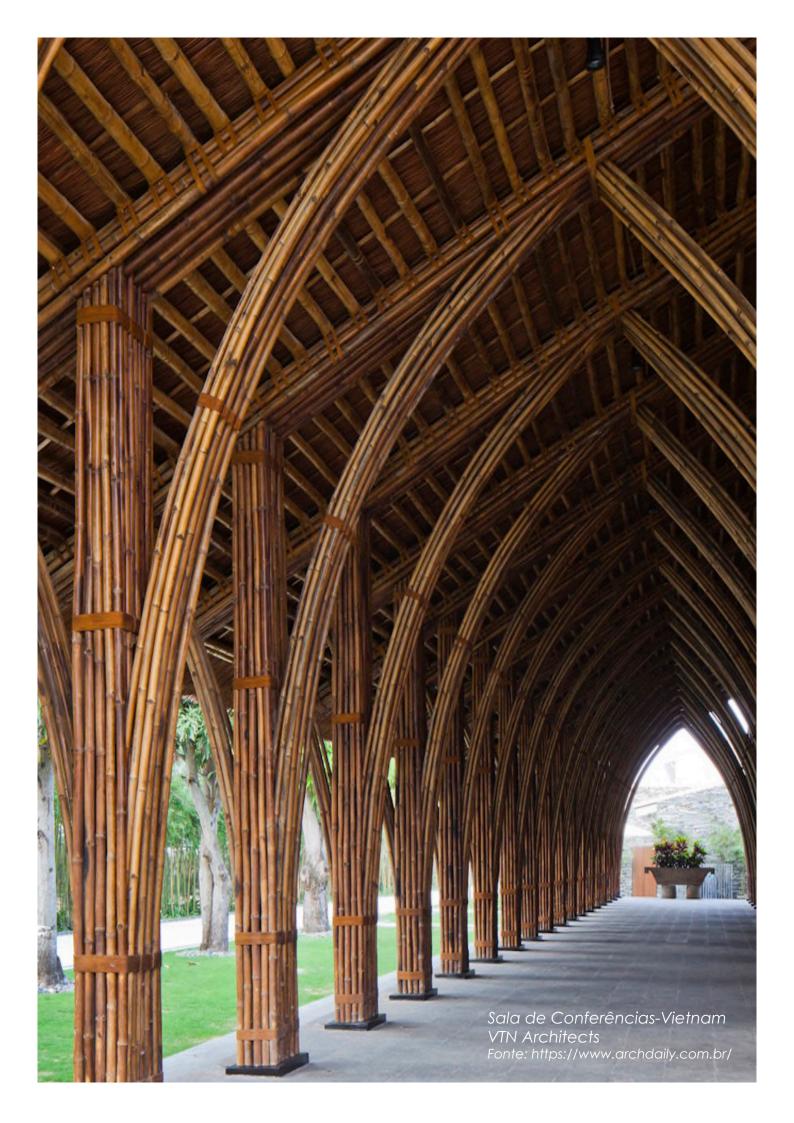
Prima di quella data ogni ricercatore faceva le proprie ipotesi ed eseguiva test sul bambú in modo indipendente, rendendo molto difficile la comparazione con altri dati.

Esistono diverse normative nazionali, esempi sono la normativa cinese (JG/T 199), la normativa colombiana (Realamento Colombiano de Construcción Sismoresistente) e peruviana (Reglamento Nacional de Edificaciones, Code E100). Queste prevedono l'utilizzo del bambú a culmo intero e non ammettono la possibilità di utilizzo del bambú "splittato", ovvero tagliato a striscie lungo la lunghezza del culmo.

Negli anni 2000 vennero pubblicate le prime normative ISO per le costruzioni in bambú.

1.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge,2016

2. Gato' O, Sharma, Bock, Mulligan and RAMAGE, Sustainable structures: Bambú standards and building codes, https://www.researchgate.net/publication/284345386, Ottobre 2014



- 3 MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli, 2008
- 4. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, II Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 cita la Normativa ISO/DIS 22156,
- "Questo standard internazionale si applica all'uso delle strutture di bambú, cioè strutture fatte di bambú (bambú a culmo intero, bambú splittato, bambú laminato ed incollato) o pannelli a base di bambú[..]"
- 5. MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 cita la Normativa ISO/DIS 22156,
- "uniti con adesivi o elementi di fissaggio meccanici."

Dall'inizio degli anni 2000 si è cercato di unificare le normative in standard che valessero a livello planetario, così, nel 2001, sono state pubblicate le ISO/DIS 22156 Bambú structural design e la ISO/DIS 22157 Determination of physical and mechanical proprieties of bamboo.³

Queste, nonostante non siano esaustive come la normativa riguardante acciaio, cemento armato o legno, danno direttive generali sulla progettazione con bambú sia a culmo intero sia con bambú "splittato", da come si può leggere nell'introduzione della ISO/DIS22156:

"This International Standard applies to the use of bamboo structures, i.e. structures made of bamboo (round bamboo, split bamboo, glued lamined bamboo) or bamboo-based panels [..]"⁴

Dando anche indicazioni generali per quanto riguarda le giunzioni tra più parti:

"[..] joined together with adhesives or mechanical fasternes."⁵

Questo standard internazionale vale per la progettazione e lo studio di prodotti strutturali in bambú. La ricerca di nuovi standard mostra il crescente interesse verso questo materiale strutturale.

Una codifica completa del bambú strutturale porterebbe, in futuro, a un notevole aumento nell'utilizzo del materiale nelle costruzioni.

In Italia non sono presenti riferimenti normativi.

Per questo, nel caso di utilizzo del materiale è necessario far riferimento alla normativa internazionale, ma rimane il dubbio se venga poi accettato.

La tabella seguente (Tab.10) riporta i valori caratteristici di riferimento che si trovano in letteratura e normativa.

Essa riporta anche alcuni valori di tensione ammissibile riguardanti differenti condizioni di carico.

	VALORE CARATTERISTICO [N/mm²]	TENSIONE AMMISSIBILE [N/mm²]	COMBINAZIONE CARICO		
COMPRESSIONE		12.4	Carico Permanente		
	56.00	15.6	C.Permanente+C.Temporaneo		
		18.7	C.Permanente+C.Temporaneo+Vento		
FLESSIONE		16.4	Carico Permanente		
	74.00	20.6	C.Permanente+C.Temporaneo		
		24.7	C.Permanente+C.Temporaneo+Vento		
TAGLIO	4.30	1.0	Carico Permanente		
		1.2	C.Permanente+C.Temporaneo		
		1.4	C.Permanente+C.Temporaneo+Vento		

Tab.10 Relazione tra valore caratteristico e valori di stress ammissibili dati dalla ISO/DIS 22156.

Fonte: Il Bambú come materiale da costruzione.

Manca però l'indicazione del grado di maturazione del culmo.

Molti altri test sono stati effettuati soprattutto con Guadua angustifolia ed essi hanno mostrato dei valori medi di resistenza ultima che talvolta si discostano leggermente da quelli della normativa. ⁶

FLESSIONE COMPRESSIONE TAGLIO Secco Verde Verde Secco Verde RESISTENZA ULTIMA MEDIA 54.8 7.1 68.4 32.87 5.87 [N/mm²] 56.2 7.47

Tab.11 Valori di resistenza ultima media di alcuni culmi di Guadua Angustifolia.

Fonte: Nonconventional and Vernacular Construction Materials.

Questi standard possono sembrare dal punto di vista metodologico completi, sia per quanto riguarda le indicazioni per lo svolgimento di test in laboratorio (ISO 22157), sia per quanto riguarda la progettazione di strutture. Rimangono comunque poco esquestive nella descrizione

Rimangono comunque poco esaustive nella descrizione del comportamento del bambú rispetto ai più comuni metodi di costruzione quali calcestruzzo, legno e acciaio.⁷

6.K.A.Harries, B.Sharma, Nonconeventional and Vernacular Construction Materials, Characterisation, Proprieties and Applications, Elsevier, Cambridge, 2016

^{7.} MAURICIO CÀRDENAS LAVERDE, Il Bambú come materiale da costruzione, Sistemi editoriali, Napoli,2008 cita la Normativa ISO/DIS 22156,

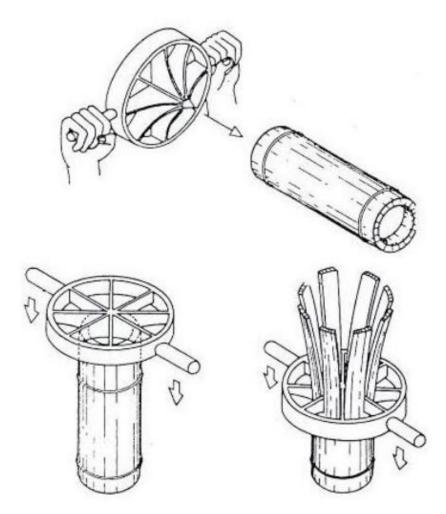
Bambú splittato

TECNICA DEL BAMBÚ SPLITTATO

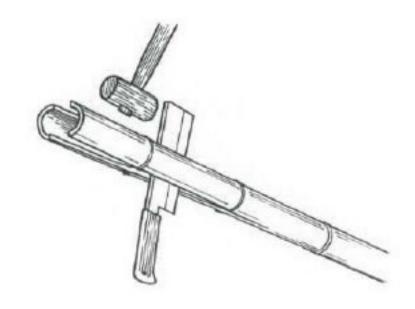
Questa tecnica prevede la divisione dei culmi in strisce longitudinali.

La tecnica prevede il taglio con machete o con l'apposito strumento, lo splittatore, con il quale è possibile, a seconda della quantità di lame inserite, dividere il culmo in più parti.

Le strisce sono comunemente impiegate nella costruzione di mobili o come materiale da rivestimento.



Splitting bambú-Splittatore Fonte: Google immagini- Splitting bambú



Splitting bambú-Machete Fonte: Google immagini- Splitting bambú

BAMBOO SPLITTER

Il bamboo *splitter* è un strumento di forma circolare con un numero variabile di lame.

L'utilizzo è molto semplice: esso deve essere posizionato sulla parte sommitale del culmo con il centro in corrispondenza di quello della canna di bambú.



Fig.8 Immagini di bamboo splitter con differente numero di lame. Fonte : Google immagini: splitting bambú

Pigiando lo splitter lungo il culmo, si ottengono le lamelle desiderate, alle quali andranno tolti i diaframmi dei nodi per rendere più flessibile la striscia.



Fig.9 Immagine della tecnica dello splitting.
Fonte : Google immagini: splitting

APPLICAZIONI DEL BAMBÚ SPLITTATO

L'inventore e designer Buckminster Fuller suggerì vari metodi di applicazione di questa tecnica, sfruttando in questo modo la flessibilità e resitenza del materiale.¹

A partire dai suoi studi, molti architetti e applicarono la tecnica nei loro progetti.

I lavori più rilevanti sono stati realizzati in installazioni artistiche. In Italia, ad esempio, il gruppo LAN architettura, insieme con l'Associazione italiana Bambú, ha realizzato un'installazione all'interno del Labirinto della Masone di Franco Maria Ricci a Fontanellato (PR)².

^{1.} LORENZA BISBANO, Tecnica del bambú splittato: applicazioni e geometrie, https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bambu/tecnica-bambu-splittato-822/,2016.

^{2.} LORENZA BISBANO, Tecnica del bambú splittato: applicazioni e geometrie, https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bambu/tecnica-bambu-splittato-822/,2016.



Fig.10 Immagine dell'installazione del gruppo LAN Architettura.
Fonte : https://www.architetturae-cosostenibile.it/materiali/bambu/tecnica-bambu-splittato-822/

Il bambú splittato è stato impiegato con successo anche in strutture come gazebi, padiglioni e tende.

È il caso della *Stardome* della Kyushu Fieldwork Society: una struttura in bambú splittato con giunzioni imbullonate e tenute alla base da corde. Essa è stata creata intrecciando 17 strisce, dando vita ad una cupola leggera e smontabile³.



Fig.11 Immagine dell'applicazione della Stardome in una tenda.
Fonte : http://www.bambuseto.it/portfolio-project/star-dome/

Oltre a questi impieghi il bambú splittato viene utilizzato più comunemente per finiture di superfici o per la creazione di palchetti. In alcuni Paesi, esso viene impiegato per la realizzazione di pareti, con o senza intonacatura.







3. LORENZA BISBANO, Tecnica del bambú

splittato: applicazioni e geometrie,

https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bambu/tecni-

ca-bambu-splittato-822/,2016.

Giunti

INTRODUZIONE

Le connessioni possono essere fisse o mobili a seconda del progetto.

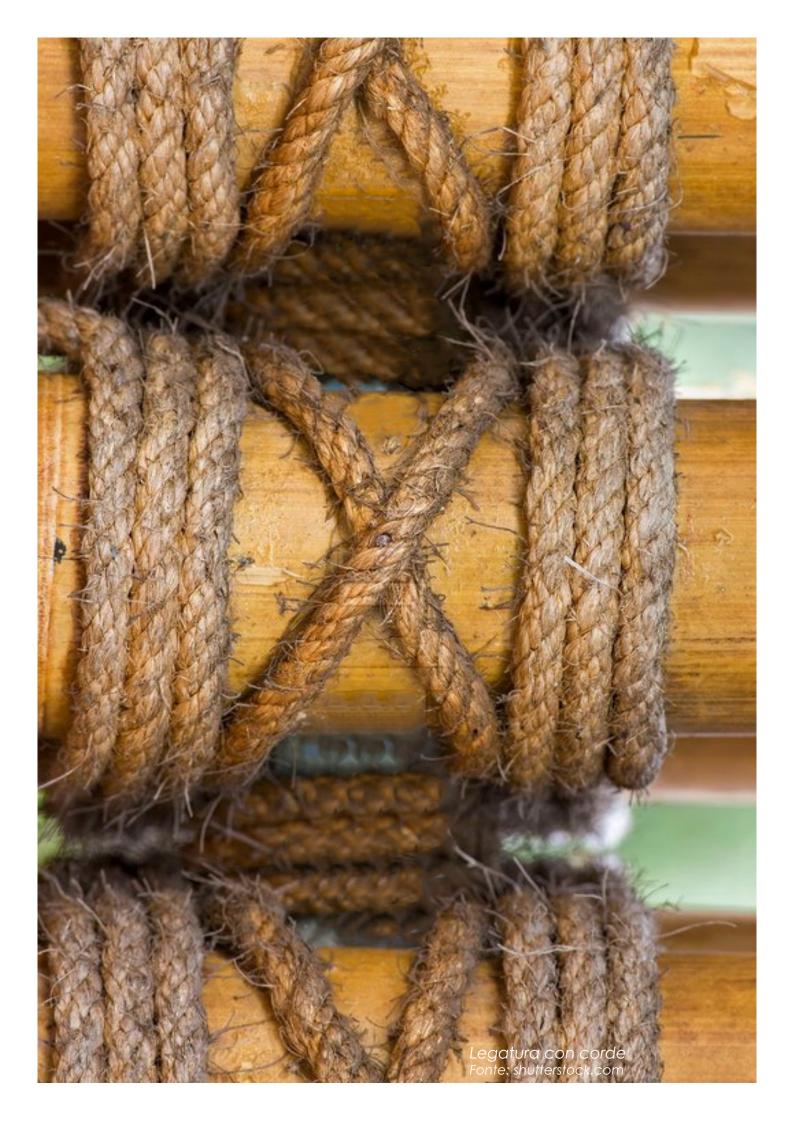
Si sono sviluppati differenti tipi di unioni: da quelle più tradizionali con corda, nylon, nastri adesivi fino ad arrivare alle giunzioni in acciaio, nel caso di strutture complesse; nessuno di questi giunti è normato. L'unico caso di cui è fatta menzione sulla normativa tecnica peruviana è l'unione imbullonata su specie Guadua angustifoglia; questo tipo di soluzione si utilizza generalmente quando la connessione da realizzare è complessa.¹

Proprio perché esistono molte tipologie di giunto, una fase fondamentale della progettazione è l'analisi della resistenza del giunto in modo da individuare quale sia la migliore soluzione.

Tutti gli elementi che lo costituiscono devono essere progettati in funzione delle sollecitazioni trasmesse, di cui la prevalente è quella di taglio.²

^{1.} MINISTERO DE VIVIENDA, COSTRUCCION Y SANEAMIENTO, Norma Técnica E.100 Bambú, Settembre 2012,

^{2.} ARCH. TANIA CERRÓN OYAGUE, Manual de constrcción de estructuras con bambú, Cartolan editore, Lima, 2014 da sito https://issuu.com/ger-levo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es



TAGLI

I principali tagli utilizzati sono: taglio retto, taglio a bocca di pesce, taglio a becco di flauto, taglio smussato o diagonale.³

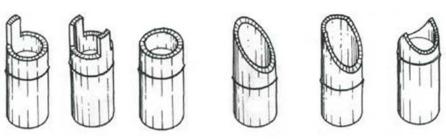


Fig.13 Immagini dei principali tagli del bambú. Da sinistra verso destra troviamo: taglio retto (primi tre), taglio diagonale, taglio a becco di flauto e taglio a bocca di pesce. Fonte: https://issuu.com/gerlevo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es

I tagli a bocca di pesce e a becco di flauto permettono di ottenere connessioni complanari e ottimizzare lo spazio occupato dagli elementi strutturali; diversamente da come accade con le connessioni a taglio retto, nelle quali gli elementi si trovano su piani distinti.

Per la realizzazione delle connessione è necessaria mano d'opera qualificata; inoltre, ogni taglio deve essere realizzato su misura in base all'elemento con cui andrà a connettersi.

Le connessioni a taglio retto, invece, non presentano questo inconveniente, in quanto i pezzi possono essere tagliati con una sega circolare e arrivare in cantiere pronti per essere assemblati, semplificando il processo costruttivo.⁴

In qualsiasi tipo di connessione, le parti di bambú devono essere a contatto tra loro e posizionate a una distanza massima di 6 cm dal nodo in quanto parte più resistente del culmo.

UNIONI TRA LE PARTI

I giunti tradizionali erano realizzati con legature attraverso corde di diversa natura (prima fibra naturale e poi sintetica); negli ultimi anni sono comparse soluzioni anche molto sofisticate.

Dato che le tipologie di giunzione sono molte, verranno di seguito elencate quelle più comunemente utilizzate nelle costruzioni partendo da quelle più recenti fino ad arrivare a quelle tradizionali.

3. ARCH. TANIA CERRÓN OYAGUE, Manual de constrcción de estructuras con bambú, Cartolan editore, Lima, 2014 da sito https://issuu.com/ger-levo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es

4. DENITIS MICHELA, Analisi sperimentale e numerica di un telaio in Guadua Angustifolia Kunth caricato orizzontalmente: il bambú come possibile alternativa ecosostenibile ai tradizionali materiali da costruzione, tesi di laurea in Scienza delle Costruzioni, Relatrice prof.ssa Ing. Luisa Molari, 2017/2018

UNIONI HIGH-TECH

INSFRIMENTO DI PERNI

Gli elementi metallici dell'unione possono essere esposti in condizioni ambientali sfavorevoli, per questo è preferibile che siano resistenti alla corrosione.



Fig.14 Immagini delle principali parti metalliche da utilizzare nelle unioni metalliche: perni,bulloni e rondelle.

Fonte: https://issuu.com/gerlevo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es

Le unioni non vanno assolutamente fatte con chiodi: l'inserimento del chiodo all'interno del culmo produrrrebbe fessurazioni nel bambú, dovute alla mancanza di fibre trasversali.

I fori devono essere eseguiti con trapano, all'interno di questi viene inserito un perno.



Fig. 14 Immagine di come creare un foro per unione nel culmo.

Fonte: Propria

Per quanto riguarda il caso di *Guadua angustifolia*, i perni non devono avere lunghezze inferiori a 150mm e non superiori a 250mm. La distanza minima tra il perno e l'estremo libero dell'elemento deve essere di 150mm nel caso di unioni sollecitate a trazione e 100mm per quelle a compressione.⁵

5. Giulia Pistolesi, Bambú - Acciaio dolce, ISIA, Firenze, 2012 da sito https://issuu.com/giuliapistolesi1/ docs/bambú_stampa

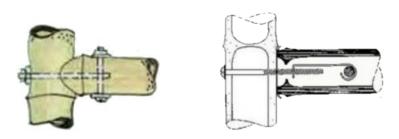


Fig.15 Esempio di giunto metallico tra due culmi.Fonte: https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bambú_stampa

GIUNTI CON PERNI E MALTA

Questo tipo di giunto prevede che le sezioni delle canne vengano unite con parti metalliche e malta.

Questa unione è differente dalla precedente in quanto,

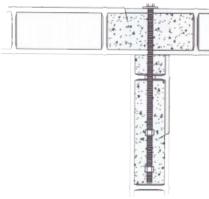


Fig.16 Esempio di giunzione tra due culmi con iniezione di malta all'interno dei culmi.

Fonte: https://issuu.com/giuliapistole-si1/docs/bambú_stampa

grazie all'iniezione di malta tra i nodi, la possibilità di fessurazione del culmo in caso di foratura è ridotta. Al tempo stesso, bisogna però prestare attenzione che la malta non sia troppo umida per evitare l'eccessivo ritiro.⁶

I giunti con perni e malta possono raggiungere alti livelli di sofisticatezza, come nel caso del padigione di Markus Heinsdorff costruito per l'Expo 2010.

Esso viene utilizzato molto spesso da Simón Vélez, .



Fig.17 Esempio di giunzione con iniezione di malta e raccordo in acciaio.
Fonte : .ironbarkarchitecture.com.au

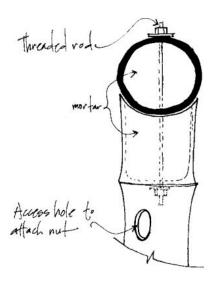


Fig.18 Dettaglio costruttivo disegnato da Simón Vélez.

Fonte: tboake.com/competitions/s_06/tran_peng/LPENG_final_Essay.pdf

6. GIULIA PISTOLESI, Bambú - Accia-io dolce, ISIA, Firenze, 2012 da sito

https://issuu.com/giuliapistolesi1/

docs/bambú_stampa

La connessione tra culmi di bambú paralleli può essere realizzata con perni d'acciaio, formando una struttura resistente.⁷

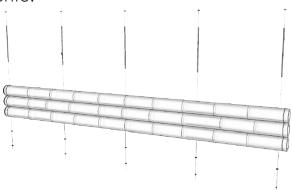


Fig.19 Esempio di giunzione tra culmi paralleli tra loro attraverso parti metalliche. Fonte : Norma Técnica E.100 Bambú

7. GIULIA PISTOLESI, Bambú - Acciaio dolce, ISIA, Firenze, 2012 da sito https://issuu.com/giuliapistolesi1/ docs/bambú_stampa

Essa può essere ottenuta anche con nastri e corde, come si può notare dall'immagine, ma sono necessarie sia esperienza sia buone capacità manuali.



Fig.20 Immagini di Sala de Conferências-Vietnam, progettato da Vo Trong Nghia. Si può notare come le unioni diano fatte con corde.

Fonte: https://www.arketipomagazine.it/

GIUNTO SENZA FORATURE

Questi tipi di giunti hanno raggiunto un sviluppo notevole solamente negli ultimi anni. Si possono trovare due tipologie: per allungare una canna di bambú o per la creazione di giunti perpendicolati tra i culmi.

I primi prevedono l'inserimento nella parte cava di uno "spinotto" di legno che viene incollato. I secondi sono giunti molto complessi che prevedono l'unione di culmi perpendicolari tra di loro. Vengono inseriti le parti da unire in "morse"che, dopo il serraggio, li tengono uniti tra loro. Oltre a questo vantaggio vi è quello che l'assemblaggio dei culmi non richede una manodopera specializzata.





Fig.21 Esempi di giunzione tra culmi senza forature. Fonte : Norma Técnica E.100 Bambú; www.tosilab.it/il-bambu-la-pianta-che-puo-rivoluzionare-architettura/

GIUNTI TRADIZIONALI

Vengono utilizzati ancora oggi per la connessione di culmi di bambú, d'esempio sono i ponteggi realizzati in Cina e opere quali Bamboo Ark (2011) di Takahashi Kogyo insieme con il Toki Lab. In quest'ultimo, le connessioni sono state realizzate con corde e nastri.8







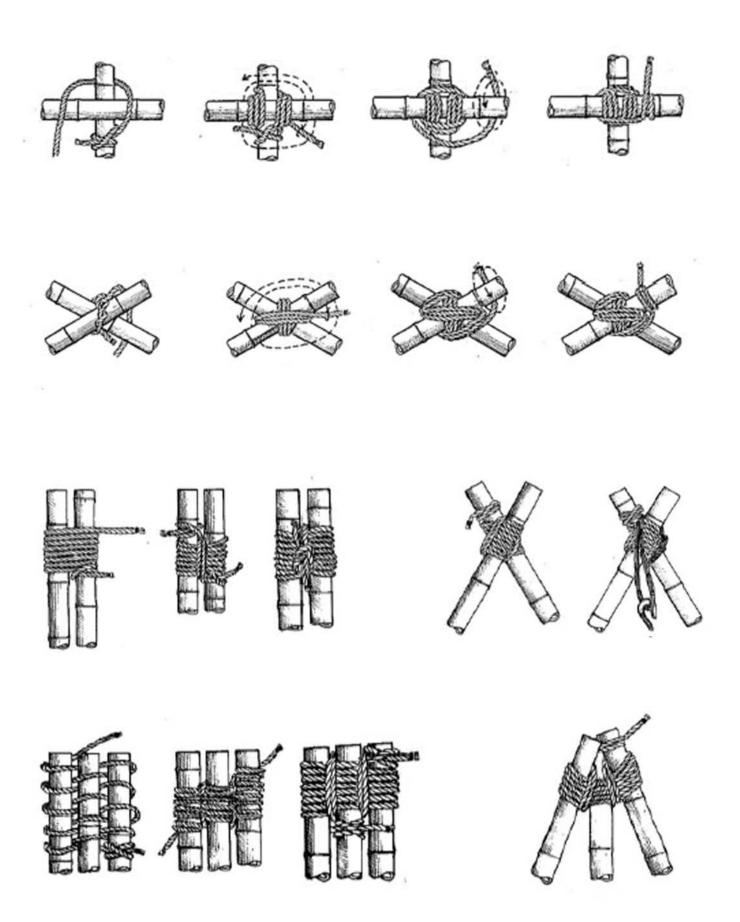
Fig.22 Immagini di Ark of Bambú. Si può notare come le unioni diano fatte con cordee nastri

Questi tipi di giunti, nonostante siano i primi, rimangono non regolamentati.

Qui di seguito sono mostrate alcune delle principali unioni tradizionali.9

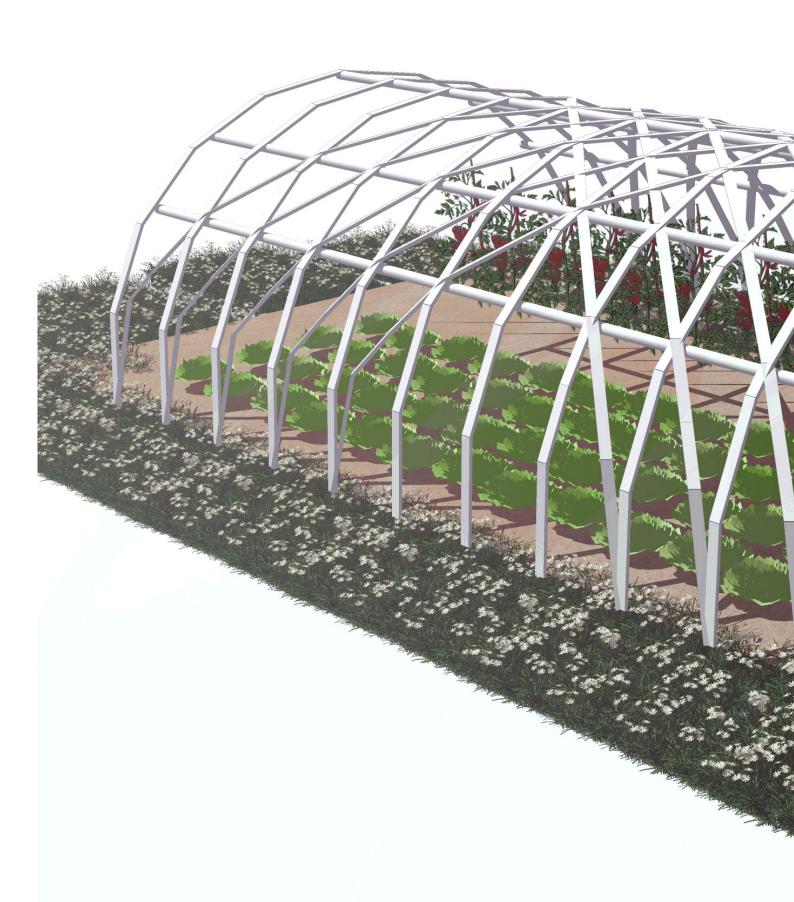
8.Japan,Architecture+Urbanism, Ark of bambú, https://www.japlusu. com/news/ark-bambú,

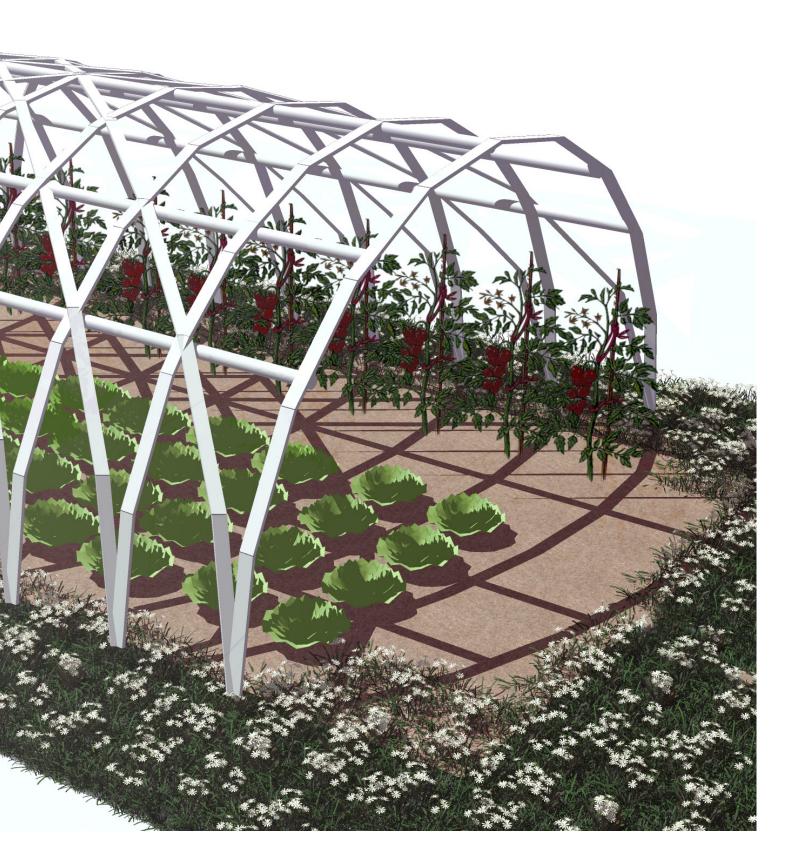
9. Arch. Tania Cerrón Oyague, Manual de constrcción de estructuras con bambú, Cartolan editore, Lima, 2014 da sito https://issuu.com/gerlevo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es



Immagini che illustrano alcuni passaggi di alcuni tipi di legature.Fonte :O. H. Lopez, Manual de construcciòn con bambú, Estudios Tecnicos Colombianos Ltda Editores.

PROGETTO: SERRA IN BAMBÚ SPLITTATO





Serre per impiego agricolo

INTRODUZIONE

Le serre sono realizzate generalemente in metallo e materiale plastico.

Questi materiali nonostante siano molto utilizzati e quindi poco costosi, sono molto "costosi" dal punto di vista ecologico.

Infatti per produrre un kg di acciaio si producono circa 1,8 kg di CO₂e ¹, oltre a causare un dispendio energetico per la sua produzione.

Il bambú, in quanto pianta, è anche un sequestratore di CO₂. Ad esempio, un ettaro di bambú Moso in un anno assorbe fino a 5,1 tonnellate di anidride carbonica.²

Per questo si è scelto di provare a investigare se fosse possibile una alternativa più "environmental friendly" per la realizzazione di serre.

Nel mondo alcuni esemplari di serra sono stati prodotti in bambú, per esempio l'International Architecture Company in collaborazione con Action for the City ha creato una prototipo di serra in bambú, ma a sezione intera.³

La parte innovativa che ci siamo posti di provare è utilizzare il bambú splittato.

1.Prof. Geoff Hammond & Craig Jones, Inventory of Carbon & Energy (ICE) Version 2.0, Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering University of Bath, 2011, da sito www.bath. ac.uk/mech-eng/sert/embodied

2. Da sito www.moso.eu

3. Da sito http://www.ansa.it



LE SERRE

3. Da sito it.wikipedia.org/wiki/Serra

"La serra è un ambiente artificiale costruito appositamente per coltivare fiori e piante con le stesse caratteristiche del loro habitat naturale."³

Si possono quindi coltivare anche piante che solitamente si sviluppano in Paesi dal clima più caldo e umido. Esse possono avere una struttura in alluminio, PVC o più raramente, in legno; poggiano su supporti mobili avvitati nel



Serre tunnel.Fonte: https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bambú_stampa

terreno con pareti in materiale trasparente.

Al loro interno si possono regolare luce, calore e umidità, a seconda del tipo di coltivazione.

Il vantaggio che si ottiene impiegando una serra è, per l'appunto, lo sfruttamento dell'effetto serra che si crea al suo interno per prolungare il tempo di coltivazione.

SERRE TUNNEL

Le serre tunnel sono strutture realizzate da archi in tubo. Nel corso degli ultimi anni si sono evolute portando molteplici vantaggi nell'efficienza della coltivazione.

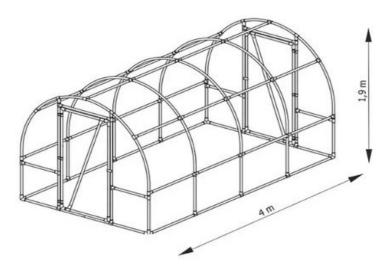


Esempio di serra tunnel in alluminio. Fonte : www.eprice.it

Le strutture a tunnel, sono oggi, le più popolari per la coltivazione di ortaggi sia per la funzionalità sia per semplicità della struttura.

DIMENSIONI SERRE

Le serre con struttura in lega metallica hanno comunemente un passo di almeno 100 cm tra un arco e l'altro e un'ampiezza che varia da 3,60 a 5 metri, mentre la sezione degli archi viene progettata per resistere a carichi della neve e vento.



Esempio di struttura per serra tunnel in PVC.

Fonte: www.dancovershop.com

Modello virtuale di arco

INTRODUZIONE

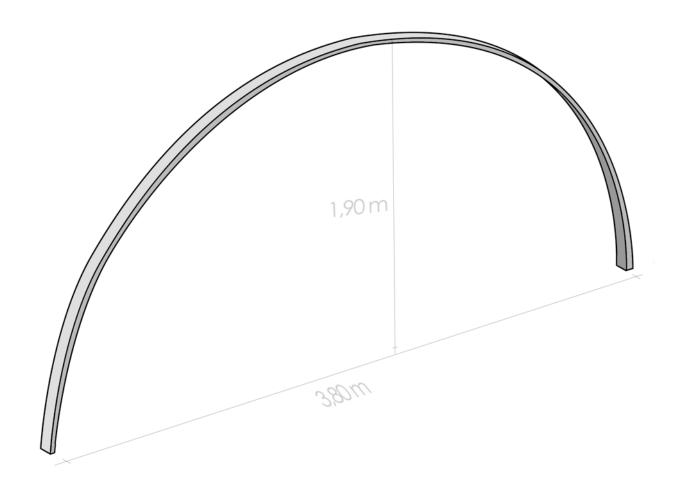
Come primo step abbiamo eseguito le prove del modello dell'arco che dovrà essere il supporto principale della serra.

Attraverso l'utilizzo del software GSA, programma di simulazione strutturale FEM, è stata realizzata un'analisi su di un modello matematico in cui le grandezze geometriche derivano da misurazioni effettuate sul materiale.

L'analisi che verrà eseguita è un'analisi non lineare, preoccupandosi dell'instabilità geometrica dell'arco. Questo tipo di simulazione ci restituisce il carico critico per cui la struttura si instabilizza; la simulazione prevede l'aumento dei carichi in modo graduale tenendo in conto la deformata precedente.

Gli spostamenti che verranno valutati sono quelli in direzione verticale facilitando la comparazione col modello fisico realizzado in seguito.

1. CARICO CRITICO: è il valore di carico corrispondente al passaggio da una condizione di equilibrio stabile ad una instabile. L'equilibrio intabile porta molto velocemente al collasso della struttura in quanto subentrano fenomeni flessionali su elementi snelli caricati di punta. Anche un piccola variazione di carico fa deformare notevolmente l'asta raggiungendo la rottura della stessa.



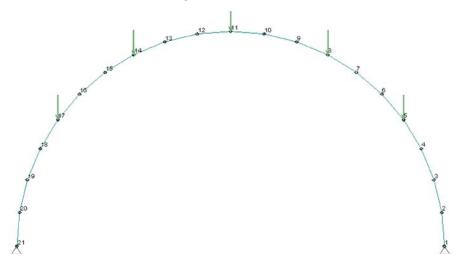
Modello dell'arco in bambú splittato. Fonte: Raccolta personale Questo primo modello è stato pensato senza alcun tipo di imperfezione iniziale, disegnando un semicerchio perfetto. Successivamente viene importato sul software di simulazione GSA imponendo un passo dei punti di controllo pari a 30 cm.

Vengono applicati 5 carichi puntuali da 1N l'uno (p_i) . La simulazione ci restituisce un fattore moltiplicativo del carico applicato.

Il risultato del carico massimo è dato da:

$$P_{cr} = L.F.* p_i$$

I vincoli alla base vengo considerati come cerniere.



Schema dell'arco su cui viene eseguita l'analisi. Fonte: Raccolta personale.

GRANDEZZE GEOMETRICHE

L'arco avrà una luce di 3,80 m, quindi 6 metri di sviluppo. Dopo essermi procurato i culmi per la creazione dei modelli fisici ed averli splittati, ho misurato spessore e larghezza delle lamelle, sia alla base sia alla cima.

Le lamelle per l'arco hanno una dimensione media alla base di 55 mm di larghezza e 10 mm di spessore, mentre alla sommità 36 mm e uno spessore di 6 mm.

Questo mi ha permesso il ridisegno della sezione media, in quanto le lamelle verranno sovrapposte cima con base, cioè la parte più spessa con quella più fine per mantenere un valore medio di sezione lungo tutta la lunghezza dell'arco.

Le grandezze utili alla simulazione vengono riportate nella tabella seguente.

Area	Wx	y	Ix	Wy	x	ly
[mm²]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]
919.56	2135.09	12.90	27542.72	9940.37	20.66	

Caratteristiche geometriche della sezione reale a doppia striscia.

Fonte: Raccolta personale.

Il valore del modulo elastico del bambú viene preso dalla normativa tecnica peruviana E.100 il cui valore medio è pari a 9500 N/mm².

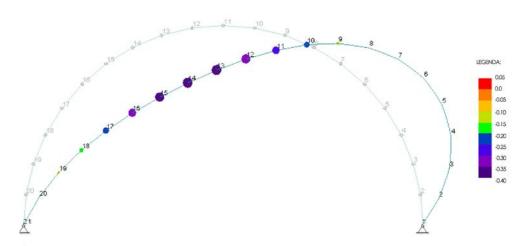
ANALISI NON LINEARE

Utilizzando le dimensioni, viene eseguita l'analisi non lineare sul modello di arco.

Questa viene eseguita dando un'imperfezione al carico sull'arco, cioè sbilanciandolo leggermente il carico verso un lato. Questa è necessaria per far avviare l'analisi non lineare. L'imperfezione è utile in quanto nel caricare l'arco insorgono aumenti di momento flettente quando la deformazione sposta il punto di applicazione del carico rispetto alla configurazione indeformata verso il basso.

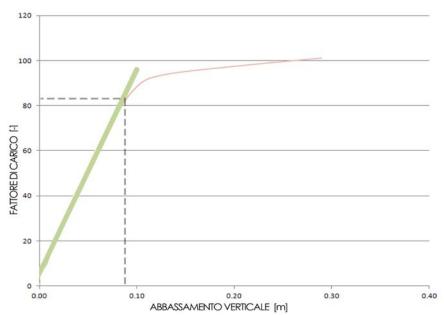
Il risultato della simulazione è di 101 N per ogni carico verticale, quindi un totale di 505 N.

Lo spostamento verticale massimo del nodo 11 è di -0.29 m.



Analisi non lineare dell'arco. Deformazioni secondo l'asse verticale (misure in metri) Fonte: Raccolta personale da software GSA.

3. MANCANZA DI CONVERGENZA: la soluzione della matrice utilizzata del programma per la valutazione della deformata successiva dopo l'incremento del carico non ha soluzione. Questo produce un arresto della simulazione individuando così il carico critico della struttura e la deformazione subita di un punto di controllo.



Graf.A Rapporto tra abbassamento verticale e fattore di carico dell'arco. Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Come si può notare dal grafico (Graf. A) si hanno due tratti: un primo tratto elastico, in cui fattore di carico e deformazione crescono proporzionalmente e un secondo in cui l'incremento di deformazione è maggiore rispetto all'aumento del carico.

Il tratto che confronterò con quello del modello fisico sarà il primo, quello elastico, perché in questo caso rimuovendo del carico applicato la deformata torna nella sua conformazione iniziale.

Modelli reali di arco

INTRODUZIONE

Dopo aver eseguito le simulazioni al computer, sono passato alle prove su modello reale.

Dopo essermi procurato dei culmi da 7,10 metri di lunghezza li ho tagliati a misura per formare l'arco desiderato. Essi vengono splittati in 4 lamelle grazie allo splittatore fornitomi dal LASTIN (Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi) del Politecnico di Torino.

Successivamente le strisce vengono unite per mezzo del nastro adesivo perché ho ritenuto questo metodo, in rapporto velocità/ facilità e facilità/resistenza, quello migliore, infatti per ogni unione vengono impiegati pochi secondi per la realizzazione. Il nastro utilizzato è della Bostik serie Grizzly Tape, resitente anche per applicazioni all'esterno. Le unioni vengono fatte con passo di circa 30 cm, dopo aver preso in considerazione il lavoro svolto da Paolo Chiacchiera e Davide Ghirardotti nel loro lavoro di tesi.

La struttura a doppia lamella viene posizionata all'interno della struttura che, oltre a formare la forma ad arco desiderata, la ferma nel piano per provarne la resistenza.

Verranno applicati carichi crescenti, facendo un'analisi non lineare ma su un modello reale, investigando su quale sia il limite di carico sopportabile. 1. CHIACCHIERA PAOLO, CHIRARDOTTI DAVIDE, Costruzioni in bambù secondo i manuali di Yona Friedman, Rel. Andrea Bocco, Walter Ceretto, Politecnico di Torino, Corso di laurea in Architettura, Corso di laurea magistrale in Architettura Costruzione Città, 2016



MODELLO FISICO

IL BAMBÚ

Il bambú è stato comprato dal bambuseto di Gianluigi Pastore a Favria.

La specie è quella del *Phyllostachys edulis*, una di quelle indicate per impieghi strutturali.

L'età dei culmi è di circa 3 anni con lunghezza pari a 7,10 metri.



Culmi interi di Moso. Fonte: Raccolta personale.

Le dimensioni sono quelle utilizzate per il modello matematico (vedi pag. 61). Mediamente alla base si ha un diametro esterno pari a 69 mm e interno di 46 mm con spessore si 13 mm mentre alla punta si ha un diametro esterno di 40 mm e interno 35 mm con uno spessore di circa 4mm.

Una volta tagliato il culmo alla misura necessaria a formare l'arco, a 6 metri (viene eseguito il taglio alla sommità del culmo) si ha una uno spessore di parete pari a 6 mm e il diametro è di 51 mm. La percentuale di umidità misurata è circa del 15%. La misurazione è stata con igrometro della Stihl.

ESECUZIONE DELLA PROVA

Per eseguire la prova si è posto il problema di come far star fermo l'arco nel piano (quindi che potesse subire le deformazioni senza "sbandare fuori" da esso).

Ho realizzato così un supporto con legno di recupero che non permettesse lo spostamento laterale.

Dopo aver splittato e tagliato a misura il bambú sono stati realizzati dei modelli di arco da testare.



Struttura di supporto all'arco. Fonte: Raccolta personale.

Essi sono stati caricati come nei modelli virtuali, con 5 carichi verticali progressivi. Per far questo ho appeso con una corda, 5 secchielli che ho riempito con mezzo litro d'acqua ciascuno per ogni incremento. Questo avviene solo dopo aver atteso un periodo di tempo sufficiente all'arco di subire la deformazione e stabilizzarsi.



Modello di arco con indicazione dei carichi applicati. Fonte: Raccolta personale.

PROVA DI CARICO SU ARCO REALE

L'analisi è stata eseguita su tre archi per ottenere un valore medio di resistenza, quindi più veritiero.

Dopo aver tagliato a misura giusta le singole lamelle di ogni arco, vengo accorpate a 2 a 2 con delle fascette per formare 3 strisce doppie. Esse sono sovrapposte in senso inverso, cioè sovrapponendo le parti più spesse, il fondo del culmo a quelle più sottili, le cime, così da avere una sezione media simile lungo tutta la lunghezza dell'arco.



Strisce di bambú legate con nastro. Le fascette sono servite per una prima unione poi sostituitaìdal nastro. Fonte: Raccolta personale.

Gli elementi così ottenuti sono stati posizionati all'interno del supporto in legno e, una volta che sono state curvate, sono state legate col nastro adesivo per essere testate. Il centro dell'arco viene preso come riferimento e misurato ad ogni step di incremento del carico.

Vengono in primis legati i secchi (la capacità è di 15 litri ciascuno) e viene registrato il primo abbassamento.



Modello di arco con i secchi appesi prima della prova. Fonte: Raccolta personale.

Dopo di che questi vengono riempiti con 0,50 litri di acqua l'uno per ogni step di carico e vengono registrati gli abbassamenti.

Dopo ciascun incremento di 2,5 litri (0,50 litri per 5 secchi),

viene aspettato che il campione si assesti prima di





Fasi della prova: misurare la quantità d'acqua e versare la quantità nei secchi. Fonte: Raccolta personale.

effettuare la misurazione e incrementare il carico con lo step successivo.

Tutti i campioni di arco con il procedere della prova e con l'aumento del carico, prendono una deformata molto simile a quella che il software aveva restituito nell'analisi non lineare del modello con imperfezione.

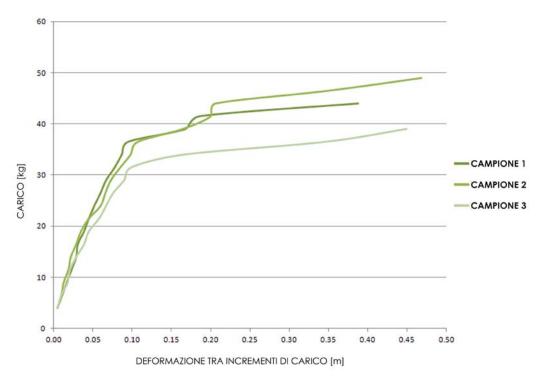


Modello 1 durante la prova e conformazione della deformata. Fonte: Raccolta personale.

I 3 campioni hanno raggiunto i valori massimi di resistenza e deformazione riportati nella seguente tabella.

TELEVILLE	PESO TOTALE [kg]	DEFORMAZIONE [m]		
	/ 3.95	/ 0.005		
	6.45	0.003		
	8.95	0.017		
	11.45	0.023		
	13.95	0.029		
	16.45	0.031		
DDOTOTIDO 1	18.95	0.039		
PROTOTIPO 1	21.45	0.045		
	23.95	0.052		
	26.45	0.06		
	28.95	0.067		
	31.45	0.078		
	33.95	0.087		
	36.45	0.095		
	38.95	0.168		
	41.45	0.186		
	43.95	0.388		
	3.95	0.005		
	6.45	0.01		
	8.95	0.013		
	11.45	0.019		
	13.95	0.022		
	16.45	0.029		
	18.95	0.035		
	21.45	0.045		
DDOTOTIDO O	23.95	0.06		
PROTOTIPO 2	26.45	0.066		
	28.95	0.073		
	31.45	0.085		
	33.95	0.098		
	36.45	0.107		
	38.95	0.164		
	41.45	0.2		
	43.95 46.45	0.206 0.349		
	48.95	0.468		
	/	/		
PROTOTIPO 3	3.95	0.005		
	6.45	0.01		
	8.95	0.018		
	11.45	0.021		
	13.95	0.029		
	16.45	0.039		
	18.95	0.045		
	21.45	0.058		
	23.95	0.067		
	26.45	0.076		
	28.95 31.45	0.09 0.099		
	33.95	0.166		
	36.45	0.346		
	38.95	0.346		
sui tre modelli di arco.	55.75	0.11/		

Tabella prova di carico sui tre modelli di arco. Fonte: Raccolta personale.



Relazione tra deformazione tra gli incrementi di carico e il carico stesso dei tre modelli. Fonte: Raccolta personale.

CONSIDERAZIONI SULLA PROVA

La differenza del carico ultimo può essere dovuto al fatto che splittando a mano e non con mezzo meccanico i culmi di bambú, le singole lamelle possono avere dimensioni differenti, soprattutto la larghezza, avendo così momenti d'inerzia differenti.

Le prove vengono terminate all'insorgere delle prime crepe sulla superficie della lamella dovuta all'eccessiva deformazione per via del carico.

Il carico applicabile medio per la rottura dei provini risulta essere 43,95 kg con una deformazione media pari a 43,5 cm.



Modello 2 a fine della prova. Rottura del provino dopo applicazione prolungata del carico

Fonte: Raccolta personale.



Fessurazione della lamella dopo la prova di carico.

Fonte: Raccolta personale.

Il bambú utilizzato possiede un quantitativo di umidità che varia tra 17-13%, questo influenza il modulo elastico del materiale.

CONFRONTO TRA MODELLO VIRTUALE REALE E REALE

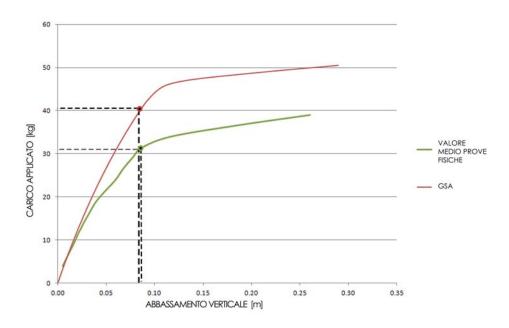
Il modello fatto su GSA risulta essere più resistente rispetto a quelli fatti dal vero.

Il carico che viene preso in considerazione per il confronto è quello del primo tratto, il tratto proporzionale.

Si può osservare come, mediamente, il limite elastico dei prototipi sia di circa 33 kg con una deformazione di 90 mm. Invece, il limite di proporzionalità in quello matematico è di 42 kg e una deformazione di 90 mm.

Il rapporto dei carichi tra i modelli, fisico e matematico, è del 70%.

Questo potrebbe essere dovuto di tutto dal fatto che il modulo elastico (VEDI BAMBÚ VS LEGNO) non ha raggiunto il



Rapporto tra abbassamento verticale e carico applicato dell'arco nel modello matematico e il valore medio dei prototipi. Evidenziati dal punto i rapporti tra carico del limite di proporzionalità e relative deformazione verticale del punto centrale degli archi.
Fonte: Raccolta personale da software GSA.

valore massimo nel caso reale, dovuto all'umidità presente nelle lamelle, come già detto. Quando le strisce raggiungeranno questo valore, il modulo elastico sarà massimo e di conseguenza la resistenza al carico dovrebbe risultare superiore, mentre si ridurrà la possibilità di deformarsi dell'arco. Comunque il contenuto di umidità è prossimo all potersi considerare secco, quindi questa variabile è poco incidente sulla percentuale

In secondo luogo, nel modello reale, entrano in gioco imperfezioni che non è possibile tenere in conto quando si fa una simulazione con il software.

Queste variabili, sono date dal fatto che i 3 prototipi fisici sono composti dalla sovrapposizione di strisce di bambú tenute insieme dal nastro. La rigidezza dell'arco, quindi, può risultare inferiore rispetto a quella del modello matematico, infatti durante la prova si sono potuti notare piccoli scorrimenti tra le lamelle.

Questi potrebbero essere ridotte o anche annullate inserendo perni metalli tra le lamelle, però questa soluzione prevede che il forare le lamelle. Questo può provocare una fessurazione delle lamelle.

Un'ulteriore soluzione sarebbe di piallare le facce delle lamelle a contatto tra di loro, sovrapponendole e incollandole. Questa soluzione non viene provata perché non si necessita di strumenti adatti per lo svolgimento.

Anche la manualità è una variabile che incide. Dipende dal livello di esperienza che uno ha nel fare le giunzioni ed è dipendente dall'operatore che sta eseguendo i nodi. Con il nastro si riduce la possibilità di aver nodi lassi (come è possibile nel caso di legature fatte con le corde) dovuta dalla presenza della colla, ma comunque rimane presente e dipendente da quanto si stringe il nastro attorno alle lamelle.

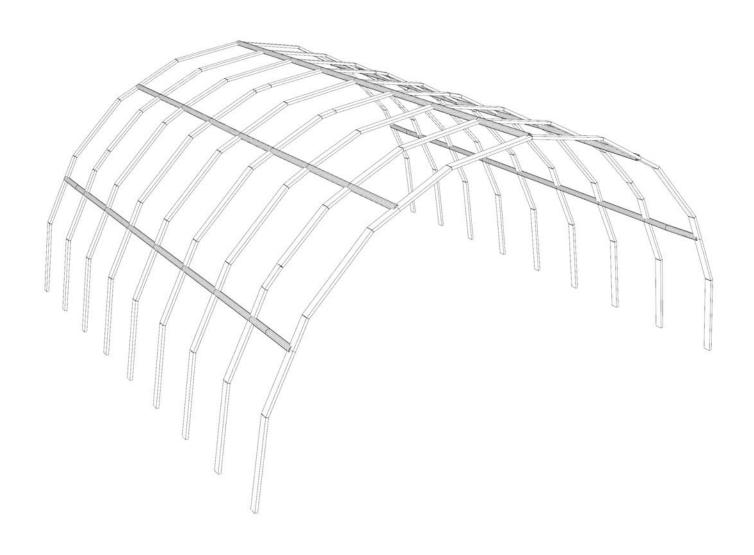
Con questi modelli di arco potremmo già realizzare un primo modello di serra: ancorandolo adeguatamente al terreno e ripetendolo in serie, stabilizzando gli archi gli uni agli altri con 5 culmi trasversali sullo sviluppo degli stessi, si possono raggiungere i metri quadrati di cui si necessitano.

Modello di serra con singoli archi

INTRODUZIONE

Una prima tipologia di serra che ho cercato di provare a vedere se fosse possibile realizzare, è formata da una serie di archi paralleli tra di loro e collegati mediante culmi di piccola dimensione.

Questa viene testata attraverso una simulazione con il software GSA.



Modello di serra con archi paralleli. Fonte: Raccolta personale Viene costruito il modello matematico e analizzato, facendo prima un'analisi statica lineare solo dei carichi verticali e successivamente un'analisi non lineare.

Il prototipo realizzato ha una lunghezza pari a 4 metri e con un passo tra gli archi di 50 centimetri. Si mantengono invariate le grandezze geometriche rispetto al modello matematico precedente, quindi ogni singolo arco avrà larghezza e momenti d'inerzia della sezione invariati.

Essi vengono collegati tra di loro da 5 correnti, aventi sezione circolare cava con una dimensione del diametro esterno pari a 45 mm e uno spessore di 4 mm.

ANALISI STATICA

Quest'analisi vuol verificare se la resistenza del materiale è comparabile con i valori di tensione ammissibile dati dalla normativa ISO 22156 (vedi pag. 38).

Viene caricato il modello con un carico verticale che rappresenta il carico della neve.

Considerando di essere nella zona di Torino si prende un valore di peso della neve al suolo di 1,25 kN/m2.

Essendo la superficie della struttura semicircolare la normativa (NTC 2008), ci dà che il coefficiente di forma, moltiplicativo del peso della neve è pari a 0,8.

Si ottiene così il carico gravante sulla struttura di 1,00 kN/m².

La normativa dice anche che quando l'angolo formato tra la tangente all'arco e il piano orizzontale supera i 60°, va considerato il carico pari a 0.

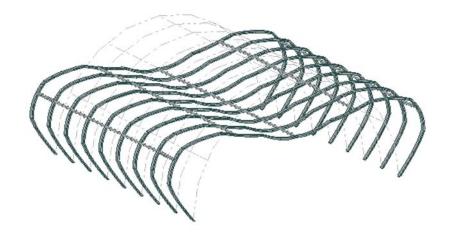
Il prototipo soggetto a pressoflessione viene verificato paragonando i risultati con le tensioni ammissibili date dalla normativa ISO 22156.

I risultati ottenuti di sforzo normale e flessione vengono inseriti nella formula:

$$\sigma = N/A + M/W$$

Avendo due tipi di tensione ammissibile, uno per lo sforzo normale e uno per la flessione si dividono le singole parti per i valori ammissibili e, dopo aver sommato i risultati ottenuti, si dovovrebbe ottenere un valore inferiore o al massimo pari a 1 affincè sia verificato.

$$(N/A)/\sigma_c + (M/W)/\sigma_f < 1$$



Deformata analisi statica lineare

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

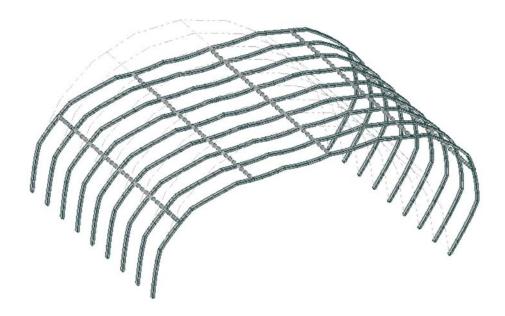
In questo caso, otteniamo che:

0.57 / 15.6 + 10.4 / 20.6 = 0.55 <1

La verifica è soddisfatta.

ANALISI NON LINEARE

L'analisi è condotta al fine di valutare i fenomeni del secondo ordine ricercando il limite di proporzionalità tra carico e deformazione.



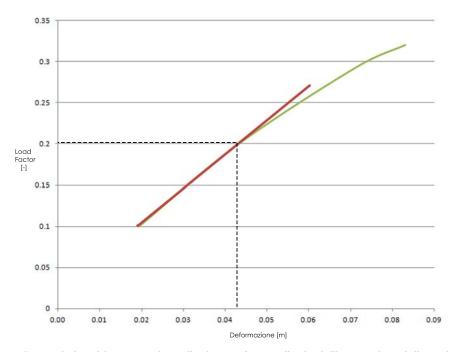
Deformazione analisi non lineare.Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Se quel valore è pari o superiore a 1 vuol dire che non si innescano fenomeni di instabilità tali da portare a rottura la struttura sotto il carico della neve della zona considerata. Se il valore fosse inferiore all'unità si avrebbe un carico critico pari:

q_{crit} = Carico Neve * LF

Anche qui verranno valutati gli sforzi del materiale con quelli ammissibili con la stessa procedura.

L'analisi non lineare di questa tipologia di serra ci restituisce un valore del limite di proporzionalità pari a 0,20 volte il carico della neve.



Rapporto tra abbassamento verticale e carico applicato dell'arco nel modello matematico e il valore medio dei prototipi. Evidenziati dal punto i rapporti tra carico del limite di proporzionalità e relative deformazione.

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Questo valore è molto basso in proporzione a quello della neve e decido di cercare un'alternativa, inserendo degli archi trasversali in rinforzo della struttura.

Modello virtuale con 3 archi

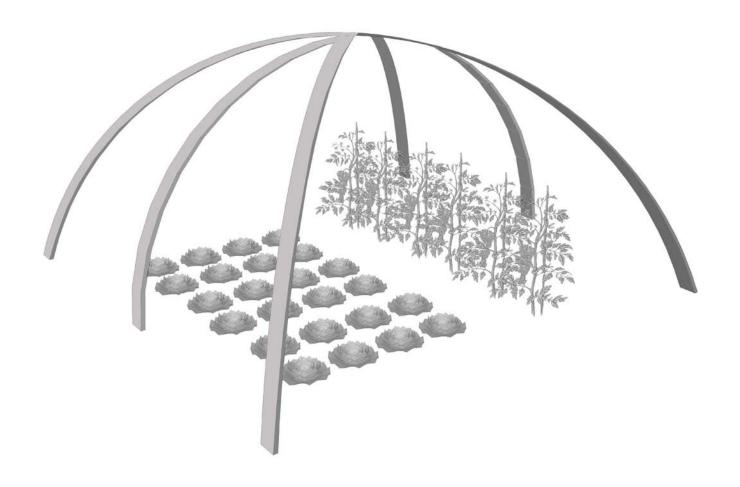
INTRODUZIONE

Dopo aver valutato che il carico verticale della serra formata da soli archi sarebbe solamente il 20% rispetto a quello che dovrebbe portareda normativa, questo dovuto a fenomeni di instabilità geometrica, si è pensato di inserire degli archi trasversali in modo da irrigidire la struttura.

Questo però implica un'ulteriore incertezza, oltre a quella dovuta all'unione delle lamelle tra di loro: quella dovuta all'unione delle intersezioni tra archi.

Si è proceduto come nel caso degli archi con un primo modello matematico e poi fisico paragonando le analisi per individuarne il fattore riduttivo tra i due.

Ne viene analizzata una parte del prototipo complessivo che verrà poi analizzato successivamente.



Modello del modulo per serra in bambú splittato Fonte: Raccolta personale

DOPPIA STRISCIA MODULO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

Per questo modelo vengono utilizzati i dati geometrici medi misurati e utilizzati anche per le analisi dell'arco.

Le grandezze utili alla simulazione vengono riportate nella tabella seguente.

Il modulo elastico per questi modelli è stato mantenuto pari a quello medio, utilizzato anche in precedenza e pari a 9500 MPa.

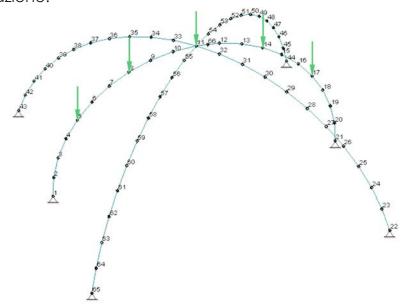
 Area	Wx	y	Ix	Wy	x	ly
[mm²]	[mm³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm³]	[mm]	[mm ⁴]
919.56	2135.09	12.90	27542.72	9940.37	20.66	

Proprietà geometriche della sezione reale a doppia striscia. Fonte: Raccolta personale.

In questi simulazioni viene caricato solo l'arco centrale in quanto con l'inserimento di correnti longitudinali, si va a caricare principalmente il suddetto arco.

Vengono mantenuti invariate sia la distribuzione del carico lungo l'arco che le condizioni di vincolo, quindi sempre considerate cerniere, anche per i due archi che intersecano quello principale.

Quello che è variato rispetto alle simulazione sugli archi sono le intensità dei carichi. In questo caso ho dovuto applicare un carico pari a 10N perchè mantenendo il carico a 1N il software non riusciva a far partire la simulazione non lineare, probabilmente l'intensità del carico era troppo bassa rispetto alla rigidezza della struttura per questa simulazione.



Applicazione carichi sul modello. Fonte: Raccolta personale.

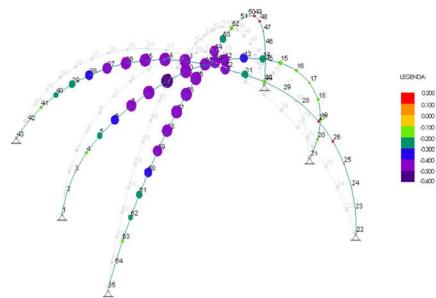
MODELLO CON IMPERFEZIONE

Questo tipo di modello viene realizzato dando una imperfezione al carico, come fatto con gli archi, sbilanciando leggermente il carico verso una parte.

Successivamente si svolge l'analisi non lineare.

ANALISI NON LINFARF

Il risultato della simulazione è di 317,6 N per ogni carico verticale, quindi per totale di 1588 N.

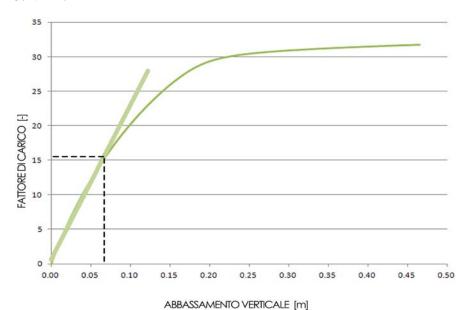


Analisi non lineare del modulo. Vengono valutati gli spostamenti in direzione verticale (legenda in metri).

Fonte: Raccolta personale.

La simulazione si ferma per mancanza di convergenza di soluzione.

Lo spostamento verticale massimo del nodo 11 è di -0.47 m.



Rapporto tra abbassamento verticale e fattore di carico. Si evidenzia il fattore di carico nel

limite proporzionale

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Dal grafico, si può notare come nel caso delgli archi, per un primo tratto le deformazioni e il fattore di carico sono proporzionali. Successivamente le deformazioni crescono più velocemente.

Verrà presa in considerazione solo la parte lineare (elastica) della curva.

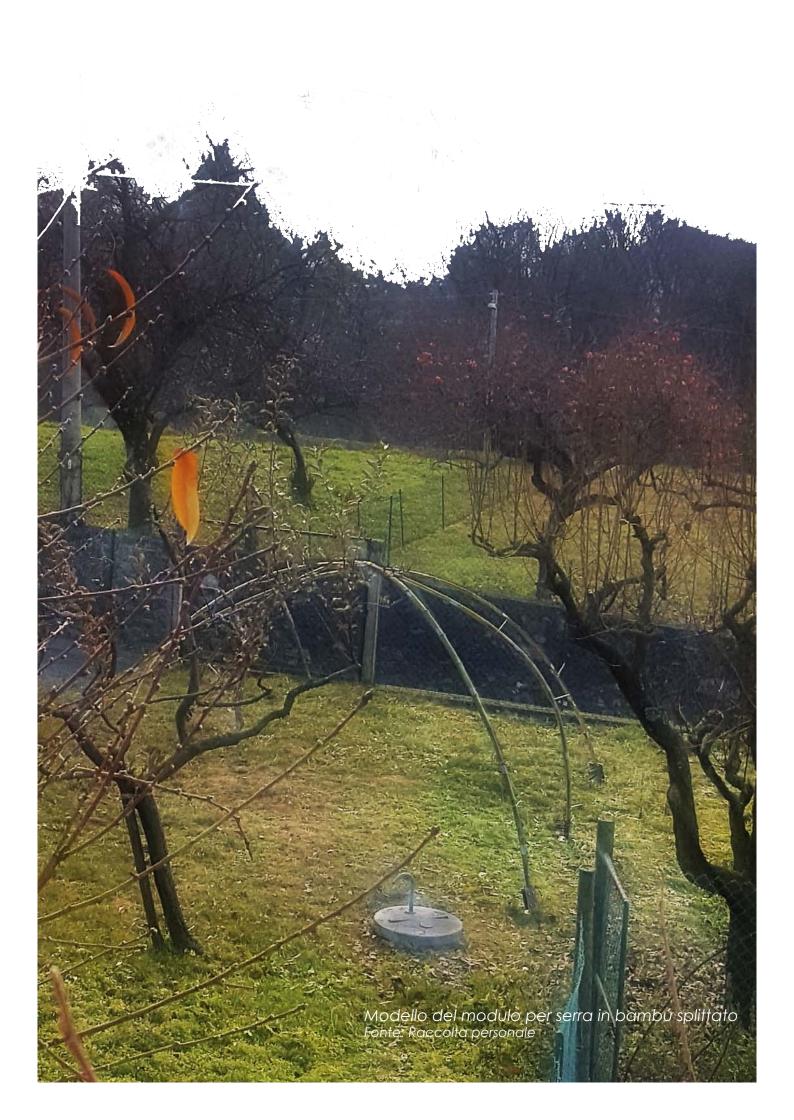
Modello reale con 3 archi

INTRODUZIONE

Dopo aver eseguito le simulazioni sul software, ho costruito e testato il modulo.

Per farlo, ho splittato le canne di bambú, queste vengono accoppiate, come fatto con gli archi, e tagliate a misura. Esse vengono ancorate al suolo attraverso un sistema molto sempliche e di facile realizzazione.

Viene successivamente eseguitala prova di carico appendendo 5 secchi e incrementando il carico gradualmente.



ANALISI DEL PROTOTIPO FISICO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

Le lamelle per gli archi hanno dimensione alla base di 55 mm si larghezza e circa 10 mm di spessore, mentre alla sommità 36 mm e uno spessore di 6 mm (dimensioni simili a quelle dell'arco testato).







Misure prese col calibro delle lamelle. Fonte: Raccolta personale.

Le lamelle vengono unite con nastro adesivo con un passo di 30 cm tra una legatura e l'altra.

La lunghezza dello sviluppo di ogni arco è di 6 metri per l'arco centrale, mentre i due che lo intersecano sono lunghi 7 metri.

ANCORAGGIO AL SUOLO

L'ancoraggio al suolo è l'unica parte in acciaio della struttura. Viene realizzata così perchè ritenuto il metodo più veloce e durevole.

L'ancoraggio prevede l'utilizzo di una "geovite", cioè una vite che si avvita nel terreno attraveso una chiave manuale.

Quella utilizzata è di "Sistemi Chiocciola".

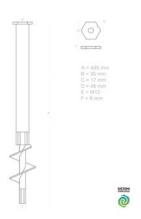




Geovite di Sistemi Chiocciola con chiave manuale. Prova di avvitatura nel suolo. Fonte: Raccolta personale.

Queste viti hanno dimensioni e attacchi sulla testa differenti, a seconda delle esigenze.

Ho scelto quella di lunghezza di 495 mm e con un foro M12 filettato in testa (modello T-Block T3FEDB60BM12CEZE), così da poterci avvitare delle piastre che fungeranno da mor-





Dimensioni geovite di Sistemi Chiocciola. Foto foro filettato in testa. Fonte : chiocciolasystems.it, Propria.

setto.

Ho realizzato le piastre con ferro di scarto di lavorazioni. Vengono realizzati due tipi di piastre a "L": piegate a 90° e a 75° con relativa piastra piana di chiusura. Esse hanno uno spessore di 3 mm.

Vengono fatte realizzare alla Bo-Pi Group di San Benigno. Queste vengono unite alla geovite con un bullone M12 e frapponendo una rondella spezzata, utile per tenere in







Piastre in ferro a "L" piegate a 90° e 75°. Piastra di chiusura. Fonte: Raccolta personale.

tensione l'unione così da rendere più difficili gli svitamenti accidentali.

Le piastre di chiusura e le "L" vengono unite mediante 4 bulloni, fatti passare nei fori asolati.

Tra le due piastre vanno messe e chiuse le estremità degli archi in bambú.

Le piastre a 90° vengono utilizzate per l'arco centrale, mentre quelle a 75° per gli archi diagonali.







Sistema di ancoraggio completo: fuori terra, interrato e sezione. Fonte: Raccolta personale.

MONTAGGIO DEL MOUDULO DI SERRA

Viene riportato di seguito il metodo di montaggio di un modulo della serra.

1. Tracciamento sul terreno

Dopo aver scelto il luogo in cui verrà posizionata la serra, vengono tracciati i lati e individuati i punti dove verranno-posizionate le viti per l'ancoraggio al suolo.





Tracciamento e individuazione dei punti di ancoraggio. Fonte: Raccolta personale.

2. Inserimento delle viti nel terreno

Vengono inserite le sei viti di ancoraggio nel terreno, attraverso l'apposita chiave per l'avvitamento manuale. Queste vengono avvitate fino a quando la testa arriva a filo col terreno.





Inserimento viti di ancoraggio nel terrreno. Fonte: Raccolta personale.

3. Applicazione dei morsetti

Vengono messi in opera i morsetti formati da piastre e staffe. Per ogni modulo serviranno 6 morsetti: 2 con staffa a 90° per l'arco centrale e 4 piegate a 75° per gli archi diagonali. Questi vengono uniti alle "geoviti" attraverso un bullone da 12 mm e una rondella spezzata.



Tracciamento e individuazione dei punti di ancoraggio. Fonte: Raccolta personale.

4. Messa in opera dell'arco centrale

Dopo aver tagliato a misura le lamelle di bambú per l'arco centrale (lunghezza 6 metri), vengono inserite le estremità nei morsetti con staffa a 90°. Vengono chiuse le viti di serraggio del morsetto. Vengono fatte le legature mediante nastro adesivo ogni 30 cm circa.



Inserimento delle estremità delle lamelle nelle staffe. Fonte: Raccolta personale.



5. Messa in opera degli archi diagonali

Dopo aver tagliato a misura le strisce di bambú (circa 7 metri), vengono, come per l'arco centrale, inserite le estremità dei due archi nei morsetti piegati a 75°. Vengono messi in modo tale che i tre archi si incrocino in un unico punto centrale. Vengono fatte le legatura anche qui col nastro a 30cm l'una dall'altra.







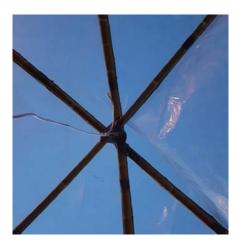
Ancoraggio e messa in opera degli archi diagonali. Fonte: Raccolta personale.

6. LEGATURA NEL PUNTO CENTRALE

Vengono uniti i tre archi nel punto di culmo. Viene utilizzato il nastro adesivo anche per questa legatura.







ANALISI NON LINEARE SUL MODULO

L'analisi è la stessa eseguita col software di simulazione strutturale GSA.



Struttura all'inizio dell'analisi non lineare. Fonte: Raccolta personale.

Dopo aver realizzato la struttura vengono applicati i 5 secchi all'arco centrale.

Questi verranno, come nel test sugli archi singoli, riempiti con acqua, mezzo litro ciascuno per ogni incremento.



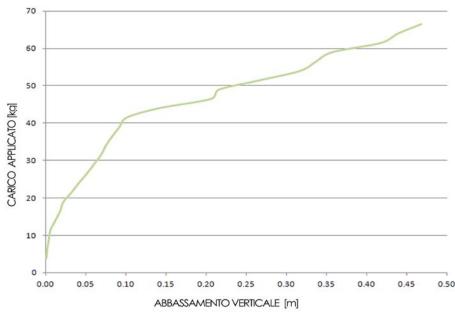
Struttura dopo aver appeso i 5 secchi. Fonte: Raccolta personale.

Prima di incrementare il carico, esso viene lasciato fino all'assestarsi della struttura e registrato il valore di abbassamento del punto centrale, misurandolo con un metro.

	PESO TOTALE [kg]	DEFORMAZIONE [m]		
	/ 3.95 6.45 8.95 11.45 13.95 16.45 18.95 21.45 23.95 26.45	/ 0.001 0.002 0.004 0.006 0.012 0.018 0.022 0.032 0.041 0.051		
PROTOTIPO	28.95 31.45 33.95 36.45 38.95 41.45 43.95	0.060 0.069 0.075 0.083 0.092 0.101 0.141		
	46.45 48.95 51.45 53.95 56.45 58.95 61.45 63.95 66.45	0.206 0.216 0.267 0.317 0.337 0.357 0.418 0.439 0.468		

Tabella con i valori dell'analisi non lineare.

Fonte: Raccolta personale.



Rapporto tra abbassamento verticale e fattore di carico del modulo di serra reale. Fonte: Raccolta personale da software GSA.

CONSIDERAZIONI SULLA PROVA

La prova effettuata restituisce il carico critico e l'abbassamento al raggiungimento di questo carico.

Il carico che instabilizza la struttura che è stato trovato con questa prova è di 66,45 kg con un abbassamnto di circa 47 cm.

Analizzando il grafico si può notare come raggiunti circa 42 kg, cioè il tratto elastico della struttura, la struttura inizia a deformarsi in modo significato.



Modello durante la prova con circa 41,45 kg applicati. Fonte: Raccolta personale.

Successivamente la struttura si deforma notevolemente prendendo una conformazione della deformata simile a quella data del software GSA. Il valore massimo che ho applicato di 66.45 kg dove la struttura ha una forma molto deformata.



Modello a fine prova con i 66,45kg applicati. Fonte: Raccolta personale.

Ho voluto fermarmi a questo carico perchè la rottura, per questo prototipo sarebbe giunta probabilmente col successivo incremento di carico.

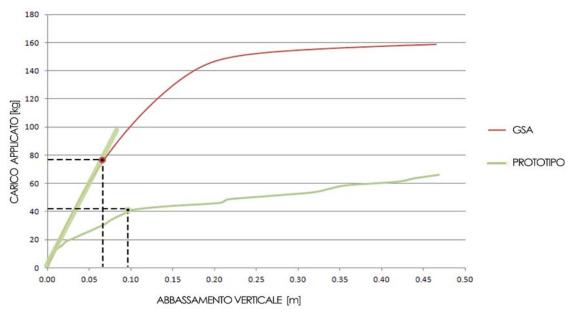
CONFRONTO TRA MODELLO VIRTUALE E REALE

Confrontando il prototipo reale con quello di GSA, nei loro tratti proporzionali si può notare come le deformate siano simili.

Il carico applicato però è differente.

Nel caso di quello matematico il carico totale applicabile è di circa 75 kg, mentre in quello reale arriva a 42 kg quindi una riduzione del carico di circa il 60%.

Questa riduzione è dovuta per gli stessi motivi analizzati negli archi (vedi pag.73), ma anche dal fatto che la legatura in sommità dei 3 archi un ruolo importante nella struttura lo svolge. Più essa risulta essere rigida, facendo così reagire le strutture come una unica, più il carico applicabile sulla



Rapporto tra abbassamento verticale e fattore di carico del prototipo e quello realizzato con GSA. Sono evidenziati i limiti proporzionali.

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

struttura sia avvicinerebbe a quella del modello di GSA. Per questo motivo ho scelto il nastro adesivo che, oltre ad essere un metodo facile e veloce di legatura anche senza essere esperto di nodi, permette una presa forte sui 3 archi tenendoli insieme grazie alla colla. Nonostante questo, il fattore riduttivo del carico tra modello matematico e prototipo diminuisce del 10% rispetto a quello trovato con gli archi (dal 70% al 60%), questo dovuto proprio alla realizzazione della legatura centrale. Questa variabile può cambiare a seconda dell'operatore che svolge la legatura.

Si potrebbe incrementare la percentuale utilizzando un perno in acciaio che unisce gli archi. Questo comporterebbe tutte le conseguenze della foratura (riduzione della sezione e fessurazione della lamella)

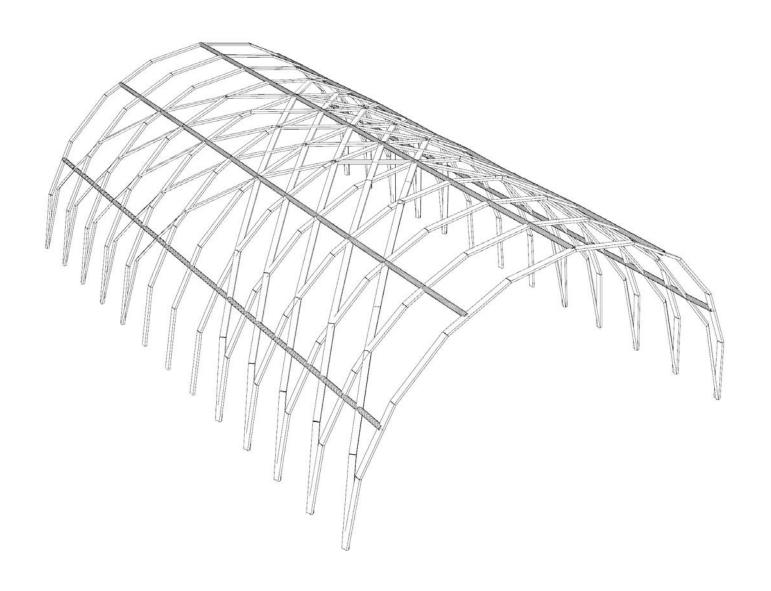
Simulazione prototipo di serra

Dopo aver paragonato il prototipo matematico con quello fisico, e aver trovato il coefficiente per passare dal primo al secondo (tenendo presente che questo riguarda solo il caso di unioni con nastro adesivivo della "Bostik"), sono passato a simulare due prototipi di serra formati sia da archi paralleli che da altri diagonali, per valutare se e di quanto la resistenza incrementi.

Come già spiegato in precedenza, viene eseguita una simulazione statica lineare con solo il carico della neve, successivamente viene fatta una analisi non lineare per valutare il carico che porta la geometria a instabilizzarsi; e come ultima una lineare statica per valutare il carico del vento laterale.

I valori di tensione ammissibile utilizzati vengono dati dalla norma ISO 22156.

Le analisi effettuate si riferiscono ad un modello dove le unioni sono perfette, mentre nel caso che ho analizzato (unioni con nastro adesivo) i risultati devono essere ridotti del fattore riscontrato facendo il confronto tra prove di carico e simulazioni.

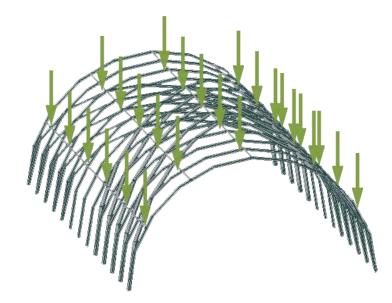


Modello del modulo per serra in bambú splittato Fonte: Raccolta personale

CARICO DELLA NEVE

Il carico della neve viene valutato tenendo conto della lunghezza, della forma della struttura e dal zona geogragfica di installazione della struttura.

La zona considerata e la forma della struttura sono le stesse che ho utilizzato per la simulazione di pagina 76.



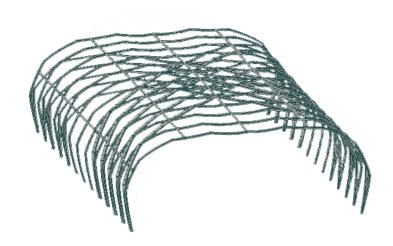
Carico verticale applicato sulla struttura Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Il modello è lungo 6 metri e largo 3,80, con un interasse tra gli archi pari a 50 cm ai quali vengono aggiunti 10 archi diagonali di irrigidimento e stabilizzazione.

ANALISI STATICA LINEARE

La verifica a presso-flessione di questo modello è soddisfatta in quanto si ha che:

Quindi il materiale e la sezione utilizzati potrebbero sopportare il carico considerato.



Deformata dell'analisi lineare statica.Fonte: Raccolta personale da software GSA.

ANALISI NON LINEARE

Il limite proporzionale del rapporto carico-deformazine è inferiore all'unità, ma triplicata rispetto a quello dei soli archi paralleli.

Questo vuol dire che la geometria risulta più rigida e resistente rispetto a quella dei soli archi paralleli. Tuttavia, non lo è sufficientemente per reggere il carico imposto dalla normativa per questa zona, perché la struttura va a rottura per fenomeni di deformazione eccessiva.

L'analisi si interrompe per mancanza di convergenza a 0.81.

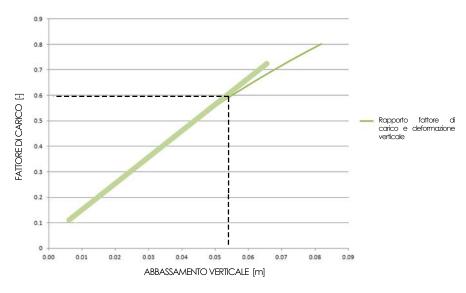
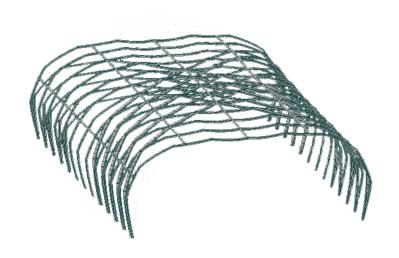


Grafico del rapporto tra fattore di carico-deformazione della struttura. Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Considerando che il limite proporzionale della curva fattore di carico-deformazione della struttura è pari a 0.6, vengono valutate le tensioni in quell'instante e il risultato della verifica a pressoflessione è verifica in quanto si riscontra che:

ANALISI CARICO DEL VENTO LATERALE

Viene preso come riferimento la zona di Torino con una velocità del vento pari a 25 m/s e una densità dell'aria pari a 1,25 kg/m³.



Deformata dell'analisi non lineare.

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

La morfologia del terreno considerata è pianeggiante, priva di ostacoli.

La formula per calcolare la forza del vento¹ è:

P= qb x Ce x Cp x Cd x Ct



Schema struttura con vento laterale.

Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Il fattore qb, ovvero la pressione cinetica di riferimento, viene calcolato tenendo in conto la velocità dell'aria e della densità della stessa. Nel nostro caso otteniamo 390,63 N/m².

Il fattore Ce (ovvero il fattore di esposizone) tiene conto della zona e dell'altitudine con relativa distanza dal mare. Nel nostro caso utilizzando le tabelle dell'Eurocodice 1, si ottiene il valore di 1.8.

Il fattore Cd (ovvero il coefficiente dinamico) nel nostro caso è pari a 1 in quanto la nostra struttura non ha una forma irregolare e non supera gli 80 metri d'altezza.

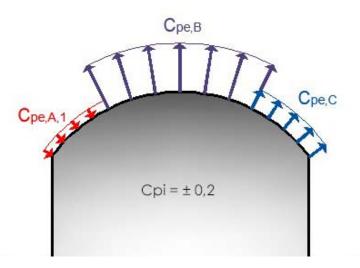
Il fattore Ct (ovvero il coefficiente topografico) viene anch'esso preso pari a 1 in quanto ho considerato di essere in zona pianeggiante e priva di ostacoli.

Il fattore Cp è il fattore di forma che nel caso delle struttura ad arco, avendo un rapporto tra monta dell'arco e larghezza pari a 0,5, ha la seguente distribuzione dei fattori: una prima zona pari a 1/4 della lunghezza dell'arco dove il coefficiente è pari a 0.8 (Cpe,a), una seconda zona pari a metà dell arco dove il coefficiente è pari a -1.2 (Cpe,b) e infine una terza parin a 1/4 della lunghezza dell'arco pari a -0.4 (Cpe,c).

Il coefficiente di pressione interna che va aggiunto a questi ultimi fattori è pari ± 0,2.

Otteniamo così, tre pressioni del vento agenti sulla superficie: una positiva e due negative.

Inserendo i carichi agenti sulla struttura e valutandone le tensioni scaturite dall'azione dei carichi otteniamo che la verifica a pressoflessione non viene verificata:

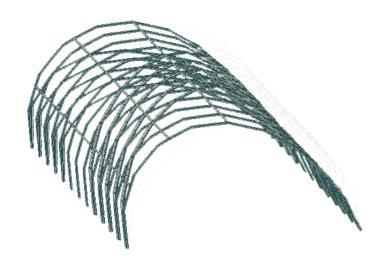


Schema applicazione del carico del vento. Fonte : www.pisanoingegneria.it.

2.28 / 15.6 + 26.31 / 20.6= 1.42 >1

CONSIDERAZIONI

Le simulazioni mostrano come il materiale sarebbe sufficientemente resistente per portare il carico della neve, ma la geometria non risulta essere sufficientemente rigida e per questo cede per eccessiva deformazione.



Deformata dell'analisi lineare statica con carico neve e vento applicati. Fonte: Raccolta personale da software GSA.

Si potrebbe valutare l'opzione di incrementare a 4 le lamelle della sezione. Questo porterebbe a un aumento della resistenza della geometria e al tempo stesso si potrebbe riscontrare probabilmente la verifica della simulalzione con il carico del vento.

Si deve tener in considerazione che il risultato del fattore di carico ottenuto con la simulazione p-delta, ovvero il 60% del carico di riferimento dato da normativa, va ridotto ancora del 60% che è la percentuale di discostamento tra il modello matematico e il prototipo reale (pag. 99). Si ha nello specifico una capaità portante che risulta essere del 36% rispetto a quello che la normativa impone, nel caso di legature fatte con il nastro adesivo.

Sarebbe comunque tutto da testare nella realtà su prototipi in numero sufficiente da ottenere un valore medio di resitenza al carico, anche se i risultati non sono incoraggianti, in quanto il carico che porta all'instabilità risulta molto inferiore a quello della normativa.

Dovrebbe essere valutata anche la tenuta nel tempo sotto l'azione degli agenti atmosferici delle giunzioni e del materiale stesso, ma per motivi economici e di tempo si rimandano le prove a una sperimentazione futura.

Come spunto per ulteriore ricerca, si potrebbero sperimen-

tare altri tipi di connessione (ad esempio perni metallici, morsetti metallici e corde) oltre all'incremento della sezione resistente.

Conclusione

A conclusione di questo lavoro ho cercato di dare alcuni spunti per portare avanti questa ricerca nel futuro.

In primo luogo dopo l'esperienza fatta si può dire che il bambú ha rispettato la sua fama di acciaio vegetale. La sezione utilizzata, molto piccola è in grado di sopportare i carichi verticali, in questo caso la neve.

La fragilità del sistema è data dalla geometria che, come si è potuto valutare dalle simulazioni sui modelli matematici, riduce la capacità portante della struttura in seguito all'eccessiva deformazione.

Gli spunti per portare avanti la ricerca sarebbero:

- 1- provar ad aumentare la sezione resistente, passando da 2 a 4 lamelle sovrapposte
- 2- pensare ad una geometria diversa da quella a tunnel, che nonostante utilizzi gli archi (geometrie resistenti per forma), ha il punto debole di svilupparsi con una sola curvatura e porta la geometria a deformarsi facilmente sotto l'azione dei carichi lungo l'asse sul quale si sviluppa il tunnel.
- 3- inserire degli archi parziali nella geometria, paralleli a quelli obliqui che apporterebbero un aumento della rigidezza alla struttura dovuta a più numerose unioni tra gli elementi. Bisognerebbe valutarne se l'aumento di resistenza è ragionevole rispetto alla soluzione, che pare essere più sosfisticata di quella portata avanti in questo lavoro.

Gli elementi più importanti alla fine della realizzazione sono le giunzioni tra gli elementi, sia quelli che uniscono le lamelle tra di loro sia quelli alle intersezioni degli archi.

Infatti questi, soprattutto se eseguiti, come nel caso sviluppato, con nastri o anche corde, dipendono molto dalla manualità della persona che li esegue. Questo porta a incertezze notevoli sulla resistenza finale della struttura.

Nel mio caso ho riscontrato che con il nastro adesivo, i modelli fisici hanno resistenza inferiore, dovuta alla manualità, rispetto a quella ottenuta matematicamente (da calcolo). Si potrebbe provare a inserire dei perni metallici che tengano unite insieme le lamelle, e anche nei punti di intersezione tra gli elementi lamellari, rendendo più rigido tutto il sistema.

In questo modo si ridurebbe il gap tra modello matematico e quello fisico, che nel mio caso è circa il 60%.

Nel caso si dovesse riuscire ad avere un prodotto vendibile si potrebbero proporre due soluzioni: mettere in vendita un kit con tutto il necessario per costruirsi la propria serra oppure questo kit verrebbe assemblato da una persona specializzata, con esperienza nel settore.

La seconda soluzione parrebbe essere la migliore perché si avrebbe una riduzione dell'incertezza della capacità portante del prodotto finale causata dalla manualità. Potrebbe essere più indicata nel caso di soluzioni di strutture legate alla costruzioni con nastri o corde, nella quale la componente manuale è molto rilevante. Presenta l'inconveniente che ogni volta che si registra un problema alla struttura (sostituzione lamelle, ripristino legature), la riparazione debba essere eseguita da un addetto specializzato, con un aumento del costo di manutenzione.

La prima, invece, potrebbe essere utilizzata nel caso di unioni con perni metallici, dove la componente manuale del giunto è ridotta. In questo caso si fornirebbero le lamelle di bambú già forate. Più difficile è fornire le lamelle con i fori per i perni delle giunzioni tra archi perché è molto difficile che essi vengano a trovarsi nella posizione predefinità e comunque richiederebbero un precisione molto fine. Si potrebbe pensare ad un giunto a "morsetto" (fig. 21 a pag. 50) che non richiede la foratura delle lamelle.

Un'ulteriore ricerca che si potrebbe svolgere potrebbe essere valutare quali tipi di giunti siano di facile realizzazione e gestione nel tempo, nel caso di una autocostruzione, che par essere la soluzione migliore per questo sistema.

Un ulteriore elemento che dovrebbe essere valutato è il come coprire la struttura. Si dovrebbe sperimentare un metodo valido di fissaggio del telo. In questo senso una prima riflessione è stata fatta, pensando di termosaldare alla copertura dei nastri di velcro che andrebbero fissati sugli archi.

Sarebbe comunque da valutare come tenere teso il telo, evitando che esso si deformi in sommità. Questo porterebbe la struttura a caricarsi puntualmente, portandola al collasso anzitempo.

Fig.4 Ancoraggio del telo alla struttura con strappi. Fonte: Raccolta personale.



Un ulteriore tema che rimane aperto è il tema della durabilità: degli elementi di unione (nastro, corde, serraggio perni) che col tempo e anche a causa degli agenti atmosferici possono perdere di efficacia, sia delle lamelle, ogni quanto bisognerebbe rimpiazzarne con delle nuove e nel caso della copertura, bisognerebbe analizzare le giunzioni temosaldate dei nastri di velcro, valutandone la durabilità nel tempo, sempre legata all'azione degli agenti atmosferici.

Le costruzioni in bambú splittato hanno dimostrato come possano avere buone potenzialità, sia legate alla resistenza del materiale stesso sia per l'estrema flessibilità, grazie alla quale ci può permettere la realizzazione di forme e soluzioni particolari.

Questa tesi ha avuto lo scopo di metterne in luce alcune, legate principalmente alle serre agricole, la cui applicazione andrebbe ulteriormente approfondita.

APPENDICE

Prove di laboratorio

TRAZIONE GIUNTI

Per valutare quale sia il giunto più efficace da eseguire per le legature tra le lamelle, ho provato a caricare dei provini con una macchina di carico universale.

Ho realizzato 9 provini con lamelle sovrapposte: 3 eseguiti con nastro adesivo Bostik "Grizzly Tape", 3 con corda di fibra naturale e 3 inserendo dei perni metallici.

La sovrapposizione è di 600 mm per avere 3 giunzioni per ogni provino, la stessa distanza utilizzata nei modelli fisici.

GIUNZIONI CON NASTRO

Questo tipo di giunto viene ottenuto eseguendo 3 giri di nastro lungo tutta la larghezza delle lamelle, prestando attenzione che il nastro sia a contatto anche nella parte inferiore.



Fig.1 Provini con legature con nastro. Fonte: Raccolta personale.

GIUNZIONI CON CORDA

Le giunzioni in corda vengono eseguite con corda in fibra naturale. Questa viene lasciata a mollo per un paio di giorni in modo tale che sia umida nel momento della legaura, infatti dopo la successiva asciugatura essa eserciterà una forza maggiore dovutta alla perdita dell'acqua.

Il nodo viene eseguito con la procedura descritta dalla sequenza qui sotto.









Fig.2 Sequenza della legatura con corda.

Fonte: Raccolta personale.



Fig.3 Provini con legatura con corda. Fonte: Raccolta personale.

GIUNZIONE CON PERNI METALLICI

Questa giunzione viene fatta eseguendo un foro da 5 mm ogni 300 mm e inserendo una bullone (da 5 mm) e serrandoli manualmente. Questo tipo di giunzione ha lo svantaggio di dover forare le lamelle per l'inserimento dei perni.

Fig.4 Provini con perni.Fonte: Raccolta personale.



LA PROVA A TRAZIONE

Le prove sono state eseguite presso il laboratorio LASTIN del Politecnico di Torino con una macchina idraulica universale della METRO COM Engineering con portata massima di 300kN.

Viene azionata dal tecnico di laboratorio Corrado Carbonaro con l'aiuto di Angela Lacirignola.



Fig.5 Macchina idraulica utilizzata. Fonte: Raccolta personale.

La prova prevede di esercitare una forza di trazione sui provini, valutando la forza alla quale le lamelle iniziano a scorrere tra di loro. La valutazione di questo scorrimento viene fatta a vista realizzando delle tacchette allineate tra le lamelle. Quando queste iniziano a essere disallineate la prova viene fermata e registrato il valore di forza impressa dalla macchina.

Le prove sui provini connessi con al corda non vengono effettuate in quanto le lamelle scorrono tra di loro applicando una piccola forza manuale.

GIUNZIONI CON NASTRO

Le prove con connessioni col nastro vengono effettuate su 6 provini: 3 con giunzioni eseguite da 9 mesi e successivamente con le stesse lamelle, 3 con giunzioni appena ese-

PROVINI CON LEGATURE DOPO 9 MESI			
PROVINO	AREA [mm²]	forza impressa [n]	
1	920	130	
2	904	100	
3	900	80	
MEDIA		103	

PROVINI CON LEGATURE NUOVE			
PROVINO	AREA [mm²]	forza impressa [n]	
1	920	150	
2	904	110	
3	900	80	
MEDIA		113	

guite. Questa prova è stata fatta per valutare la tenuta nel tempo del nastro. C'è da dire che i provini sono stati tenuti in laboratorio dove non sono stati sottoposti a sbalzi di termo-igrometrici e irraggiamento, variabili molto importanti che andrebbero ulteriormente approfonditi..

La forza media applicata è di 113 N sia per le giunzioni nuo-



Fig.6 Provino a fine prova. Fonte: Raccolta personale.

ve e di 103 N per quelle realizzate precedentemente. Come si può constatare il tempo non ha inciso notevolmente sulla resistenza impressa del nastro.

Come si può notare dalle immagini il cedimento dea parte dell'unione del provino (fig.6) avviene per scorrimento delle lamelle per mancanza di presa da parte del nastro.

Si è potuto notare come nei provini dove la giunzione è eseguita in prossimità dei nodi, dopo una prima fase di scorrimento della lamella nella legatura, essa si ferma e la forza da applicare per far sì che essa scorra di nuovo è 5 volte superiore alla forza per farla scorre dove le legature non sono vicino al nodo; questo è dovuto all'inspessimento della sezione. Questo ci porta a dire che sarebbe più vantaggioso eseguire le giunzioni in prossimità dei nodi.

GIUNTI CON PERNI

Le prove vengono fatte su 3 provini per valutare quanto sia superiore al nastro questo tipo di giunzione.

La forza media applicata per lo scorrimento delle lamelle è di 5170 N.

PROVINI CON PERNI METALLICI				
PROVINO	AREA [mm²]	forza impressa [n]		
1	912	5580		
2	892	5010		
3	922	4920		
MEDIA		5170		







Fig.7 Provino a fine prova.

Fig. 8 Deformazione perni dopo la prova.

Fig.9 Rottura del provino.

Fonte: Raccolta personale.

Come si può vedere dall'immagine (fig.9), la rottura del provino avviene per fessurazione del bambú lungo la direzione delle fibre. Prima della rottura le viti si inclinano subendo una deformazione a loro volta.

I perni risultano la soluzione più resistente per rendere solidali gli elementi che vengono giuntati.

Infine ho provato a comparare la sforzo tagliante uscente dalla simulazione del modello matematico con quella trovata dalle simulazioni di laboratorio.

Per calcolare la forza dallo sforzo di taglio ho utilizzato la seguente forma (derivante dalla formula di Juorawsky):

$$F_{c} = T \times b \times X$$

 $F_s = \tau \ x \ b \ x \ X$ dove τ è lo sforzo tagliante, b è la dimensione di base della mia sezione di lamelle e X è il passo con cui vengono fatte le legature.

La tensione massima riscontrata nei modello matematico risulta essere di 1,1 N/mm², con una forza di taglio pari a 1364 N, che paragonata ai valori medi del nastro, risulta essere 10 volte superiore. Questo vuol dire che la sezione con le legature fatte col nastro, sottoposta ai carichi della neve, non si comporeterebbe come unico elemento in quanto farebbe scorrere le lamelle una sull'altra.

Il valore del carico che la struttura potrebbe supportare prima che le lamelle inizino a non essere più unico elemento scende da 360 N/m² a 100 N/m².

Invece risulterebbe essere verificata quella con i perni metallici la cui forza media risulta essere ben 5 volte superiore a quella data dal software di calcolo.

Questo conferma come le unioni in questo tipo di struttura siano un elemento delicato che andrebbero ulteriormente approfondito.

BIBLIOGRAFIA

Alessia Umberto, Pugno Maurizio, Manuale di costruzioni: Prontuario ad uso dell'Istituto per Geometri dei tecnici progettisti e dei professionisti, Edizione SEI, Torino

Caironi Mario, Teoria e tecnica delle costruzioni. Instabilità dei telai, Clupquide, 1986

Càrdenas Laverde Mauricio, Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive, Sistemi Editoriali, Napoli, 2008

Friedman Yona, Roofs, a cura di Bocco Andrea, Quodlibet, Macerata, 2017

Harries Kent A., Sharma Bhavna, Nonconventional and Vernacuclar Construction Materials, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2016

Jurgen Hennicke, Frei Otto, IL 10- Gittershallen/Grid shel-Is,Institute for Lightweight Structure(IL), University of Stuttgard,1974

Levy Dana, Austin Robert, Ueda Koichiro, Bamboo, Weatherhill, New York, 1978

Timoshenko Stephen, Theory of elasticity, McGraw-Hill College, 1 gennaio 1970

Ugarte Jimena, Habusta Magrit, Bamboo the vegetal miracle/ Bambú el milagro vegetal, Istituto Arquitectura Tropical Costa Rica, 2011

Vélez Simón, Dethier Jean, Steffens Klaus, Grow Your Own House: Simone Velez and Bamboo Architecture, Vitra Design Stiftung, Bilingual edizione, 2002

Wolley Tom, Natural Building: A Guide to Materials and Techniques, Crowood Press, 2006

TFSI

Chiacchiera Paolo, Ghirardotti Davide, Costruzione in bambù secondo i manuali di Yona Friedman, Rel. Andrea Bocco, Walter Ceretto. Politecnico di Torino, Corso di laurea in Architettura, Corso di laurea magistrale in Architettura costruzione citta', 2016

Denittis Michela, Analisi sperimentale e numerica di un telaio in Guadua Angustifolia Kunth caricato orizzontalmente: il bambù come possibile alternativa ecosostenibile ai tradizionali materiali da costruzione.,Rel. Prof.ssa Ing. Luisa Molari, Ing. Caori Patricia Takeuchi Tam, Università di Bologna, Corso di laurea in Ingegneria edile-architettura, 2018-2019

Fabiani Marco, Physical and mechanical properties of Italian bamboo culms, Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia, 2015

Greco Silvia, Il Bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per prospettive sostenibili, Rel. Prof.ssa Ing. Luisa Molari, Ing. Marco Fabiani, Prof. Ing. Lando Mentrasti, Corso di laurea in Ingegneria edile-architettura, 2016-2017

Pipino Valeria, Studio di un sistema costruttivo in bambù per la realizzazione di edifici ecosostenibili in Europa.,Rel. Andrea Bocco, Donato Sabia, Politecnico di Torino, Corso di laurea specialistica in Architettura Costruzione, 2012

Randal Mitch Derek, Splitting Capacity Characterization of Bamboo Culms, Undergraduate Thesis, University of Pittsburgh, 2009

NORMATIVA TECNICA

Decreto Supremo N° 011-2012-VIVIENDA, Normativa Técnica- E.100 Bambù, Ministero de VIvienda, Costrucciòn y Saneamiento

Eurocodice 1 UNI EN 1995-1-1:2014 Progettazione delle strutture di legno

Eurocodice 5 UNI EN 1995-1-1:2014 Progettazione delle strutture di legno

SITOGRAFIA

http://www.bambuseto.it/il-bambu/

http://www.ecology.com/2013/05/15/what-can-bam-boo-do-about-co2/

http://www.eprice.it

http://www.ironbarkarchitecture.com.au/

http://www.poliedra.xyz/trattamenti/

http://www.sistemichiocciola.com/prodotti/t-block. html?___store=default

http://www.tboake.com/competitions/s_06/tran_peng/ LPENG_final_Essay.pdf

http://www.technolit.de

https://it.wikipedia.org/wiki/Serra

https://www.archdaily.com/

https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bam-bu/bambu-vietnam-progetti-030/

https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bam-bu/tecnica-bambu-splittato-822/

https://www.arketipomagazine.it/

https://www.carbonsolutions.com/

https://www.dancovershop.com

https://www.greenb.it

https://www.guaduabamboo.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bamboo-guadua-vs-moso

https://www.ideegreen.it/come-costruire-serra-per-lor-to-47363.html

https://www.issuu.com/gerlevo/docs/manual_de_construcci_oacute_n_de_es

https://www.issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo_stampa

https://www.moso.eu/

ARTICOLI SCIENTIFICI

Bruno Luca, Sansone Mario, Venuti Fiammetta, Effects of the Equivalent Geometric Nodal Imperfections on the stability of single layer grid shells, ScienceDirect, Politecnico di Torino, Torino, 2016

Venuti Fiammetta, Bruno Luca, Influence of in-plane and out-of-plane stiffness on the stability of free-edge gridshells: A parametric analysis, ScienceDirect, Politecnico di Torino, Torino, 2018

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo lavoro di tesi è doveroso da parte mia ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine e che ho conosciuto durante questi anni di studi.

In primo luogo vorrei ringraziare il professor Andrea Bocco per l'oppurtunità data nell'effetturare questa ricerca e il professor Walter Ceretto per i consigli utili per lo svolgimento della stessa.

Vorrei porgere i miei ringraziamenti anche ad Angela Lacirignola e a Fiammetta Venuti per avermi concesso un po' del loro tempo e per avermi aiutato nella ricerca.

Un grazie enorme alla mia famiglia.

Grazie a mamma e a papà per avermi supportato in questi anni e aiutato nello svolgimento della tesi, facendo anche tanti sacrifici. Non smetterò mai di ringraziarvi per questo. Grazie a Simo e Ale, i miei fratelli, che mi hanno aiutato sempre, dandomi la loro opinione su tutto.

Vorrei ringraziare Alessia, senza la quale non saprei come fare. Grazie per essermi stata vicina sempre, soprattutto nei periodi più difficili, spalleggiandomi e credendo sempre in me.

Un grazie va anche ad Ernestino Auda per avermi aiutato nel trasporto del materiale e alla Bo-Pi Group che mi ha fornito alcune delle parti metalliche.

Infine, un ringraziamento ai miei compagni e amici che ho conosciuto in questi anni.

In modo speciale Alessia, Gianni, Pasto e llaria con i quali ho passato mattine, pomeriggi e notti per riuscire a portare a compimento i nostri lavori.

Tra fatica, risate e brindisi ho imparato molto da voi.

Vorrei anche ringraziare i miei amici Alessandro Lovato e Marco Grossi per i bei momenti passati insieme durante questi cinque anni.

Grazie anche a Andre, Michi e Luca amici di una vita e sui quali posso sempre contare.