POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di una serra agricola in bambù

Relatore:

Prof. Andrea Bocco

Correlatore:

Prof. Walter Ceretto

Candidato:

Antongiulio Lizzio

Luglio 2020

INDICE

Introduzione 6

1- Le serre 7
1.1 Cenni storici 7
1.2 Classificazione e tipologie costruttive 9
1.3 Caratteristiche strutturali 11
1.4 Materiali per la copertura 12
1.5 Sviluppi futuri 15

2- Il bambù come risorsa 18
2.1 Distribuzione geografica 18
2.2 L'importazione del bambù in Europa 19
2.3 La sostenibilità del bambù 19
2.4 L'immaginario collettivo rispetto al materiale 23
2.5 Caratteristiche fisiche 25
2.5.1 Proprietà fisiche 25
2.5.2 Proprietà meccaniche 27
2.6 Prove sperimentali sul bambù italiano 29
2.6.1 Contenuto di umidità 31
2.6.2 Resistenza a compressione parallela alle fibre 33
2.6.3 Resistenza a trazione parallela alle fibre 36
2.6.4 Caratterizzazione del materiale 40
2.7 Il bambù curvo come elemento strutturale 43
2.7.1 Tecniche a caldo 43
2.7.2 Tecniche a freddo 45
2.8 Boundled Bamboo Split, esempi e tecniche 47

3- Le strutture ad arco 51
3.1 L'arco catenario 53
3.2 Gli archi in bambù 58
3.3 Canyaviva 62
3.3.1 Il metodo 63

3.3.2 Raccolta 64
3.3.3 Pulizia 64
3.3.4 Classificazione 65
3.3.5 Realizzazione delle colonne 67
3.3.6 Curvatura 69
3.3.7 Montaggio 71
3.3.8 Fondazioni 72
3.3.9 Rivestimento 74
3.3.10 Sviluppi futuri 75

2- I giunti 77

4.1 Sistemi tradizionali 77
4.2 Sistemi moderni 81
4.3 Casi studio 83
4.3.1 Energy efficent Bamboo House 83
4.3.2 Mobile theatre 85

5- Il progetto strutturale 88

5.1 Valori caratteristici 88
5.2 Valori caratteristici di progetto 89
5.3 Concept di serra 91
5.3.1 L'analisi degli archi 91
5.3.2 Comportamento dell'arco a due cerniere 93
5.3.3 Comportamento dell'arco a tre cerniere 97
5.4 Premesse sull'applicazione delle normative 101
5.4.1 Combinazioni agli Stati Limite Ultimo 103
5.5 Carico neve 105
5.6 Carico vento 108

6- Risultati dell'analisi 115

6.1 Analisi non lineare sul modulo 130

7- Progettazione dei giunti 134

7.1 Primi prototipi 134
7.1.1 Giunti tipo 1 136

7.1.2 Giunti tipo 2 138
7.2 Seconda versione 140
7.2.1 Giunti tipo 1 140
7.2.2 Giunti tipo 2 141

8- Progettazione dei giunti 144
8.1 Premesse 144
8.2 Processo di realizzazione 145
8.2.1 Selezione 145
8.2.2 Realizzazione centina 146
8.2.3 Realizzazione delle semi colonne 147
8.2.4 Sistema di fondazione 148
8.3 Analisi sugli archi 149
8.3.1 Analisi arco a due strisce 149
8.3.2 Analisi arco a quattro strisce 150
8.3.3 Seconda analisi arco a due strisce 152
8.3.4 Seconda analisi arco a quattro strisce 153
8.3.5 Analisi arco a sei strisce 154
8.3.6 Analisi arco misto 7+5 strisce 157
8.4 Realizzazione del modulo di serra 160
8.4.1 Analisi modello 1 164
8.4.2 Analisi modello 2 168
8.5 Considerazioni e sviluppi futuri 170

Sintesi

La produzione e l'uso di serre agricole, spesso realizzate in plastica o ferro, si sviluppa parallelamente alla continua e crescente richiesta alimentare mondiale. Per limitare le emissioni di CO2 correlate alla loro produzione, nell'ambito di questa studio, si è deciso di indagare la possibilità di produrre un modello di serra sostenibile che fosse realizzato in bambù. In questa tesi mi sono proposto l'obiettivo di contribuire alla ricerca strutturale su questo materiale attraverso la realizzazione di una serie di prove di carattere sperimentale e di laboratorio. Il tutto seguendo, dove possibile, le linee guida delle normative internazionali, essendo l'Italia sprovvista di uno standard specifico per il bambù.

Sono state innanzitutto valutate alcune delle principali caratteristiche meccaniche e fisiche del *Phyllostachys Edulis* italiano, che ci hanno restituito dei valori comparabili con quelli provenienti dai paesi dove questo materiale è comunemente usato e studiato.

Successivamente si è passati alla progettazione e verifica del modulo comprendente lo sviluppo dei giunti e l'analisi tramite software sia dei singoli archi che compongono il prototipo di serra, sia del modulo completo, valutandone il comportamento agli SLU e tramite analisi non lineare.

Infine si è passati alla fase di messa in opera, realizzando e testando gli archi singoli e il prototipo in scala 1:1, al fine di valutarne le differenze rispetto ai modelli matematici e la fattibilità realizzativa e commerciale.

Abstract

The production and use of agricultural greenhouses, often made of plastic or iron, develops together with the continuous and growing worldwide food demand. To limit the CO2 emissions related to their production, as part of this study, it was decided to investigate the possibility of producing a sustainable greenhouse model in bamboo.

In this thesis I set myself the goal of contributing to structural research on this material through the creation of one series of experimental and laboratory tests, following where possible the guidelines of international regulations, because Italy does not have a specific

standard for bamboo.

First of all, some of the main mechanical and physical characteristics of the Italian *Phyllostachys Edulis* were assessed, giving us values comparable with those from the countries where this material is commonly used and studied. After that, we proceeded to the design and verification of the module, including the development of the joints and the analysis by software of the individual arches that make up the greenhouse prototype. The same analysis was done for the complete module, evaluating its behavior to the SLUs and through non-linear analysis. Finally I made and tested the single arches and the 1: 1 scale prototype, in order to evaluate the differences with respect to the mathematical models and the realization and commercial feasibility.

Introduzione

Mi sono proposto l'obiettivo di proseguire gli studi svolti da Francesco Levetto nella sua tesi di laurea "Il bambù, sperimentazione del bambù splittato nella realizzazione di una serra tunnel".
Oggetto principale dello studio resta, dunque, anche nel mio caso, una serra agricola con struttura in bambù, ideata approfondendo gli aspetti che riguardano la progettazione.
Ripartendo dall'inizio, ma avendo già chiari i punti critici e gli approfondimenti necessari da svolgere, alcuni dei quali suggeriti proprio da Levetto, cercherò di arrivare a un prodotto finito, potenzialmente commercializzabile.

Il settore agricolo italiano rappresenta un comparto produttivo importantissimo in termini economici e di utilizzo del territorio, grazie anche alle favorevoli condizioni climatiche del Paese. Negli ultimi tempi il soggetto principale che in questo settore dell'economia è diventata la Grande Distribuzione Organizzata; essa, per rispondere alle richieste del consumatore, impone la presenza costante, nel corso di tutto l'anno, di prodotti alimentari che fino a qualche decennio fa erano soltanto stagionali. Per far ciò è necessario ricorrere sempre più a sistemi che gestiscano il controllo climatico annuale degli ambienti atti ad ospitare la coltivazione.
L'ultimo censimento dell'Istat risale al 2010 e mostra una SAU (Superficie Agricola Utilizzata) pari a 12.885.185 ha e un'occupazione nel settore di circa 1.000.000 lavoratori.
La filiera nazionale delle serre, pur occupando una superficie molto piccola (42.000 ha) rispetto alla SAU, produce un fatturato complessivo di circa 3 miliardi di euro a fronte di 31.256 aziende che producono in serra (al 2010).
Questi numeri che danno l'idea di quanto questo ambiente artificiale sia diffuso ed utilizzato nel nostro Paese. Lo stesso avviene altrove: in Cina è aumentato l'utilizzo fino a ricoprire 1 milione di ettari (su circa 2 milioni totali nel mondo).
Inoltre, uno sforzo significativo in questi ultimi anni è stato rivolto al raggiungimento di una maggiore efficienza energetica nell'ambito dell'agricoltura protetta,

attraverso l'applicazione di tecniche di climatizzazione a basso consumo energetico e di processi produttivi eco-compatibili. Ciò deve dunque riguardare anche la realizzazione delle serre stesse, poiché i consumatori, sempre più attenti verso i temi dell'ecosostenibilità, orientano le loro scelte di acquisto.
È in questo contesto che ricade la scelta di indagare un metodo alternativo a quelli convenzionali per la realizzazione di un prototipo di serra che sfrutti il bambù come materiale strutturale. Questa pianta non è autoctona, ma su di essa si sta concentrando una crescente attenzione anche nel nostro Paese.

Capitolo 1 Le serre

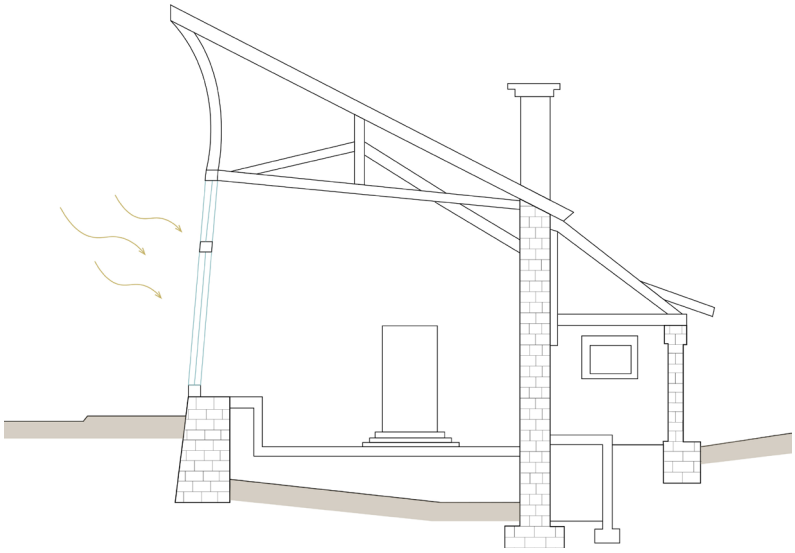
1.1 Cenni storici

L'idea di sviluppare spazi di protezione per la coltivazione di piante alimentari si inizia a diffondere in epoca romana. I romani infatti, utilizzavano materiali come la mica e la selenite (in lastre traslucide) per costruire ripari, utilizzando anche vapore per la climatizzazione.
Plinio il Vecchio, nella Historia Naturalis, riporta che l'imperatore Tiberio, nel suo soggiorno nell'isola di Capri (26 d.C.), richiedesse ogni giorno cetrioli freschi che dovevano essere coltivati in strutture simili a bauli in legno e vetro, permettendo il riscaldamento dell'aria al suo interno.
Ma è dopo il XVI secolo che la diffusione di serre ebbe una significativa espansione. Ciò allo scopo di coltivare numerose piante del Nuovo Mondo (come peperoni e pomodori) anche in Europa, per usi alimentari e decorativi, ma anche per scopi medici e farmaceutici.
Non esiste una data specifica che permetta di capire se la prima progettazione e costruzione di una serra appartenga al botanico Jules Charles (Leida, Olanda, 1577) per coltivare piante medicinali, oppure all'Orto Botanico di Padova (fondato nel 1545, su richiesta di Francesco Bonafede).
In ogni caso, le serre costruite in Europa tra il XVI e il XVII secolo avevano un aspetto decisamente diverso da come le conosciamo oggi; erano strutture in muratura e legno con delle grandi vetrate poste sul lato Sud e addossate a un pendio o ad

una costruzione massiva sul lato Nord.

Nel XVIII sec. in Olanda questa tipologia evolse come un edificio che si sviluppa sull'asse Est-Ovest con grandi finestre a Sud e locali di deposito a Nord, un unico tetto a falda singola sporgente a Sud in modo da limitare l'apporto di calore in estate quando il sole è alto.

Figura 1



Serra settecentesca di tipo olandese (sezione)
Rielaborazione da fonte: Treberspurg, M., *Neus Bauen mit der Sonne,* Wien 1994,p.17

Ma il più grande sviluppo di questi sistemi avvenne anni dopo, con la diffusione di strutture portanti in ferro o ghisa. L'architetto Decimus Burton realizzò nel 1841 la *Palm House* che faceva parte dei Royal Botanic Gardens a Kew (Sud-Ovest di Londra); in occasione dell'Esposizione Universale del 1851 fu realizzato il Crystal Palace di Londra.

Con il XX secolo si iniziarono a utilizzare anche sistemi di riscaldamento, irrigazione e fertilizzazione e venne adottato il termine «serra» o «green-house» per indicare tutti quei sistemi di copertura costituiti da materiale trasparente.

Intorno al 1960 dopo la scoperta dei materiali polimerici, sfruttando il clima favorevole dell'area mediterranea, nacquero strutture più economiche di tipo «serra-tunnel».

È possibile distinguere tre tipi di serra:

(LTG) Low Tech Greenhouse: struttura portante composta da tubi in PVC curvi, copertura in plastica, ridotto controllo climatico.
(MTG) Medium Tech Greenhouse: struttura portante spesso in metallo e copertura in plastica rigida o in vetro; sono presenti sistemi di controllo climatico.
(HTG) High Tech Greenhouse: la struttura è generalmente in ferro zincato e i sistemi di controllo climatico sono relativi a tutti i fattori ambientali (raffreddamento e riscaldamento dell'aria e del substrato, controllo dell'umidità e della quantità di luce, nonché della concimazione).

1.2 Classificazione e tipologie costruttive

La normativa per la progettazione di serre è la UNI 13031-1:2004 che riprende lo Standard Europeo EN 13031-1 (2001) che la definisce come: "*una struttura utilizzata per la coltivazione e/o la protezione di piante e colture che sfrutta la trasmissione della radiazione solare sotto condizioni controllate per migliorare l'ambiente di crescita, con dimensioni tali da consentire alle persone di lavorare al suo interno*".
In particolare, si può definire serra se:
- il suo utilizzo sia adibito alla coltivazione o protezione di piante;
- sia possibile controllare la temperatura interna;
- il materiale di copertura permetta la trasmissione della radiazione solare e dunque la continua produzione di calore tramite effetto serra;
- ci siano adeguate condizioni di lavoro, in termini di dimensioni.

Secondo la normativa, le serre sono classificate in base alle previsione di vita utile di progetto. Vengono distinte due classi principali (A e B) a cui sono collegate caratteristiche strutturali e classi di rischio diverse.
In base a quest'ultima, il progettista deve determinare gli stati limite (situazione oltre la quale la struttura non soddisfa più i requisiti prestazionali e di sicurezza stabiliti) ed è, inoltre, assegnata anche la durata di vita minima.
Un fattore che determina l'appartenenza alla classe è la possibilità o meno del rivestimento di assecondare eventuali spostamenti del telaio (se li tollera, la serra

è di classe B).

Tab. 1

Classification [c]	Minimum design working life		
	15 year	10 year	5 year
Class A [a]	A15	A10	-
Class B [b d]	B15	B10	B5

[a] Class A greenhouses shall have a minimum design working life for the structure of either 15 years or 10 years and shall be designated as Class A15 or A10 greenhouse accordingly.
[b] Class B greenhouses shall have a minimum design working life for the structure of 15 years, 10 years or 5 years and shall be designated as Class B15, B10 or B5 greenhouses accordingly.
[c] Greenhouses clad in glass shall have a minimum design working life of not less than 15 years.
[d] Where expensive crops and/or equipment are present in the greenhouse a design working life of at least 10 years is recommended.

Classificazione serre UNI EN 13031-1:2004

Concentrandoci, invece, sugli aspetti formali e prendendo come riferimento la sezione trasversale, possiamo distinguere tre tipi:

Serre tunnel

Strutture facilmente removibili, essendo prevalentemente prive di ancoraggi a terra, che presentano una sezione totalmente ad arco (più o meno ribassato), oppure pareti laterali, inclinate o meno, ma costituite da elementi rettilinei, in questo caso definite a mansarda. Questo tipo viene realizzata principalmente a campata singola.

Le caratteristiche principali sono la semplicità e il basso costo, mentre le dimensioni variano in base al tipo di coltivazione.

Apprestamenti mobili non praticabili:

Tunnel piccoli e medi di altezza tra i 30-40 cm e 80-90 cm;

Apprestamenti praticabili:

A partire da volumi minimi di 1,8 m^3 per m^2 di superficie coperta.

Serre a tetto curvilineo

Sono caratterizzate da montanti verticali e copertura curvilinea ad arco ribassato o gotico, permettendo così lo sviluppo di campate multiple affiancate.

Il rivestimento è di materiale plastico, in forma di lastre o film.

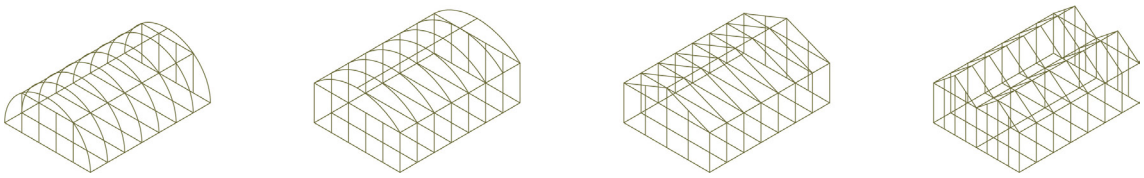
Serre con tetto a falde

Questa categoria può essere a sua volta suddivisa in due:

- serre a padiglione, che presentano due falde simmetriche e pareti verticali che permettono lo sviluppo di campate multiple e il ricircolo dell'aria con aperture sui lati e sul colmo della falda.
- serre di tipo *Venlo*, che prendono il nome dalla città Olandese dove furono inventate, sono specifiche per comporre campate multiple, in quanto presentano una struttura portante costituita da colonne su cui poggia una trave reticolare orizzontale e sul cui estradosso si innesta la struttura portante del tetto sviluppata da due o più ordini di falde simmetriche.

Queste ultime sono particolarmente diffuse nel Nord e Centro Europa, poiché riducono le dispersioni di calore grazie al rapporto di forma (V/S) e sfruttano maggiormente la radiazione diffusa, spesso superiore a quella diretta, grazie all'altezza considerevole (anche superiore ai 5 m).

Figura 2



Serra a tunnel | Serra a tetto curvilineo | Serra con tetto a falda | Serra tipo *Venlo*

1.3 Caratteristiche strutturali

In una serra la struttura portante è costituita da:

- Sistema di fondazione;
- Colonne portanti verticali e travature (unico elemento per sistemi ad arco);
- Controventature longitudinali;
- Sistemi di connessione tra i vari elementi.

Inoltre, è importante che tutti questi elementi riducano al minimo il loro ombreggiamento interno, rispondendo ad esigenze di leggerezza e ingombro, nonché soddisfino i requisiti strutturali necessari.

I materiali più utilizzati sono il legno, le leghe d'alluminio, il ferro e i materiali plastici.

Il primo può garantire luci più ridotte rispetto a ferro e alluminio a parità di superficie ombreggiante della struttura, e una durata minore (5/10 anni in base al tipo di legno), ma può risultare meno costoso e i processi produttivi meno impattanti in termini di emissioni in ambiente rispetto alla plastica, al ferro e all'alluminio.

1.4 Materiali per la copertura

Generalità

Il materiale di copertura svolge funzioni indispensabili al funzionamento della serra:

- salvaguardare le specie vegetali da agenti climatici come pioggia, grandine, neve, vento ecc.;
- permettere l'ingresso massimo delle radiazioni solari nello spettro del visibile e allo stesso tempo produrre il cosiddetto "effetto serra".

Quest'ultimo si produce, in questi sistemi, facendo passare l'infrarosso "vicino" (lunghezza d'onda compresa tra 700 e 3.000 nm) e bloccando le radiazioni infrarosse "lontane" (lunghezze d'onda tra 3.000 e 26.000 nm) che vengono riemesse dal terreno, dalle piante e dagli oggetti presenti all'interno della serra.

I materiali che possono svolgere queste funzioni sono principalmente il vetro e la plastica.

Esistono due norme riguardo alla qualità dei materiali di copertura:

1) UNI EN 13206:2002 " Film termoplastici di copertura per uso in agricoltura ed orticoltura";

2) UNI 10452:1995 ".Lastre ondulate ed alveolari di materiale plastico trasparente, incolore o traslucido per serre ed apprestamenti analoghi. Tipi, dimensioni, requisiti e metodi di prova".

Il vetro

Di vari spessori e dimensioni standardizzati, si trova con caratteristiche traslucide o trasparente. La caratteristica più utile di questo materiale è la sua incapacità di

trasmettere lunghezze d'onda maggiori di 4.600 nm: ciò determina la nascita del suddetto effetto serra.
La sua resistenza all'urto non è elevata, per una lastra temprata di 4 mm è pari a 10 Joule.
Per resistere alle grandinate oggi si utilizza spesso vetro temperato o si ricopre la struttura di reti antigrandine. Necessita di strutture importanti, dato il suo peso specifico di circa 26.490 N/m^3, e dunque anche i costi sono maggiori rispetto a quelli associati a materiali di copertura più leggeri che si trattano di seguito.

La plastica

Alcuni tipi di plastiche sono adatte per essere applicate a serre semplici, prive di impianti di condizionamento dell'aria.
Questa classe di materiali presenta numerosi pregi, come la facilità d'istallazione, l'economicità e la leggerezza, ma anche dei difetti:
- tende a degradarsi dopo lunghe esposizioni al sole (fotolabilità), con conseguente ingiallimento e dunque riduzione della luce trasmessa;
- si usura facilmente provocando decadimento delle prestazioni spettroradiometriche e meccaniche, dunque problemi di durabilità;
- tende a formare condensa;
- capacità più ridotte di effetto serra rispetto al vetro.

Questi fattori riducono la vita utile di questi manti di copertura a circa 5 anni, se pur il continuo progresso tecnologico, ad es. tramite additivi, stia tentando di allungarne la durata.
Inoltre, per il problema dell'accumulo di condensa (che aumenta la riflessione fino al 15%, riducendo la radiazione trasmessa), esistono film plastici con trattamenti superficiali che fanno scorrere le gocce lungo le pareti evitandone l'accumulo. Questo fenomeno può essere accentuato anche tramite la forma del tetto, prediligendo quello gotico che ha una pendenza maggiore della falda.

I principali materiali plastici di rivestimenti possono essere suddivisi in tre gruppi :

1) Film plastici flessibili

- Polietilene (PE), il quale può essere usato tra -40° e +70° (dopo questa soglia tende a deformarsi). È impermeabile al vapore e all'acqua ma non ai gas come CO_2 e O_2. È il materiale più utilizzato in serricoltura grazie alla sua economicità, alle sue buone caratteristiche meccaniche e di trasparenza, seppur presenti ridotte capacità di effetto serra rispetto ad altri materiali plastici.
- Cloruro di polivinile (PVC), ha caratteristiche ottiche migliori del precedente ma è più fragile, difficile da smaltire e ha un costo maggiore.

È permeabile al vapore e in parte all'ossigeno e all'anidride carbonica ma impermeabile all'acqua.

- Etilene Vinil Acetato (EVA), ha caratteristiche ottiche intermedie tra il PE e il PVC, anche se è connotato da un migliore effetto serra e dalla capacità di sviluppare condensa ridotta. È di difficile deformabilità e presenta maggiore durata, ma ha un costo maggiore.

2) Laminati semirigidi

Possono essere in forma piana e ondulata e possono essere prodotti con il PVC oppure altri due tipi di polimeri:

- Polimetilmetacrilato (PMMA), conosciuto come plexiglas, più resistente all'erosione e agli urti del vetro e ha una durata di circa 15 anni (ma ha la tendenza ad ingiallire col tempo).

Presenta un coefficiente di trasparenza di 0.93, più elevato del vetro per il quale varia tra 0.80 e 0.90.

Rispetto agli altri materiali plastici, però, presenta maggiori costi (4÷5 volte quelli del vetro) e un peso più elevato (circa 1,2 kg/m^2 per millimetro di spessore).

- Poliestere fiberglass reinforced plastic (PRFV), conosciuto come vetroresina, che ha una bassa resistenza all'abrasione e dunque tende erodere la sua superficie colpita dagli agenti atmosferici, con conseguente riduzione della trasparenza e della resistenza.

3) Le lastre rigide

Possono essere piene o alveolari. Vvengono ottenute per estrusione e presentano caratteristiche di leggerezza e resistenza meccanica ma scarsa trasmittanza luminosa. I materiali utilizzati sono il PMMA e il Policarbonato (PC), quest'ultimo è più economico del PMMA, tende però ad ingiallirsi dopo circa 5 anni.

1.5 Sviluppi futuri

La costante ricerca tecnologica sta portando allo sviluppo di nuovi polimeri auto-pulenti che possono ridurre il depositarsi di polvere, anch'essa colpevole come la condensa di ridurre il flusso di luce entrante e quindi la resa delle colture. Questa caratteristica è conferita tramite l'aggiunta di nanoparticelle che rendono il materiale idrofobico, permettendo dunque all'acqua di scorrere e rimuovere facilmente la polvere e lo sporco.

Tra i materiali sono in produzione anche dei teli di copertura in etilene tetrafluoroetilene (ETFE). Il suo processo di sintesi risulta essere più ecologico dei polimeri normali in quanto non necessita di solventi chimici né di petrolio ma è a base d'acqua.

Presenta caratteristiche elevatissime di trasparenza (trasmissione dei raggi solari del 95%), è 99 volte più leggero del vetro e ha una durata, senza alterazioni né cromatiche né meccaniche, di quasi 30 anni. Al momento il problema è l'alto costo di produzione.

Altro importante progresso è stato fatto nel campo dei materiali fotoselettivi colorati, anche attraverso gli studi di Pasquale Mormile (CNR di Napoli) e Giovanni Minuto (CERSAA di Albenga). Questi hanno dimostrato come, attraverso l'uso di questi prodotti, avvengano notevoli miglioramenti nella crescita delle piante e anche nel controllo di determinati agenti patogeni (come la mosca bianca) ed erbe infestanti. Il tutto si traduce in una riduzione dei pesticidi utilizzati (se pur l'obiettivo sia la loro abolizione completa), altro grande problema in ambito agricolo.

Secondo il documento dell'ONU del gennaio 2017 "*Report of the Special Rapporteur on the right to food*", antiparassitari e anticrittogamici sono *"responsabili per un*

numero stimato di 200.000 decessi all'anno per avvelenamento acuto" in tutto il mondo.

Infine, il Polietilene biodegradabile *Mater-Bic*, che può essere utilizzato per realizzare teli per la pacciamatura totalmente biodegradabili rilavorandoli col terreno stesso alla fine del suo utilizzo.

Infatti, uno dei problemi maggiori dell'impiego di materiali plastici per le coperture resta la difficoltà di smaltimento a fine vita, che come detto, è relativamente breve.

CAPITOLO 2 Il bambù come risorsa

2.1 Distribuzione geografica

Il bambù è un'erba gigante risalente al Cretaceo (compresa tra 65 e 135 milioni di anni fa), nativa in tutti i continenti ad eccezione dell'Europa e dell'Antartico.

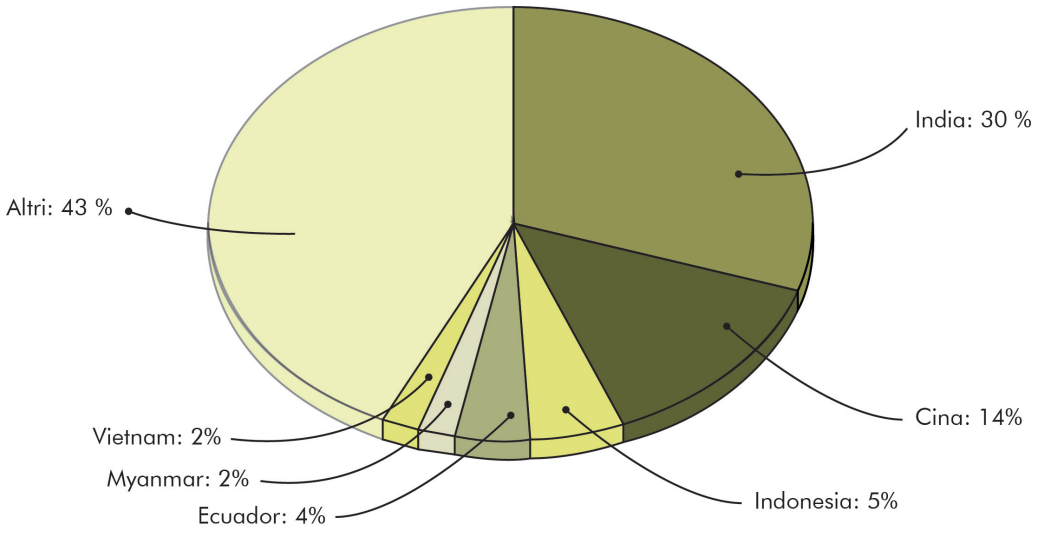
È probabile che questa pianta sia originaria dell'Arcipelago malese, della Birmania e dell'India, poiché il 65% delle specie conosciute (circa 1400) sono state ritrovate in questi luoghi.

Il bambù cresce spontaneamente in climi tropicali e sub-tropicali, principalmente a latitudini tra 46° Nord e 47° Sud e temperature che oscillano tra gli 8 e i 36°C, seppur sia stato documentato che alcune specie, come *Phyllostachys edulis*, resistano a temperature di -10°C e l'*Himalayacalamus* cresca fino a 3.600 m d'altitudine.

Si stima che le foreste di bambù coprano circa 36 milioni di ettari nel mondo, ovvero il 3.2% delle aree forestali totali (FAO, 2007), anche se questo dato è sicuramente impreciso vista l'incompletezza di informazioni di alcuni Paesi.

Ad esempio, dei Paesi Latinoamericani, solo il Brasile, il Cile e l'Ecuador sono dotati di informazioni precise e attuali circa l'estensione di questa pianta; gli altri forniscono informazioni più datate.

Figura 3



Distribuzione percentuale per paese FAO (2007)

2.2 L'importazione del bambù in Europa

I primi contatti che l'Europa ebbe con questa pianta risalgono al 552 d.C., quando le prime uova di baco da seta furono contrabbandate all'interno di canne di bambù dalla Cina a Costantinopoli.

Marco Polo parlò di questo materiale nel *Milione* (1298) descrivendo le corde che in Cina servivano a portare in secca le grandi navi.

Nel 1626 il botanico tedesco G.E. Rumpf pubblicò *Herbarium Amboinense*, in cui descrisse 24 specie di "alberi tubolari" e i loro usi.

Il suo nome fu coniato nel 1778 basandosi sulla lingua malai che lo chiama "*mambu*", tradotto in inglese come Bamboo. Il nome scientifico *Bambusoideae* è stato definito dal botanico tedesco Christian Luerssen nella pubblicazione *Grundzüge der Botanik* del 1893.

L'arrivo di questa pianta in Europa si fa risalire al XVI-XVII secolo periodo in cui, tramite le esplorazioni e conquiste coloniali, numerose specie straniere furono importate nel vecchio continente (vedi Cap. 1.1).

I Portoghesi furono i primi a tentare di far acclimatare questa pianta, anche attraverso l'uso di serre, inizialmente a Setubal.

In Francia, a Généragues, Eugène Mazel, commerciante di spezie ma appassionato di botanica, nel 1855 fondò il più grande vivaio di bambù dell'epoca (sei ettari) al fine di diffonderne la conoscenza. Questo verrà denominato *Bambouseraie* e dopo essere stato venduto ed ampliato risulta uno dei più grandi parchi a tema bambù d'Europa.

2.3 La sostenibilità del bambù

Le piantagioni monoculturali, di cui anche il bambù coltivato fa parte, sono le più dannose in termini di diversificazione ambientale e habitat naturali. Tuttavia, un bambuseto può permettere la crescita, tra la fitta coltre di canne di bambù, anche grazie al microclima che si sviluppa al suo interno, anche di altre specie vegetali e di conseguenza anche di insetti, uccelli e altri animali. Ciò è dovuto al fatto che per la sua coltivazione non è necessario l'uso di pesticidi ed erbicidi (se non per il primo anno di vita, dopodiché il bambù può essere definito "adulto").

Inoltre, nella coltivazione del bambù, non c'è necessità di ripiantare dopo il raccolto poiché la rete di radici continua a produrre nuovi germogli.

Di conseguenza sono annullati sia i tempi che le emissioni conseguenti alla piantumazione.

Altre caratteristiche positive in termini ambientali sono:

-assorbimento di CO_2: un bambuseto, rispetto ad un bosco di latifoglie, a parità di ettari, assorbe fino al 35% in più di CO_2 (15 tonnellate per ettaro in media, ma specie come la *Guadua angustifolia* Kunth nel primo anno di età assorbe circa 54 tonnellate di Co2 per ettaro.).

La gestione e lo sviluppo di foreste di bambù può contribuire all'attuazione degli obiettivi dell'UN-REDD (United Nations Collaborative Programme on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries).

-basse emissioni di CO_2 durante la produzioni: I culmi di bambù, usati come elementi strutturali, sono tra i più sostenibile materiali edili esistenti, con un'impronta ecologica di soli 0.20 kg di CO_2 eq/kg, quando proviene da foreste locali (Van der Lugt e Vogtländer 2015).

-velocità di crescita: dopo circa 5 anni la pianta raggiunge l'età adulta ed è pronta ad essere utilizzato in ambito strutturale, mentre per impieghi minori si inizia a sfruttare questa pianta già dai primi mesi, ad esempio come germoglio alimentare (il cui mercato è in costante crescita anche in Italia).

Tab. 2

Periodo di crescita e potenziali usi	
<30 giorni	Germogli commestibili
6-9 mesi	Ambito decorativo, piccoli mobili, cestini
2-3 anni	Lamelle per pannelli
3-6 anni	Culmi per edilizia
> 6 anni	Perdita graduale delle proprietà fisiche

-consolidamento del suolo: il rizoma, che cresce orizzontalmente e in maniera fitta, aiuta a prevenire smottamenti del terreno e dissesti. Inoltre lo stesso sistema

di radici trattiene una grossa quantità di acqua meteorica, evitando così, in caso di forti piogge, possibili alluvioni.

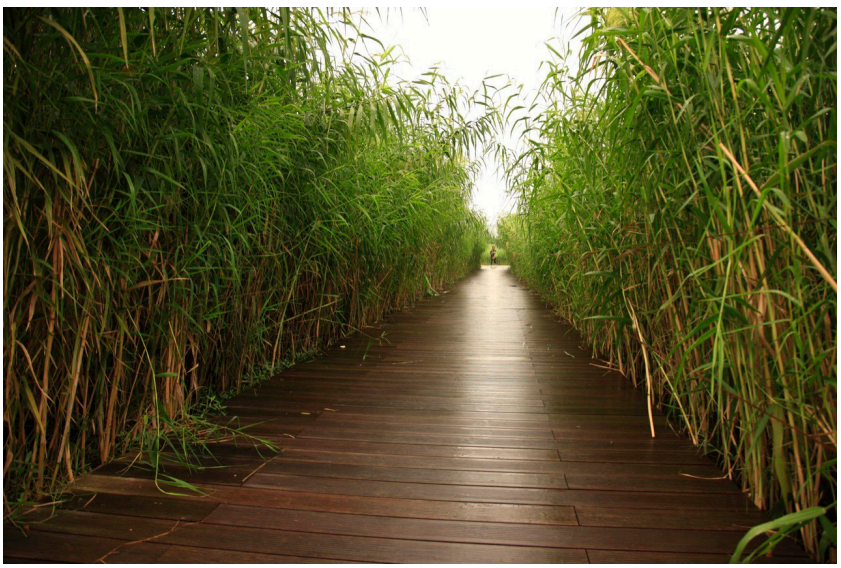
-Resistenza al fuoco: difficilmente prende fuoco se è ancora verde, di conseguenza un bambuseto può ritardare la propagazione di incendi. Inoltre, se pur il culmo dovesse prendere fuoco, l'apparato radicale permetterebbe la rigenerazione del bambù (già dopo un anno).

-bonifica dei terreni: il fitto apparato radicale, sopratutto delle specie monopodiali, consente a questa pianta di crescere anche in terreni già adibiti a discarica che necessitano di essere riconvertiti. Lo strato superficiale, che man mano tenderà a cedere a causa della presenza di materiale incoerente sottostante, si assesterà grazie alle radici.

All'interno della città di Shanghai, lungo le rive del fiume Huangpu, nel 2005 è stato realizzato l'Houtan Park, sopra un ex sito industriale (ricoperto di rifiuti urbani e da demolizione). Alcune aree del parco sono state bonificate facendo crescere varie specie di bambù per il consolidamento del terreno e alcune piante acquatiche sono servite per il trattamento delle acque inquinate del fiume.

Anche per la pavimentazione dei percorsi del parco è stato sfruttato il bambù sotto forma di laminati.

Figura 4



Vista interna allo Houtan Park
https://www.archdaily.com/131747/shanghai-houtan-park-turenscape

Grazie alle caratteristiche appena citate di risanamento ambientale, l'associazione INBAR[2] sta sfruttando al meglio il bambù per raggiungere alcuni obiettivi fissati per la "Bonn Challenge". Nato nel 2011 per iniziativa della Germania ma avente applicazioni a scala mondiale, ha come obiettivo il ripristino di 150 milioni di ettari di foresta degradate o di terreni disboscati nel mondo entro il 2020. L'obiettivo è stato poi esteso durante la "New York Declaration on Forests" (Nazioni Unite, 2014) a 350 milioni di ettari entro il 2030.

I Paesi membri di INBAR hanno concordato di ripristinare 5 milioni di ettari tramite bambù entro il 2020, che potrebbero crescere fino a 10 milioni nel prossimo decennio.

Tab. 3 - Aspetti positivi e negativi del bambù in ambiente e nelle costruzioni

	ASPETTI POSITIVI	ASPETTI NEGATIVI
AMBIENTE	SOLUZIONE PER LA DEFORESTAZIONE	RARAMENTE FIORISCE E PRODUCE FRUTTI
	COLTIVAZIONE SENZA PESTICIDI	PROPRAGAZIONE SPORADICA DEI RIZOMI
	CRESCITA RAPIDISSIMA	CO_2 EMESSA SE IMPORTATO
	ASSORBIMENTO DI CO_2	TRATTAMENTI CHIMICI
	BASSI CONSUMI PER LA TRASFORMAZIONE DEL MATERIALE	IGROSCOPIA
	ELEVATA PRODUZIONE DI BIOMASSA	IMPIEGO DI COLLE PER PRODOTTI LAMELLARI
	BIODEGRADABILE	
NELLE COSTRUZIONI	RAPIDITA' DI MESSA IN OPERA	PROBLEMI DI DURABILITA'
	OTTIME PROPRIETA' FISICHE	SCARSITA' DI NORME DI RIFERIMENTO
	RESISTENZA A SISMI E VENTI FORTI	SCARSITA' DI MANODOPERA SPECIALIZZATA PER I CANTIERI
	APPLICABILE IN MOLTI IMPIEGHI	INFIAMMABILE
	IL CULMO NASCE PER UN USO STRUTTURALE	PROBLEMI NEI GIUNTI
	ECONOMICITA'	IRREGOLARITA' DEGLI ELEMENTI

[2] INBAR: (International Bamboo And Rattan Organisation); organizzazione comprendente 41 Stati per lo sviluppo e la promozione dell'uso del bambù e del rattan. Ha come obiettivo il miglioramento delle condizioni di vita rurali, la protezione dell'ambiente, la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici utilizzando una rete di partner governativi, privati e ONG.

2.4 L'immaginario collettivo rispetto al materiale

Il bambù, è oggi accostato, nell'immaginario collettivo, alla realizzazione di architetture povere: ripari provvisori, abitazioni in contesti in cui l'economicità del materiale ne permette l'uso più facilmente rispetto a materiali industriali (calcestruzzo e acciaio in primis) o in situazioni di emergenza, tenuta in considerazione la sua velocità di impiego.

Questa cattiva reputazione è probabilmente dovuta anche alla durata di vita limitata del bambù.

Infatti, nel giro di pochi anni tende a degradarsi perdendo di conseguenza resistenza meccanica specie se non è stato trattato o è utilizzato in maniera scorretta. Questa può essere una delle ragioni per cui la maggior parte degli Stati, tra cui l'Italia, non lo ritengono un materiale da costruzione applicabile.

Negli ultimi decenni, sono stati costruiti numerosi edifici con struttura portante in bambù, tra cui padiglioni dalle forme avveniristiche ma fine a se stesse, resort di lusso in mete turistiche tropicali per ricreare atmosfere esotiche ormai perdute, ma anche per sfruttare questo materiale in ambiti più concreti e per applicazioni atte a rispondere alle esigenze reali.

È, utile sottolineare che pur essendo il bambù un materiale molto economico (se non si considerano i costi di trasporto), spesso il suo utilizzo in ambito architettonico necessita di manodopera specializzata. Vanno poste particolari attenzioni ad ogni fase della realizzazione, dalla progettazione alla messa in opera considerando l'unicità di ogni elemento di bambù.

Ragionando su questi aspetti, si è deciso di investigare l'uso del bambù per una serra agricola, cercando di sviluppare un sistema modulare, ripetibile e facilmente assemblabile da chiunque.

2.5 Caratteristiche fisiche

Il bambù non è un materiale convenzionale come il cemento, l'acciaio e il legno. È, però, un materiale resistente, leggero e flessibile pur presentando molte irregolarità sia dimensionali che di proprietà fisiche.

Per questi motivi, non tutte le specie di bambù possono essere impiegate in ambito edilizio, anzi, di circa 1400 solo alcune di esse sono adatte.

Tra queste, le più note e utilizzate sono: D*endrocalamus hamiltonii, D. balcoa, D. asper, D. giganteus, D. strictus, Bambusa tulda, B. nutans, B. spinosa, B. baleooa, B. polymorpha, B. blumeana, Melocanna baecifera, Gigantoehloa apus, Guadua angustifolia, Phyllostachys edulis* (più conosciuto come "Moso").

Le ultime due specie sono quelle su cui si sta maggiormente concentrando l'attenzione nel nostro Paese vista la loro resistenza al freddo.

In generale, si può dire che il bambù sia un materiale naturale che presenta caratteristiche visco-plastiche e anisotrope, ovvero il valore delle sue proprietà fisiche e meccaniche varia in base alla direzione. Nella direzione longitudinale ci sono le fibre di cellulosa, forti e rigide, mentre nella direzione trasversale è presente la lignina, morbida e fragile.

In "*Designing and Building with Bamboo*", Jules J.A. Janssen espone le caratteristiche meccaniche di questo materiale, distinguendo spesso il culmo intero dalle strisce. L'autore afferma che le caratteristiche meccaniche sono fortemente influenzate da fattori come:

- l'umidità contenuta all'interno del bambù (*MC, moisture content*).
- Specie ed età. i valori variano notevolmente;
- Porzione considerata (base, media e sommitale), poiché lungo il fusto cambia lo spessore della parete e la quantità di lignina presente. Dagli studi di M. Ahmad e A. Kamke (2005), risulta che la cima della canna presenti migliori caratteristiche meccaniche rispetto alla base.
- parametri ambientali come la latitudine e l'altitudine di provenienza ne modificano le caratteristiche.
- Presenza di nodi e internodi, da tenere in considerazione più per la fase di test in laboratorio che per le applicazioni reali tranne in termini di accortezze progettuali

- Specie ed età. i valori variano notevolmente;
- Porzione considerata (base, media e sommitale), poiché lungo il fusto cambia lo spessore della parete e la quantità di lignina presente. Dagli studi di M. Ahmad e A. Kamke (2005), risulta che la cima della canna presenti migliori caratteristiche meccaniche rispetto alla base.
- parametri ambientali come la latitudine e l'altitudine di provenienza ne modificano le caratteristiche.
- Presenza di nodi e internodi, da tenere in considerazione più per la fase di test in laboratorio che per le applicazioni reali tranne in termini di accortezze progettuali (ad es. un giunto dovrebbe sempre includere l'ultimo nodo della canna o degli split).

2.5.1 PROPRIETÀ FISICHE

-Massa volumica

Per il bambù il valore oscilla intorno ai 500/900 kg/m^3 in base alla specie.
Aumenta dagli strati più interni verso quelli più esterni (con variazioni dal 20 fino al 50%), di conseguenza la resistenza in quest'ultima parte del culmo risulta maggiore, seppur, per culmi con spessore di parete piccola anche la variazione sarà minore.
Si può considerare, inoltre, che la resistenza ultima a flessione del bambù (N/mm2) è 0,14 volte la massa volumica (in kg/m^3).
Questo valore è influenzato principalmente dalla porzione di culmo analizzata e dall'età dello stesso. Infatti, la densità cresce dal basso verso l'alto e di conseguenza anche le proprietà meccaniche ad essa associate come la resistenza a compressione.
Inoltre, la massa volumica nei nodi è maggiore di quella presente negli internodi, poiché è presente meno parenchima e più fibre.

-Contenuto di umidità

È espresso in percentuale del suo peso a secco secondo la seguente formula:

$$M.C.\% = \frac{\text{peso in M.C.\%} = \text{peso inizale} - \text{peso a secco}}{\text{peso a secco}} \times 100$$

Il contenuto di umidità varia in base alla specie, all'età, alla zona del culmo, decresce dal basso verso l'alto (Prawirohatmodji, 1988), nonché cambia in base periodo in cui viene tagliato; allo stato verde può variare tra il 40 e 150% (O.H.Lopez, 2003).

Va considerato che un culmo secco (percentuale di umidità minore del12%, ovvero il valore obbligatorio per la normativa colombiana al fine di poter essere utilizzato in edilizia) esposto in un ambiente umido tende ad equilibrare la sua umidità con quella dell'atmosfera e viceversa, un culmo verde in un ambiente secco rilascerà umidità.

Questo punto di equilibrio è detto *equilibrium moisture content (E.M.C.)*.

La resistenza meccanica del bambù è fortemente influenzata dal contenuto di umidità della canna, diminuendo al suo aumentare.

Tab. 4 - Variazione delle caratteristiche meccaniche rispetto al contenuto di umidità

M.C. [%]	E [N/mm^2]	σ_c (Compressione) [N/mm^2]	σ_t (Trazione) [N/mm^2]	σ_v (Taglio) [N/mm^2]
0	2	238	63,2	9,99
7,5	21500	201	54,8	9,30
38,2	15500	175	35,8	6,36
81,2	11760	150	43,3	6,98

Rielaborazione a partire da V.S. Godbale e S.C. Lakkand, *Effect of water absorption on mechanical properties of bamboo,* 1986

-Resistenza al fuoco

Il bambù ha una buona resistenza al fuoco, dovuta all'alta presenza di silicati acidi e all'alta densità negli strati esterni della parete. Infatti, la norma DIN 4102 classifica il bambù come infiammabile ma di difficile combustione.

Se però il culmo presenta delle spaccature permette al fuoco di entrare dall'interno e di bruciare più velocemente avendo una doppia superficie dove propagrasi.

2.5.2 PROPRIETÀ MECCANICHE:

-Resistenza a trazione

Nel corso del Novecento, sono stati svolti numerosi test in laboratorio, come quelli di H.F. Meyer (1923) per la resistenza delle travi in calcestruzzo rinforzato con lamine di bambù al posto dell'acciaio. Lo sforzo di trazione secondo gli studi di C. H. Duff (1941) è la condizione in cui il materiale lavora meglio.

Infatti, sono stati riscontrati valori alti, motivo per cui è spesso definito *"acciaio vegetale"*, questi valori cambiano in base alla zona del culmo analizzata. Si passa dai 342 N/mm2 dello strato esterno a 54 N/mm2 di quello interno. Duff ha però riscontrato che non c'è grande differenza tra la base e la metà del culmo, mentre la parte sommitale risulta essere fino al 40% più resistente.

La resistenza cambia anche tra nodi e internodi, con una differenza fino al 20% a favore della zona di internodo.

Altri parametri influenti sono l'età, lo stato di stagionatura, l'umidità.

Nel 1978, McLaughlin stabilì che anche la densità influisce sulla resistenza: all'aumentare della massa volumica aumenta anche la resistenza ultima a trazione. Questa proprietà è nel bambù tra le proprietà fisiche più importanti rispetto ad altri materiali da costruzione "naturali".

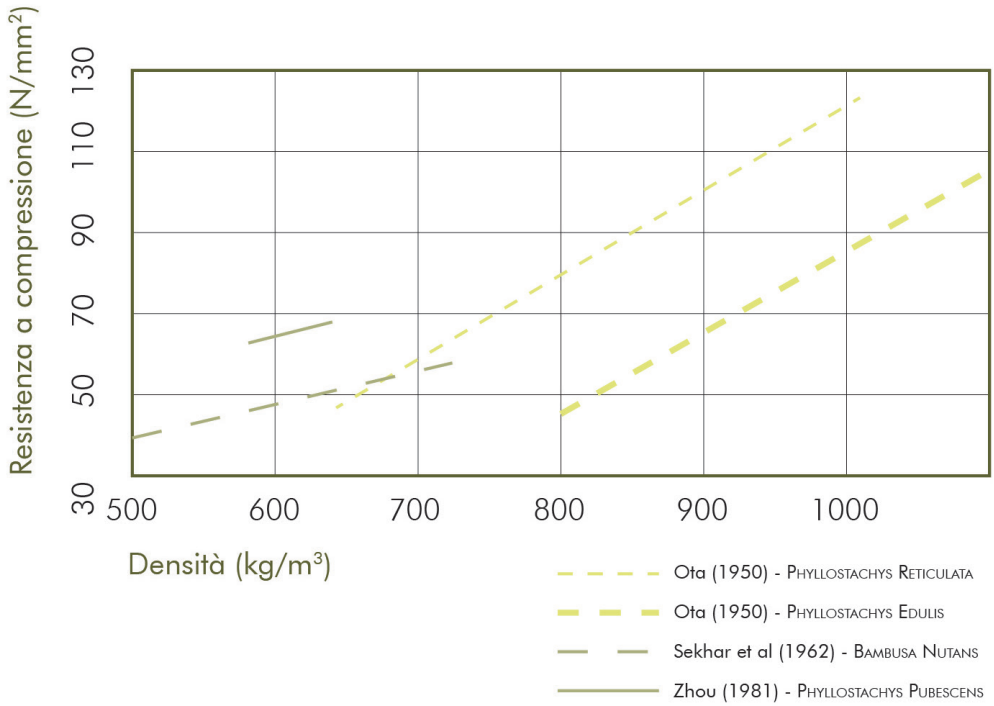
M. Cárdenas Laverde ne *"Il Bambù come materiale da costruzione"*, per quanto riguarda la resistenza a trazione, riporta valori di 106,5 e 107,5 N/mm2 (nel primo caso il provino era riferito all'internodo, nel secondo caso al nodo, seppur non specifica la specie di riferimento).

-Resistenza a compressione

E' stato verificato da più autori come la resistenza a compressione sia fortemente correlata alla densità che, come detto in precedenza, aumenta dal basso verso la cima e dall'interno della parete verso l'esterno.

Marco Fabiani nel paper *Physical and mechanical properties of Italian bamboo culms,* riporta valori medi di resistenza a compressione pari a 55.7 MPa (max: 59.0; min: 51.1 MPa) per campioni di diametro medio di 74.8 mm e spessore della parete di 7.5 mm. e densità di 765.3 Kg/m^3.

Tab. 5 - Relazione tra resistenza a compressione e densità secondo diversi autori.



-Resistenza a flessione

Una delle caratteristiche più importanti per sfruttare al meglio questo materiale è la sua resistenza a flessione, poiché travi e pilastri sono solitamente sottoposti a questo tipo di sforzo.

Per culmi interi, la resistenza a flessione decresce all'aumentare del diametro e aumenta al diminuire dell'umidità, motivo per cui il bambù verde si flette a sollecitazioni minori rispetto allo stato secco.

Marco Fabiani nel paper *Physical and mechanical properties of Italian bamboo culms,* riporta una resistenza a flessione media di 97.3 MPa (max: 118.4; min: 72.1 MPa) per campioni di *Phyllostachys Edulis*.

-Resistenza a taglio

Il valore relativo al taglio è molto basso, circa 8% della resistenza a trazione. Questo parametro è influenzato dalla scarsa coesione reciproca delle fibre parallele lungo il culmo, infatti nei nodi, dove sono presenti anche dei vasi conduttori che interrompono le fibre longitudinali, la resistenza aumenta.

Il valore tende a diminuire con l'aumentare della superficie di taglio; ad es. una

parete del culmo con spessore 10 mm ha una resistenza a taglio di circa 11% inferiore di una parete con spessore 6 mm.
In generale la letteratura internazionale dà un valore medio di 12 Mpa.

2.6 Prove sperimentali su bambù italiano

Ho deciso di indagare alcune proprietà meccaniche e fisiche della specie utilizzata successivamente per la realizzazione della serra, ovvero la *Phyllostachys edulis,* comunemente denominato Moso. Questa specie è tra le coltivazioni di bambù in Italia.
Le canne di bambù sono state fornite dal vivaio Purpurea, situato a Piobesi Torinese, a pochi km da Torino, permettendo di ridurre al minimo le emissioni di CO_2 legate al trasporto.
La *Phyllostachys edulis* (abbreviata PE) ha un diametro massimo di 18 cm e altezza massima di 30 metri. Le canne presenti al vivaio hanno un altezza media di 15 m. Le canne acquistate, di 3-4 anni di età, hanno diametro di circa 3 cm, lunghezza di 400 cm e sono state tagliate ad un'altezza di 100 cm dal suolo (la parte di culmo adatta agli scopi strutturali è compreso solitamente tra 1 e 7 m dal suolo).
Per studiare le proprietà fisiche e meccaniche del materiale così come si presenta al momento dell'applicazione progettuale, ho deciso di acquistare del bambù secco e non trattato (essiccato per 6-7 mesi al coperto e poi stoccato per circa una settimana all'interno del laboratorio Lastin del Politecnico di Torino, dove sono stati effettuati i test; U.R. circa 75%, temperatura compresa tra i 19° e 23°).
Le prove meccaniche eseguite hanno lo scopo di verificare che i valori di riferimento riscontrabili nelle normative internazionali (come la colombiana NSR-10) abbiano una corrispondenza con quelli reali dei campioni testati e inoltre di estendere il numero di risultati sperimentali relativi al bambù italiano come materiale da costruzione.
Le prove sono state effettuate seguendo la normativa internazionale ISO 22157-1 e ISO 22157-2:2004. Questi documenti sono stati redatti dalla commissione tecnica ISO/TC 165 (Timber structures) e INBAR al fine di dettare le linee guida per

determinare le caratteristiche fisiche e meccaniche del bambù.

Le procedure con cui sono stati effettuati i test sono stati in alcuni casi modificate (si veda i test a trazione) per adattarle alle attrezzature presenti in laboratorio.

Le caratteristiche fisiche analizzate sono il diametro, lo spessore di parete, il contenuto di umidità (MC) e la densità (ρ). Le caratteristiche meccaniche comprendono la resistenza a compressione e a trazione e i rispettivi moduli elastici.

Essendo il bambù un materiale naturale, ogni provino presenta delle irregolarità, di conseguenza si approssima la forma a un cilindro cavo regolare caratterizzato da diametro, altezza e spessore medie estrapolate come segue:

- Il diametro è la media di 6 misurazioni, 3 per l'estremità superiore e 3 per quella inferiore dei campione;
- L'altezza è la media di 3 misurazioni effettuate in 3 punti diversi lungo il diametro del culmo a una distanza di circa 120°;
- Lo spessore è la media di 6 misurazioni, 3 per l'estremità superiore e 3 per la quella inferiore, anch'essi alla distanza reciproca di circa 120°.

Per le misure sono utilizzati un calibro digitale con una sensibilità di 0,01 mm e una bilancia digitale con precisione di 0.01 g, come prescritto da normativa.

I 4 culmi analizzati (C1÷C4), di dimensioni medio-piccole, hanno un diametro esterno che decresce dalla base verso la cima con una variazione media per metro lineare del 3,9 %. Similmente, lo spessore della parete decresce mediamente del 11,8 % per metro lineare.

Tab. 6 - Caratteristiche dimensionali

	D max (mm)	D min (mm)	t max (mm)	t min (mm)	V. D. (%)	V. t. (%)
C1	33,2	29,1	5,3	2,8	3,08	11,8
C2	35,2	31,8	4,5	2,3	2,44	12,2
C3	33,0	24,9	4,8	2,4	6,66	12,5
C4	33,7	29,1	5,8	3,3	3,42	10,7

Con: D max. diametro alla base; D min. diametro in cima (4 m); t max. spessore della parete alla base; t min. spessore della parete in cima (4 m); V. D. variazione percentuale del diametro per metro di lunghezza; V. t. variazione percentuale dello spessore di parete per metro di lunghezza.

2.6.1 Contenuto di umidità

L'umidità media presente nel bambù è stato calcolata da 18 provini selezionati dalle stesse canne della prova a compressione e sono indicativi anche dei provini utilizzati per i test a trazione poiché tutti i culmi sono stati tenuti nelle medesime condizioni ambientali.

I campioni hanno dimensioni, come indicato da normativa ISO 22156, di: 25 x 25 x t (mm).

La prova è stata condotta misurando il peso, con una tolleranza di 0,01 g, allo stato iniziale "m" e a fine essiccazione "m_0". In questo modo è possibile calcolare la perdita di massa del campione che corrisponde alla quantità di acqua presente nel provino al momento iniziale.

La norma indica di porre i campioni in forno a 103 ± 2°C per 24h e da questo momento registrare la massa a intervalli regolari di 2h; si considera terminata l'essiccazione quando la differenza tra la rilevazione della massa del campione rispetto a quella successiva non supera 0,01g.

Tuttavia, ho deciso di utilizzare un misuratore di umidità serie Thermo60 della ORMA che svolge lo stesso ruolo con una sensibilità maggiore (0,001g) tramite il sistema di lampade alogene che permette di impostare la temperatura a 103 ± 2°C.

Il contenuto di umidità viene calcolato in automatico e istantaneamente dalla macchina come percentuale di massa secca del campione usando la formula riscontrabile nella norma:

$$\rho = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100$$

Ho deciso di accoppiare i campioni provenienti dalla stessa sezione per inserirli nel misuratore di umidità estrapolando quindi la perdita di umidità come una media ma misurando i due pesi singolarmente.

I tempi di essiccazione variavano notevolmente in base alla provenienza del provino rispetto alla canna: i campioni alla base necessitavano di più tempo rispetto a quelli provenienti dalla parte sommitale, proporzionalmente alla quantità di acqua presente e anche allo spessore dei provini.

In media sono serviti 73 minuti a campione per arrivare allo stato secco con una deviazione standard di 26,77.

L'umidità media contenuta nei campioni è di 10,79% con deviazione standard di 1,26, che conferma il fatto che le canne si trovino al di sotto del contenuto di umidità prescritto da normativa per utilizzare il bambù in ambito strutturale (12%).

Tab. 7 - Dati dimensionali e risultati

	m (gr)	m_0 (gr)	M.C.%
B1 a	3,42	3,01	13,01
B1 b	2,88	2,55	13,01
M1 a	2,26	2,03	11,11
M1 b	2,34	2,11	11,11
T1 a	2,15	2,02	9,40
T1 b	2,06	1,78	9,40
B2 a	2,39	2,11	12,20
B2 b	2,43	2,19	12,20
M2 a	1,70	1,58	10,50
M2 b	1,96	1,73	10,50
T2 a	1,57	1,39	9,20
T2 b	1,64	1,52	9,20
B3 a	2,79	2,53	11,53
B3 b	3,06	2,72	11,53
M3 a	2,23	1,99	10,20
M3 b	2,18	1,93	10,20
T3 a	1,78	1,58	10,00
T3 b	1,81	1,67	10,00

Con: m= peso prima dell'essiccazione m_0= peso allo stato finale;
M.C.= contenuto di umidità

2.6.2 Resistenza a compressione parallela alle fibre

Sia i test a compressione che quelli a trazione sono stati effettuati con una macchina universale Metrocom con capacità di 300KN.

Sono stati analizzati 12 provini, provenienti da 4 canne: 4 alla base (B), 4 nella parte media (M) e 4 alla cima (T) con dimensioni prelevati in accordo con la norma in cui la lunghezza è uguale al diametro esterno.

Il carico viene applicato con velocità costante media di 0,0609 kN/sec.

Il valore di resistenza a compressione (MPa) è calcolato tramite la formula:

$$f_{c,0} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Con: F_{ult}= Valore massimo del carico applicato al campione prima della rottura (kN);

A= area della sezione trasversale sottoposta a compressione (mm^2).

Tab. 8 - Dati dimensionali e risultati

	g_0 (gr)	D (mm)	t (mm)	L (mm)	A (mm^2)	F_{ult} (kN)	$f_{c,0}$ (MPa)
Canna 1							
B1	12,84	33,9	5,8	34,3	464,5	36,92	53,36
M1	8,81	32,2	5,3	34,5	493,8	26,35	79,48
T1	5,87	29,1	2,8	28,7	231,3	20,4	88,1
Canna 2							
B2	11,31	35,2	4,5	34,5	434	32,44	74,74
M2	9,61	35,8	3,2	35,3	327,7	24,54	74,88
T2	6,41	31,8	2,3	32,1	213,1	19,52	91,16
Canna 3							
B3	11,85	33,0	4,8	32,9	425,2	32,04	75,53
M3	8,25	30,08	3,4	30,0	284,9	25,53	89,61
T3	3,97	24,9	2,4	24,8	169,6	16,36	96,46
Canna 4							
B4	15,55	33,8	5,8	33,9	510,2	41,75	81,83
M4	12,97	33,4	4,6	33,7	416,2	35,63	85,60
T4	7,46	29,1	3,3	29,2	267,4	24,8	92,27

Con: g_0= massa del campione; D= diametro medio; t= spessore medio della parete;
L= lunghezza campione; A= area della sezione trasversale;
F_{ult}= sforzo ultimo a rottura; $f_{c,0}$= resistenza a compressione

Il valore medio di resistenza a compressione è 81,91 MPa, con una deviazione standard di 11,09 MPa.

Per i campioni alla base = 71,36 MPa; per i campioni a metà = 82,39 MPa; per i campioni alla sommità = 91,99 MPa.

In conformità con gli studi di J. J. Janssen, la resistenza a compressione lungo la canna aumenta proporzionalmente dalla base alla cima.

Seguendo la norma, è stato poi calcolato il modulo di elasticità a compressione, come la tangente tra la tensione e la deformazione ai valori di 20 e 80%, come segue:

$$E_{t,0} = \frac{F_{80} - F_{20}}{A\,(\Delta_{80} - \Delta_{20})}$$

Con: F_{80}, F_{20}= valori di carico applicato all' 80% e al 20% di F_{ult} (N);

A = area della sezione media (mm^2), calcolata con la formula:

$$A = \frac{\pi}{4}\,(D^2 - (D-2t)^2)$$

Δ_{80}, Δ_{20} = valori della deformazione misurata all' 80 % e al 20% di F_{ult} (%).

Tab.9

	F_{20} (N)	F_{80} (N)	A (mm^2)	Δ_{20} (m)	Δ_{80} (m)	$E_{t,0}$ (MPa)
Canna 1						
B1	7384	21600	464,5	0,0002	0,0015	23542,2
M1	5270	15810	493,8	0,0012	0,0019	30492,3
T1	4080	12240	231,3	0,0007	0,0020	27137,5
Canna 2						
B2	6488	19464	434,0	0,0002	0,0009	42712,3
M2	4908	14748	327,7	0,0002	0,0007	60054,9
T2	3904	11712	213,1	0,0005	0,0013	45800,1
Canna 3						
B3	6408	19224	425,2	0.0011	0,0025	21529,3
M3	5106	15318	284,9	0,0010	0,0016	59740,2
T3	3272	9815	169,6	0,0006	0,0014	48223,7
Canna 4						
B4	8350	25050	510,2	0,0013	0,0046	9918,8
M4	7126	21378	416,2	0,0011	0,0023	28535,9
T4	4960	14880	267,4	0,0006	0,0018	30914,9

Fig. 10 - Relazione tra sforzo e deformazione nei campioni prelevati alla base delle canne

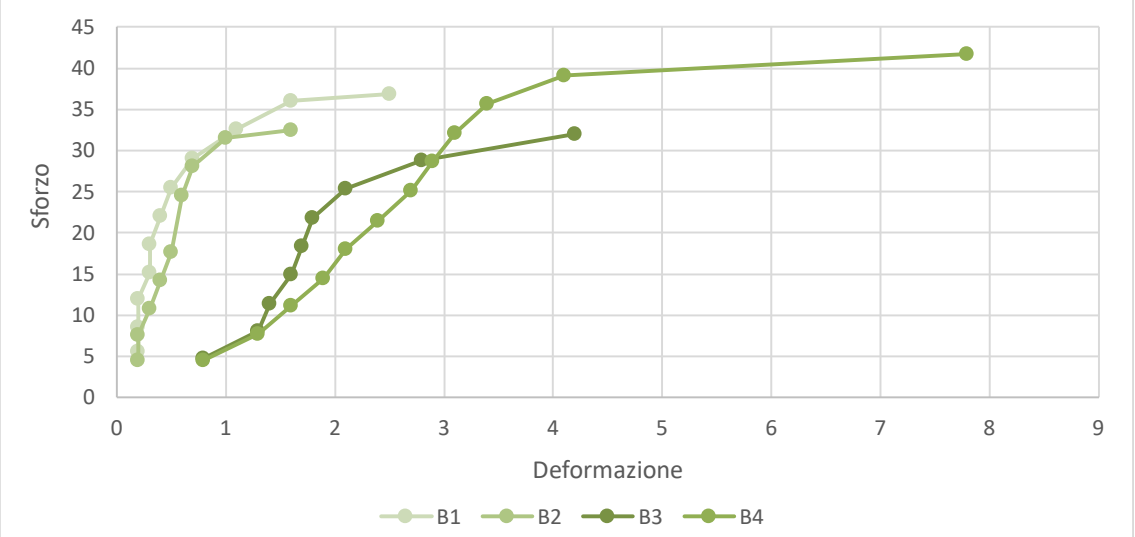
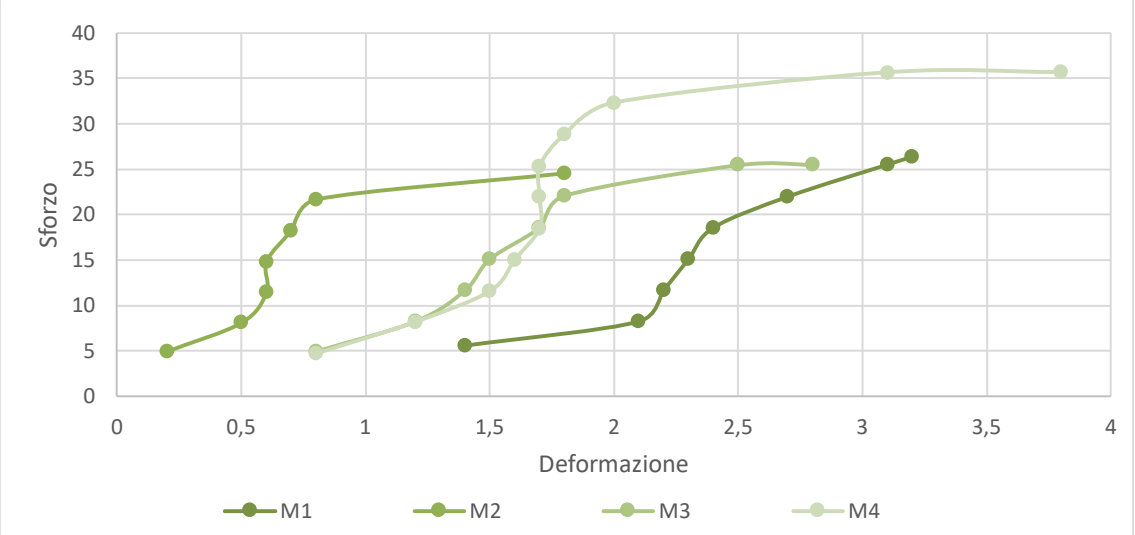
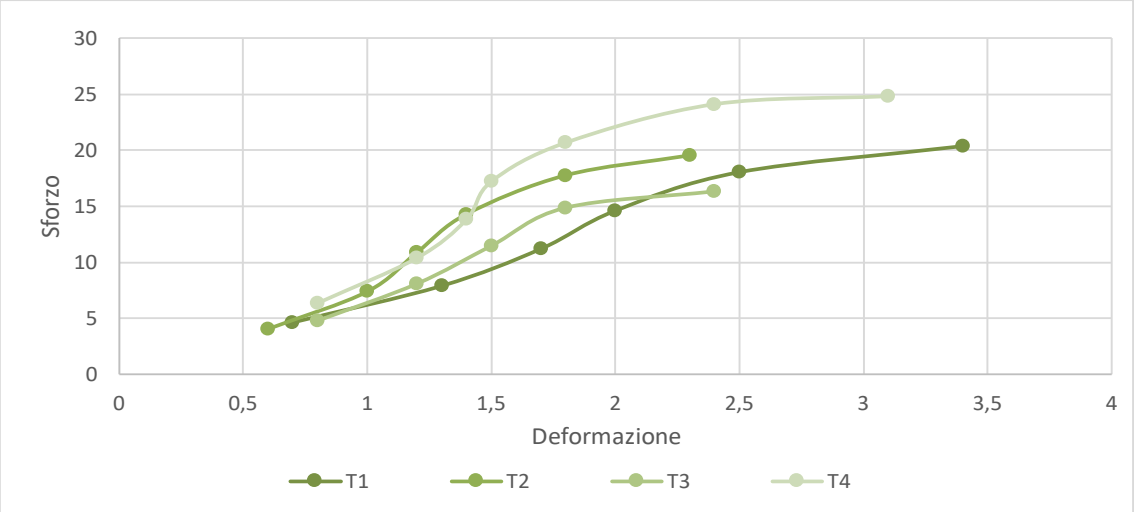


Fig.11 - Relazione tra sforzo e deformazione nei campioni prelevati alla medi delle canne



Tab.12 - Relazione tra sforzo e deformazione nei campioni prelevati alla cima della canna



Analizzando i grafici nelle figure 10,11,12 è possibile notare:

-Un primo tratto di assestamento dei provini dovuto alla non perfetta complanarità delle due facce superiore e inferiore e dunque un notevole aumento della deformazione all'applicazione di un piccolo carico.

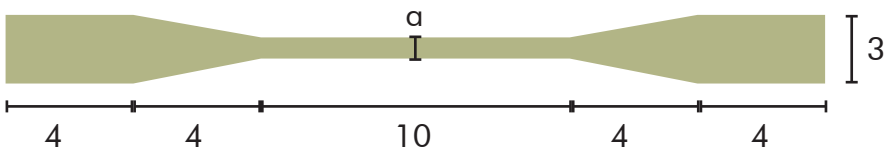
-Un secondo tratto in cui il bambù ha un comportamento pressoché elastico lineare.

-Un ultimo tratto di non linearità che porta alla rottura improvvisa del provino anticipata solo dal rumore delle fibre che si spezzano.

2.6.3 Resistenza a trazione parallela alle fibre

In questo paragrafo, inizialmente, è stata analizzata la resistenza a trazione parallela alle fibre su provini di bambù di forma uguale a quella suggerita dalla normativa, ovvero a "forma di osso" e con un nodo al centro della sezione sottile, sebbene la norma non dia indicazioni precise rispetto alle dimensioni del provino.

Figura 5



Con a= ± 10 mm;

Il test di compressione prevede che i due estremi vengano fissati alla macchina universale che inizierà a tendere fino alla rottura del campione, che si prevede debba avvenire nella sezione centrale, in caso contrario i risultati vanno scartati.

La resistenza a trazione viene calcolata come:

$$f_{t,0} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Con: F_{ult}= Valore massimo del carico applicato raggiunto il quale il campione si rompe (kN);

A= area della sezione trasversale sottoposta a compressione (mm^2) .

La norma non specifica dove misurare a sezione trasversale e poiché può risultare abbastanza costante lungo la sezione libera, ma aumentare in prossimità del nodo, si è deciso di utilizzare una media come segue:

-t_1 e a_1: media di 3 misurazioni prima e dopo il nodo;

-t_2 e a_2: media di 3 misurazioni sul nodo.

Durante lo svolgimento dei test si è notato fin dal primo campione che la forma curva della sezione trasversale nei punti di aggancio dei provini creava dei problemi. Infatti, seppure esse fossero state limate per portarle a una sezione rettangolare (come suggerito dalla norma), i morsetti che bloccano il campione schiacciandolo provocavano delle fessurazioni longitudinali già in fase di assestamento.

I campioni B1 e M1 si sono rotti in prossimità degli agganci e non vicino al nodo come previsto, procedendo a una velocità di carico di 0,08 kN/sec in media (figura 6).

Ho deciso, quindi, di modificare la forma dei provini, eliminando la sezione più larga agli estremi, portandoli a semplici parallelepipedi uniformi (figura 7), e di diminuire la velocità di carico a 0,02 kN/sec in media.

Si riportano i valori in tabella:

Figura 6 - 7

A sinistra: provino B1; a destra: M3

Tab. 13

	t_m (mm)	a_m (mm)	A (mm^2)	f_{ult} (KN)	$f_{t,0}$ (MPa)
Canna 1					
B1	7,50	9,64	72,30	7,77	107,4
M1	7,55	8,38	63,269	4,85	76,66
T1	7,05	10,23	72,12	5,10	70,71
Canna 2					
B2	10,20	9,31	94,96	6,91	72,80
M2	8,95	8,86	79,29	6,36	87,97
T2	8,05	9,50	/	/	/
Canna 3					
B3	9,45	9,20	/	/	/
M3	7,05	9,50	/	/	/
T3	7,50	8,90	66,75	6,26	93,80
Canna 4					
B4	9,30	10,60	98,58	7,38	74,86
M4	8,20	9,60	78,72	6,38	81,05
T4	7,90	8,90	70,31	6,07	86,33
Canna 5					
B5	10,20	10,90	111,18	13,60	122,23
M5	8,75	10,20	89,25	12,08	152,38
T5	7,30	9,90	72,27	12,60	174,34

Con: t_m= spessore medio della parete; a_m= larghezza media; A= area della sezione trasversale; F_{ult}= sforzo ultimo a rottura; $f_{t,0}$= resistenza a trazione; /= rottura del provino prima dell'inizio della prova

I campioni T2, B3, M3 si sono rotti già in fase di assestamento non permettendo la lettura dei dati, mentre i campioni B5, M5, T5 hanno restituito dei valori fuori dalla media.

Tutti i provini, tranne i primi due, si sono rotti a partire dalla zona nodale confermando la maggiore resistenza per la parte di internodo.

Il valore medio di resistenza a trazione è di 92,54 MPa, con una deviazione standard di 32,91 MPa.

Per i campioni alla base = 94,3 MPa ; per i campioni a metà = 99,51 MPa; per i campioni in cima = 106,29 MPa

Anche in questo caso è stato confermato, seppur con un numero esiguo di campioni, che la resistenza a trazione aumenta dal basso verso l'alto.

Come da norma, è stato poi calcolato il modulo di elasticità a trazione parallelo alle fibre, come in precedenza:

Tab. 14

	F_{20} (N)	F_{80} (N)	A (mm^2)	Δ_{20} (m)	Δ_{80} (m)	$E_{t,0}$ (MPa)
Canna 1						
B1	1554	6216	72,30	0,0004	0,0069	9920
M1	970,0	3880	63,27	0,002	0,0071	9018,3
T1	1020	4080	72,12	0,0017	0,0059	10102,2
Canna 2						
B2	1382	5528	94,96	0,0001	0,0017	27287,8
M2	1272	5008	79,29	0,0018	0,0079	7724,3
T2	/	/	/	/	/	/
Canna 3						
B3	/	/	/	/	/	/
M3	/	/	/	/	/	/
T3	1252	5008	66,75	0,002	0,0065	12504,3
Canna 4						
B4	1476	5904	98,58	0,0009	0,0039	14972,6
M4	1276	5104	78,72	0,0012	0,0078	7367,9
T4	1214	4856	70,31	0,0023	0,0082	8779,5
Canna 5						
B5	2720	10880	111,18	0,0042	0,0258	3397,9
M5	2416	9664	89,25	0,0047	0,0196	5450,3
T5	2520	10080	72,27	0,0036	0,0169	7865,2

2.6.4 Caratterizzazione del materiale

Attraverso i test descritti in precedenza, è stato possibile caratterizzare esattamente la resistenza del materiale rispetto ai tradizionali valori riscontrabili in letteratura o in normativa (come il *Reglamento colombiano de sismo construction NSR-10*).

In particolare, si è proceduto dapprima calcolando la media di tutti i valori di carico e spostamento rilevati nei test a trazione e compressione, paralleli alle fibre, dei provini riferiti alla sezione in base, alla parte centrale e alla sezione in cima; successivamente è stato calcolato il valore medio tra le tre sezioni. I valori sono stati poi messi a sistema nel Softwar di analisi strutturale Sap2000 in fase di caratterizzazione del materiale, che viene impostato come ortotropo (ovvero le sue proprietà cambiano in base alla direzione verso cui sono analizzati).

Tramite il softwar è stato possibile estrapolare la curva carico-spostamento.

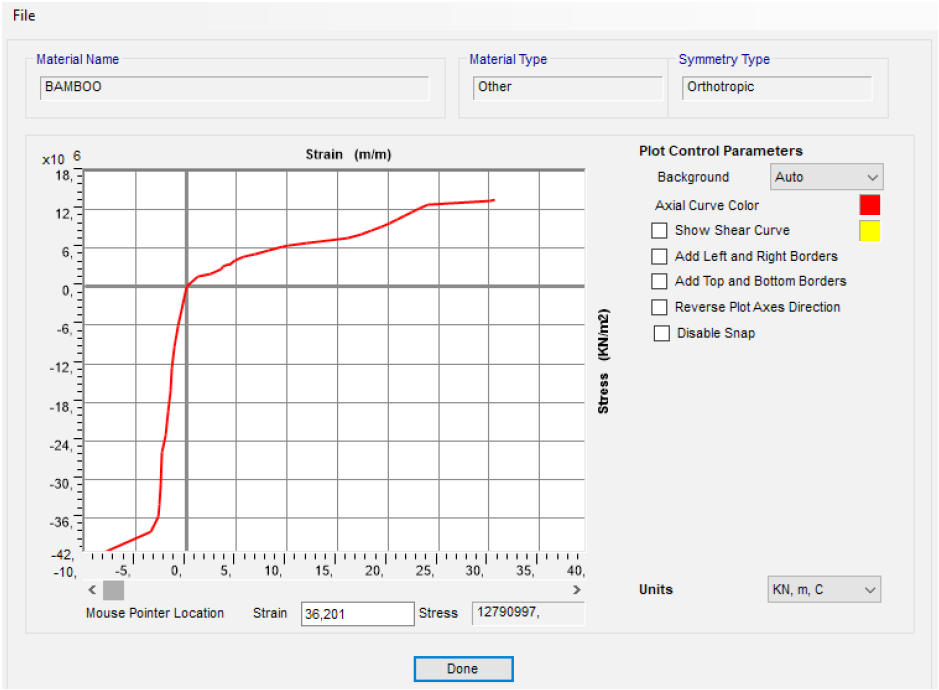
Tab. 15 Valori di carico e spostamento

STEP	STRAIN	STRESS (kN/mm²)
1	-8,80	-41,75
2	-3,55	-38,05
3	-2,80	-35,75
4	-2,67	-33,95
5	-2,56	-30,90
6	-2,46	-25,89
7	-2,08	-23,01
8	-1,80	-19,43
9	-1,58	-16,15
10	-1,42	-12,74
11	-1,23	-9,35
12	-0,84	-6,02
13	0	0
14	1,20	1,64
15	2,40	2,06
16	3,52	2,67
17	3,64	3,14
18	4,19	3,62
19	4,26	3,26

STEP	STRAIN	STRESS (kN/mm²)
21	4,85	4,12
22	5,69	4,61
23	6,81	5,11
24	8,12	5,62
25	9,50	6,15
26	10,14	6,51
27	11,95	6,88
28	15,93	7,62
29	17,30	8,24
30	18,37	8,78
31	19,33	9,37
32	20,10	9,91
33	20,90	10,48
34	21,63	11,04
35	22,32	11,60
36	23,07	12,15
37	23,90	12,70
38	30,10	13,38
39	30,60	13,60

Valori di carico e spostamento;
in negativo i valori registrati a compressione e in positivo quelli a trazione

Figura 8



Curva di carico e spostamento estrapolata da SAP2000;

Per il peso specifico è stato calcolato il valore medio del bambù acquistato e confrontarlo con quello da normativa.

Sono stati utilizzati i dati dimensionali dei campioni cilindrici dei test a compressione (vedi tab.8) per ricavare il volume dei singoli cilindri (in mm^3).

Dividendolo per il loro peso (in g) si è ottenuta la massa volumica, moltiplicata per l'accelerazione gravitazionale si ottiene il peso specifico in N/m^3.

Tab.16 Massa volumica

PESO (gr)	VOLUME (mm^3)	Peso specifico g (mm^3)
12,84	17562,18	0,000731
8,81	15452,44	0,000570
5,87	6639,65	0,000884
11,31	14973,38	0,000755
9,61	11568,90	0,000831
6,41	6842,34	0,000937
11,85	13990,59	0,000847
8,25	8549,40	0,000965
3,97	4207,22	0,000944
15,55	17295,59	0,000899
12,97	14025,87	0,000925
7,46	7810,27	0,000955

La media risulta di 854 Kg/m^3, in linea con le aspettative (vedi paragrafo 2.5.1). Convertita in 8,37 kN/m^3 che è il peso specifico da inserire nel software per caratterizzare il materiale.

Per quanto riguarda il coefficiente di Poisson, calcolabile tramite il rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale, non è stato possibile stabilire l'esatto valore ricavabile dai test.

Ciò perché non erano disponibili gli estensimetri e i deformometri per misurare la variazione dimensionale longitudinale e trasversale sotto sforzo della sezione dei cilindri. Si utilizza, per tanto, il valore di 0,35 ricavato dai test svolti da J.J.A. Janssen nel 2002.

Per quanto riguarda il modulo di elasticità a compressione longitudinale alle fibre, ho deciso di utilizzare il valore per un bambù asciutto (umidità al 12%) espresso dalla normativa colombiana NSR-10; $E_{0,5}$ = 9500 Mpa (valore sottostimato per prudenza nei calcoli strutturali).

Ciò perché i valori ricavati dai test di laboratorio svolti in questa tesi, presentano una media $E_{t,0}$ di 35716,8 Mpa, che si discosta dalla media dei valori tipici relativi al modulo di elasticità, che varia tra i 10000 -17000 Mpa.

2.7 Il bambù curvo come elemento strutturale

L'elasticità del bambù permette di curvarlo più o meno facilmente.

Klaus Dunkelber ne *IL 31 Bambus - Bamboo* afferma che le caratteristiche che influenzano la flessibilità di questo materiale sono diverse:

- Le caratteristiche elastomeccaniche (rigidità e densità);
- Lo stato della canna di bambù (secco o verde; in quest'ultimo caso risulta più facile da piegare);
- Lo spessore della parete;
- La finezza, ovvero il rapporto tra lo spessore medio della parete e la lunghezza del fusto;

Per curvare il bambù esistono diverse tecniche, alcune tradizionali, altre più recenti. Ognuno di esse conferisce differenti caratteristiche estetiche, strutturali e costruttive agli elementi, nonché comporta vantaggi e svantaggi.

Si possono distinguere due grandi categorie: a caldo e a freddo.

2.7.1 Tecniche a caldo

Il bambù quando viene riscaldato (temperature >150°) diventa più plastico, permettendo di essere piegato facilmente mantenendo la forma data una volta che si è raffreddato.

Per raggiungere questo risultato è possibile applicare due tecniche: immersione o combustione.

-Immersione: Il bambù diventa pieghevole quando è idratato, di conseguenza immergendolo in acqua tiepida per qualche ora (dalle 5 ore in su in base al diametro e allo spessore della parete), esso diventa più umido e lavorabile. Una volta data la forma desiderata, bisogna lasciarlo fissato in posizione per 1÷3 giorni in modo da farlo essiccare con la forma voluta, che successivamente manterrà.

-Combustione: applicando una fonte di calore diretta alla canna di bambù essa diventa fortemente malleabile. È però necessario porre attenzione: il bambù può bruciarsi se la fiamma è troppo forte o perdura per troppo tempo in un unico

punto; inoltre piegandolo troppo velocemente mentre si riscalda può spezzarsi. Per evitare ciò può essere utile:

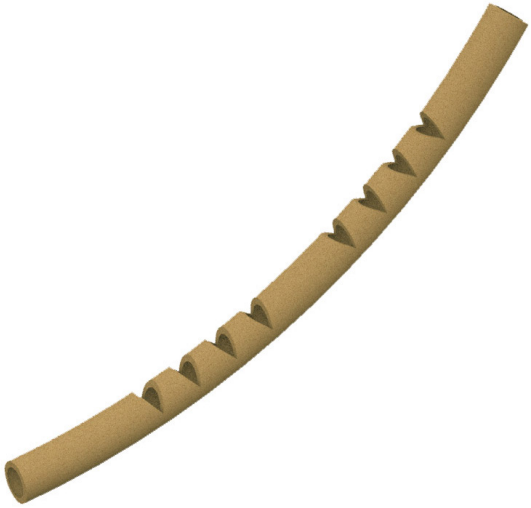
- Provocare dei piccoli fori alla canna, in corrispondenza dei nodi, in modo tale da permettere la fuoriuscita del calore interno evitando accumuli pericolosi.
- Spostare sempre la fiamma, preferibilmente nel verso di crescita della pianta.
- Riempire la canna con sabbia che previene la rottura.
- Bagnare con un panno umido la superficie della canna nei punti in cui verrà colpita dalla fiamma.

2.7.2 Tecniche a freddo

-Taglio: attraverso la realizzazione di una serie di incisioni a "V" perpendicolari alla lunghezza della canna e con profondità di due terzi dell'intero diametro è possibile piegare il bambù nel verso del taglio, fissandolo poi nella posizione voluta.

Questa tecnica non curva perfettamente il culmo ma produce una serie di angoli tra le sezioni rette. Inoltre, Il bambù così curvato ha la stessa resistenza a compressione del bambù retto e integro, ma la resistenza a trazione è ridotta a causa del taglio delle fibre di bambù.

Figura 9



Tecnica di curvatura per asportazione di materiale tramite taglio a V.

-Splittaggio

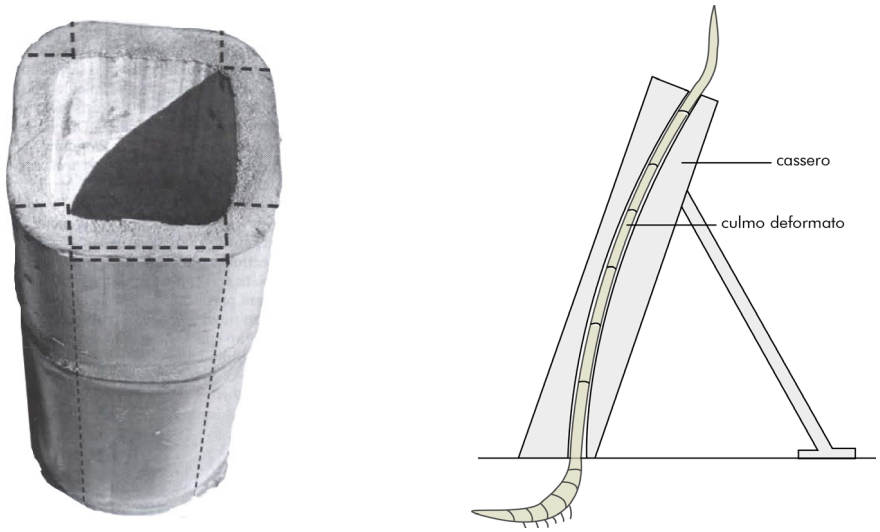
Uno dei metodi più efficaci e versatili tra le tecniche di curvatura (e per oggetti), si attua fendendo il culmo in strisce parallele alla direzione principale.

Questo meccanismo è facilitato dal fatto che le fibre del bambù sono disposte longitudinalmente alla canna e non radialmente, tranne che per i nodi in cui, questa distribuzione cambia leggermente (è infatti la zona in cui il meccanismo di splittaggio viene ridotto dalla presenza dei diaframmi che fungono da "fasciatura naturale"). Ciò fa sì che il bambù abbia una resistenza a taglio relativamente bassa, ma è un vantaggio per la produzione di strisce. La canna può essere divisa da 4 a 12 strisce in base alla larghezza voluta, tenendo conto del diametro iniziale. Ad esempio, Oscar H. Lopez ne *Bamboo, the gift of the gods* afferma che da una canna di diametro 10 cm, la larghezza massima ottenibile per una striscia è di 2,5 cm. All'aumentare del diametro, aumenta la larghezza ottenibile.

Suggerisce però che sarebbe possibile produrre strisce anche producendo culmi di bambù quadrati (figura 10) facendoli crescere in appositi "casseri" per imporgli la forma (metodo che necessita di tempi e costi maggiori) avendo così delle strisce di forma più squadrata che hanno bisogno di meno lavorazioni successive.

Attraverso questa tecnica è possibile anche forzare la crescita del culmo che dovrà seguire l'andamento del cassero assumendo la forma desiderata (figura 11).

Figura 10. 11



A sinistra: foto di un culmo squadrato, da *The Gift of the Gods*, p.309,
a destra: crescita di un culmo dentro un cassero

Per dividere il culmo in strisce si possono utilizzare strumenti diversi, dai più rudimentali come un semplice machete a macchinari automatizzati più sofisticati e veloci, anche se lo strumento più utilizzato è lo "splitter".

Le strisce ottenute si flettono facilmente e resistente alla trazione egualmente ai culmi interi, permettendogli di essere intrecciato o piegato in forme curve.

Figura 12

Da sinistra a destra divisione dei culmi tramite:
machete, macchina splittante e splitter manuale

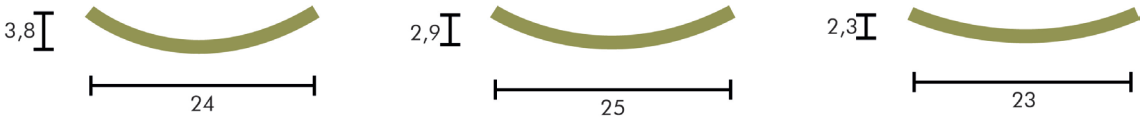
Le strisce possono essere anche combinate tra loro per sviluppare elementi più resistenti. Questa tecnica è definita *Bundled Bamboo Split* e sarà alla base del metodo strutturale impiegato per la realizzazione del modello di serra.

Ogni culmo ha diametri diversi, di conseguenza è fondamentale sapere che dimensioni di split (in termini di larghezza e altezza della concavità) si vuole utilizzare.

Tab. 17 Larghezze degli split realizzabili da culmi con diametri diversi

	3 strisce	4 strisce	5 strisce	6 strisce	8 strisce	10 strisce
CANNE DIAMETRO 40 mm	35	28	24	20	15	12
CANNE DIAMETRO 50 mm	43	35	29	25	19	15
CANNE DIAMETRO 60 mm	52	42	35	30	23	19

Tab. 18 Concavità degli split



1/5 strisce ricavate da una canna Ø:40 cm

1/6 strisce ricavate da una canna Ø:50 cm

1/8 strisce ricavate da una canna Ø:60 cm

2.8 Bundled Bamboo Split, esempi e tecniche

Diverse architetture e opere ingegneristiche sono state realizzate con la tecnica *Bundled Bamboo Split* viste le forme curve che è possibile realizzare e alla sua ottima resistenza meccanica.

L'Atelier colombiano *StudioBamboo* ha realizzato nel 2016 un piccolo ponte pedonale dalle forme curve che si adatta al contesto boschivo tropicale in cui sorge.

Il ponte, composto principalmente da archi realizzati unendo strisce di *Guadua Angustifolia* realizzati in laboratorio e direttamente posti in opera, poggiano su fondazioni in cemento acciaio.

Figura 13

Come si nota dalla foto a sinistra, per unire le strisce di bambù sono stati utilizzati dei chiodi, disposti con un passo di 50cm, che attraversano in senso perpendicolare le sezioni. Questa tecnica permette una coesione molto forte tra le parti, evitando slittamenti e spostamenti delle strisce. Di contro, forare il bambù può creare delle fessurazioni che tenderanno col tempo ad accentuarsi producendo spaccature che corrono lungo l'asse della striscia e conseguentemente ad indebolirla.

Figura 14

Immagine 8 e 9 tratte da: https://studiobamboo.org/here-it-begins/

Un altro esempio di opere basate su questa tecnica è "Bamboo TreeHouse", ideato da Jaime Peña nel 2014, anch'esso in Colombia.

Il progetto è una casa sull'albero di tre piani che si innesta attorno ad un esemplare secolare di albero di *Ceiba* (specie nativa della Colombia). In questa architettura il bambù permette di realizzare forme curve che assecondano l'idea di biomimesi che l'architetto voleva realizzare.

La struttura prevede l'uso di culmi interi usati sia come travi a sbalzo che come pilastri imbullonati ai plinti di fondazioni in cemento.

I grandi archi che si vedono in figura 15 e 16 reggono la rampa ellittica e lo sbalzo del 2° piano. In questo caso sono state utilizzate delle fascette metalliche (con un passo di 50 cm) che uniscono gli split di bambù stringendoli invece che perforandoli con i chiodi, riducendo il rischio di fratture.

Questa tecnica è l'evoluzione dei tradizionali metodi di unione dei culmi di bambù paralleli tra loro che si effettua tramite corde, la quale però, col tempo tende ad allentarsi, soprattutto se la corda è realizzata con materiali vegetali che si sfibrano.

Figura 15

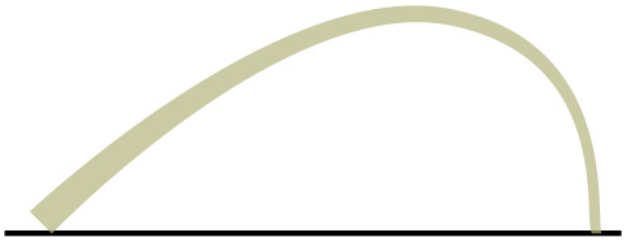
Figura 16

Immagini tratte da: https://www.guaduabamboo.com/construction/bamboo-treehouse

CAPITOLO 3 Gli archi in bambù

Come riportato negli studi di Kaus Dunkelberg, la semplice possibilità di curvare il bambù ha permesso di sfruttarlo facilmente fin dall'antichità senza l'uso di particolari attrezzi, permettendo la realizzazione di veloci ed economici ripari.
Il culmo, infatti, presenta una particolare curva di deflessione non simmetrica quando si cerca di avvicinare i suoi due estremi: ciò è dovuto alla forma conica che sviluppa un raggio di curvatura crescente dalla base alla cima.

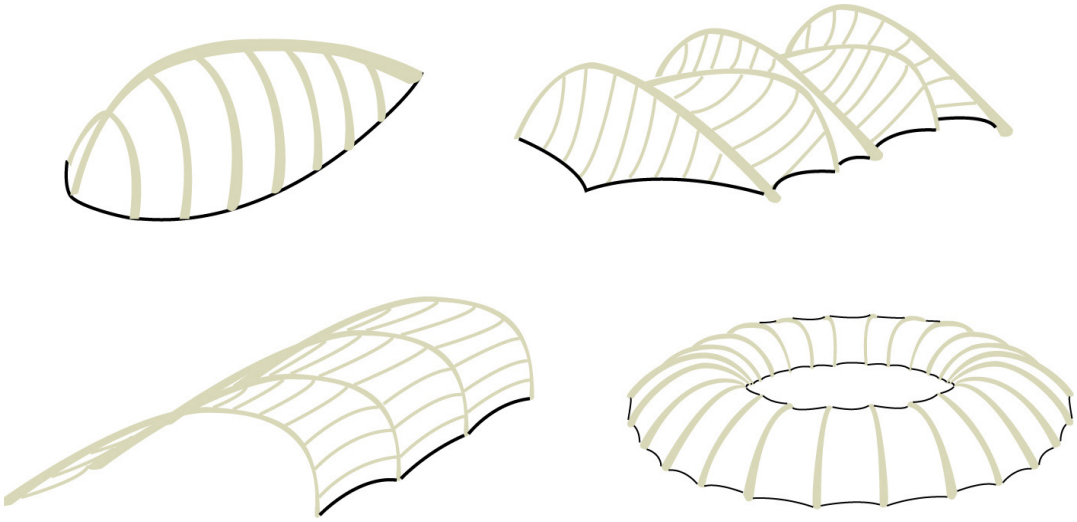
Figura 17



Raggio di curvatura di un culmo di bambù

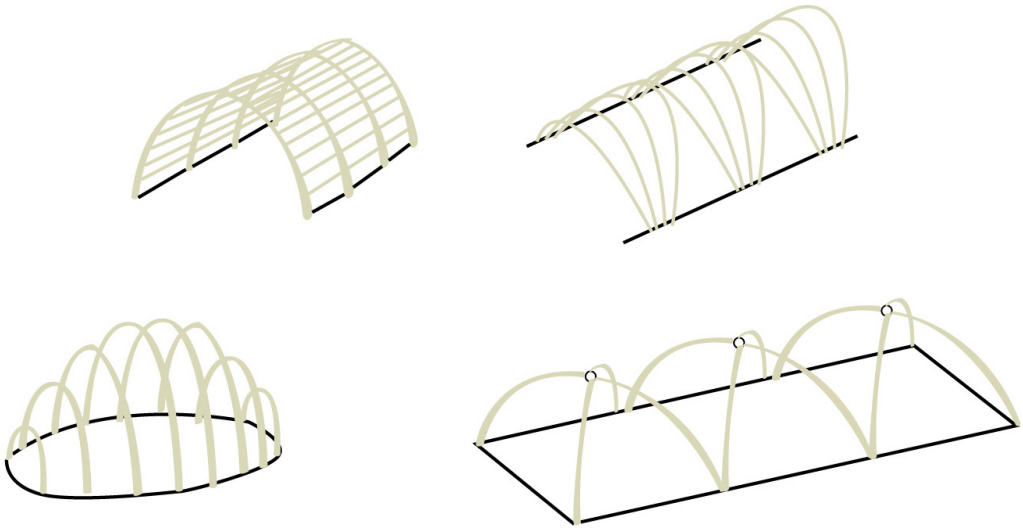
A partire da questa considerazione, sono moltissime le forme che si possono dare alle *architetture di sopravvivenza* (come le avrebbe definite l'architetto Yona Friedman), disponendo i culmi paralleli tra loro, in maniera concentrica o sfalsati e ancora fissandoli con diversa angolazione alle fondazioni.
Di seguito si riportano alcuni esempi di semplici composizioni sviluppabili dalla curvatura di una singola canna.

Figura 18



O dalla combinazione di due canne congiunte al vertice

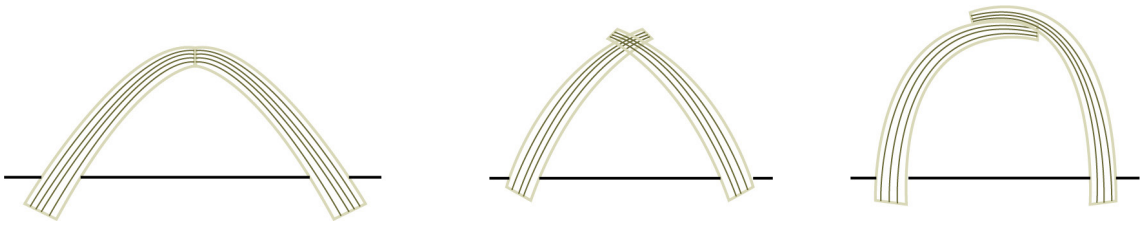
Figura 19



Una volta realizzata la struttura, la copertura può essere sviluppata con diversi materiali, dalla paglia alle foglie di palma ai fogli di plastica.

Per strutture più ampie o che necessitano di reggere carichi maggiori, nel corso dei secoli sono nate tecniche che prevedono la realizzazione di archi composti da più di una canna. Ciò ha permesso di utilizzare anche materiali che singolarmente sono troppo flessibili e poco rigidi come la paglia, la canna di fiume (*Arundo donax*), il giunco (*Juncus effusus*), al fine di realizzare diversi tipi di archi come segue.

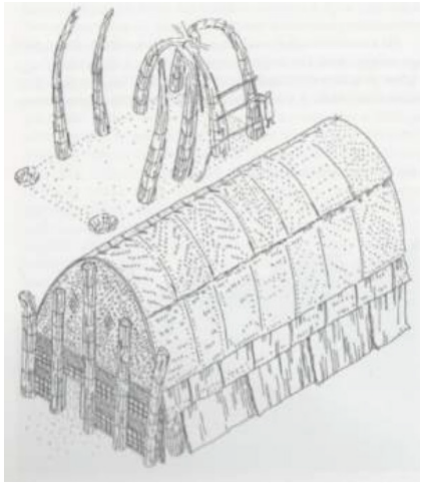
Figura 20



Le applicazioni di questi sistemi nella storia sono innumerevoli, già a partire dalle "mudhif" mesopotamiche, abitazioni costruite dal popolo Ma'dan (letteralmente "Arabi delle paludi" poiché abitavano in zone paludose del delta fluviale Tigri-Eufrate). Questa popolazione sfruttava la canna fluviale, unita in fasci di diametro notevole (anche superiore al metro alla base) che venivano facilmente curvati

e fissati tra loro per realizzare edifici privati e pubblici costituiti da portali su cui poggiava l'orditura secondaria del tetto, a sua volta realizzata da fasci di canne più sottili.

Figura 21



Fonte: *The ecology of Mudhif*, G. Broadbent

L'architetto e studiosa di architetture vernacolari Sandra Piesik, insieme allo studio architettonico ed ingegneristico *BuroHappold Engineering* e alla ditta specializzata in tensostrutture *Mehler Texnologies,* nel 2014 hanno dimostrato attraverso un prototipo sperimentale ad Al Ayn negli Emirati Arabi, come l'utilizzo di materiali tradizionali combinati con tecniche moderne possa soddisfare i bisogni attuali della popolazione.

Il progetto chiamato "The Sabla", ancora in fase di sviluppo, è stato ideato per tutelare l'agricoltura nell'oasi di Al Ayn (patrimonio UNESCO) e per rispondere al problema dello spreco di cibo a causa della mancanza di uno spazio dove immagazzinarlo. Questo è un problema diffuso in molti paesi tra cui l'India, in cui lo United Nations Development Programme ha stimato che il 40% del cibo venga sprecato anche per la mancanza di questi luoghi.

Per la struttura sono state utilizzate le foglie della palma da dattero che normalmente sono scartate nel processo di lavorazione.

Nel progetto di Piesik esse vengono, invece, unite in fasci lunghi (anche le corde che li legano derivano dalla stessa pianta) curvati in archi, che combinati tra loro sviluppano una struttura reticolare fissata a terra tramite dei piccoli plinti in

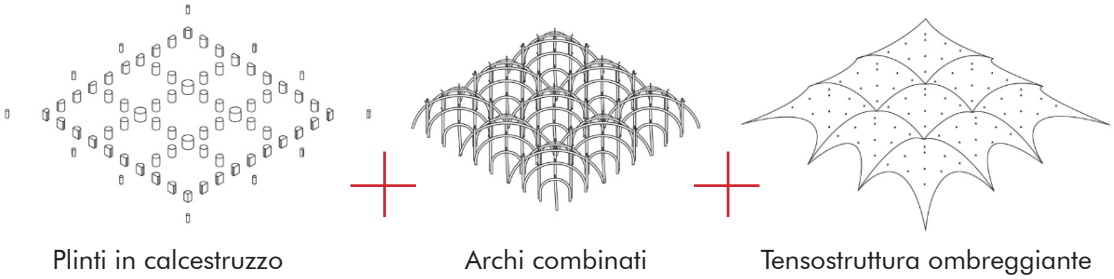
calcestruzzo.

Il tutto si ripete per nove moduli di 8 x 8 m che fornisce un'area di ombreggiatura totale di 600 m^2, grazie ad una tensostruttura montata al di sopra degli archi e che contribuisce alla rigidità della struttura (figura 22).

Figura 22

The Sabla a fine cantiere, immagine tratta da archnet
https://archnet.org/sites/15659/media_contents/113381

Figura 23



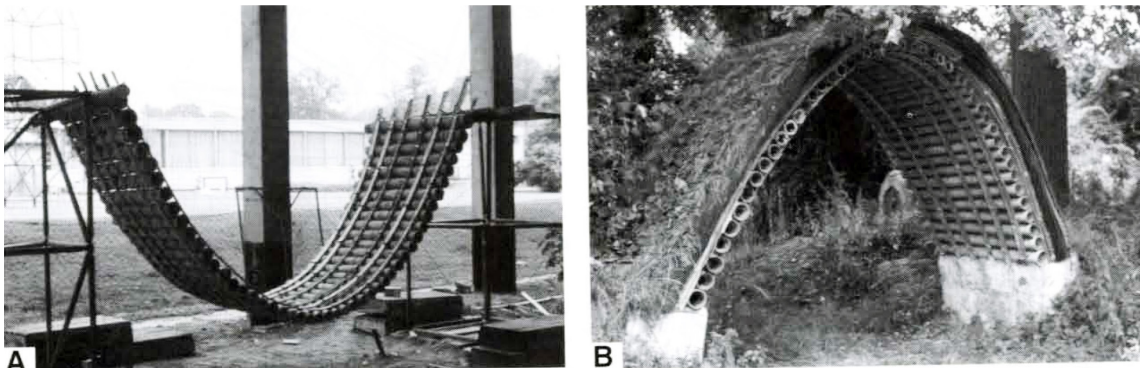
Agli inizio del 1980, l'architetto Gernot Minke, fondatore e direttore di un centro di ricerca, il *Forschungslabor für Experimentelles Bauen* dell'università di Kassel, iniziò degli studi sul comportamento di un arco catenario in bambù.

Questa particolare forma geometrica è data dal carico distribuito lungo il suo sviluppo, ovvero la forma della struttura e quella del carico coincidono.

Minke che ha progettato un centinaio di edifici, è autore di oltre 300 articoli scientifici riguardanti l'uso di materiali naturali per le costruzioni, nonché di svariati libri come *Building with Straw* o *building with Bamboo*. Numerosi sono i sui edifici realizzati utilizzando l'arco catenario per la struttura portante, realizzate con i materiali più vari, dalla terra cruda ai blocchi precompressi di paglia. Nel 1982, Minke costruì una struttura con sezioni di culmi di bambù affiancati e uniti tangenzialmente con sei strisce di bambù, fissando gli estremi e facendo pendere la struttura (figura 24a) per poi ribaltarla in forma di arco.

In questo modo è riuscito a ricavare la forma ideale che assume l'arco soggetto al solo peso proprio. Egli notò che appesantendo la struttura con un carico distribuito, in questo caso uno strato di argilla e un manto erboso, essa risultava ancora più stabile (Figura 24.b).

Figura 24



Costruzione di un arco catenario in bambù,
tratta da O. H. Lopez: *The Gift of the God*, 2003, p. 181

3.3 Canyaviva

Canyaviva è un'associazione multidisciplinare di ricerca, sviluppo e promozione di architetture naturali, nata nel 2005 in Spagna dalle sperimentazioni dell'architetto inglese Jonathan Cory Wright. Oggi conta più di 60 progetti realizzati. L'organizzazione utilizza materiali naturali per realizzare edifici e costruzioni innovative, temporanee e permanenti.
I progetti di Canyaviva si basano sull'arco costituito da fasci di canne come elemento strutturale per ottenere le forme organiche che sono alla base del suo stile. Vengono utilizzati materiali secondari come la calce-canapa, l'argilla, la paglia e le corde di fibra naturali che svolgono funzioni di intonaco, rivestimento, fondazione e legatura. L'idea di Canyaviva si basa sull'effimerità delle sue realizzazioni e dei materiali utilizzati, poiché tutto quello che realizza può col tempo ritornare alla terra.
Una frase dal *Libro d'ombra* di Junikiro Tanizaki sembra descrivere al meglio questo pensiero:

"Raccogliete sterpi e
Legateli.
Una capanna.
Scioglieteli.
Lo sterpaio di prima."

Il metodo di Canyaviva si basa sull'ottimizzazione della flessibilità e resistenza di due materiali apparentemente simili: la canna mediterranea (*Arundo donax*) e il bambù (*Bambusoidae*). Standardizzando il processo progettuale e costruttivo (Canyaviva collabora con la Escuela Universitaria de Arquitectura Tècnica y Ingegneria de la Edificaciòn della Universitat Politècnica de Catalunya) si riducono i rischi legati all'uso di materiali naturali, garantendo le capacità strutturali dell'opera poiché la scelta delle canne, la classificazione e l'assemblaggio segue regole precise.

Attraverso corsi di formazione, workshop, progetti sociali e cantieri aperti è possibile imparare questa tecnica e replicarla poiché il sistema è registrato con licenza Copyleft che ne permette la diffusione e il riadattamento anche per scopi personali, incentivando l'autocostruzione.
Un ramo di Canyaviva è CanyavivaItalia, nata nel 2016 per promuovere anche nel nostro Paese questa tecnica attraverso istallazioni e workshop grazie al lavoro svolto da Matteo Mannini e Margherita Bertoli.

3.3.1 Il metodo

In uno di questi workshop, quello svolto a Genazzano (RM) presso il "Bosco dei piccoli" nel giugno 2019, ho potuto apprendere la tecnica ideata da quest'associazione. Lo scopo era la costruzione di due archi che sarebbero serviti per la copertura di un palchetto musicale.
Si possono utilizzare sia la canna mediterranea sia il bambù, ma vanno presi alcuni accorgimenti atti a tenere in considerazione le differenze tra i due materiali (come la variazione della relazione tra lunghezza e diametro dell'*Arundo d*. rispetto al bambù).
Nel workshop è stato utilizzato il bambù, in particolare la specie *Phyllostachys viridiglaucescens* proveniente dal bambuseto presente nel luogo di svolgimento del corso.
Il metodo si articola in fasi che possono essere riassunte come segue:

1) Raccolta
2) Pulizia
3) Classificazione
4) Realizzazione delle colonne
5) Curvatura
6) Montaggio
7) Fondazioni
8) Rivestimento

3.3.2 Raccolta

Essendo disponibile il materiale in loco, abbiamo avuto la possibilità di occuparci direttamente della raccolta delle canne. In questa fase, attraverso un'attenta osservazione della pianta, si individuano quali culmi vanno recisi considerando l'altezza e il diametro nonché lo stato di maturazione (si possono utilizzare canne a partire dai 2 anni e mezzo di età). Il periodo migliore per il taglio della pianta è quello invernale nei giorni di luna calante, poiché l'attività di crescita è ridotta (la linfa si trova alle radici, dunque meno zuccheri nel culmo e minore possibilità che sia attaccato dagli insetti). Il taglio è stato fatto a una decina di centimetri dal suolo, appena al di sopra di un nodo, riducendo la possibilità che si depositi acqua la quale può far marcire il rizoma.

Figura 25

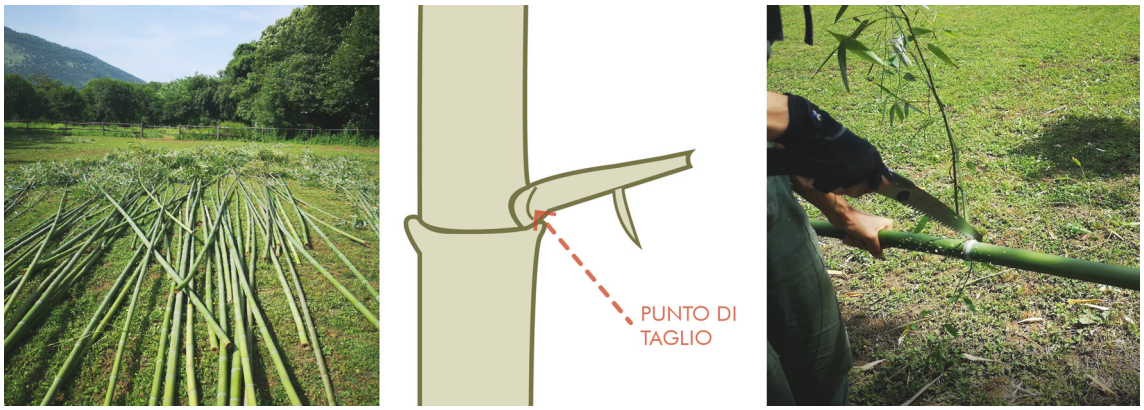
Da sinistra a destra: il bosco di bambù, il taglio delle canne,
i culmi sporgenti dal rizoma dopo il taglio.

3.3.3 Pulizia

Una volta tagliate le canne (circa 50 nel nostro caso) si è proceduto allo stoccaggio in un ampio spazio aperto, adatto alla pulizia del fusto dai rami. Questa lavorazione deve avvenire avendo cura di fare i tagli in modo da lasciare sporgere il minimo possibile dal fusto. Infatti, nel momento in cui le canne sono accoppiate tra di loro, se sono presenti dei nodi, si rischia di creare un punto di tensione che può spezzare le canne.

Per questo motivo, in molti casi è stato necessario limare questi punti con una lima metallica in modo da ottenere una superficie liscia e regolare del culmo.

Figura 26



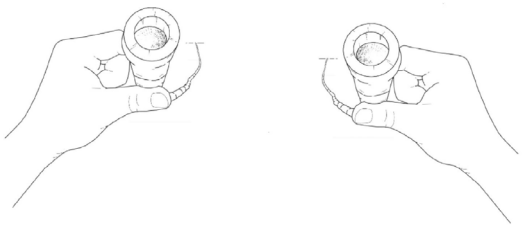
Da sinistra a destra: le canne tagliate da pulire, il punto dove va tagliato il ramo, il taglio dei rami con seghetto giapponese.

3.3.4 Classificazione

Questo passaggio è importanza al fine di ottenere archi che si curvino in maniera ottimale.

Va predisposta un'area di smistamento delle canne poiché esse vengono suddivise innanzitutto in base alla loro lunghezza e curvatura naturale del culmo (orario o antiorario, si veda figura 27). Infatti, essendo gli archi costituiti da due colonne unite tra loro, una deve avere andamento orario e l'altra antiorario per assecondare una flessione naturale quando verranno congiunte.

Figura 27



Sono fissati dei paletti in bambù, in linea, alle seguenti quote: 0m (punta) – 0,30m - 2,80m (detto punto V) – 4m – 5m – 6m (base), che serviranno per verificare i parametri dimensionali delle canne, tramite uno strumento detto classificatore.

Poggiata ogni canna al lato dei paletti, si controlla quanto segue:

Nel punto V la canna deve avere un diametro di circa 2 cm. Si esegue una prova di flessione tenendo fermo a terra questo punto e alzando la cima inarcando il fusto, verificando che esso non si spezzi. Successivamente si verifica che la punta a 0,30 m abbia un diametro massimo di 1 cm.

Se la canna rispetta queste indicazioni si procede al taglio della canna alla base (importante ricordarsi di tagliare a un paio di cm dal nodo), poiché, in base allo sviluppo dell'arco che si vuole realizzare, i culmi devono avere le seguenti lunghezze:

-archi da 7 m= due colonne di canne di circa 5m.

-archi da 9 m= due colonne di canne di circa 6m.

-archi da 11 m = due colonne di canne di circa 7m.

-archi da 13 m= due colonne di canne di circa 8m.

-archi da 15 m= due colonne di canne di circa 9m.

Questa misura deriva dal fatto che la colonna, a partire dal punto V, dirama la sua cima in due fasci più piccoli formando una sorta di "Y". Queste, di lunghezza tre metri, vengono accoppiate con le rispettive cime dell'altra colonna, scorrendo l'una sull'altra, formando un unico fascio. Ad es. per una arco da 7 m il fascio è dato dalla sommatoria di 5+5-3 m. (si veda par. 3.2.5).

Infine, dopo il taglio delle canne, esse vengono smistate in base alla torsione del culmo (oraria o antioraria) che viene definita facendo poggiare la punta della canna a terra e congiungendo visivamente la suddetta con la base.

Classificate tutte le canne, si può procedere alla realizzazione delle colonne che compongono gli archi.

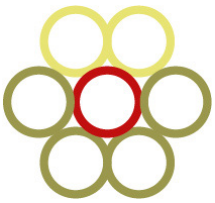
Figura 28

Da sinistra a destra: calibro per misurare il diametro delle canne, prova di flessione, canne classificate per lunghezza e torsione.

3.3.5 Realizzazione delle colonne

Il Modulo sviluppato da Canyaviva prevede l'impiego di sette canne: il numero permette di avere una sezione molto resistente, a sezione centrale e maneggevole durante il montaggio. La disposizione delle canne per realizzare il modulo non è casuale, ma ognuna di essa è posizionata nel punto che meglio asseconda le sue caratteristiche dimensionali, flessionali e di torsione.

Figura 29



In giallo le canne con diametro minore che andranno all'intradosso, in rosso la canna centrale più rettilinea delle altre e in verde le canne con diametro maggiore

Questo modulo di sette canne viene irrobustito con altri culmi che partono dalla base e vengono disposti all'estradosso (per assecondare la successiva curvatura delle colonne); il numero da aggiungere varia in base alle dimensioni dell'arco come segue:

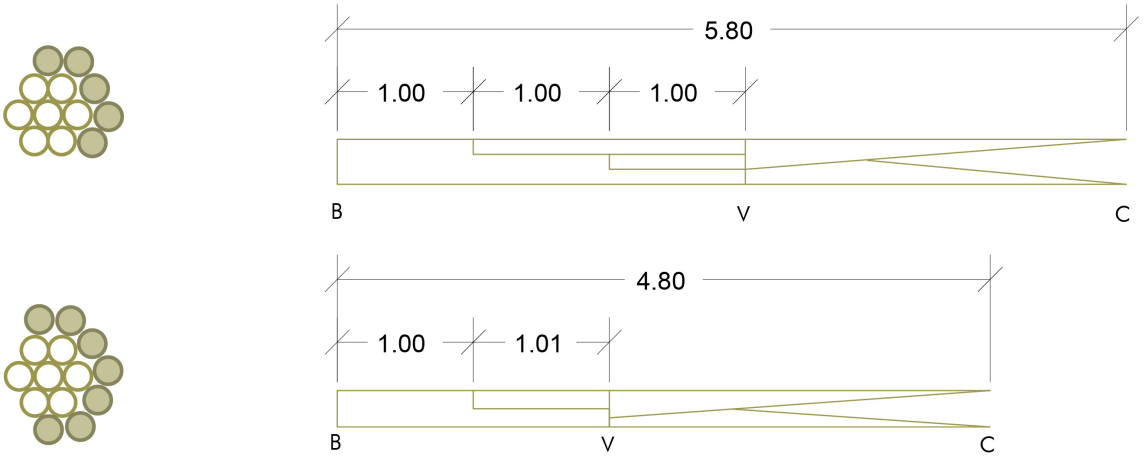
-arco da 13-15m = 7 canne.

-arco da 11m = 7+3 canne.

-arco da 9m = 7+5 canne.

-arco da 7m =7+7 canne.

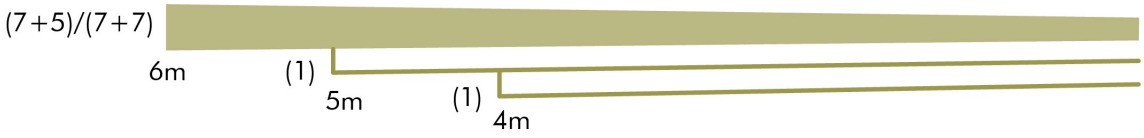
Figura 30



Moduli dei due archi realizzati, rispettivamente da 9 e 7 metri.
B=base, V=punto di inizio biforcazione, P=punta

Infine, altre due canne di lunghezza minore vengono aggiunte al modulo (all'estradosso) per uniformare il diametro delle colonne che tendono a rastremarsi.

Figura 31



Posizionamento delle altre due canne aggiuntive rispetto al fascio principale

La fase di montaggio è resa più agevole appoggiando il fascio di canne su cavalletti, poiché il passaggio successivo è la legatura che richiede particolare attenzione.

Durante il corso, il tema dei nodi è stato trattato approfonditamente, poiché con la tecnica è essi vanno realizzati con maestria. Infatti, se i nodi presentano delle debolezze o se la corda non è stretta a sufficienza, tutto l'arco ne risentirà strutturalmente.

Una prima legatura provvisoria viene realizzata per mantenere le sette canne unite tra loro e disposte come scelto precedentemente attraverso una legatura detta "nodo parlato" (o barcaiolo).

Vengono aggiunti altri cinque culmi e fissati con un nodo più resistente detto "nodo parlato triplo", il quale viene ulteriormente stretto attraverso l'uso di un pezzetto di bambù detto "tornichetto" (precedentemente levigato per evitare che tagli la corda), il quale si inserisce all'interno della corda e ruotando su se stesso

Figura 37

Da sinistra a destra: tornichetto stringente,
nodo parlato semplice, nodo parlato triplo.

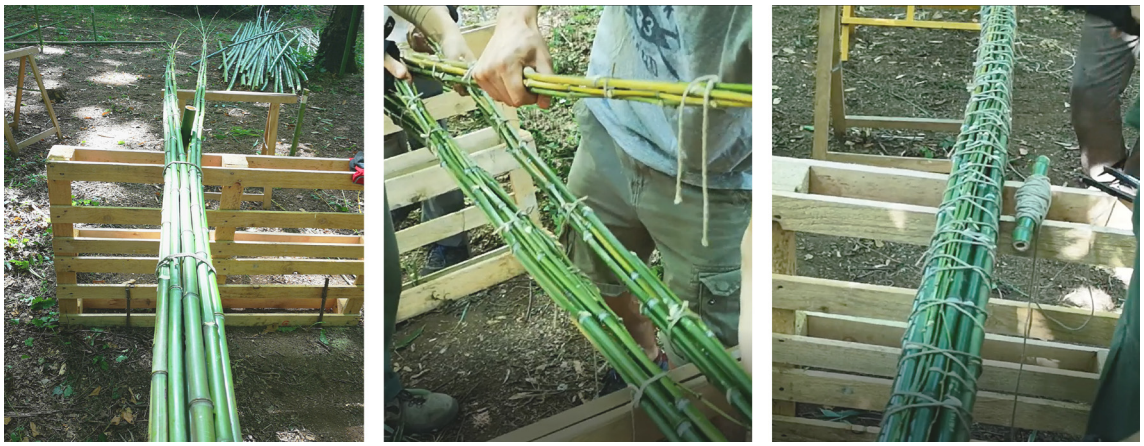
Si procede ripetendo questo passaggio ogni 50 cm a partire dalla base; a un metro viene aggiunta la prima canna più corta e a due metri la seconda legandole al fascio principale con la medesima tecnica. La legatura procede fino al punto V di diramazione, da questo punto in poi la cima viene divisa in due fasci legati separatamente.

Le due cime ottenute non devono necessariamente avere lo stesso numero di canne (deve però esserci un minimo di quattro canne). Inoltre, le punte della prima colonna verranno divise orizzontalmente, quelle della seconda verticalmente, in modo tale che le due V tra di loro combacino quando sono accoppiate.

A questo punto le due colonne vengono unite tra loro aprendo i quattro vertici e facendole scorrere fino a raggiungere la lunghezza desiderata. L'unione delle due punte misura sempre 3 metri ed è il segmento che ha la curvatura maggiore nell'arco.

Una volta posizionate, si passa a fissarle avvolgendo una corda da punto V a punto V della seconda colonna.

Figura 32



Da sinistra a destra: colonna finita e divisione delle punte,
unione delle quattro cime,
legatura di due colonne accoppiate per formare un arco intero.

3.3.6. Curvatura

Il passaggio successivo è curvare la lunga colonna appena realizzata.

Si inizia posizionandola in uno spazio precedentemente predisposto e organizzato con picchetti a terra che seguono la curvatura dell'arco e servono come riferimento

(visivo).

Per curvare lentamente e uniformemente il fascio, si utilizza una corda molto resistente e due moschettoni che vengono fissati uno per lato agli estremi ed entro cui scorre la corda che tirerà l'arco.

In questa fase servono almeno sei persone per dividere i ruoli come segue:

- una persona mantiene in linea il punto di chiave e lo tiene fermo durante la curvatura;
- due persone, una per lato, tirano la corda (e dunque le estremità della colonna) verso il picchetto centrale;
- due persone, uno per lato, spingono le due basi per facilitare il movimento;
- una persona, posta in asse centrale nel punto verso cui tirano le due corde, dirige l'andamento sui due lati permettendo una curvatura lenta, uniforme e parallela.

Figura 33

A sinistra l'area predisposta alla curvatura,
a destra l'arco curvato

Una volta che la curvatura è completa si fissa la posizione grazie a una corda tesa tra le due estremità che funge da catena, finché l'arco non sarà definitivamente posto in opera e dunque la corda potrà essere sciolta.

Infine, per stabilizzare ulteriormente l'arco viene aggiunta una canna di bambù (legata con corda tramite "nodo diagonale") tra i due punti V che funge da catena e che verrà smontata, come la corda alla base, una volta completato il montaggio.

Figura 34

A sinistra: dettaglio di aggancio della corda alla base,
a destra: legatura diagonale della canna che funge da catena fissata dei due punti V.

3.3.7. Montaggio

A questo punto l'arco viene messo in posizione verticale e tenuto in tensione tramite corde (fissate almeno in sei punti dell'arco: due in chiave, una in ogni punto V, e due a circa due metri dalle basi) e tese verso dei picchetti al terreno. Le corde fungono da tensori e da regolatori dell'inclinazione.

In questo caso l'installazione era temporanea e a scopo formativo (un successivo workshop avrebbe completato l'opera), di conseguenza non erano state predisposte le fondazioni in cui l'arco si sarebbe dovuto innestare. Tutto il procedimento è stato ripetuto anche per l'arco di 7 metri, posizionato parallelo a quello da 9 per poterli collegare insieme.

Figura 35

I due archi tenuti in posizione grazie ai tensori in corda,
fissati tramite picchetti al terreno

L'ultimo passaggio è stato connettere i due archi e realizzare dei controventi e l'orditura della copertura. Secondo il metodo Canyaviva, questa connessione può essere effettuata in due modi, a seconda della scelta si avranno risultati estetici e di resistenza diversi:

- Tramite un'orditura di canne perpendicolari agli archi, legate come nel caso delle catene tra i punti V che impediscono anche il ribaltamento degli elementi.
- Tramite archetti realizzati con strisce di bambù combinate tra loro con fil di ferro. Con questo metodo si possono realizzare anche anelli completi.

Figura 36

Da sinistra a destra: controventi rigidi di canne intere,
controvento elastico composto di strisce, risultato finale.

3.3.8. Fondazioni

Pur non avendole realizzate, ci è stato comunque spiegato quale tecnica utilizza l'associazione.

Il problema principale, oltre a garantire la stabilità agli archi, è mantenere asciutte le basi degli archi al fine di evitare che marciscano o che vengano attaccate da funghi o insetti.

Sono stati sviluppati tre tipi di fondazioni:

- Fondazioni interrate: si scava una fosse di circa 50 cm di larghezza e minimo 70 cm di profondità; lo scavo va fatto inclinato sia per stabilizzare l'arco nella posizione corretta, sia per un migliore drenaggio delle acque. Si aggiungono un tubo di drenaggio perimetrale e uno strato di pietre grandi al fondo, pietre medie

con malta dopo 30/40 cm e ghiaia per ricoprire lo scavo e portarlo a livello del terreno, infine si completa la fondazione con circa 15 cm di malta esterna allo scavo.

- Fondazioni semi interrate: lo scavo inclinato ha una profondità di 30/40 cm e anche qui si procede con l'inserimento di un tubo di drenaggio, pietre grandi con malta al fondo,10/15 cm di ghiaia finale e uno strato di 40/50 cm di malta al di sopra del terreno che ricopre l'inizio delle colonne.

- Fondazioni elevate: lo scavo è di minimo 10 cm con pietre al fondo. La stabilità viene fornita dall'innalzamento di una sorta di muro di 60/70 cm attorno alla base delle colonne, realizzato in malta.

Se la struttura deve durare almeno un anno, si può procedere a rivestire le basi delle colonne con una guaina bituminosa per almeno 40 cm, in base alla profondità dello scavo delle fondazioni.
Per Casa de Laila a Málaga in Spagna, uno spazio multifunzionale permanente realizzato nel 2013, le fondazioni sono state realizzate con plinti di calcestruzzo, così come per la Domo NBDA a Diamapur, India (2011). Così facendo, gli archi sono staccati di circa mezzo metro dal terreno e poi rivestiti per almeno un metro da calce-canapa evitando fenomeni di risalita capillare e garantendo una durata di vita superiore alla struttura rispetto all'utilizzo dei metodi elencati precedentemente .

Figura 37

A sinistra: la struttura della Domo NBDA con plinti in cls,
a destra: Casa de Laila con rivestimento parziale in calce-canapa

3.3.9. Rivestimento

Come detto, il metodo Canyaviva utilizza canne di bambù o di Arundo, sia verdi che stagionate: esse tendono a degradare velocemente e questo è il motivo per cui la maggior parte delle realizzazioni sono temporanee (raramente superano i 2 anni di vita).

Per allungare la durata, l'associazione ha sviluppato dei sistemi di rivestimento dei fasci per proteggerli dalle intemperie. I materiali più utilizzati sono impasti di calce canapa, terra cruda, sabbia-calce o gesso. Spesso nell'impasto vengono utilizzati anche gli scarti delle canne che vengono triturate, come nel caso dello spazio multifunzionale realizzato nell'estate del 2019 a Tavira in Spagna (figura 38).

La copertura era composta da quattro strati che poggiano sulla struttura portante composta dai grandi archi principali e da un'orditura di cannette secondarie legate agli archi:

- 1) strato di gesso applicato insieme a un tessuto in juta;
- 2) strato di intonaco con canne triturate;
- 3) strato di gesso con segatura;
- 4) strato esterno di solo gesso.

Figura 38

Da sinistra a destra: un dettaglio del rivestimento con malta di calce-canapa, copertura multifunzionale realizzata a Tavira, dettaglio dell'applicazione manuale dell'impasto.

3.3.10 Sviluppi futuri

Agli inizi di aprile 2019 nell'ambito della Milano design week, è stata sperimentata l'applicazione di un rivestimento più fluido su tre piccole cupole provvisorie realizzate da Canyaviva in bambù, tramite l'uso di droni per la realizzazione del "Terramia Pavilon".

Il progetto, sviluppato dall'architetto Stéphanie Chaltiel e da un team di specialisti, prevedeva che i droni, dotati di tubi e diffusori spray, applicassero biomateriali per ricoprire le strutture.

Un connubio tra l'architettura naturale e low tech proposta da Canyaviva e una tecnologia altamente innovativa.

Figura 39

Una delle tre cupole in fase di rivestimento,
esposta all'interno del palazzo della Regione Lombardia.
Vedi: http://www.summum.engineering/portfolio/terramia/

Capitolo 4 I Giunti

Lo studio dei giunti nel mondo del bambù è probabilmente quello maggiormente indagato. Ricordiamo, infatti, che il bambù presenta degli svantaggi al momento della realizzazione delle connessioni, quali:
- ogni culmo ha dimensioni diverse;
- presenta una sezione cava e il suo fusto è rastremato;
- presenta nodi a distanza non regolare;
- non è mai perfettamente circolare e il suo rivestimento è duro e liscio;
- ha una bassa resistenza a taglio.

L'obiettivo delle connessioni è fornire continuità tra gli elementi strutturali di una costruzione, ovvero che le sollecitazioni possano essere trasmesse fino alle fondazioni e al terreno.
Negli ultimi decenni numerosi progettisti si sono cimentati nello sviluppo di sistemi di giunti a seconda delle esigenze dei vari progetti. In generale è possibile adottare due approcci diversi a seconda del contesto e della disponibilità di risorse:

4.1 Sistemi tradizionali: le prime tecniche comprendevano le legature.
Le tradizioni tramandate tra le generazioni sono arrivate ad oggi ma sono stati spesso aggiornate nei materiali utilizzati. Si è passati dall'uso di corde di fibre naturali (ricavate anche dallo stesso bambù o di yuta) che si deteriorano velocemente perdendo di resistenza, all'uso di materiali moderni come corde sintetiche o fili in metallo più resistenti nel tempo.
L'uso di questo sistema necessita di una profonda conoscenza del materiale; bisogna avere l'accortezza di fare le legature tra gli elementi nei punti giusti, ponendo attenzione a come e dove realizzare le forature spesso necessarie e ai tagli all'estremità dei culmi.
Per realizzare legature ancora più strette si può nel bagnare la corda prima di procedere: la corda asciugando si stringe, contrastando in parte i cedimenti che avverranno col tempo.

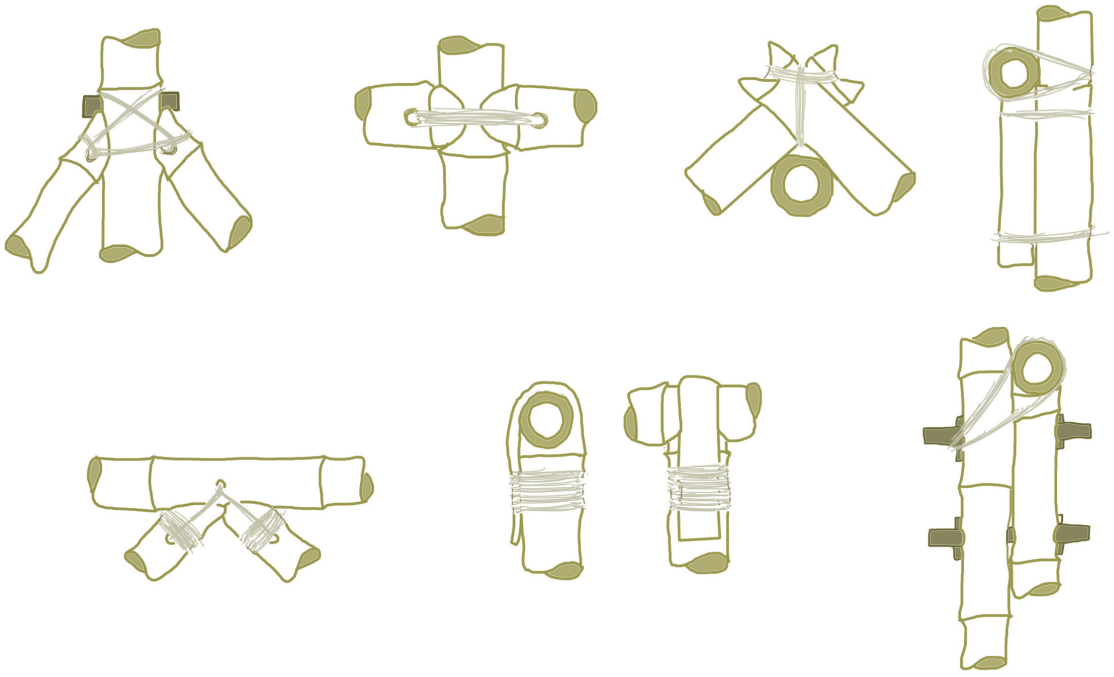
Ma il problema principale resta la necessità di esperienza da parte degli operai per eseguire le legature ad arte.

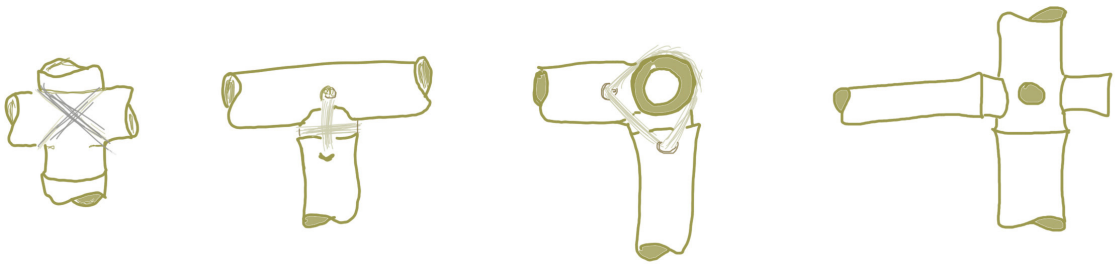
In paesi come Cina e India, la possibilità di reperire operai con tali conoscenze è molto elevata, basti pensare che le impalcature dei grandi cantieri sono spesso ancora realizzate con culmi di bambù, legati a mano dagli stessi operai che magari realizzano poi l'edificio in calcestruzzo armato e acciaio.

Figura 40

Operaio intento a montare un'impalcatura, Hong Kong, 2016.
Si noti come l'uomo si regga alle gambe mentre lega le due canne con delle fascette di plastica.

Figura 41

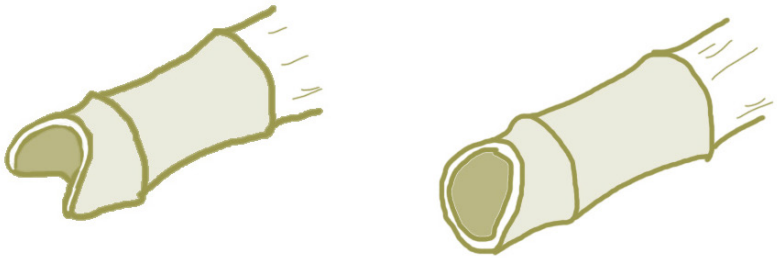




Esempi di giunti tradizionali realizzati tramite legature, rieditati a partire da *Building with Bamboo*, p.40

Alcuni giunti funzionano per solo contatto incrociando le canne e legandole, altri necessitano che si realizzino dei fori nella canna per permettere il passaggio della corda o di un altro culmo di diametro minore. Spesso è necessario che le canne siano tagliate agli estremi, dando loro forme particolari per permettere un incastro adeguato. Infatti, il trasferimento delle forze tra un culmo e un altro è favorito dal loro contatto completo; per far ciò i tagli più comuni sono due: il cosiddetto "a bocca di pesce" (è tipico di giunti perpendicolari)e il taglio detto "a punta di flauto" (per accoppiare le canne con una determinata angolazione).

Figura 42



A sinistra: taglio a bocca di pesce, a destra: taglio a punta di flauto

I sistemi tradizionali di giunto si sono man mano evoluti per cercare di ridurre la manutenzione, molto frequente per le corde.

Negli esempi in figura 50 i giunti sono più complessi pur mantenendo dei tratti in comune con i vecchi sistemi, le classiche legature in corda sono sostituite con fili di ferro o acciaio, i bulloni e i dadi permettono l'accoppiamento dei culmi nelle direzioni volute, anche le chiodature in ferro o i cunei di bloccaggio in legno o bambù possono servire per sviluppare sistemi più articolati e resistenti.

In alcuni casi è necessario inserire del cemento o malta all'interno del culmo per poter poi incastrare in maniera più solida i bulloni.

A tal proposito, Gernot Minke nel suo libro *Building with Bamboo, design and technology of a sustainable Architecture* dà dei suggerimenti al fine di evitare errori. Afferma infatti che, nella perforazione di un culmo per inserire dei bulloni, il foro va fatto ben centrato rispetto all'asse dello stesso, con un diametro 1.5 mm più grande del bullone e subito vicino ad un nodo per limitare i fenomeni di splittaggio. Anche per questo motivo, spesso viene iniettato del cemento all'interno dell'internodo (è preferibile che la soluzione sia ben liquida). L'autore ricorda però che, una volta asciugato, il cemento si contrarrà rischiando dunque di non mantenere il contatto con le pareti del culmo.

Per limitare questo fenomeno suggerisce di non utilizzare il rapporto solitamente consigliato tra cemento e sabbia di 1:2, ma una parte di cemento per 3-4 parti di sabbia grossa e ghiaia (<4 mm di diametro).

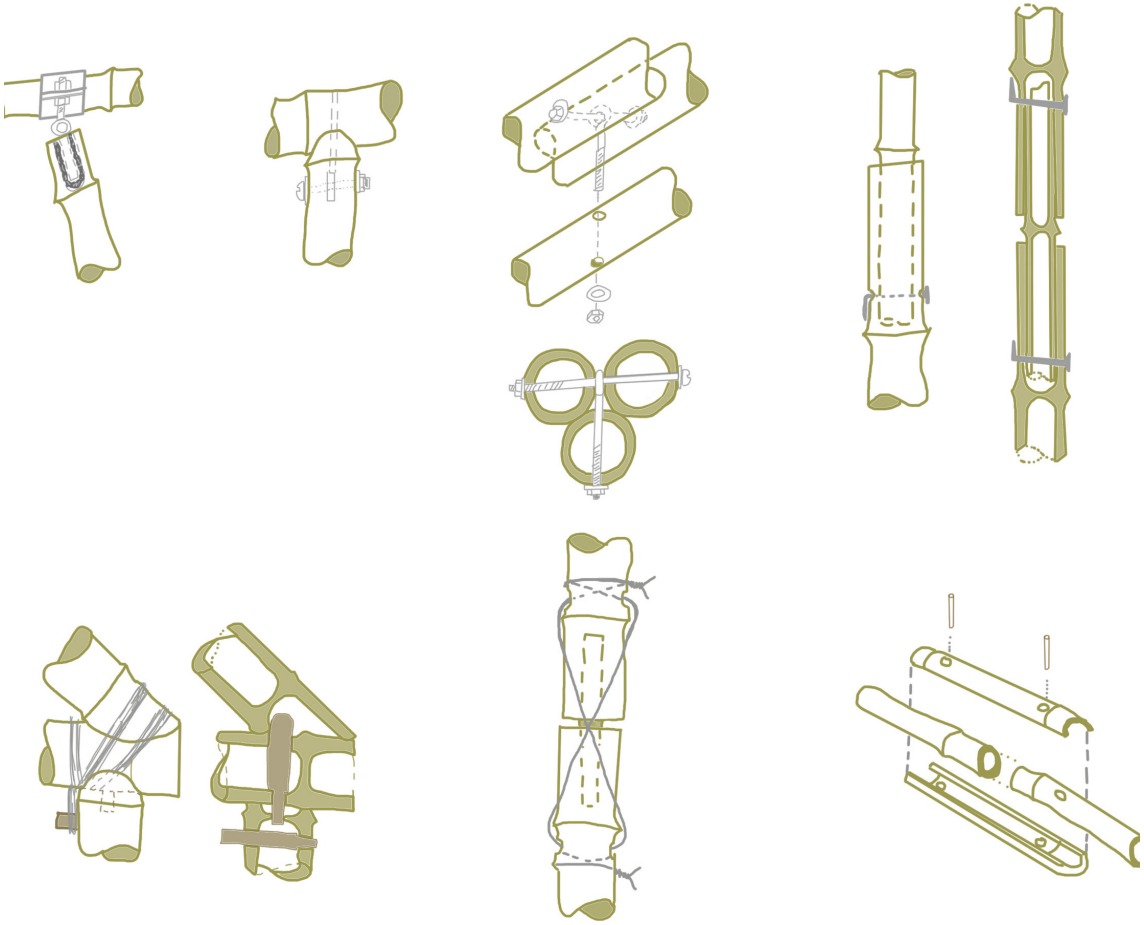
La foto a destra sintetizza quanto detto, è infatti possibile osservare l'uso di materiali e tecniche al fine di ottenere il risultato migliore sia dal punto di vista estetico che strutturale.

Figura 43

Dettaglio del rifugio *Playa Man* realizzato dallo studio SCS, The Scarcity and Creativity Studio a Puerto Baquerizo Moreno.

Il cemento ha il duplice scopo di irrobustire la zona soggetta a compressione e funge anche da chiusura della canna evitando che acqua e insetti penetrino all'interno del culmo. Il fil di ferro sostituisce la corda permettendo di stringere più facilmente i due culmi perpendicolari, ed è interessante notare come sia stato inserito anche un cuneo in bambù che attraversa le due canne mantenendole in posizione.

Figura 44



Esempi di giunti tecnologicamente più complessi

4.2 Sistemi moderni

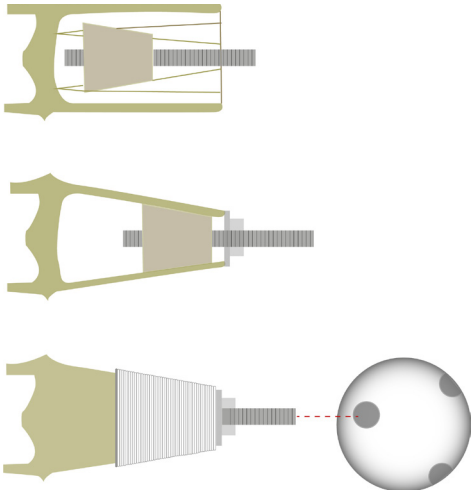
Negli ultimi decenni, i giunti sono realizzati con materiali industriali come l'acciaio inossidabile, l'alluminio, il calcestruzzo e i materiali polimerici, sotto forma di bulloni, dadi, tiranti, barre filettate, cuscinetti in gomma, piastre di metallo ecc.

La facilità di applicazione di questi sistemi è variabile; i loro vantaggi possono comprendere:

- Sono facilmente assemblabili e smontabili con un set di attrezzi normale;
- Si adattano al diametro e alle irregolarità della canna;
- La loro modularità permette più configurazioni;
- Sono spesso realizzati in parte in acciaio e quindi riutilizzabili a fine vita o facilmente riciclabili;
- Spesso non è necessario forare il bambù riducendo così i rischi di fratture.

Ad esempio, per collegare più culmi in un unico nodo fu sviluppato già nel 1941 da C.H. Duff un metodo ingegnoso che utilizza più materiali. Il sistema consiste nell' incidere con dei tagli a V longitudinali, lunghi circa 15 cm (fino al primo nodo) un'estremità del culmo, in modo da trasformare il cilindro in un cono.
All'interno del cono è inserita una barra filettata (cementata o avvitata ad un pezzo di legno a sua volta conico che viene incollato alle pareti interne del bambù) che sporge dal culmo, permettendo, così, di avvitare le aste ad una sfera metallica che presenta dei fori filettati (figura 45).

Figura 45



Il cono è molto spesso irrigidito tramite una corda metallica che gli viene avvolto intorno.
Questo sistema può facilmente essere utilizzato anche per fissare i culmi alle fondazioni di cls.
Questi tipi di giunti, hanno costi e impatti ambientali maggiori rispetto a una semplice corda, seppur abbiano permesso di sviluppare forme e sistemi di collegamento altresì difficili da realizzare.

4.3. CASI STUDIO

4.3.1. Energy efficent Bamboo House

L'atelier italiano Studio Cardenas ha progettato una casa modulare di 320 m^2, realizzata nel 2016 a Lishui in Cina, sfruttando il bambù proveniente dalla vicina foresta di Zhejiang, combinato con l'alluminio per realizzare un sistema costruttivo ripetibile e adattabile.

Il sistema è l'evoluzione di una tecnologia sviluppata in un altro progetto dello stesso studio del 2006, un padiglione temporaneo sito in Milano alla Fabbrica del Vapore, realizzato con una struttura in alluminio e bambù (figura 46).

Figura 46

Dettaglio del giunto in alluminio che unisce travi e pilastri e che regge la copertura in policarbonato alveolare.

Il giunto, realizzato per l'abitazione, collega un gran numero di canne, realizzando un nodo rigido che unisce i pilastri alle travi in maniera semplice e indiretta, permettendo lo sviluppo di un telaio spaziale con diverse configurazioni.

Il sistema permette di non forare il bambù (né per assemblarlo né per riempirlo di cemento) ed è facilmente smontabile.

Il giunto è basato su due piastre di alluminio che scorrendo lungo i tiranti filettati stringono la canna fino a bloccarla.

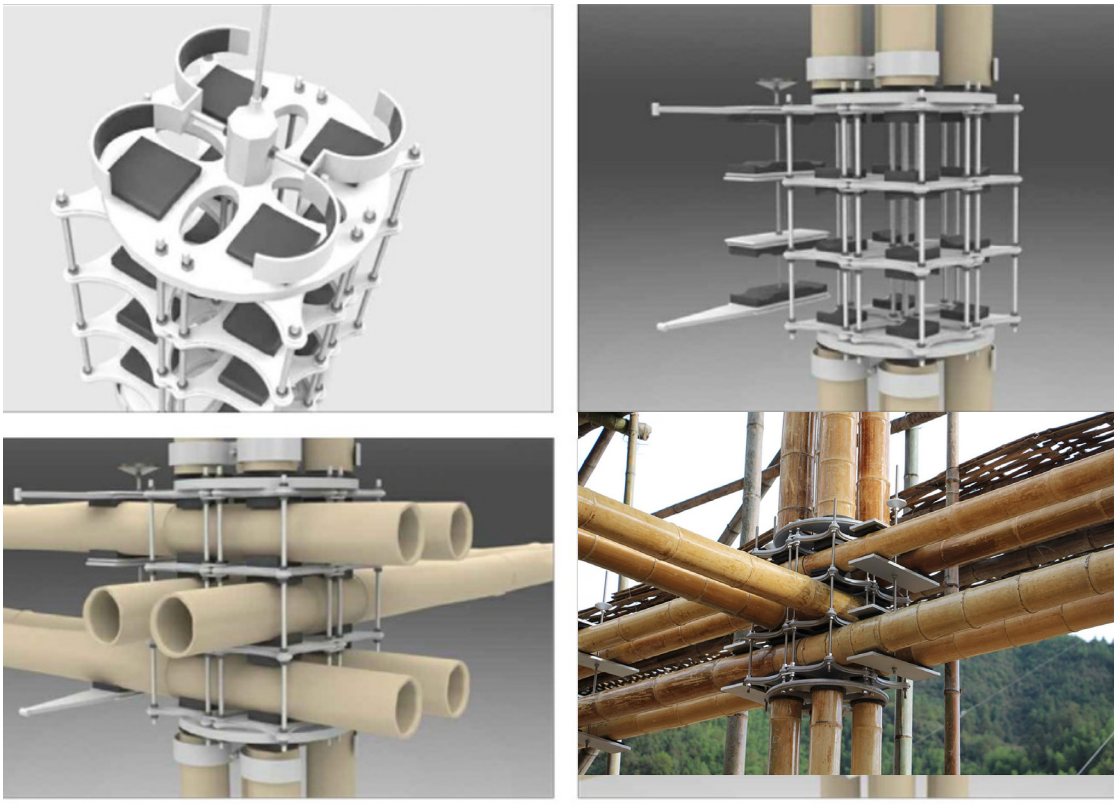
Per evitare che il pezzo di alluminio schiacci il bambù è stato interposto un cuscinetto di gomma dura che ammortizza la presa e riduce per attrito un eventuale slittamento delle canne.

L'idea del progettista era di realizzare un telaio strutturale a vista su cui agganciare i moduli dei solai e delle pareti, così facendo è stato necessario trattare le canne immergendole in un composto di sali di boro per permetterle di resistere all'esterno.

Figura 47

Vista dell'abitazione

Figura 48



Render tridimensionali del giunto e immagine reale di cantiere

4.3.2. Mobile theatre

L'opera, realizzata dallo studio francese Studio Akkerhuis nel 2017, dovendosi inserire nella spiaggia di Noordwijk in Olanda, necessitava di una serie di accorgimenti progettuali particolari:

Doveva essere un'opera leggera, facilmente assemblabile senza utilizzare grossi macchinari, stagionale e riutilizzabile in futuro, che permettesse una buona flessibilità di utilizzo.

Sono state adottate 4 specie differenti e di varie dimensioni per altrettanti impieghi: dalle funzioni strutturali (verticali e di copertura) passando per gli arredi e alle gradinate, per un totale di 5800 culmi impiegati.

Il teatro di forma circolare (20m di diametro) che permette di ospitare fino a 350 posti a sedere e una piccola orchestra, trae ispirazione dalle tende beduine del deserto, i tendoni dei circhi e un anfiteatro romano.

La massima lunghezza delle canne di 5,8 m ha consentito di far arrivare il materiale in un unico container navale proveniente dalla Colombia.

Infatti, il problema dell'utilizzo di questo materiale in Europa resta sempre l'approvvigionamento, poiché risulta più facile importarlo dai maggiori Paesi produttori, piuttosto che rifornirsi in loco, riducendo così, in parte, i vantaggi ecologici legati alla scelta del bambù.

Per collegare le canne si è fatto largo uso di legature ma soprattutto di bulloni e dadi, rendendo la fase di assemblaggio veloce e realizzabile da volontari non specializzati nell'arco di due settimane.

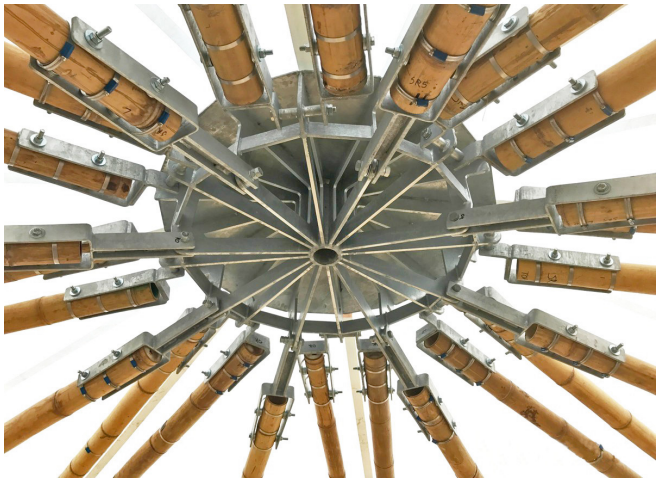
I giunti più particolari, sono stati i collegamenti alle fondazioni (composti da grossi blocchi in calcestruzzo interrati ma rimovibili) e soprattutto il giunto in cima alla cupola dove si congiungevano le canne che ne compongono la struttura.

Per far ciò sono stati realizzati dei morsetti in acciaio che vengono imbullonati ai pilastri in bambù e alle fondazioni, mentre un unico grande giunto circolare raccorda in cima 24 culmi inclinati realizzando una soluzione sofisticata e pertinente (figura 50).

Figura 49

Vista del teatro a fine cantiere

Figura 50



A sinistra: dettaglio della connessione con le fondazioni,
a destra: giunto in sommità della cupola

Capitolo 5 Il progetto strutturale

La maggior parte dei materiali edilizi tradizionali, impiegati sotto forma di travi e pilastri, presentano una geometria lineare e una sezione costante, questo permette di essere facilmente modellato per i calcoli strutturali.

Il bambù è differente, tende a rastremarsi, ha nodi a intervalli irregolari, presenta una sezione non perfettamente circolare e spesso tende ad incurvarsi durante la sua crescita.

Di conseguenza il calcolo strutturale deve iniziare da una serie di schematizzazioni. Ad esempio, il momento d' inerzia viene calcolato misurando il diametro esterno e lo spessore della parete da entrambi gli estremi per fare la media.

Come riportato anche in normat ISO 22156, i culmi curvi non possono essere utilizzati come colonne o travi ma si usa un sistema di classificazione per sceglierli.

Per la norma colombiana NSR-10 i pezzi strutturali non possono superare una deformazione dell'asse maggiore di 0,33 % della sua lunghezza.

Per i giunti o i supporti è preferibile che essi vengano fissati in prossimità dei nodi.

Inoltre, il comportamento del bambù può essere definito elastico poiché il comportamento plastico può essere trascurato.

Anche quando si utilizza il bambù come materiale da costruzione è possibile affrontare la progettazione strutturale in modo da garantire adeguate performance rispetto alle combinazioni di carico delle normative nazionali per le verifiche agli SLU e SLE. In Italia non esiste una norma relativa al bambù, ma è possibile utilizzare le norme internazionali come la ISO/DIS 22156-2004 *Bamboo: Structural design* o il *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*.

In particolare la norma ISO permette di determinare i valori caratteristici del materiale e di conseguenza anche i valori di carico ammissibili, come descritto ai paragrafi successivi.

5.1 Valori caratteristici:

Il valore caratteristico della resistenza di un materiale è determinato dal 5 percentile delle proprietà meccaniche stimate tramite i test di laboratorio.

Seguendo la norma ISO 22156 e applicando la formula:

$$R_k = R_{0,05}\left(1 - \frac{2,7\ \frac{s}{m}}{\sqrt{n}}\right)$$

Con:

$R_{0,05}$: il 5 percentile derivato dai test di laboratorio;

m: valore medio dei test di laboratorio;

s: deviazione standard dei test di laboratorio;

n: numero di test effettuati (almeno 10).

Carico ammissibile:

Necessario per la procedura agli stati limite, è deducibile dalla seguente formula:

$$\sigma_{all} = Rk \times G \times \frac{D}{S}$$

G: parametro che tiene in considerazione le differenze tra i valori di laboratorio e quelli sul campo, vale di default 0,5.

D: parametro di modifica in relazione alla durata del carico:

-1,00 per i carichi permanenti

-1,25 per i carichi permanenti e temporanei

-1,5 per i carichi sopracitati più i carichi di vento

5.2 Valori caratteristici di progetto

È stato possibile ricavare quindi i valori di progetto utilizzando i risultati dei test di laboratorio illustrati al capitolo 2.6.

Compressione

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, si ricava il valore del 5 percentile pari a 53,36 Mpa, una deviazione standard di 11,09 Mpa e una media di 81,91 Mpa, da cui è possibile calcolare l'R_{kc}:

$$R_{k,c} = 53,36\left(1 - \frac{2,7\ \frac{11,09}{81,91}}{\sqrt{12}}\right) = 47,7\ Mpa$$

Il carico ammissibile a compressione assiale è invece calcolato per i tre casi di progetto, applicando i differenti parametri descritti in precedenza:

-Permanente: $\sigma_{all,c} = 47,7 \times 0,5 \times \frac{1}{2,25} = 10,6$ **Mpa**

-Permanente + temporaneo: **13,25 Mpa**

-Permanente + temporaneo + vento: **15,9 Mpa**

Trazione

Anche per i valori relativi alla trazione si procede analogamente, ricavando il 5 percentile pari a 70,71 Mpa, deviazione standard di 32,91 Mpa e una media di 92,54 Mpa.

$$R_{k,t} = 70,71 \left(1 - \frac{2,7 \frac{32,91}{92,54}}{\sqrt{12}} \right) = 65,05 \text{ Mpa}$$

Il carico ammissibile vale:

-Permanente: $\sigma_{all,t} = 65,05 \times 0,5 \times \frac{1}{2,25} = 14,45$ **Mpa**

-Permanente + temporaneo: **18,07 Mpa**

-Permanente + temporaneo + vento: **21,68 Mpa**

Per completezza dei dati e come termine di paragone, si riportano i parametri meccanici prescritti dalla normativa Colombiana NSR-10.

Tab. 19 Sforzi ammissibili Fi (MPa) per un M.C.= 12%

F_b Flexión	F_t Tracción	F_c Compresión ∥	F_{p*} Compresión ⊥	F_v Corte
15	18	14	1.4	1.2

5.3 Concept di serra

Come detto, il bambù è un materiale naturale, resistente ma leggero, cresce velocemente, è economico e semplice da lavorare. Per questi motivi si è deciso di indagare la realizzazione di una serra agricola realizzata con questo materiale.

Nell'idea del prodotto, risulta fondamentale la possibilità che la serra sia facilmente assemblabile anche da manovali non specializzati o dal semplice utente finale, come già accade per serre tunnel realizzate con i materiali più comuni (alluminio e plastica).

Ho cercato di semplificare quanto possibile la morfologia della struttura e i pezzi che la compongono in modo da poterla assimilare tra i modelli di serra a tunnel praticabili di dimensioni medie.

Per motivi di realizzazione e di facile trasportabilità nonché imballaggio degli elementi ho deciso di dividere l'arco in due elementi colonna, uniti al colmo tramite un giunto che viene descritto successivamente.

La campata ha dimensioni in larghezza di 4 metri e un'altezza al colmo di 3 metri; queste dimensioni permettono il movimento agevole dell'uomo al suo interno e anche la possibilità di utilizzare piccole macchine agricole come dei trattorini.

Il sistema strutturale è composto da una sequenza di archi collegati tra loro tramite montanti, che permette di estendere la serra in lunghezza a piacimento, in modo da essere applicabile anche per le coltivazioni intensive che necessitano di coprire grandi appezzamenti di terreno.

5.3.1 L'analisi degli archi

Il primo passaggio è stato quello di analizzare la resistenza in termini di carico e spostamento dell'elemento principale che è l'arco parabolico. Questa fase è avvenuta nella consapevolezza che gli archi realizzati nella realtà avranno degli scostamenti geometrici, fisici e di risposta statica rispetto al modello perfetto digitale.

Nel mio caso, per motivi dimensionali, si è deciso di dividere la sua lunghezza lineare, che sarebbe stata di circa 7,7 m, in due segmenti di circa 3,85 m.

Ciò comporta una serie di vantaggi in termini di trasportabilità degli elementi, di persone necessarie per la fase di montaggio e conseguente velocità di esecuzione.

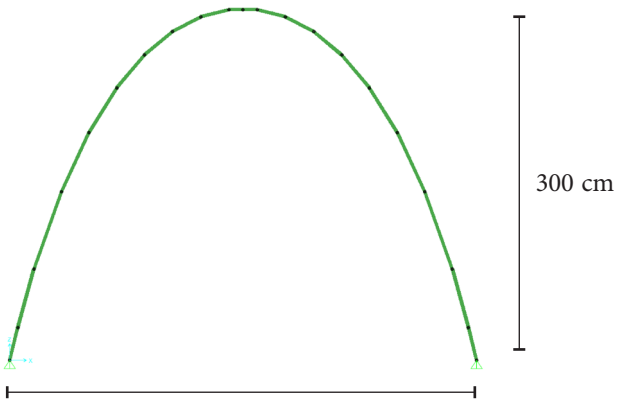
Inoltre, dividendo a metà l'arco, è possibile sostituire, in caso di danneggiamento puntuale, solo una delle due colonne che lo compongono, avendo così un risparmio economico e di materiale.

Come anticipato nei capitoli precedenti, il sistema tecnologico impiegato per la realizzazione delle colonne è il *Bundled Bamboo Split,* che permette di avere degli elementi facilmente curvabili per realizzare gli archi.

Di conseguenza, una prima fase di analisi ha riguardato la risposta, in termini di spostamento applicato al carico, di alcune tipologie di archi composti da un numero crescente di strisce di bambù accoppiate.

Dopo aver prodotto su Cad la curva catenaria passante per i 3 punti (base, vertice, base) essa è stata importata sul software Sap2000 al fine di studiarne il comportamento strutturale.

Figura 51



schema arco catenario

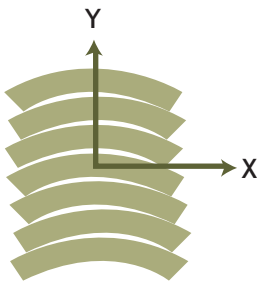
Nel software non è possibile modellare la sezione fedelmente alla realtà, ovvero come l'accoppiamento di una serie di parallelepipedi con sezione leggermente curva. Si rende necessario, dunque, un'approssimazione nel programma, cioè quella di impostare la sezione rettangolare piena con dimensioni uguali alla sommatoria degli spessori delle strisce.

Le strisce di *Phyllostachys Edulis,* acquistate per questa tesi, presentano uno spessore medio di parete approssimato a 7 mm (questa media tiene conto degli spessori rilevati nella cima, nella base e al centro della canna, nonché nelle zone nodali in cui lo spessore cresce notevolmente).

La larghezza media è di 3 cm.

Tab. 20 Caratteristiche geometriche delle sezioni

Sezione	Area (mm^2)	dx (mm)	dy (mm)	Iy (mm^4)	Ix (mm^4)
2 strisce	420	30	14	31500	6860
3 strisce	630	30	21	47250	23152
4 strisce	840	30	28	63000	54880
5 strisce	1050	30	35	78750	107187
6 strisce	1260	30	42	94500	185220
7 strisce	1470	30	49	110250	294122



Con: dx= larghezza strisce; dy= spessore totale strisce;
Iy= momento di inerzia direzione y; Ix= momento di inerzia direzione x;

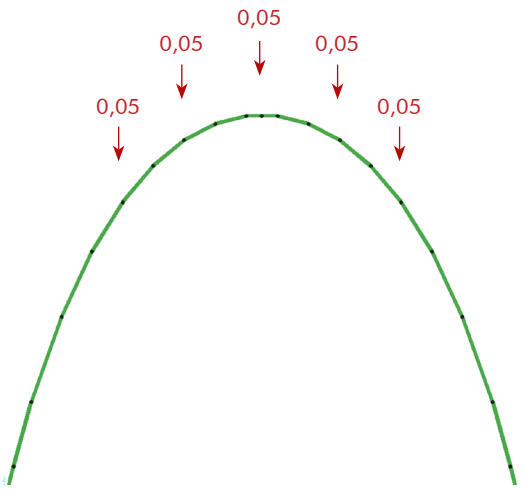
5.3.2 Comportamento dell'arco a due cerniere

In questa fase si è proceduto ad analizzare il comportamento dei diversi archi, attraverso un'analisi non lineare statica che tiene in considerazione sia le caratteristiche del materiale sia la geometria dell'elemento, al fine di poter comparare successivamente queste simulazioni con quelle sui modelli reali.

L'arco viene considerato a due cerniere, assumendo il fatto che il giunto al colmo trasmetta momento. La stessa analisi verrà successivamente ripetuta considerando invece l'arco a tre cerniere e valutando poi quale delle due analisi sia più fedele al comportamento reale dell'arco e dunque del giunto progettato (si veda paragrafo 6.1.1).

L'analisi viene eseguita applicando un carico concentrato iniziale (P) di 0,05 kN in direzione -Z (verticale) in cinque punti dell'arco.

Figura 52



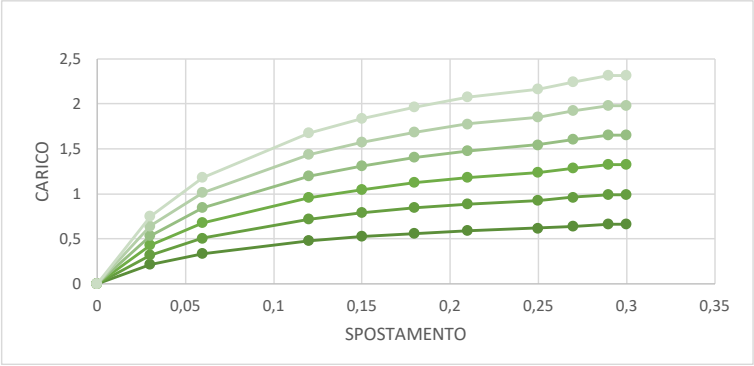
Applicazione dei carichi ai nodi.

Essa avviene per step (10) e si interrompe al raggiungimento dello spostamento di -0,3 m del punto di colmo, registrandone il carico associato.

Tab. 21 Valori di carico e spostamento per le diverse sezioni di arco a due cerniere

Spostamento (m)	n°strisce 2	n°strisce 3	n°strisce 4	n°strisce 5	n°strisce 6	n°strisce 7
	Carico (kN)					
0	0	0	0	0	0	0
0,03	0,214	0,321	0,428	0,535	0,642	0,749
0,06	0,337	0,506	0,675	0,843	1,012	1,18
0,12	0,478	0,718	0,957	1,196	1,435	1,675
0,15	0,524	0,786	1,048	1,311	1,573	1,835
0,18	0,561	0,842	1,122	1,403	1,683	1,964
0,21	0,592	0,887	1,183	1,479	1,775	2,071
0,25	0,618	0,927	1,236	1,544	1,853	2,162
0,27	0,641	0,961	1,281	1,601	1,922	2,242
0,29	0,661	0,991	1,321	1,652	1,982	2,313
	0,661	0,991	1,321	1,652	1,982	2,313

Tab. 22 grafico carico-spostamento

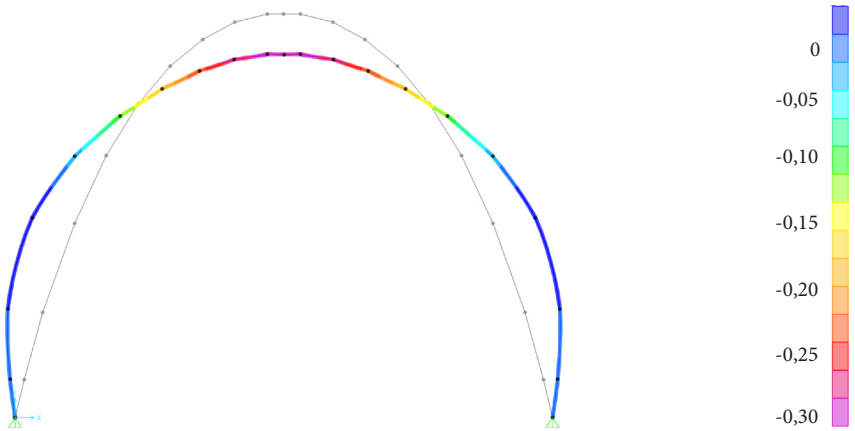


Come si evince dai dati delle tabelle precedenti, i modelli di arco rispondono all'aumento del carico con due comportamenti diversi: un primo tratto elastico, in cui l'aumento di carico e lo spostamento sono proporzionali e un secondo tratto in cui la deformazione cresce maggiormente rispetto all'aumento di carico poiché vengono superati i valori caratteristici del materiale.

È stato possibile estrapolare la deformata che assumerebbe l'arco così sollecitato. Il tipo di deformata risulta essere simmetrico, poiché il modello non presenta

imperfezioni. Ed è uguale per tutti e 7 i modelli.

Figura 53

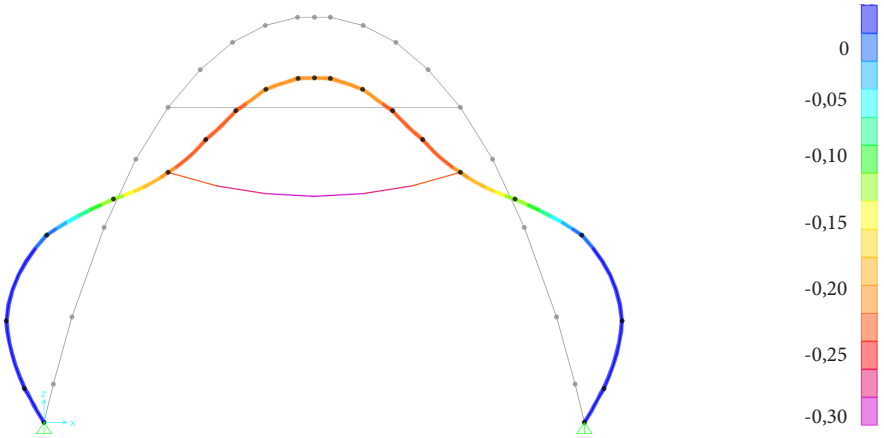


Andamento della deformata allo step 10, con abbassamento di 0,3 m del punto di colmo.

Com'era prevedibile, dal diagramma è possibile dedurre che la deformata massima in direzione -Z avviene nei 5 punti di applicazione del carico, mentre le "colonne" laterali subiscono uno spostamento principale sull'asse X, seguendo il fenomeno di spanciamento tipico degli archi.

Questo fenomeno può essere ridotto con una catena che assorba parte delle spinte orizzontali esercitate sull'arco. Inoltre, considerata la snellezza dell'arco e la flessibilità del materiale, è presumibile che nella realtà esso non mantenga questa geometria, rendendo necessaria la catena per mantenere la forma parabolica.

Figura 54



Andamento della deformata allo step 10 con aggiunta di catena;
Evidenziati con i colori i valori di spostamento sull'asse Z

Nel caso dell'arco formato da 7 strisce (avente sezione pari a 0,03 x 0,049 m), attraverso l'aggiunta di una catena (posizionata a 2,3 m dalla base), modellata come un cavo di diametro 1,5 mm, si registra un carico di 4,8 kN applicato allo

spostamento del punto di colmo di -0,3 m. In assenza di catena questo valore è di 2,313 kN.

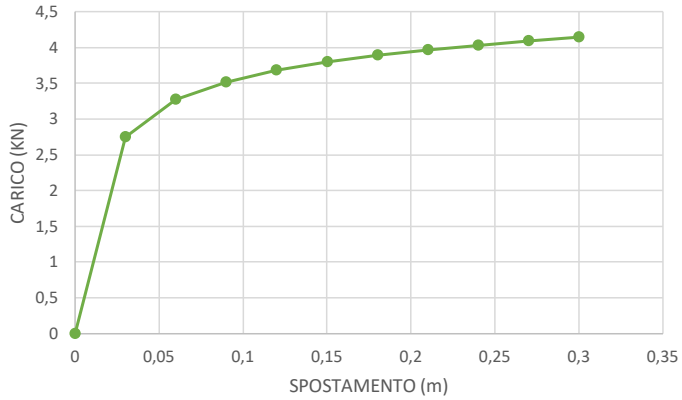
Inoltre, si tiene in considerazione che le colonne di strisce di bambù, nella realtà, difficilmente assumerebbero la configurazione parabolica del modello digitale.

Per far ciò, ho deciso di prendere spunto dalla tecnica di assemblaggio degli archi parabolici realizzati con il metodo CanyaViva.

Infatti, in maniera analoga a quanto descritto al paragrafo 3.2.5., al fascio principale vengono aggiunte alle due basi, due canne di bambù all'estradosso. Esse sono più corte della lunghezza totale della colonna, in modo da irrigidire le basi, facendo assumere l'andamento parabolico all'arco, caratterizzato da un primo tratto pressoché rettilineo. La sezione maggiore contrasta, inoltre, anche lo spanciamento. Questo fenomeno permane, seppure in maniera ridotta, anche dopo l'aggiunta della catena. Questa esigenza geometrica si rende necessaria, per il modello di serra che si vuole realizzare, al fine di poter raggiungere i 3 metri di altezza sul colmo, evitando che le pareti laterali si incurvino, in modo da poter sfruttare in altezza anche quella zona. In quest'ottica vanno considerate anche le controventature orizzontali che si devono impostare ad un altezza che permetta ad un uomo di lavorare in piedi.

L'ultimo arco analizzato è dunque quello che più si avvicina al prototipo realizzato nella realtà: una semi colonna formata da un primo tratto di lunghezza 2 m composta da 7 strisce e un secondo tratto di 1,85 m composta da 5 strisce. All'arco viene mantenuta la catena orizzontale. Anche su di esso viene svolta un'analisi non lineare come in precedenza e si estrapolano i seguenti valori.

Tab. 23 grafico carico-spostamento



Tab. 24 Valori di carico e spostamento per arco misto

Step	Spostamento	Carico
	(m)	(kN)
1	0	0
2	0,03	2,589
3	0,06	3,190
4	0,09	3,506
5	0,12	3,716
6	0,15	3,872
7	0,18	3,997
8	0,21	4,102
9	0,24	4,192
10	0,27	4,273
11	0,30	4,346

5.3.3 Comportamento dell'arco a tre cerniere

Sono poi passato ad analizzare le stesse sezioni ma considerando il giunto al colmo come una cerniera, ipotizzando che si permetta una rotazione nel giunto, se pur ridotta, tra le due semi colonne.

Per far ciò nel software si devono "svincolare" dal momento i segmenti finali delle colonne che convergono sul colmo a destra e sinistra, in modo da creare una cerniera interna.

Si procede con l'analisi non lineare come descritto in precedenza.

Tab. 25 Valori di carico e spostamento per le diverse sezioni di arco a tre cerniere

	n°strisce 2	n°strisce 3	n°strisce 4	n°strisce 5	n°strisce 6	n°strisce 7
Spostamento	Carico					
(m)	(kN)					
0	0	0	0	0	0	0
0,03	0,073	0,109	0,145	0,182	0,218	0,254
0,06	0,124	0,186	0,248	0,310	0,371	0,433
0,09	0,162	0,243	0,324	0,405	0,486	0,567
0,12	0,191	0,287	0,383	0,479	0,574	0,670
0,15	0,215	0,323	0,430	0,538	0,645	0,753
0,18	0,235	0,352	0,469	0,586	0,704	0,821
0,21	0,251	0,376	0,501	0,627	0,752	0,877
0,24	0,264	0,397	0,529	0,661	0,793	0,926
0,27	0,276	0,414	0,552	0,691	0,829	0,967
0,30	0,286	0,430	0,573	0,716	0,859	1,003

Tab. 26 grafico carico-spostamento

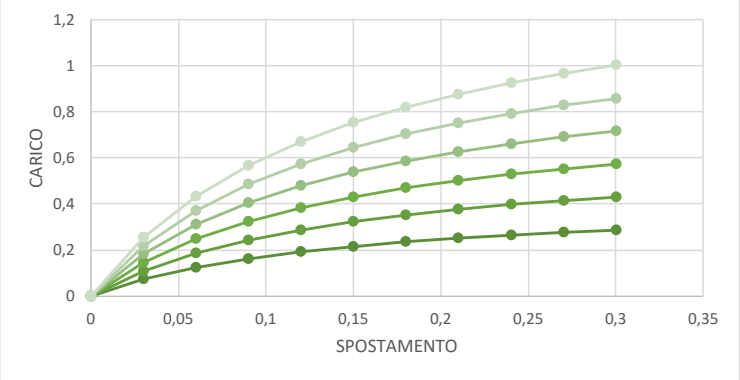
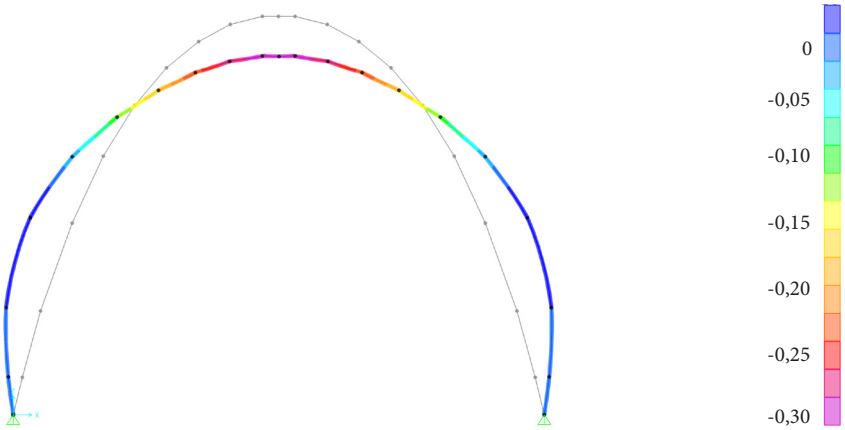


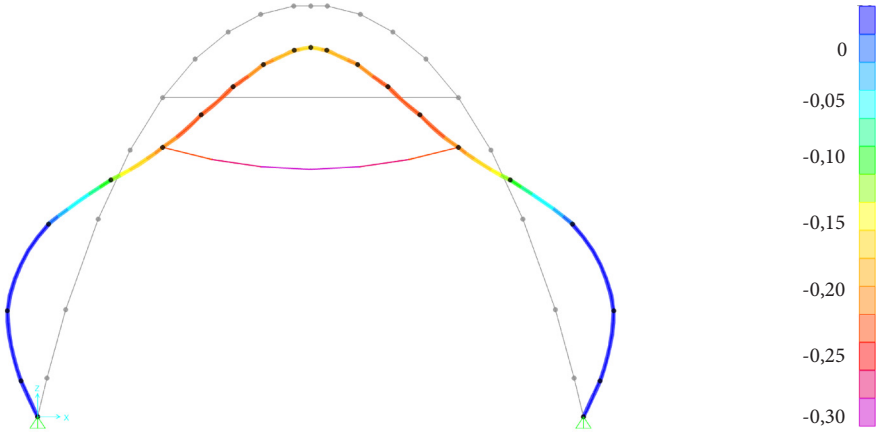
Figura 55



Andamento della deformata allo step 10, con abbassamento di 0,3 m del punto di colmo.

Anche in questo caso si è poi valutato la differenza della deformata applicando la catena a 0,7 m dal colmo per contrastare gli spanciamenti e il relativo carico portato.

Figura 56



Andamento della deformata allo step 10 con aggiunta di catena;
Evidenziati con i colori i valori di spostamento sull'asse Z

Nel caso dell'arco formato da 7 strisce, attraverso l'aggiunta di una catena, si registra un carico di 4,61 KN applicato allo spostamento del punto di colmo di -0,3 m.

In assenza di catena questo valore è di 1,003 KN.

Mettendo in proporzione i valori massimi di carico registrati tra l'arco a due cerniere e a tre, privi di catena, si estrapola una resistenza di quest'ultimo inferiore del 56% rispetto al primo.

Questa differenza scende al 4,7 % inserendo la catena su entrambi gli archi.

Infine, come in precedenza, si passa ad analizzare l'arco composta da due sezioni differenti, il primo tratto di 2 m da 0,03 x 0,049 e il secondo da 0,03 x 0,035, anch'esso avente la catena.

Tab. 27 Valori di carico e spostamento per arco misto

Step	Spostamento	Carico
	(m)	(KN)
1	0	0
2	0,03	2,744
3	0,06	3,269
4	0,09	3,520
5	0,12	3,681
6	0,15	3,798
7	0,18	3,890
8	0,21	3,967
9	0,24	4,032
10	0,27	4,090
11	0,30	4,141

Tab. 28 Grafico carico-spostamento

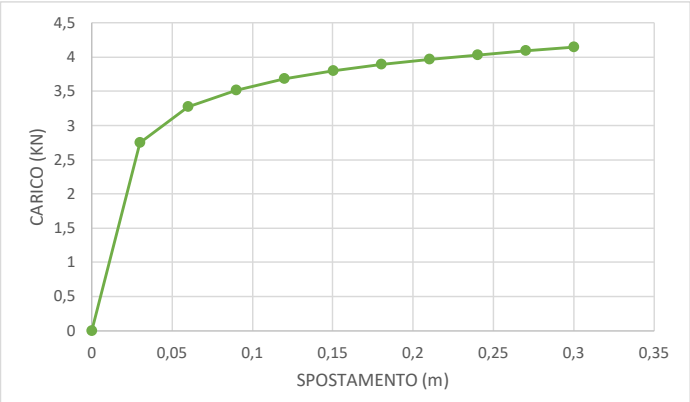


Figura 57

Andamento della deformata allo step 10 per arco a sezione mista

In questo caso, la differenza dei valori di carico registrati è del 4,6 % minore rispetto all'arco a due cerniere.

Con riferimento alla norma colombiana NSR-10, si verifica che gli elementi in bambù resistano ai carichi applicati.

Si utilizzano i valori di resistenza del materiale, estrapolati come riportato al paragrafo 5.2 per carico permanente + temporaneo pari a 13,25 Mpa (compressione) e 18 Mpa (trazione). Utilizzando i diagrammi di sforzo normale e momento e i loro relativi valori massimi, si esegue una verifica a pressoflessione.

Per gli elementi soggetti a pressoflessione la normativa fornisce la seguente formula che viene applicata all'elemento maggiormente sollecitato:

$$\frac{N_c}{F_c} + \frac{M}{M_m\left(1-\frac{1.5N_c}{N_e}\right)} \leq 1$$

Con:

-N_c= Sforzo di compressione assiale applicato all'elemento (N)

-F_c= Resistenza a compressione del materiale

- M= Momento applicato all'elemento

- M_m= Resistenza a flessione del materiale

- N_e= Carico critico di Eulero per compressione assiale

Per la resistenza a flessione, non avendo potuto ricavare i valori tramite test di laboratorio, si utilizza quello forniti dalla normativa: M_m= 15 MPa

Si calcola il carico critico Euleriano come segue:

$$N_e = \frac{\pi^2 E_{0.05} I}{\ell_e^2}$$

Con:

-$E_{0.05}$= Modulo di elasticità al 5 percentile (MPa)

- I= Momento di inerzia della sezione (mm^2)

-ℓ_e^2= Lunghezza effettiva dell'elemento (mm)

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot 9500 \cdot 94500}{3850^2} = 597.9 \text{ N}$$

Figura 58

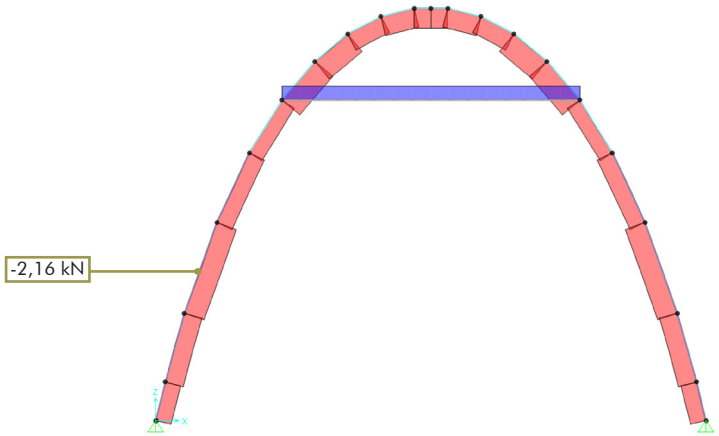


Diagramma di sforzo normale allo step 10 con valore massimo

Figura 59

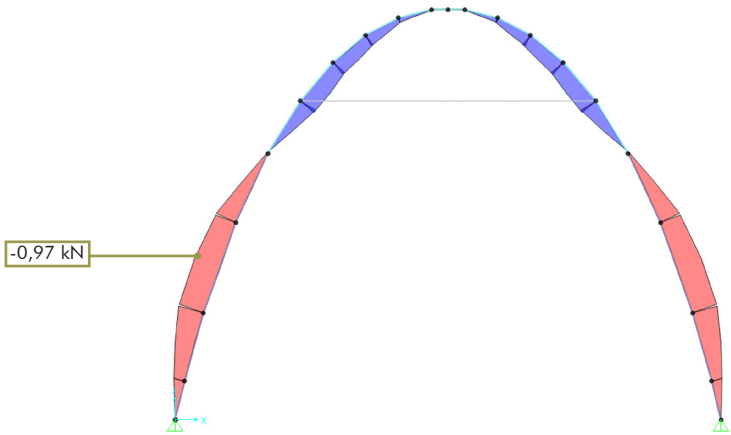


Diagramma del momento allo step 10 con valore massimo

Svolgendo i calcoli:

$$\frac{2.16}{15,9} + \frac{0,97}{15\,(1\text{-}1,5 \cdot 2.16/597,9)} = 0,20 < 1$$

La verifica a pressoflessione è soddisfatta.

5.4 Premesse sull'applicazione delle norme

Per la fase di definizione dei carichi da applicare al modello si fa riferimento a quanto prescritto dalla norma europea EN 13031-1:2019- *Greenhouse - Design and construction,* che detta le linee guida da seguire per questo tipo di struttura. Questa si avvale, inoltre, della norma UNI EN 1991-1-3 e anche delle norme nazionali in vigore, in questo caso la NTC 2018.

In primo luogo la norma suddivide il tipo di struttura che si vuole verificare secondo due categorie: di tipo A e B.

In questo caso il modello appartiene alle serre di tipo B, ovvero in cui il sistema di rivestimento (in questo caso un telo di PVC) tollera gli spostamenti del telaio dovuti alle azioni variabili; ad essa viene associata anche la vita nominale, di 5 anni essendo di tipo "tunnel".

Tab. 29 Classificazione dei tipi di serra

Type see 5.2.2	**Commercial Production Greenhouse Class**		
	Design working life n_d in years [c]		
	15 years	10 years	5 years
Type A	A15	–	–
Type B [a] [b]	B15	B10	B5

[a] A design working life of 5 years may only be used for structures with limited service life, such as tunnels.

[b] Where expensive plants (crops) and /or equipment are present in the greenhouse, the design working life should be not less than 10 years.

[c] A design working life of at least 15 years shall be used for structures dedicated to technical areas (such as electric generator rooms, boiler rooms, storage areas, cold rooms, ferti-irrigation areas, water storage, packing areas, plants (crops) preparation areas, etc.) with low level of authorized personnel.

Estratto dalla norma BS EN 13031-1:2019

Come si evince al paragrafo 5.2.2. della norma EN 13031-1:2019, per questo tipo di serre, con una vita nominale limitata, non è necessaria la verifica agli stati limite di esercizio (SLE), ma solo agli stati limite ultimi (SLU).

La stessa norma definisce l'importanza per la pubblica sicurezza rispetto al collasso delle serre di produzione commerciale come "inferiore rispetto ai normali edifici". Ciò è dovuto al fatto che l'accessibilità è fortemente limitata ad un personale autorizzato, la potenziale perdita economica è limitata al proprietario e l'impatto sull'ambiente in caso di collasso è basso.

La norma rinomina le serre di tipo B10 e B5 come CC0 a cui vengono associati dei "fattori conseguenziali" $K_{FI,i}$ che vanno moltiplicati per i coefficienti parziali per le azioni allo SLU della NTC 2018, γ_F.

$$\gamma_{F,i} = K_{FI,i} \cdot \gamma_F$$

In questo caso $K_{Fi,G}$ e $K_{Fi,Q}$ (per azioni permanenti e variabili) valgono 0.8, mentre $K_{Fi,A}$ (per carichi accidentali) vale 0.6. (Per strutture leggere come le serre tunnel, i carichi accidentali, come quelli da impatto non vanno considerati).

Utilizzando i coefficienti parziali dalla NTC per le verifiche agli stati limite ultimi strutturali, si ottengono:

Carichi permanenti $\gamma_{G1} = 1,3$

Carichi permanenti non strutturali $\gamma_{G2} = 1,5$

Carichi variabili $\gamma_{Qi} = 1,5$

Ne conseguono i seguenti valori di $\gamma_{F,i}$:

Carichi permanenti $\gamma_{G1} = 1,3 \cdot 0,8 =$ **1,04**;

Carichi permanenti non strutturali e variabili $\gamma_{G2} - \gamma_{Qi} = 1,5 \cdot 0,8 =$ **1,2**.

Per quanto riguarda i valori dei coefficienti di combinazione $\psi_{0,j}, \psi_{1,j}, \psi_{2,j}$ ci si affida ai valori delle normative nazionali. Si hanno i seguenti coefficienti:

Azioni variabili	$\psi_{0,j}$	$\psi_{1,j}$	$\psi_{2,}$
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0

Un'altra indicazione che fornisce la norma EN 13031 riguarda le combinazioni del vento; quando si deve considerare l'azione del vento Qk1 con l'azione della neve Qk2, devono essere valutate solo le azioni di pressione positiva sia sulle pareti che sul tetto, quindi non le depressioni.

Inoltre, ricorda che tra i carichi variabili Q_{k3} va considerata l'azione del peso delle piante, eventualmente fossero supportate dalla struttura.

Questa azione è da considerarsi come verticale e uniformemente distribuita e ha valori specifici per le principali tipologie di colture e uno generico, che si decide di inserire nei calcoli, pari a 0,15 kN/m^2. A questo valore vanno considerati altri 0,13 kN/m^2 riferiti a carichi detti di "installazione" generici come i cavi che sorreggono le piante, agli eventuali canali di irrigazione sospesi ecc. Quest'ultimo carico è da considerarsi come permanente non strutturale e uniformemente distribuito.

Infine, per quanto riguarda le strutture ad arco, la normativa all'appendice D ricorda che per tenere in considerazione delle imperfezioni geometriche possibili negli archi, è necessario applicare una forza orizzontale equivalente al punto di chiave, come segue:

$$1/50 \cdot V$$

Dove:

V è il carico verticale totale applicato all'arco.

Ad es. come si vedrà al paragrafo successivo, il carico vento (ii) vale 1,2 kN/m^2 quindi: $1/50 \cdot 1{,}2 =$ **0,024 kN/m^2** di carico orizzontale da aggiungere all'azione della neve.

5.4.1 Combinazioni agli Stati Limite Ultimo

Per le combinazioni di carico allo SLU si segue la tabella esposta in norma come riportato di seguito:

Tab. 30 Combinazioni di carico allo SLU

a) Permanent + Installations + Wind + Snow +Crops					
	Permanent	Installations	Wind	Snow	Crops
a1)	$\gamma_{G1}\, G_{k1}$ +	$\gamma_{G2}\, G_{k2}$ +	$\boldsymbol{\gamma_{Q1}\, Q_{k1}}$ +	$\psi_{Q2}\, \gamma_{Q2}\, Q_{k2}$ +	$\psi_{Q3}\, \gamma_{Q3}\, Q_{k3}$
a2)	$\gamma_{G1}\, G_{k1}$ +	$\gamma_{G2}\, G_{k2}$ +	$\psi_{Q1}\, \gamma_{Q1}\, Q_{k1}$ +	$\boldsymbol{\gamma_{Q2}\, Q_{k2}}$ +	$\psi_{Q3}\, \gamma_{Q3}\, Q_{k3}$
a3)	$\gamma_{G1}\, G_{k1}$ +	$\gamma_{G2}\, G_{k2}$ +	$\psi_{Q1}\, \gamma_{Q1}\, Q_{k1}$ +	$\psi_{Q2}\, \gamma_{Q2}\, Q_{k2}$ +	$\boldsymbol{\gamma_{Q3}\, Q_{k3}}$

Nel nostro caso:

- G1: carico permanente (peso della struttura)
- G2: carico di installazione
- Qk1: vento in direzione X
- Qk2: vento in direzione Y
- Qk3: carico neve (i e ii, come si vedrà al paragrafo 5.5)
- Qk4: carico delle colture

Successivamente si procederà al calcolo delle seguenti combinazioni a partire dalla combinazione fondamentale e applicando i fattori conseguenziali.

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \ldots$$

-Combinazione A (neve caso i) :

a1): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2· Qk1) + (1,2 · 0,6 · Qk2) + (1,2· 0,5 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

a2): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2 · 0,6 · Qk1) + (1,2 · Qk2) + (1,2 · 0,5 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

a3): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2 · 0,6 · Qk1) + (1,2· 0,6 · Qk2) + (1,2 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

-Combinazione B (neve caso ii):

b1): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2· Qk1) + (1,2 · 0,6 · Qk2) + (1,2· 0,5 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

b2): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2 · 0,6 · Qk1) + (1,2 · Qk2) + (1,2 · 0,5 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

b3): (1,04 · G1) + (1,2 · G2) + (1,2 · 0,6 · Qk1) + (1,2· 0,6 · Qk2) + (1,2 · Qk3) + (1,2 · 1 · Qk4)

5.5 Carico neve

Per il calcolo del carico di neve sulla copertura si fa riferimento alla norma europea UNI EN 1991-1-3_2004 e alla norma nazionale NTC 2018.

Il carico provocato dalla neve sulle coperture (agente in direzione verticale e in riferimento alla proiezione orizzontale della superficie della copertura) è valutato tramite l'espressione:

$$q_s = q_{sk} \cdot u_i \cdot C_E \cdot C_t$$

Con:

- q_s : carico neve sulla copertura;
- q_{sk} : valore caratteristico di riferimento del carico neve al suolo (kN/m^2);

Questo valore è indicativo della zona di riferimento della costruzione e dell'altezza sul livello del mare (a_s); si ipotizza di ubicare la serra a Torino, dunque secondo la NTC, in "Zona I - Alpina" a 200 m slm, di conseguenza:

$q_{sk} = 1{,}50$ kN/m^2 per $a_s \leq 200$ m

u_i : coefficiente di forma della copertura;

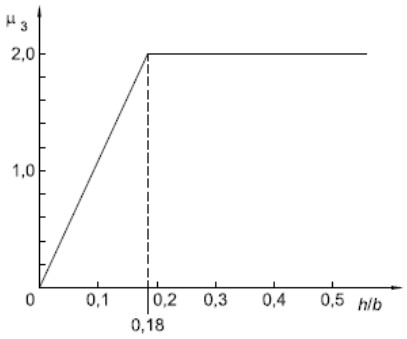
La norma nazionale non fornisce indicazioni di riferimento per quanto riguarda le coperture cilindriche, alla quale si può assimilare la forma della serra in questione. La norma UNI EN, invece, fornisce le suddette al paragrafo 5.3.5. come segue:

$u_3 = 0$ per $\beta > 60°$

$u_3 = 0{,}2 + 10 \cdot h/b$ per $\beta \leq 60°$

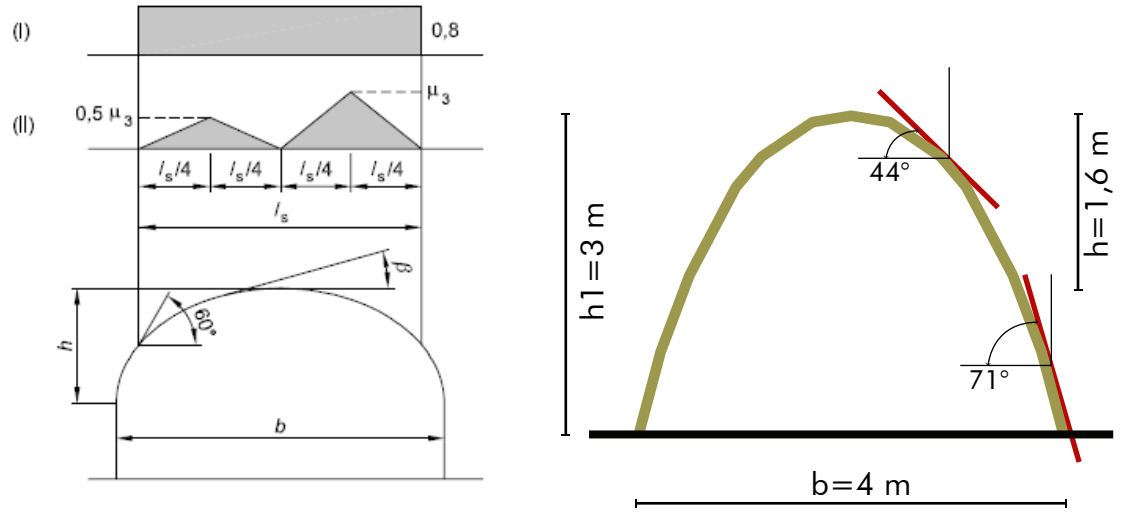
con: u_3 per il quale si suggerisce un limite superiore massimo di 2,0.

Nel caso del modello di serra in questione, gli angoli tangenti sono riportati nella figura seguente:



Norma UNI EN 1991-3-2004 figura 5.5

Figura 60



A sinistra: figura estratta da UNI EN 1991-1-3_2004, a destra: schema di progetto

Si divide la struttura in una prima zona che non presenta accumuli nevosi (da quota 0 a circa 1,5 m, punto in cui l'angolazione inizia ad essere < 60°) e una seconda zona in cui essendo $\beta = 44$ si calcola u_3 come segue:

$$u_3 = 0{,}2 + 10 \cdot 0{,}4 = 4{,}2 \longrightarrow 2$$

C_E: coefficiente di esposizione;

È un coefficiente che può modificare il valore di carico in funzione delle caratteristiche dell'area in cui sorge la struttura. Si assume pari a 1, cioè relativo ad un contesto definito dalla norma NTC "normale".

C_t: coefficiente termico

Tiene conto della riduzione del carico neve a causa dello scioglimento della stessa dovuto alla perdita di calore della costruzione. In assenza di uno specifico studio si deve utilizzare $C_t = 1$.

Quindi i valori di carico da applicare risultano:

Caso (i, assenza di vento): 1,5 · 0,8 · 1 ·1= **1,2 KN/m²**

Caso (ii, presenza di vento): vertice triangolo 1= **0,75 KN/m²**;

vertice triangolo 2= **3 KN/m²**

5.6 Carico vento

Anche per le azioni del vento sulle costruzioni si è fatto riferimento alla norma europea UNI EN 1991-1-4_2004, quella nazionale NTC 2018 e la CNR DT 207/2008.

Le superfici di un edificio possono essere colpite direttamente o indirettamente dall'azione del vento, sviluppando aree soggette a pressioni (dette sopravento) e depressioni (superficie sottovento).

La pressione del vento si calcola tramite l'espressione:

$$p = q_r \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

Con:

-q_r: pressione cinetica di riferimento (N/m^2), data dall'espressione:

$$q_r = 1/2 \cdot r \cdot v_r^2$$

Con:

r: densità dell'aria (1,25 kg/m^3);

V_r: velocità di riferimento;

V_b: velocità base di riferimento del vento (m/s); è un valore caratteristico della velocità del vento a 10 m dal suolo (categoria di esposizione del terreno II) mediata su 10 minuti. Si assume convenzionalmente come:

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

dove:

c_a : coefficiente di altitudine, fornito dalla relazione:

$$c_a = 1 \qquad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \cdot (a_s/a_0 - 1) \qquad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

Con:

a_s: altitudine sul livello del mare (nel caso della serra si assume pari a 200 m);

$v_{b,0}$, a_0, k_s : parametri forniti da tabella in funzione della regione in cui sorge la costruzione. Per il Piemonte si assume:

Zona	Regione	$v_{b,0}$ (m/s)	a_0 (m)	k_s
1	Piemonte	25	1000	0,4

La velocità di riferimento è poi "pesata" in base al periodo di ritorno (10 anni) della costruzione in oggetto, tramite la formula:

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

dove:

c_r: coefficiente di ritorno; funzione del periodo di ritorno del progetto T_R.

$$c_r = 0{,}75\sqrt{[1-0{,}2 \cdot \ln(-\ln(1-1/T_R))]}$$

Essendo T_R = 10 anni, c_r risulta pari a 0,85.

V_r sarà dunque uguale a 25·0,84= 21.

Avendo calcolato Vr, si procede al calcolo di q_r: $1/2 \cdot r \cdot 21^2 = 275{,}625$ N/m^2

-c_e: coefficiente di esposizione, dipendente dall'altezza sul suolo del punto considerato (z), dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito. Per altezze non superiori a z= 200 m, si usa la formula:

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) \cdot (7 + c_t \ln(z/z_0)) \qquad \text{per } z \geq z_{min}$$

$$c_e\, z) = c_e(z_{min}) \qquad \text{per } z < z_{minc}$$

Con:

c_t: coefficiente di topografia, generalmente pari a 1.

k_r, z_0, z_{min}: valori assegnati da tabella in base alla categoria di esposizione del sito. In assenza di analisi specifiche, si utilizza la posizione geografica del sito e la classe di rugosità del terreno, definito in tabella come segue:

Classe di rugosità	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni, …); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi...)

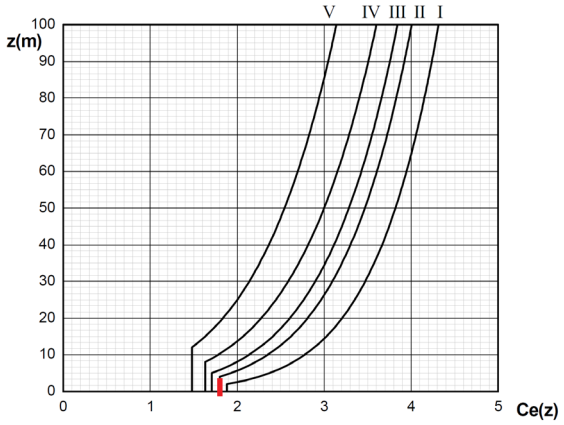
Nel caso della serra si decide per la classe di rugosità D, a cui si allega la tabella che definisce la classe di esposizione in base anche alla zona (1), si ricava una classe di esposizione II (per altitudine entro i 500 m).

Ne consegue:

categoria esposizione	K_r	Z_0 (m)	Zmin (m)
II	0,19	0,05	4

Si calcola il coefficiente di esposizione in base all'altezza del colmo (3 m), che essendo < di Zmin (4 m) si ottiene tramite diagramma presente in norma NTC e risulta pari a 1,8:

Tab. 31



Andamento del coefficiente di esposizione c_e in funzione della quota z=3 (per c_i=1)

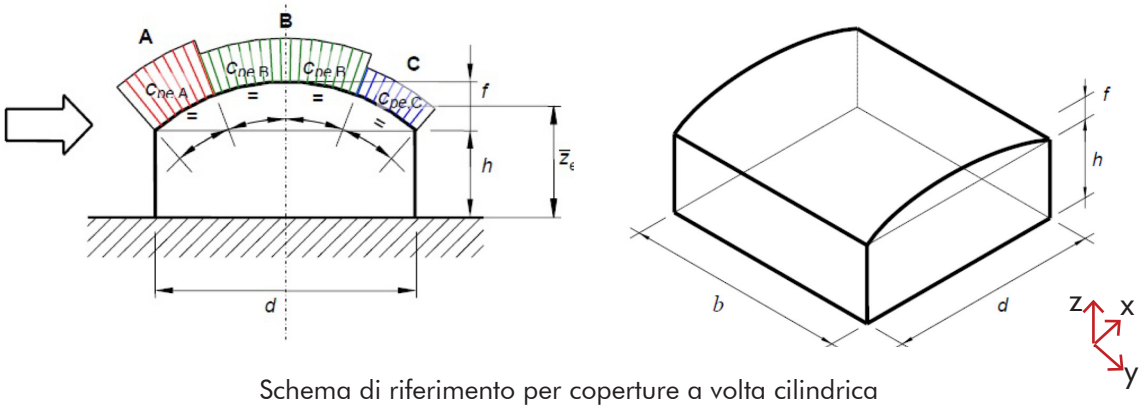
-c_d: coefficiente dinamico, che tiene conto degli effetti riduttivi dovuti alla non contemporaneità delle massime pressioni locali. Può essere assunto pari a 1 per edifici "regolari" (non superiori a 80 m di altezza).

-c_p: coefficiente di forma (o aerodinamico), funzione della geometria della costruzione, delle sue dimensioni e dell'orientamento rispetto al vento.

Si distingue in un coefficiente C_{pe} esterno e un coefficiente C_{pi} interno (da prendere in considerazione se la costruzione non è stagna, come per il caso di progetto).

Nel caso della serra in questione, si tratta di una superficie assimilabile ad una forma cilindrica; nella UNI EN si raccomanda di dividere la superficie della stessa in tre zone, come di seguito.

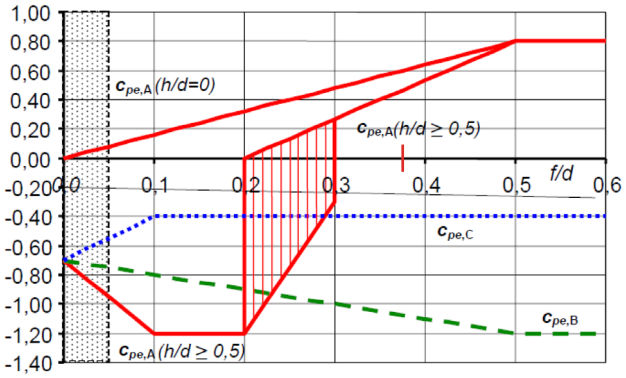
Figura 61



Schema di riferimento per coperture a volta cilindrica

Si calcolano i relativi coefficienti Cpe.A (sopravento), Cpe.B e Cpe.C (sottovento) tramite il diagramma funzione dei rapporti f/d e h/d:

Figura 62



Coefficienti di pressione per coperture a volta cilindrica, tratta da norma CNR DT 207/2008

Con:
f: freccia= 1,5 m - d: larghezza= 4 m - h: gronda= 1,5 m
f/d= 0,375 - h/d= 0,375

Dalla figura 62 risulta:
per h/d ≥ 0,5:
- Cpe,A,a= +0,5
- Cpe,A,b= 0:
per h/d=0
- Cpe,A,c= +0,6

Poiché 0< h/d < 0,5 e f/d <0,5 è necessario operare per interpolazione tramite la formula:

$$Vk= k/0,5 \cdot (Cpe,A,a - Cpe,A,c) + Cpe,A,c$$

Con:
K=h/d

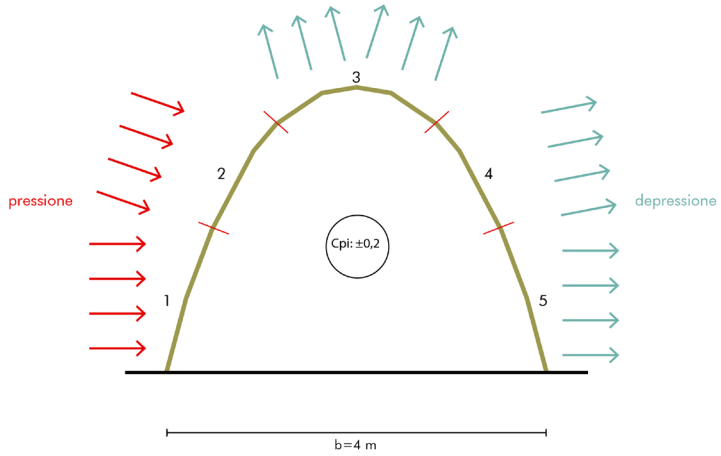
-Interpolazione tra Cpe,A,a e Cpe,A,c:
0,375/0,5 · (0,5-0,6)+0,6= +0,525
-Interpolazione tra Cpe,A,b e Cpe,A,c:
0,375/0,5 · (0-0,6)+0,6= +0,15
Si decide di utilizzare solo il primo valore poiché peggiorativo.

	Cpe,A	Cpe,B	Cpe,C
direzione X	+0,525	-1,1	-0,4

Il coefficiente di pressione interna, poiché si assume che la serra non sia stagna e presenta un'apertura (porta d'ingresso) con percentuale di superficie < di 1/3 di quella totale, vale: Cpi: ± 0,2 che deve essere sottratto o aggiunto scegliendo il

segno in modo da peggiorare la spinta esercita.

Per il vento in direzione X la struttura è divisa in 5 superfici come segue:



-Superficie 1:

Cp= Cpe,1+Cpi: 0.8 (per inclinazioni prossime ai 90°sopravento)+0,2 = 1

p= 275,625 ·1,8·1·1 = **496,12 N/m²**

-Superficie 2:

Cpe,2 (corrispondente a Cpe,A) +Cpi: 0,525 +0,2 = 0,725

p=275,625 ·1,8·0,725·1 = **359,69 N/m²**

-Superficie 3:

Cpe,3 (corrispondente a Cpe,B) +Cpi: -1,1 -0,2 = -1,3

p= 275,625 ·1,8·(-1,3)·1 = **-644,96 N/m²**

-Superficie 4:

Cpe,4 (corrispondente a Cpe,C) +Cpi: -0,4 -0,2= -0,6

p= 275,625 ·1,8·(-0,6)·1 = **-297,67 N/m²**

-Superficie 5:

Cpe,5 +Cpi: -0,4 (per inclinazioni prossime ai 90°sottovento) -0,2= -0,6

p= 275,625 ·1,8·(-0,6)·1 = **-297,67 N/m²**

Per il vento in direzione Y la struttura è, invece, sollecitata da una forza uniforme su tutta la superficie perpendicolare alla direzione del vento.

In maniera analoga a quanto accade sulla superficie 1 per il vento in direzione X, la pressione esercitata sulla superficie vale quindi:

Cp= Cpe+Cpi: 0.8 (per inclinazioni prossime ai 90°sopravento)+0,2 = 1

p= 275,625 ·1,8·1·1 = **496,12 N/m²**

Capitolo 6 Risultati dell'analisi

Ho analizzato il comportamento della struttura su software, dopo aver caratterizzato gli elementi che la compongono. In particolare, le sezioni degli archi e i traversi longitudinali sono definiti come elementi "frame" e hanno le proprietà del bambù analizzato in laboratorio. I traversi sono definiti come culmi di bambù intero aventi diametro di 3 cm e spessore di parete 6 mm, dato dalla media delle misurazioni alla base e alla cima delle canne acquistate.

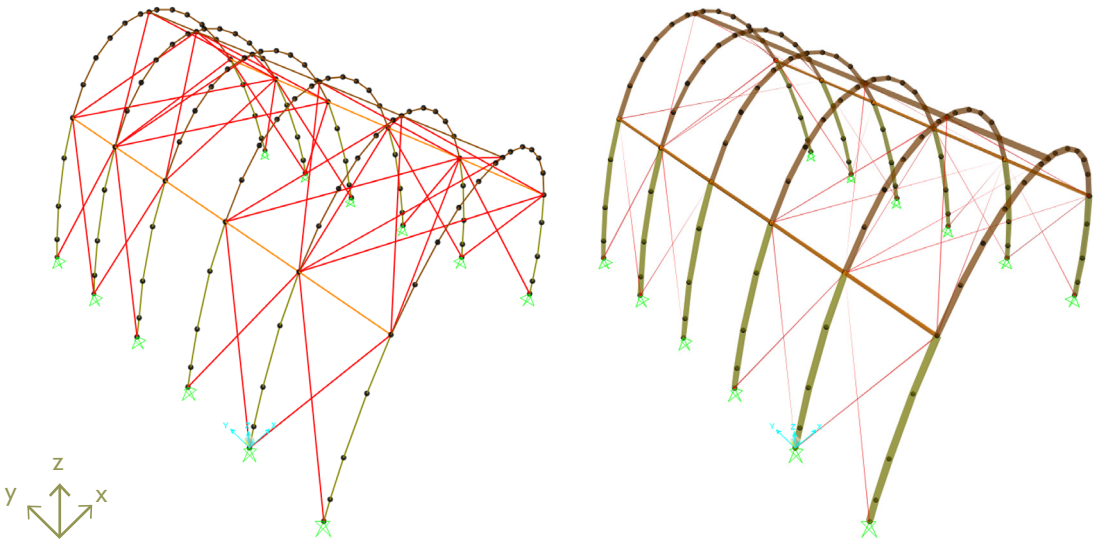
Sia le colonne che i traversi in bambù vengono definiti come elementi continui, non tenendo in considerazione i nodi.

I controventi, che a seguito delle prime analisi risultano necessari, vengono definiti come "cavi" in acciaio di diametro 1,5 mm e si utilizzano i valori di default del software per questo materiale.

Per le analisi effettuate il modello di riferimento ha dimensioni 6 x 4, ovvero sei archi in successione distanziati di un metro, privi delle chiusure frontali. Ho deciso di analizzare gli archi composti da due sezioni diverse, il primo tratto formato da sette strisce per i primi 2 metri e il secondo tratto da cinque strisce per i restanti 1.85 m, come descritto al capitolo 5.

Si illustrano in forma grafica i risultati di maggior interesse, come gli inviluppi delle deformazioni e sollecitazioni per le varie combinazioni di carico.

Figura 63



A sinistra: schema della struttura; a destra: sezioni degli elementi

Combinazione a1 (vento in direzione X)

Figura 64

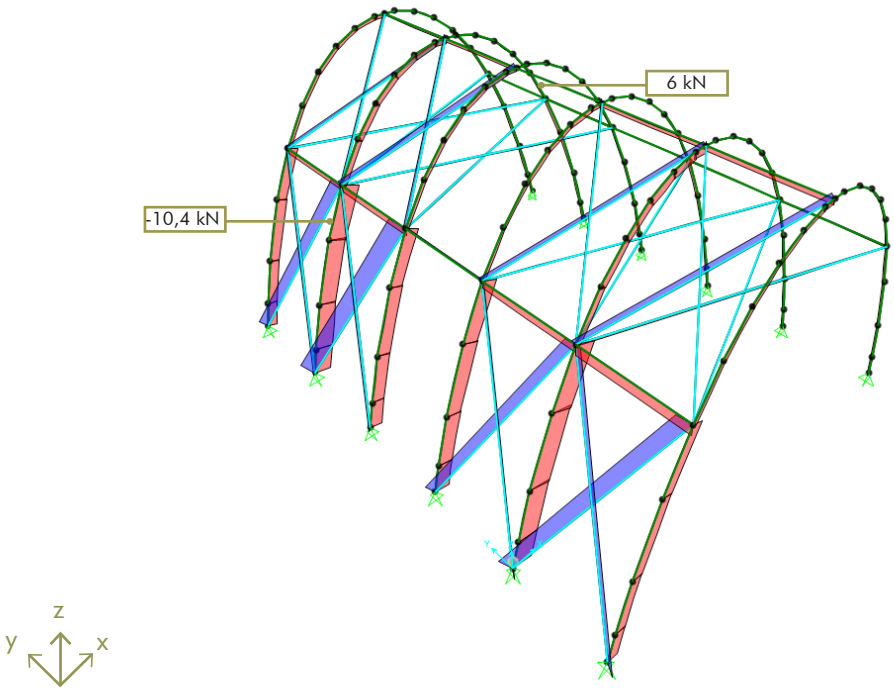


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 65

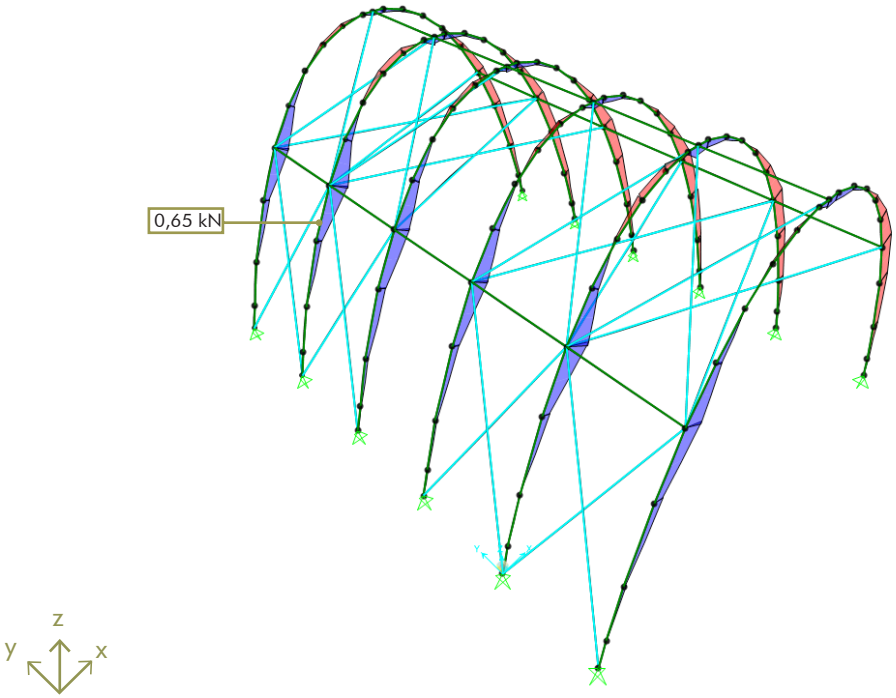


Diagramma del momento con valore massimo

Con riferimento alla norma colombiana NSR-10, ho verificato che gli elementi in bambù che compongono la struttura resistano ai carichi di progetto riscontrati, come svolto al paragrafo 5.3.3, in particolare le verifiche vengono eseguite per la pressoflessione e flessotensione.

$$\frac{10,4}{15,9} + \frac{0,65}{15(1\text{-}1,5\cdot 10,4/597,9)} = 0,7 < 1$$

La verifica a pressoflessione è soddisfatta.

Si procede in maniera analoga per la verifica a flessotensione, riprendendo la norma colombiana NSR-10 che fornisce la seguente formula:

$$\frac{N_t}{F_t} + \frac{M}{M_m} \leq 1$$

Con:

-N_t= Tensione assiale applicato all'elemento (N)

-F_t= Resistenza a trazione del materiale

Svolgendo i calcoli:

$$\frac{6}{21,68} + \frac{0,65}{15} = 0,32 < 1$$

Anche la verifica a flessotensione è soddisfatta.

Figura 66

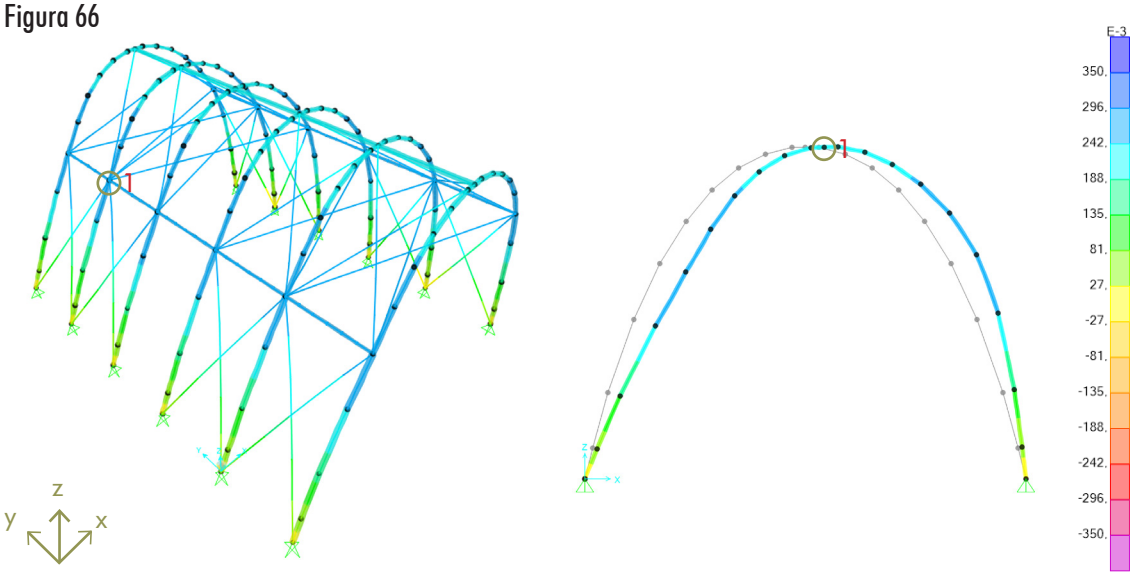


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Il grafico della deformata sovraesposto è quello più rilevante per questo tipo di combinazione dove l'azione del vento in direzione X è la predominante.

Il punto 1, che coincide con i traversi longitudinali è il nodo che subisce maggiormente la deformazione e presenta i seguenti valori:

Ux: 0,44 m

Uy: 0,001 m

Uz: -0,0018 m

Figura 67

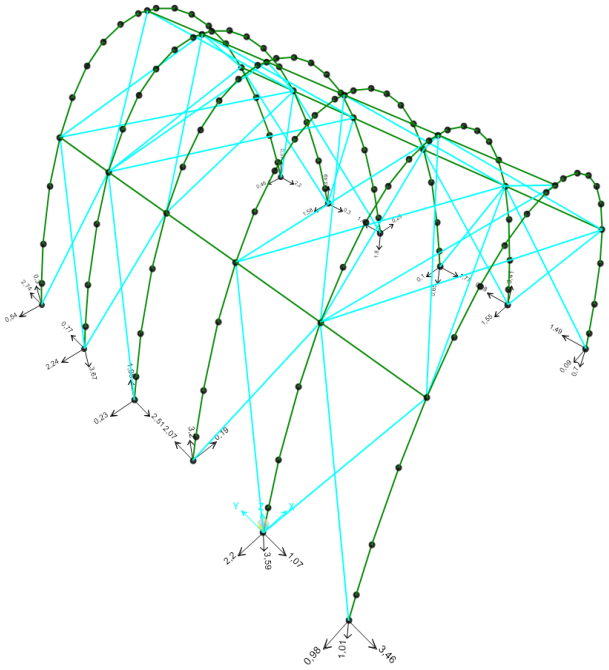


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

Per completezza, di seguito si illustrano i risultati anche delle altre combinazioni.

Combinazione a2 (vento in direzione Y)

Figura 68

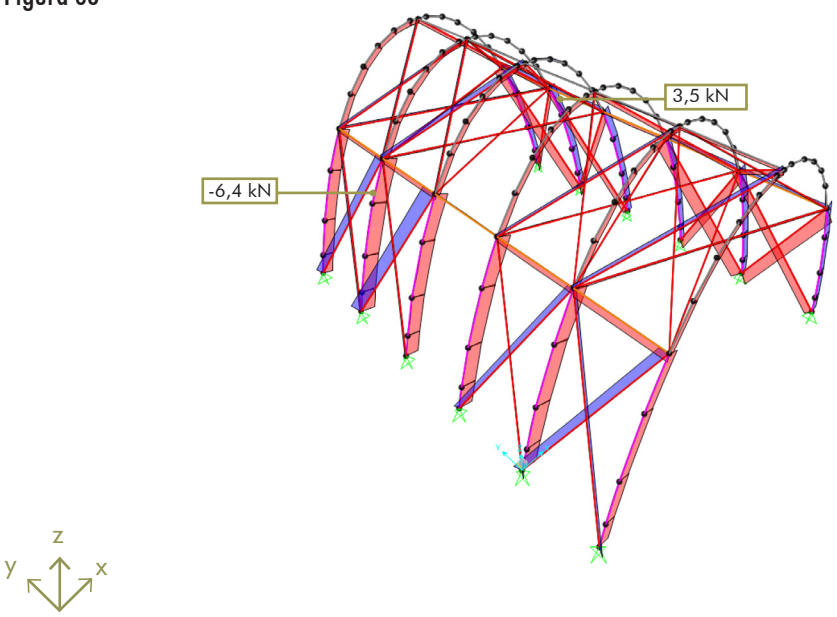


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 69

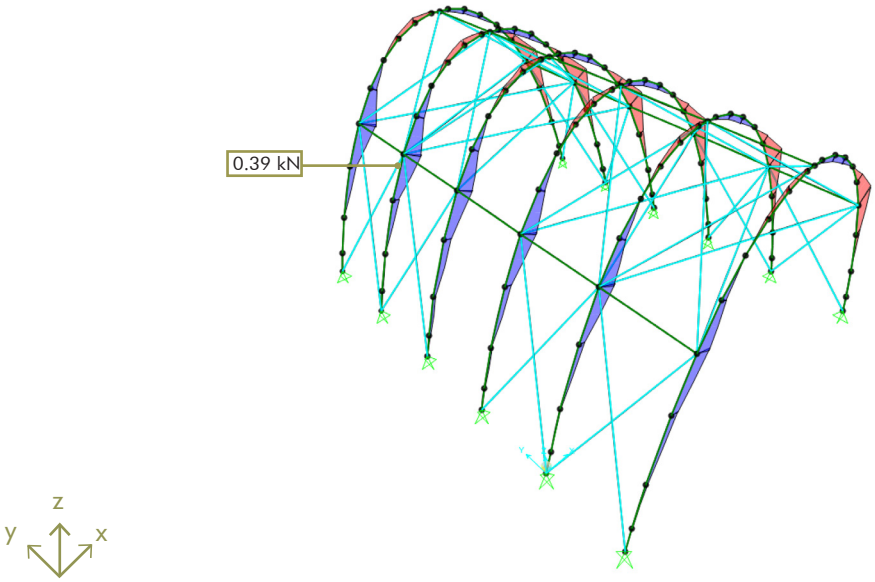


Diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{6,4}{15,9} + \frac{0,39}{15\,(1\text{-}1,5 \cdot 5,3/597,9)} = 0,43 < 1$$

$$\frac{3,5}{21,68} + \frac{0,39}{15} = 0,19 < 1$$

Figura 70

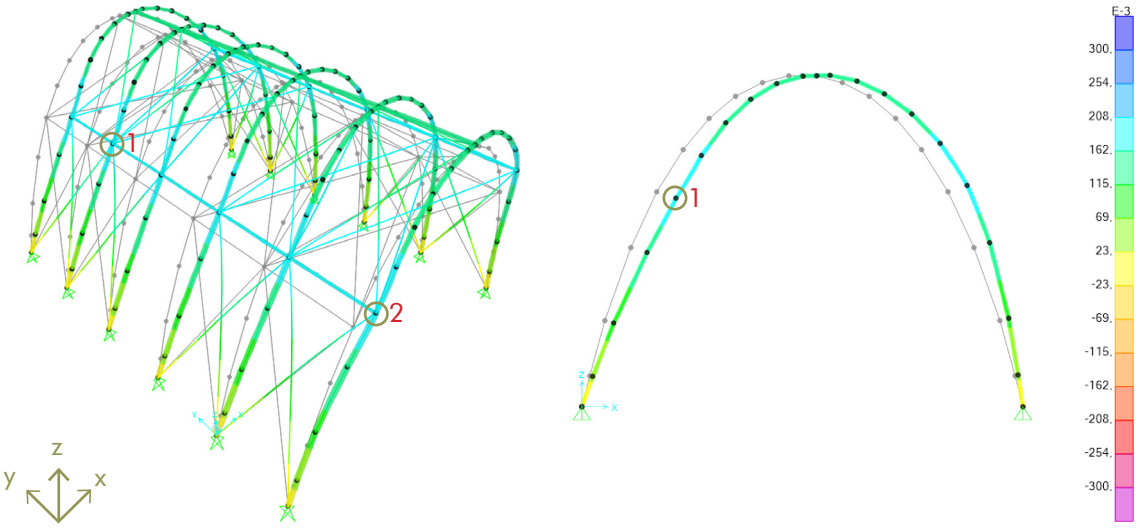


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Nella combinazione delle azioni a2, l'azione del vento in direzione y è la predominante, ma la struttura tende a deformarsi maggiormente in direzione x come riportato in figura 68.

Il punto 1 e 2 subiscono i seguenti spostamenti:

1) Ux: 0,36 m
   Uy: 0,0046 m
   Uz: -0,12 m

2) Ux: 0,36 m
   Uy: 0,003
   Uz: -0,12 m

Figura 71

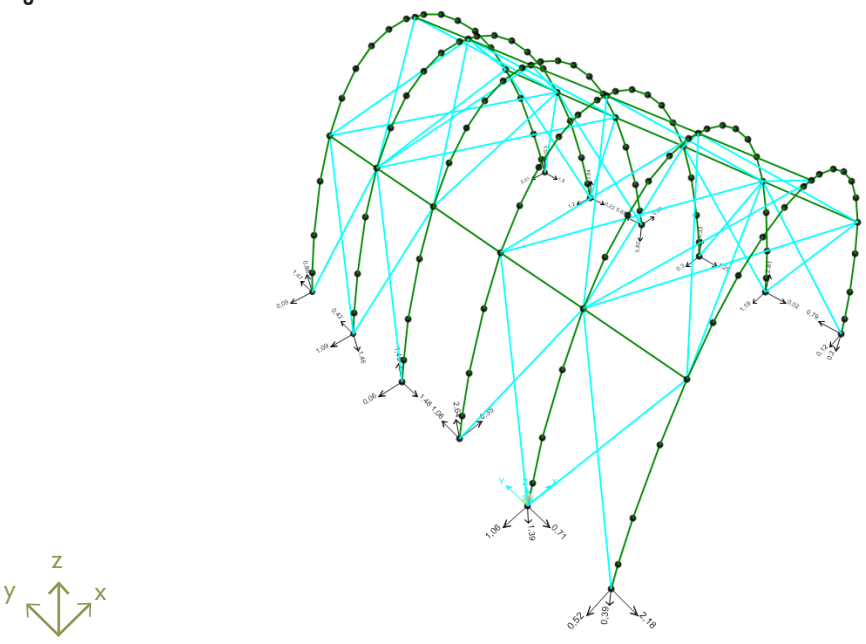


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

Combinazione a3 (neve)

Figura 72

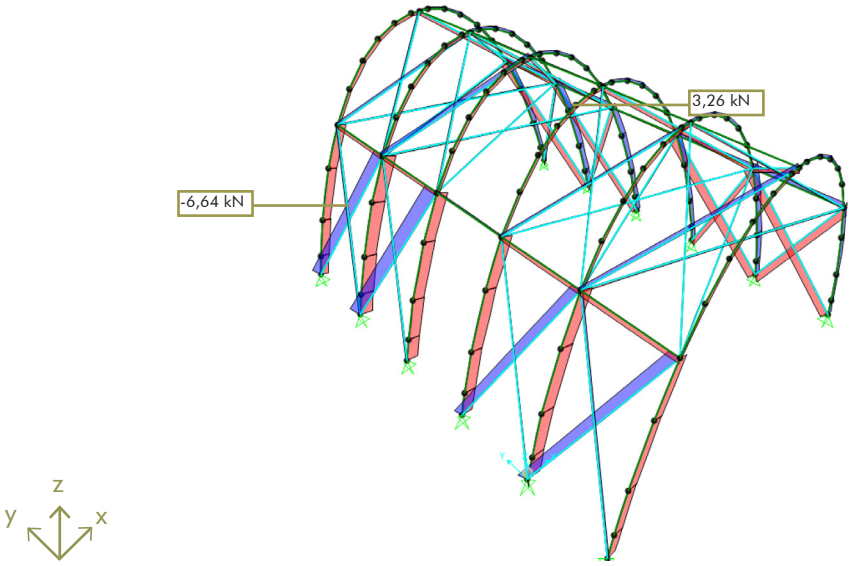


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 73

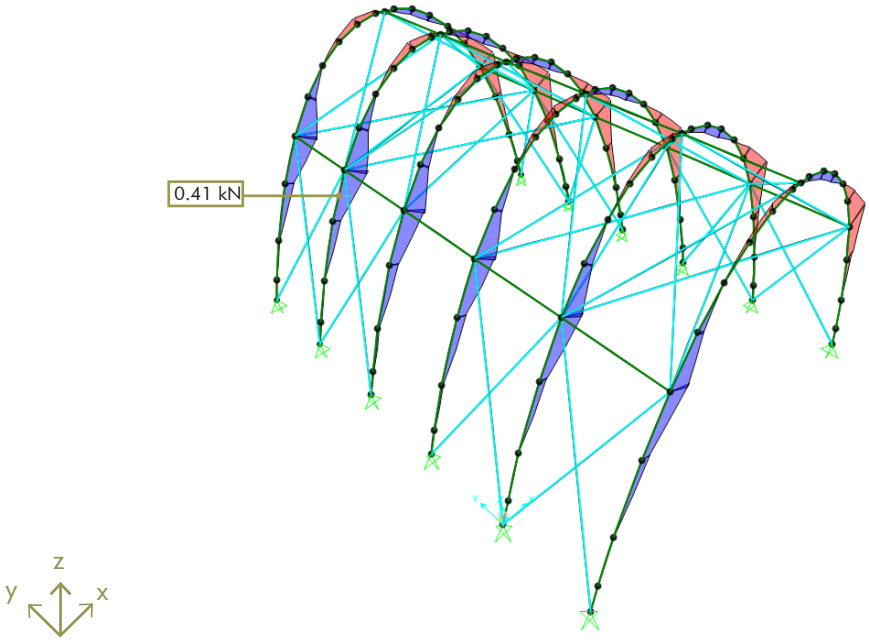


Diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione e flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{6,64}{15,9} + \frac{0,41}{15\,(1\text{-}1,5\cdot 6,64/597,9)} = 0,45 < 1$$

$$\frac{3,26}{21,68} + \frac{0,41}{15} = 0,18 < 1$$

Figura 74

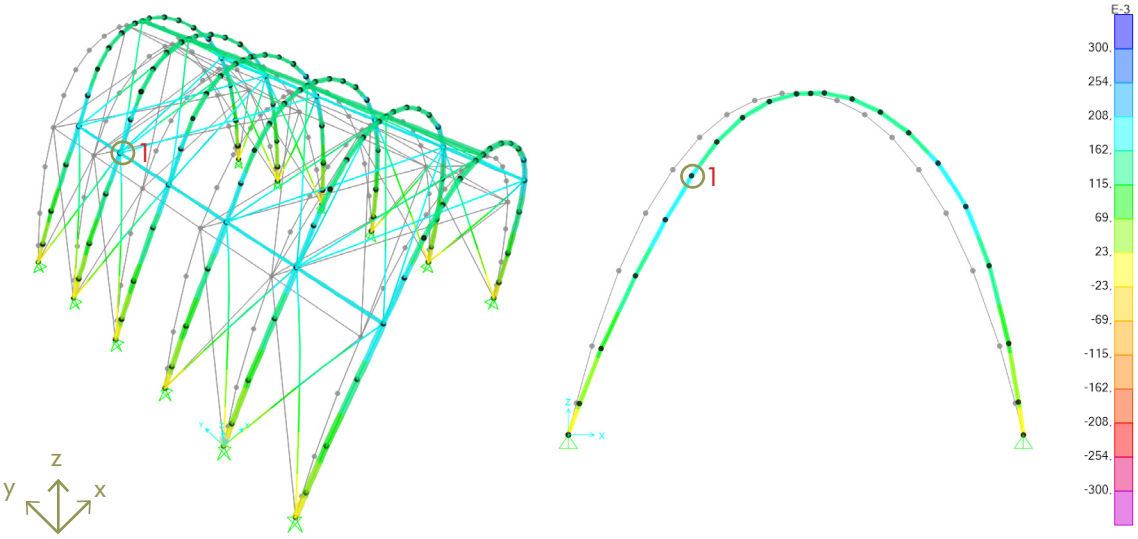


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Anche per la combinazione a3, in cui la forza verticale della neve predomina, si osserva uno spostamento maggiore del punto 1 in direzione X; si riportano i valori per le tre direzioni:

Ux: 0,36 m

Uy: 0,0016 m

Uz: -0,12 m

Figura 75

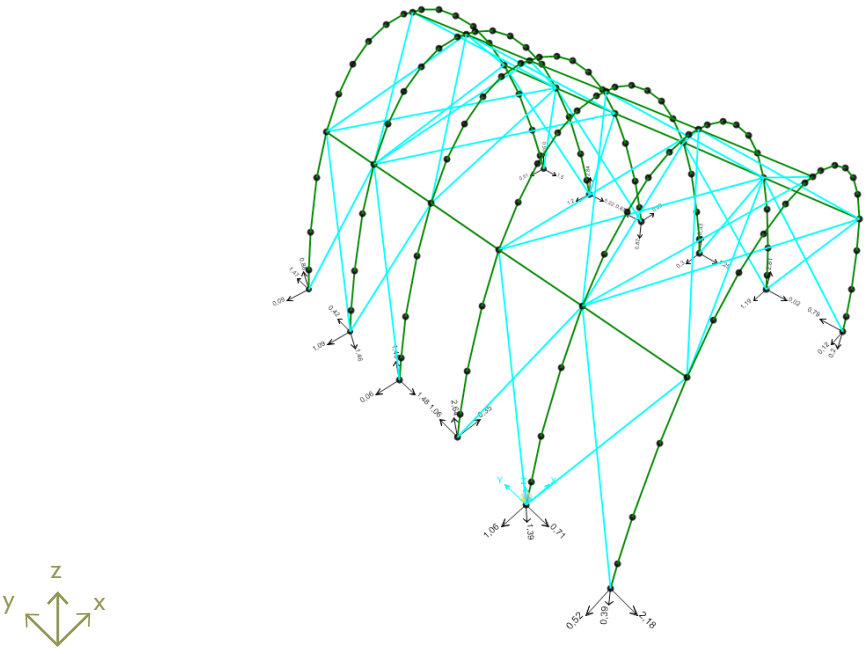


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

Combinazione b1 (vento in direzione X)

Figura 76

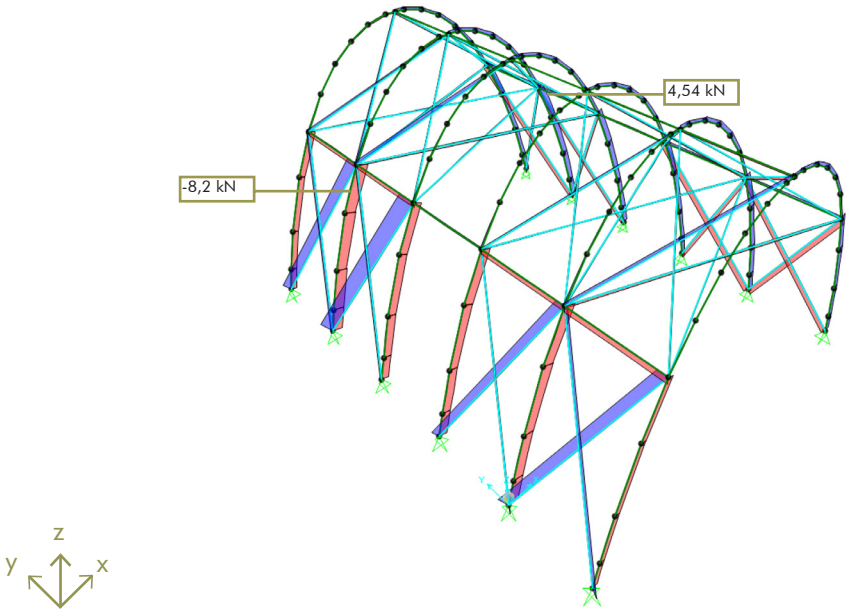


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 77

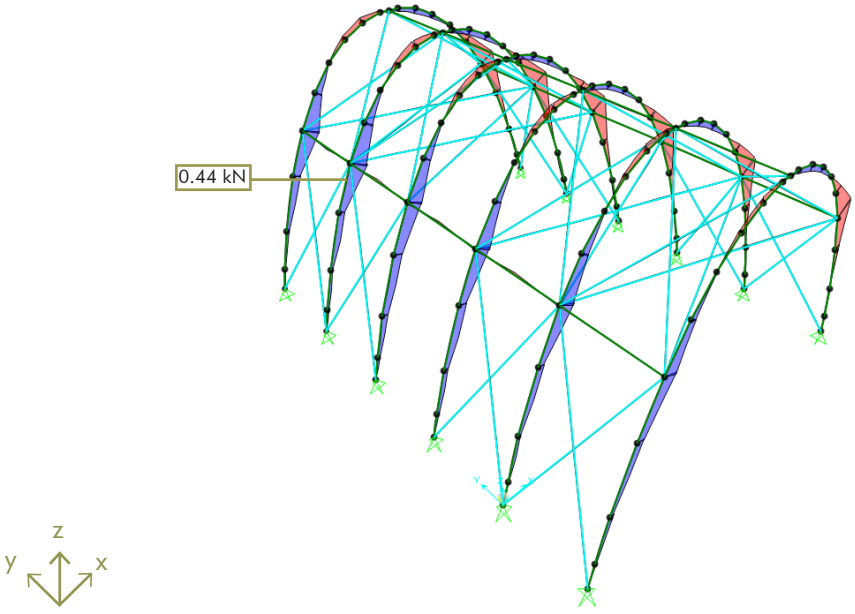


Diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione e flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{8,2}{15,9} + \frac{0,44}{15\,(1\text{-}1,5 \cdot 8,2/597,9)} = 0,55 < 1$$

$$\frac{4,54}{21,68} + \frac{0,44}{15} = 0,24 < 1$$

Figura 78

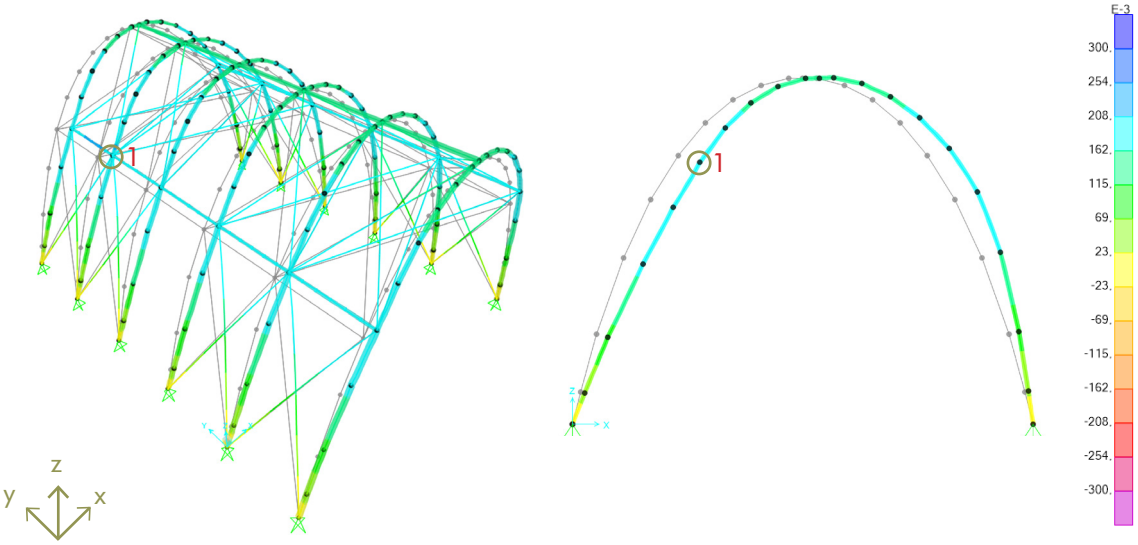


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Per la combinazione b1, in cui predomina la forza orizzontale del vento in direzione X, si osserva uno spostamento maggiore nel punto 1 in direzione X; si riportano i valori per le tre direzioni:

Ux: 0,42 m

Uy: 0,0056 m

Uz: -0,14 m

Figura 79

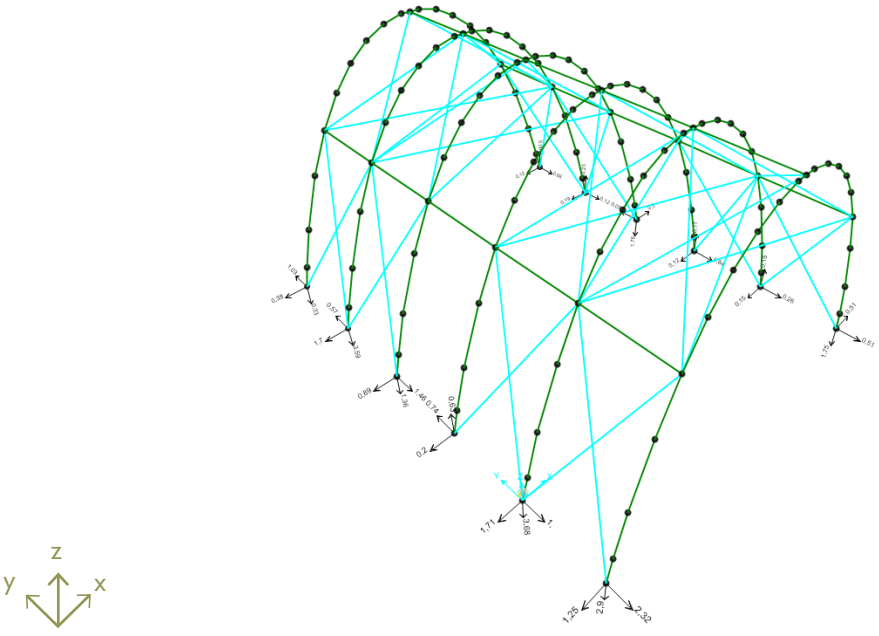


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

Combinazione b2 (vento in direzione Y)

Figura 80

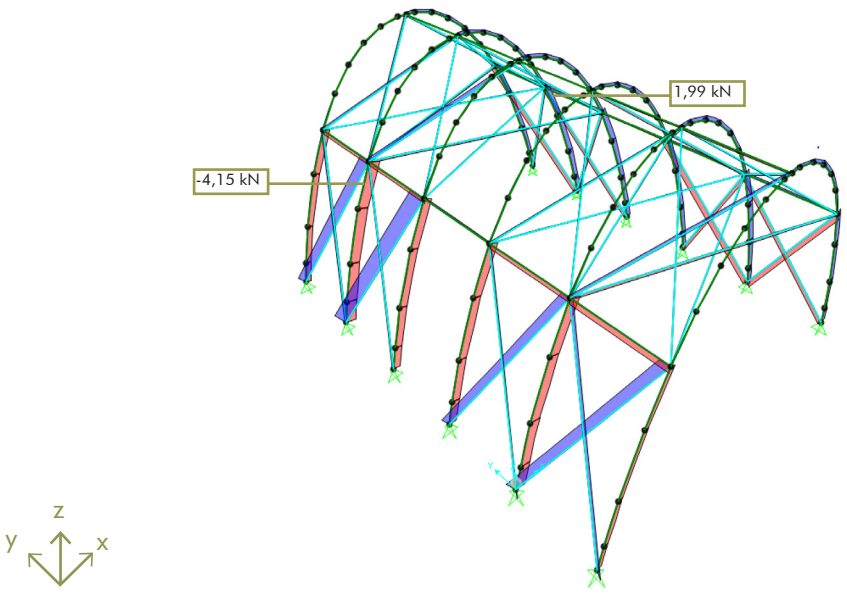


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 81

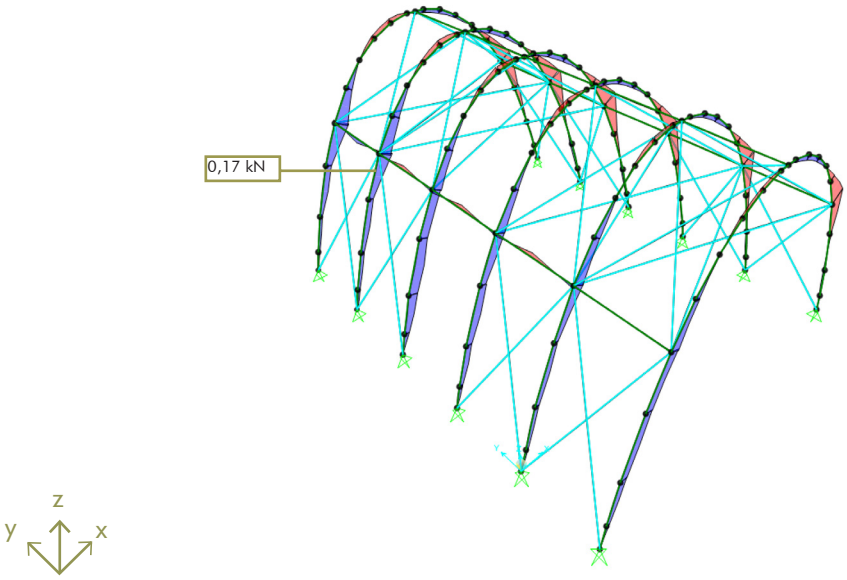


Diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione e flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{4,15}{15,9} + \frac{0,17}{15(1-1,5\cdot 4,15/597,9)} = 0,28 < 1$$

$$\frac{1,99}{21,68} + \frac{0,17}{15} = 0,11 < 1$$

Figura 82

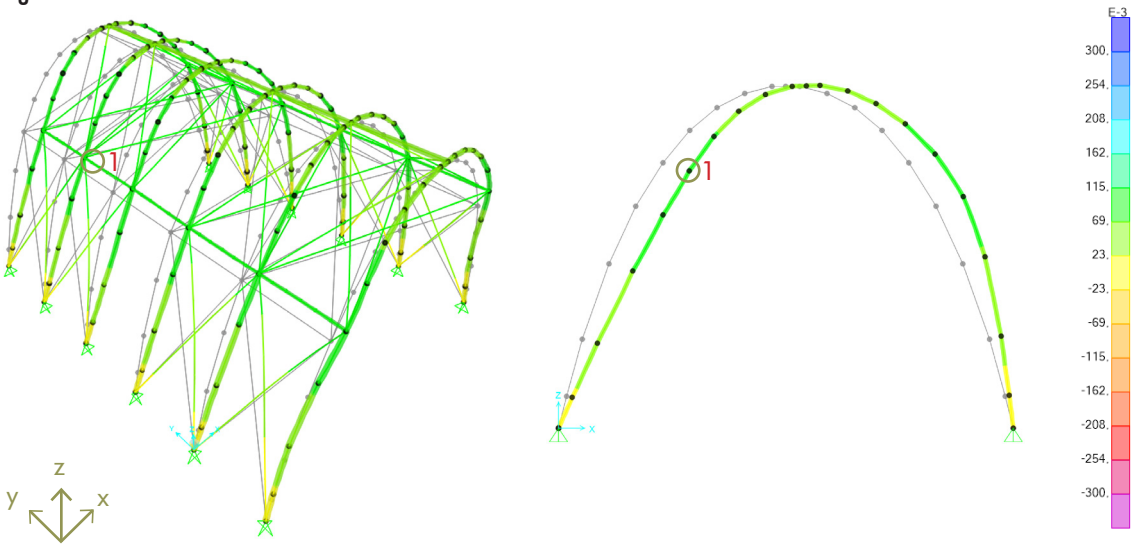


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Per la combinazione b2, in cui la forza orizzontale del vento in direzione x predomina, si osserva uno spostamento maggiore nel punto 1 in direzione X; si riportano i valori per le tre direzioni:

Ux: 0,17 m

Uy: 0,0076 m

Uz: -0,059 m

Figura 83

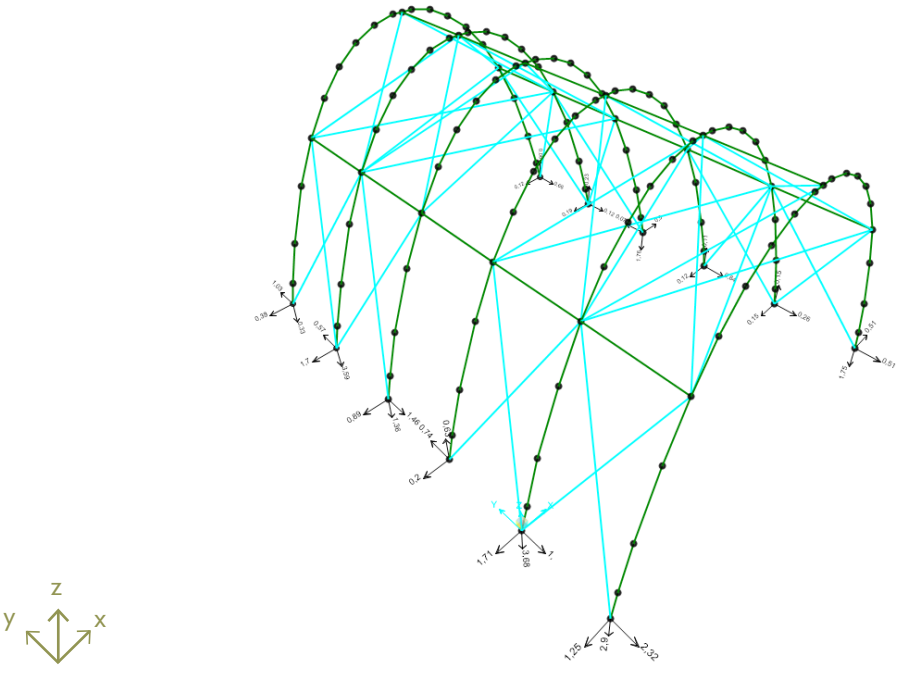


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

Combinazione b3 (neve)

Figura 84

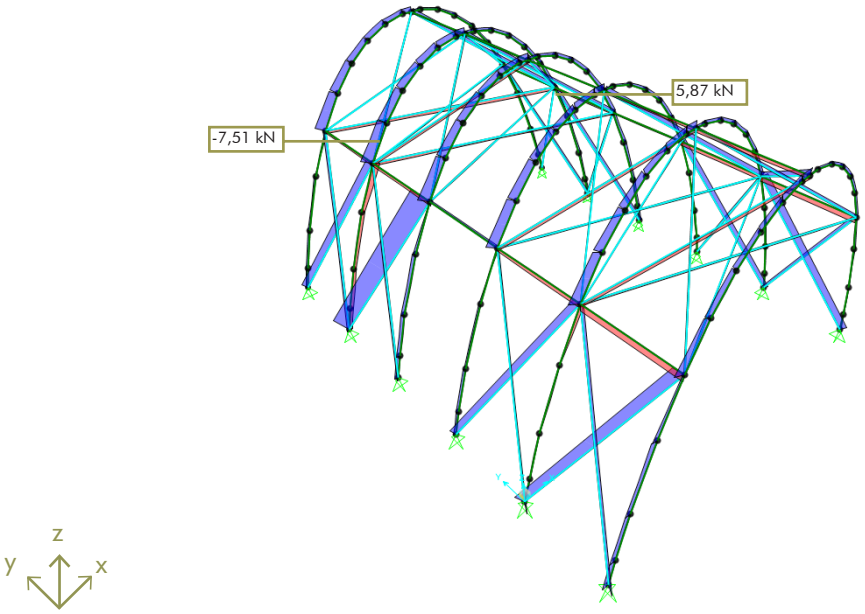


Diagramma degli sforzi assiali con valore massimo;
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione

Figura 85

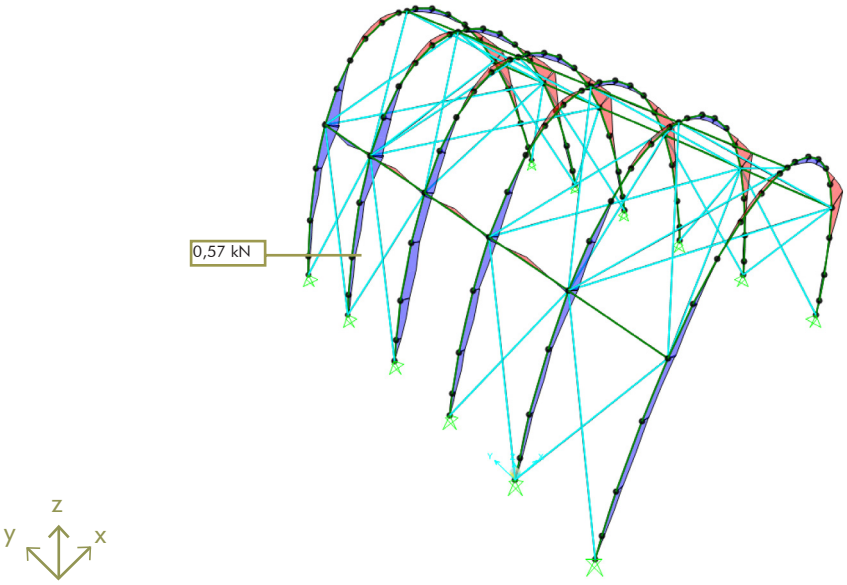


Diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione e flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{7,51}{15,9} + \frac{0,57}{15\,(1-1,5\cdot 7,51/597,9)} = 0,51 < 1$$

$$\frac{5,87}{21,68} + \frac{0,57}{15} = 0,30 < 1$$

Figura 86

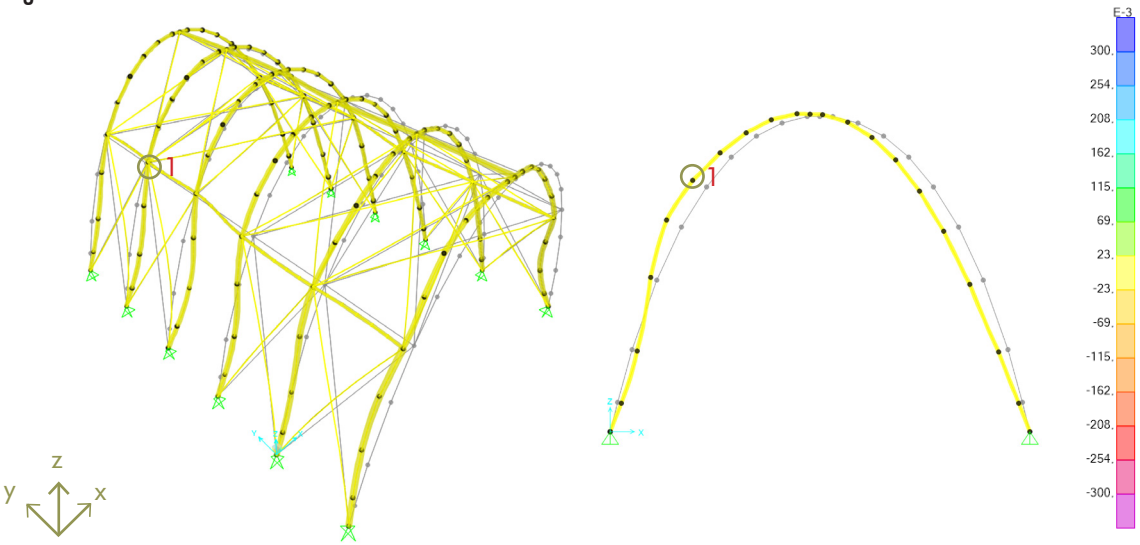


Diagramma della deformata per l'asse X: a sinistra vista assonometrica; a destra vista frontale

Per la combinazione b2, in cui la forza orizzontale del vento in direzione x predomina, si osserva uno spostamento maggiore nel punto 1 in direzione X; si riportano i valori per le tre direzioni:

Ux: 0,53 m

Uy: 0,0056 m

Uz: -0,18 m

Figura 87

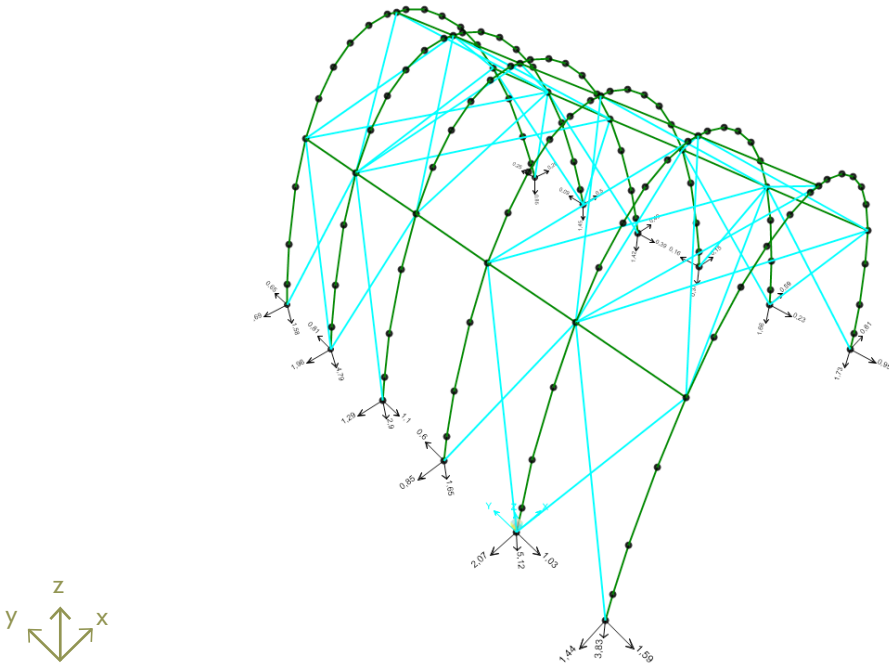
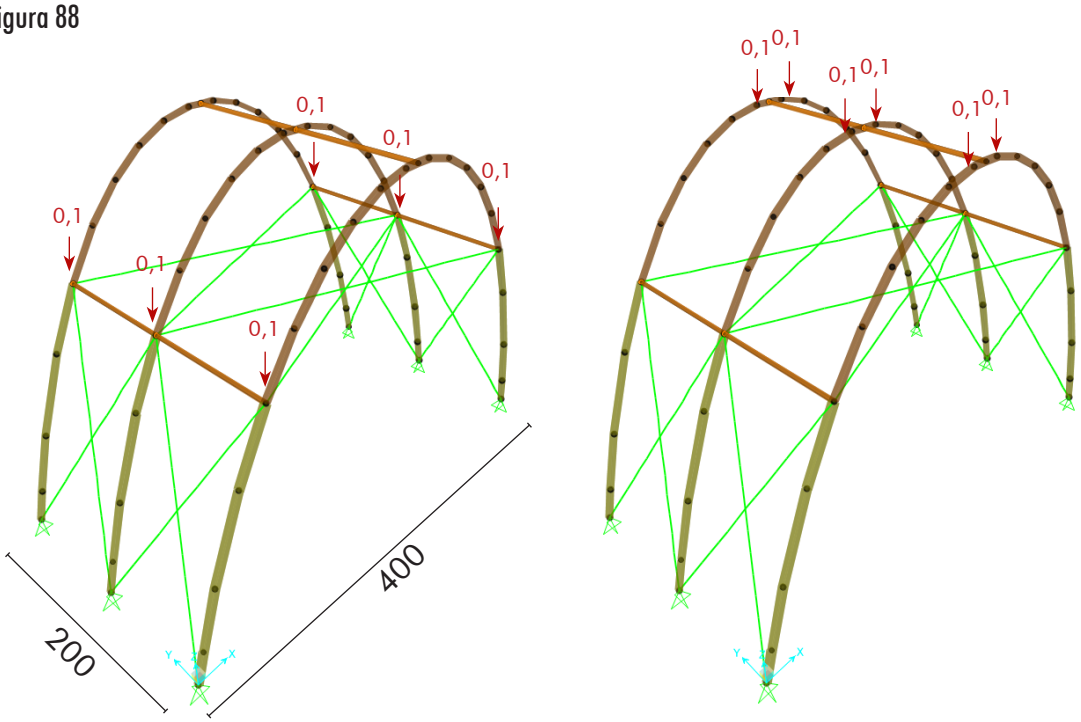


Diagramma delle reazioni vincolari alle basi, con relativi valori

6.1 Analisi non lineare del modulo

Una volta verificato la resistenza allo SLU della struttura, l'ultimo passaggio effettuato prima della realizzazione del modello fisico è stata un'analisi non lineare di un modulo composto da tre archi e relativi passanti longitudinali, con la presenza di controventi. Ciò al fine di paragonare i valori teorici estrapolati dal software con i valori reali del prototipo della struttura successivamente realizzata. Ho deciso di effettuare due analisi: nella prima i sei carichi puntuali di 0,1 kN di partenza vengono assegnati nei punti di connessione con i passanti longitudinali (due per ogni arco); nella seconda, gli stessi carichi sono assegnati al punto di colmo (due per ogni arco). A differenza di quanto avvenuto nei test sui singoli archi, in cui l'analisi veniva interrotta all'abbassamento di 0,3 m, in questo caso il carico viene incrementano fino al raggiungimento di uno spostamento verticale del punto di chiave dell'arco centrale di -0,1 m, poiché aumentando la rigidità della struttura non è prevedibile che possa subire un tale abbassamento senza arrivare a rottura.

Figura 88



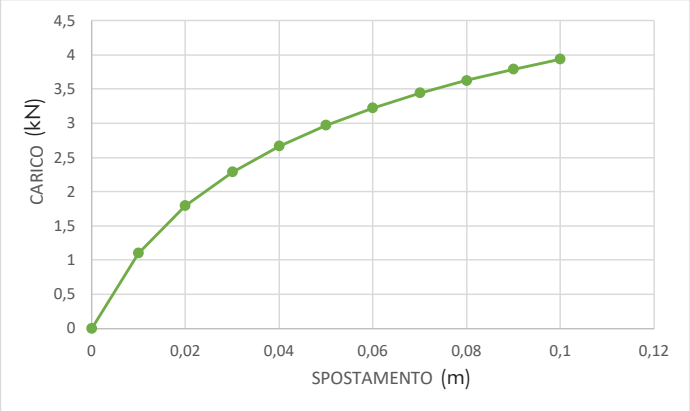
Modulo con quote e punti di applicazione del carico,
A sinistra: analisi di tipo 1; a destra: analisi di tipo 2

Le analisi si concludono dopo 11 step al raggiungimento dello spostamento impostato e restituiscono i seguenti valori:

6.1.1 Analisi del modello - Test 1

Tab 32

Step	Spostamento	Carico
	(m)	(kN)
1	0	0
2	0,01	1,103
3	0,02	1,791
4	0,03	2,285
5	0,04	2,664
6	0,05	2,970
7	0,06	3,223
8	0,07	3,439
9	0,08	3,626
10	0,09	3,790
11	0,10	3,936



Valori di carico e spostamento e relativo grafico

Figura 89

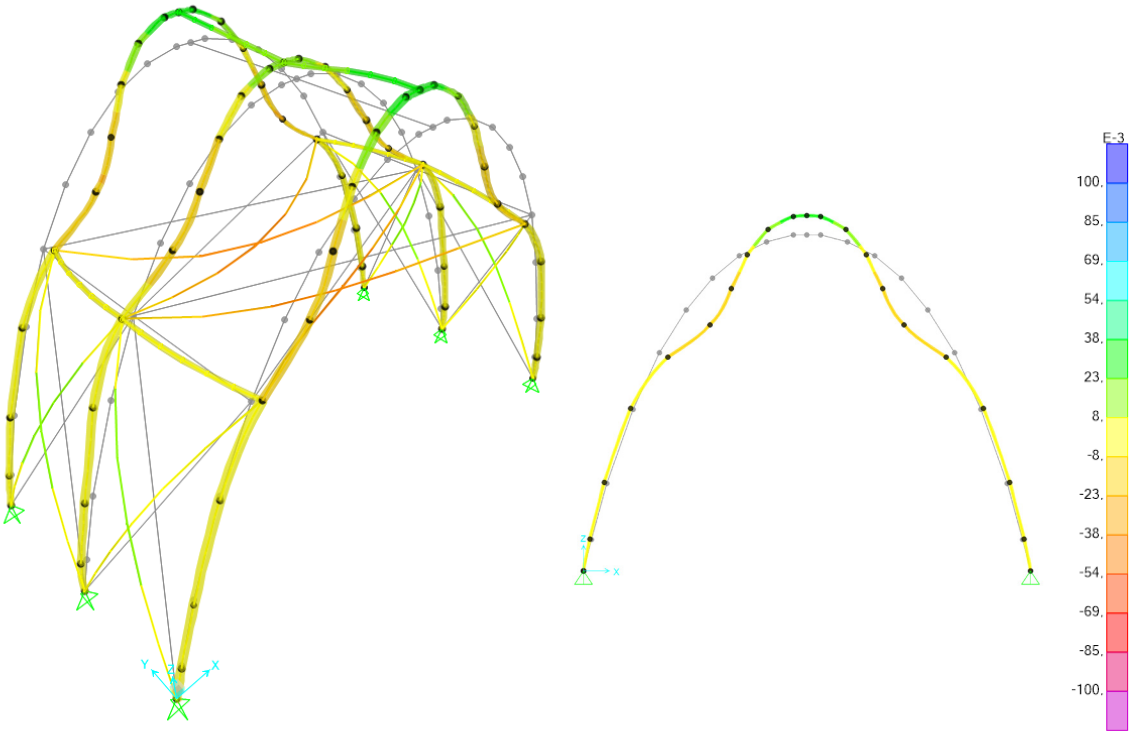


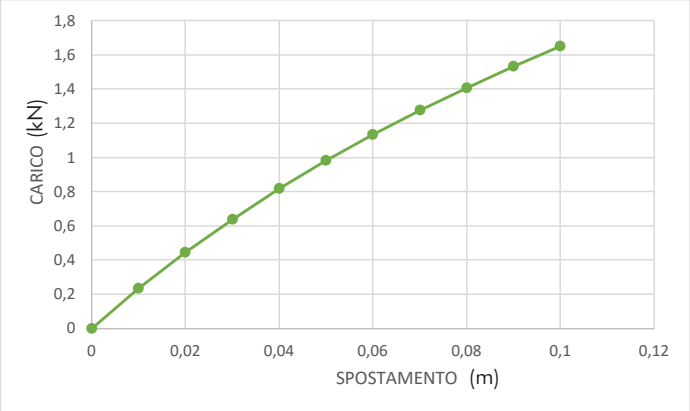
Diagramma della deformata per l'asse Z;
a sinistra vista assonometrica, a destra vista frontale

Si noti che lo spostamento dei punti di colmo, applicando il carico a circa metà colonna in direzione -Z, avviene verso l'alto come conseguenza dello spanciamento.

6.1.2 Analisi modello TEST 2

Tab 33

Step	Spostamento	Carico
	(m)	(kN)
1	0	0
2	0,01	0,233
3	0,02	0,445
4	0,03	0,639
5	0,04	0,817
6	0,05	0,982
7	0,06	1,134
8	0,07	1,276
9	0,08	1,408
10	0,09	1,532
11	0,10	1,648



Valori di carico e spostamento e relativo grafico

Figura 90

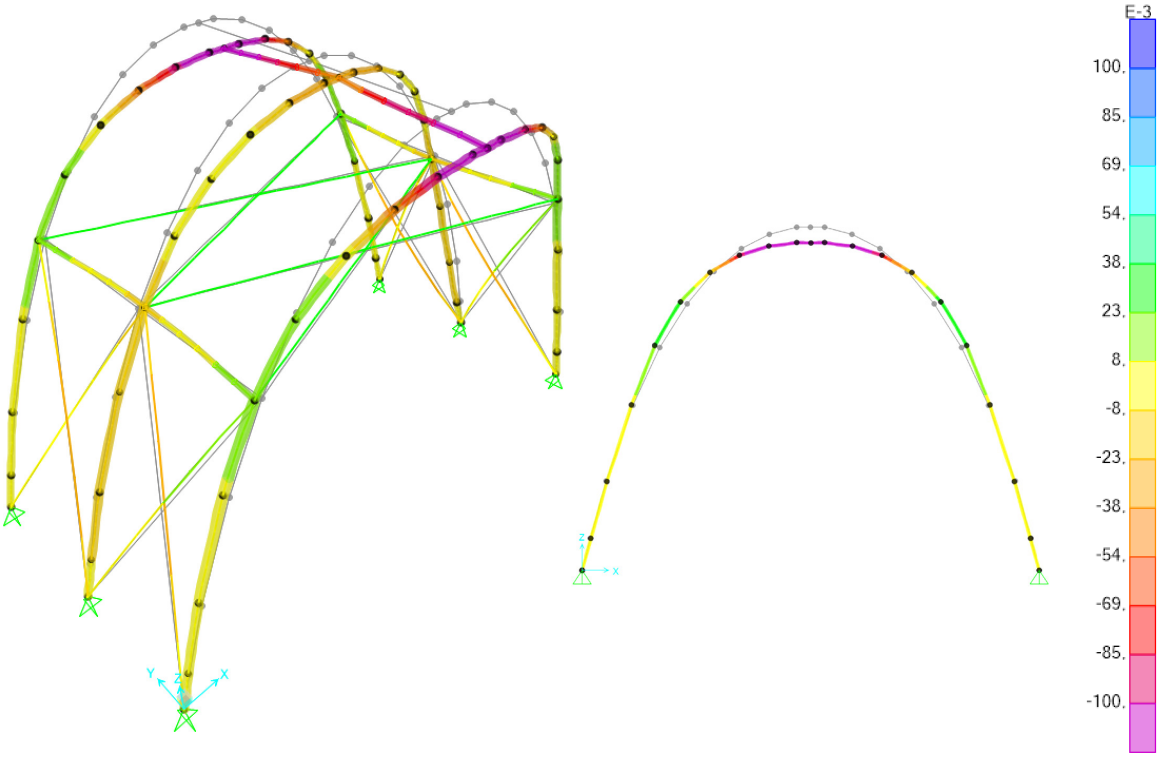


Diagramma della deformata per l'asse Z;
a sinistra vista assonometrica, a destra vista frontale

Capitolo 7 Progettazione dei giunti

La realizzazione dei giunti è uno dei problemi principali durante la progettazione di una struttura in bambù, per le attenzioni da porre al materiale, come visto al capitolo 4.

Durante il lavoro di tesi sono state progettate e realizzate numerose versioni prima di arrivare a quella applicata, ma ogni versione ha seguito alcuni principi di base nati da quanto appreso in letteratura e da alcuni progetti realizzati in passato.

In particolare:

- Resistere alle sollecitazioni meccaniche e funzionare come sistema di unione delle varie parti;
- Evitare di forare il bambù, riducendo così le possibilità di fessurazioni e i punti deboli;
- Adattabilità geometrica, necessaria trattandosi di un materiale naturale irregolare;
- Semplicità e velocità di montaggio e smontaggio;
- Durabilità, in relazione alla durata di vita del progetto.
- Possibilità di essere riutilizzato;
- Costi contenuti;
- Biodegradabilità dei pezzi, in linea con i presupposti generali del progetto;

La prima fase di progettazione si è concentrata nel valutare il meccanismo più efficace e versatile di bloccaggio degli elementi in bambù disposti in direzioni diverse nello spazio. Si è fin da subito optato per un sistema "a sandwich" che lavorasse comprimendo gli elementi tra due piastre parallele tra loro, in modo da far collaborare gli elementi nel trasmettere le sollecitazioni .

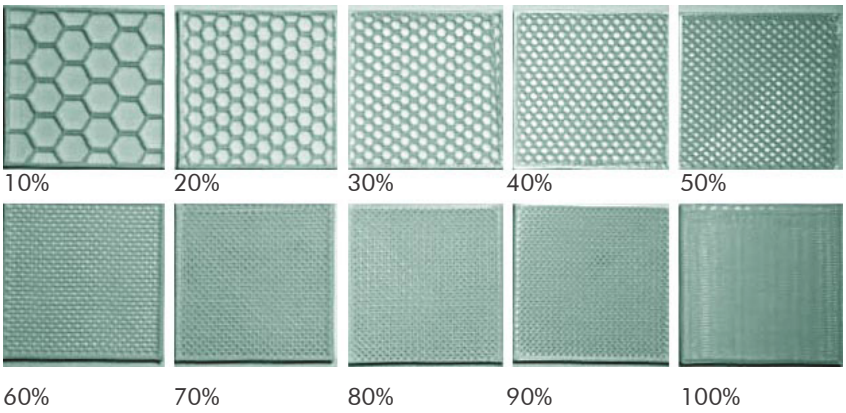
7.1 Primi prototipi

Successivamente ad una prima fase di schizzi e modelli tridimensionali su Cad si è passati alla realizzazione vera e propria dei primi prototipi.

Vista la fase di rapida prototipazione si è deciso di lavorare sfruttando la tecnologia delle stampanti 3D che mi ha permesso di realizzare autonomamente alcuni pezzi senza ricorre ad aziende esterne.

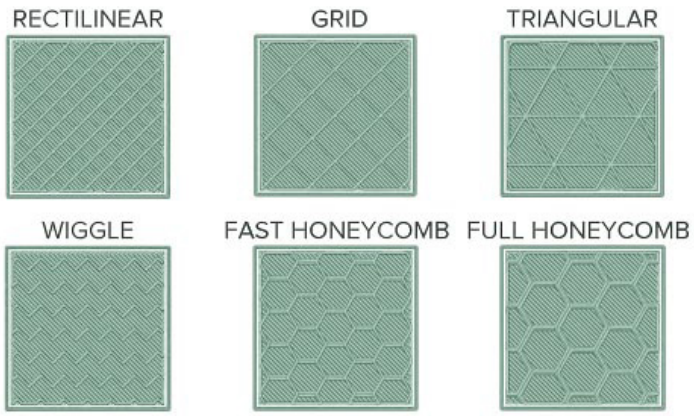
Sono arrivato, dopo numerose fasi di messa a punto della geometria ideale e delle impostazioni di stampa, ad un prodotto che soddisfacesse le resistenze meccaniche necessarie e in tempi contenuti (entrambe variano modificando il riempimento di materiale che la stampante estrude e scegliendo la geometria del riempimento stesso, vedi fig 91). In questo caso, ho optato per un riempimento del 40% seguendo una geometria a griglia per economicità di tempo e materiale. Infine, anche il materiale con cui ho deciso di estrudere cambia le proprietà meccaniche, fisiche ed estetiche del pezzo. I più diffusi sono il PLA e l'ABS, entrambi polimeri termoplastici, economici e resistenti. In questo caso si è optato per il PLA (acido polilattico) che, pur essendo un polimero, è biodegradabile essendo realizzato a partire da vari prodotti vegetali come mais e patate.

Figura 91



Percentuale di riempimento di materiale.

Figura 92



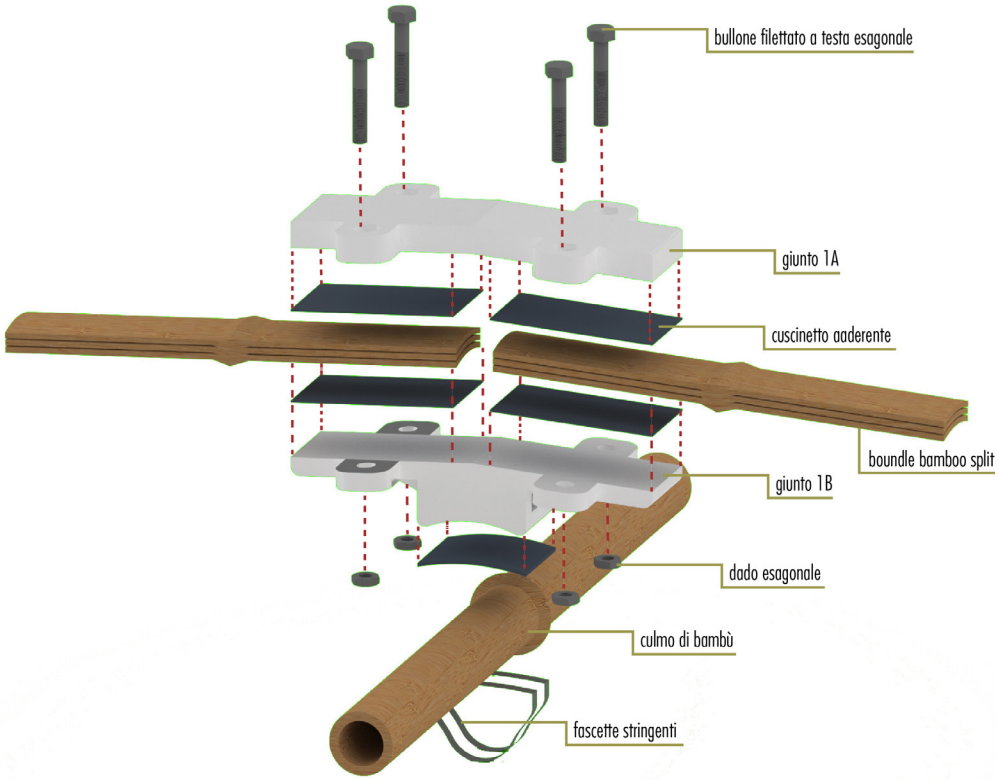
Geometrie di riempimento

Inoltre, ho tentato di ridurre al minimo le geometrie diverse dei giunti da dover realizzare per montare la struttura, arrivando a due tipologie illustrate di seguito.

7.1.1 Giunto tipo 1

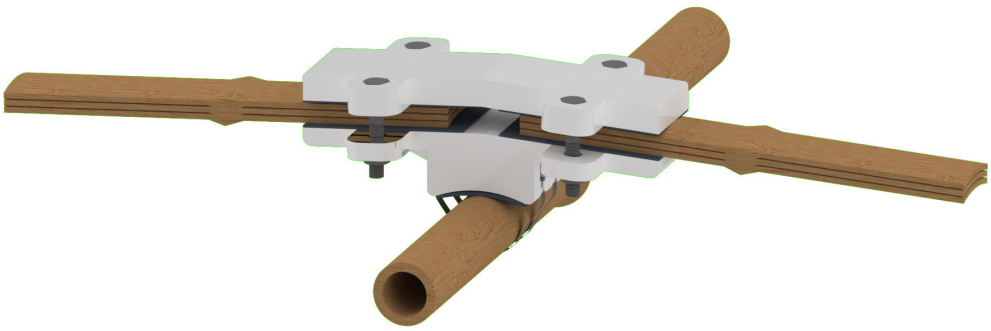
Il giunto di tipo 1 unisce al colmo le due semi-colonne formate dalle strisce di bambù unite tra loro che formano l'arco e contemporaneamente collega gli elementi di irrigidimento longitudinale composti dai culmi interi. Tra gli strati viene interposto un cuscinetto di sughero da 1,5 mm che attutisce la compressione e permette di aumentare l'aderenza degli elementi riducendo gli spostamenti e lo schiacciamento del bambù che potrebbe rischierebbe di fessurarsi.

Figura 93



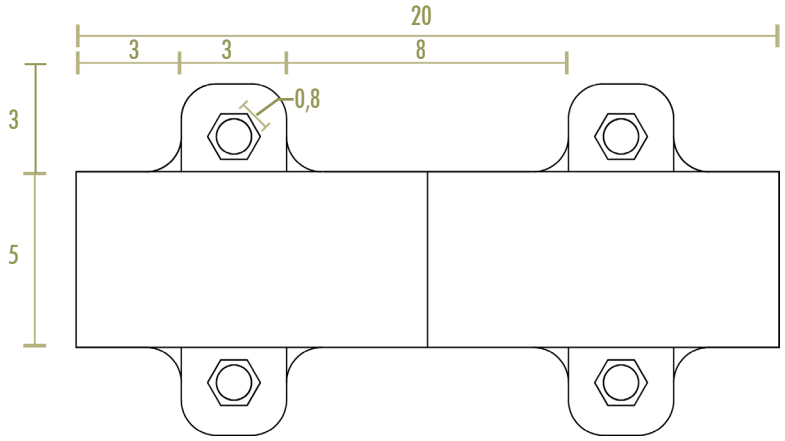
Esploso assonometrico

Figura 94



Render finale giunto 1

Figura 95



Dimensioni giunto 1

Figura 96

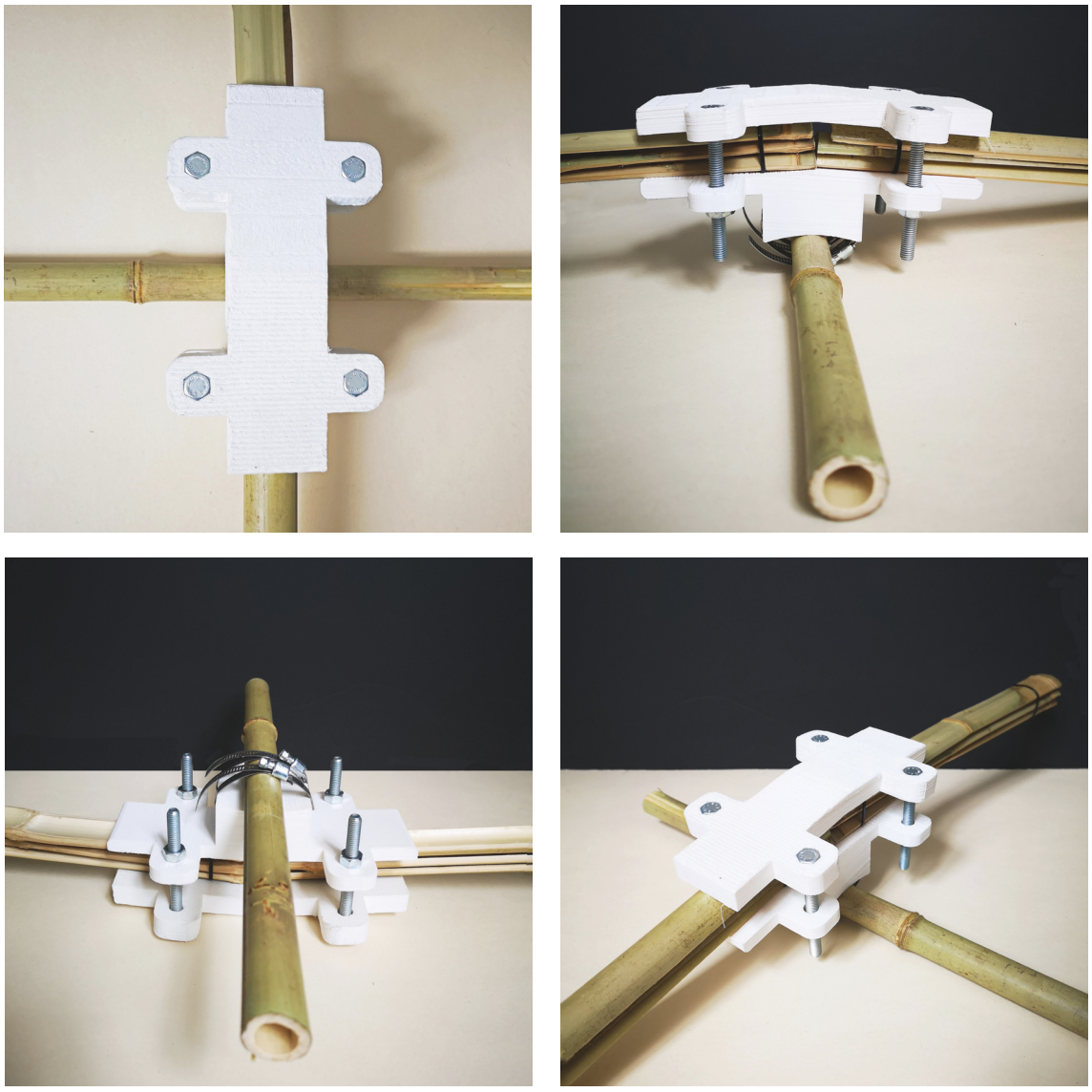


Foto del giunto assemblato

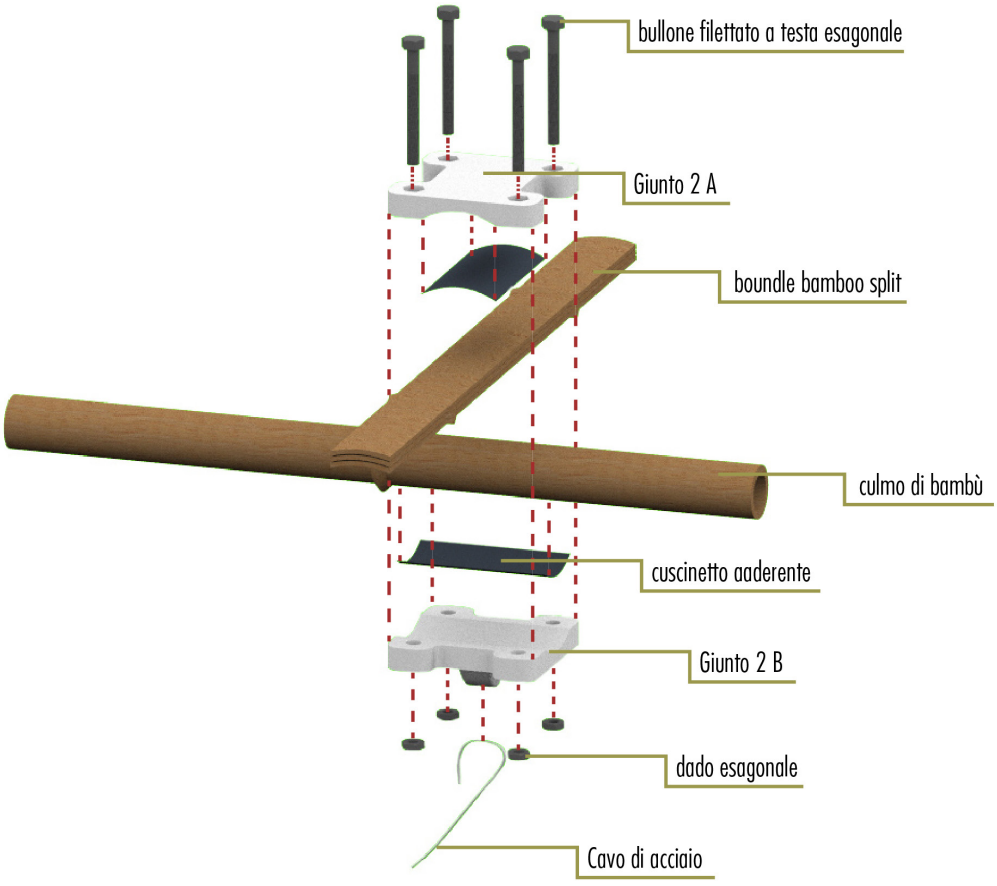
7.1.2 Giunto tipo 2

Il giunto di tipo 2 presenta una geometria più semplice del precedente e si trova in quantità maggiore nella struttura. Serve ad assicurare la connessione tra le colonne e gli elementi longitudinali, nonché a fissare uno dei due estremi della controventatura in acciaio tramite ugelli.

Il meccanismo di bloccaggio è il medesimo del precedente, si avvale di bulloni filettati che permettono di regolare la distanza tra le facce parallele in modo da adattarsi allo spessore variabile delle canne.

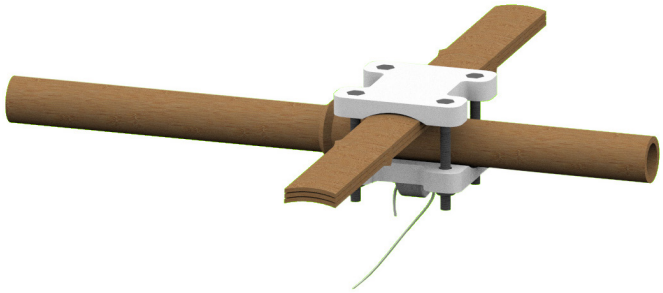
Inoltre, la geometria sagomata in forma curva delle piastre permette di avere una zona di appoggio alle canne più avvolgente in modo da aumentare la superficie a contatto con la sezione curva delle canne e delle strisce e di conseguenza limitare gli spostamenti. Anche in questo caso è presente un cuscinetto di sughero da frapporre tra gli elementi per i motivi descritti al paragrafo 6.1.1.

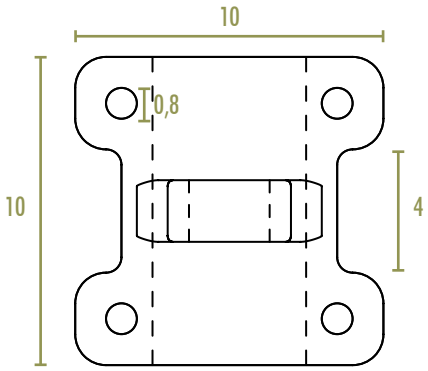
Figura 97



Esploso assonometrico giunto 2

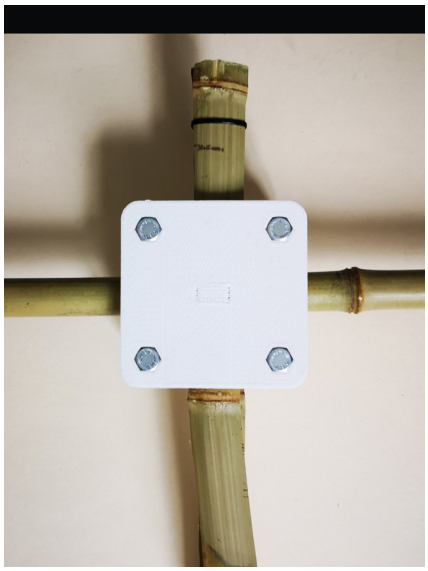
Figura 98- 99

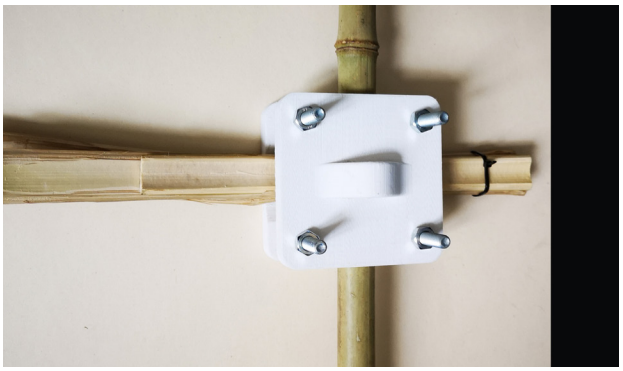


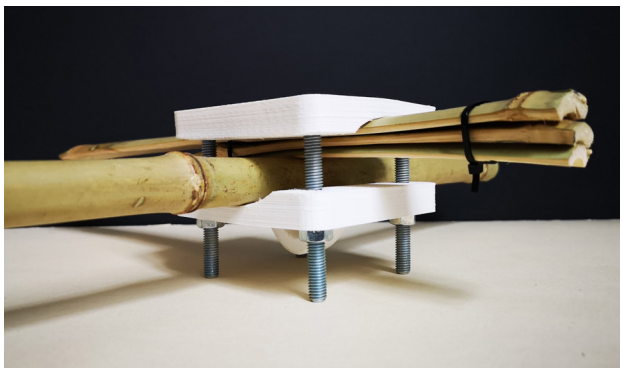


A sinistra: render finale; A destra: dimensioni giunto 2

Figura 100







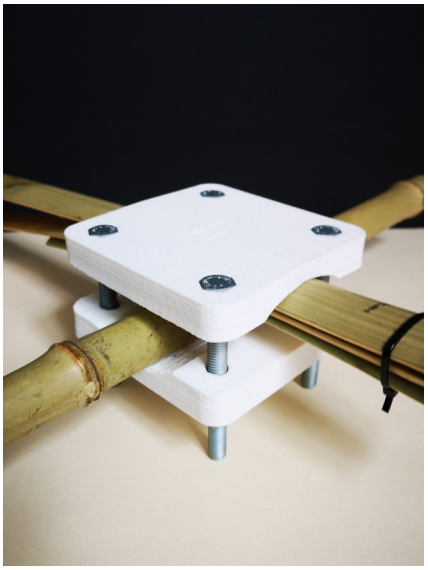


Foto del giunto assemblato

In ogni caso, resta da considerare che questi pezzi vanno prodotti in serie; di conseguenza è necessario che essi vengano realizzati con metodi di produzione della plastica più tradizionali, che abbattono i costi e i tempi di esecuzione.

7.2 Seconda versione

Per il prototipo della serra in scala 1:1 successivamente realizzato, avendo la necessità di crearli personalmente, ho deciso di optare per dei giunti più semplici in termini di materiali e geometrie, nonché di tempo di realizzazione e prezzo dei singoli pezzi. Le due tipologie di giunti, precedentemente illustrati, sono realizzati in legno, in particolare in multistrato d'abete, facilmente lavorabile e altamente resistente. Il funzionamento dei giunti rimane il medesimo di quelli stampati, ovvero bloccare le parti in bambù che compongono la serra tra due piastre per compressione grazie ai bulloni stringenti.

I giunti, realizzati a partire da pannelli 100x60x1,5 cm, non permettono le geometrie più complesse ottenibili grazie alla stampa 3D o seguendo altri processi di produzione della plastica. Ciò può avvenire solo attraverso l'uso di macchinari particolari per la lavorazione del legno come torni, piallatrici e fresatrici, a fronte di maggior tempo di realizzazione e costi più elevati.

Di conseguenza, avendo realizzato personalmente i prototipi di seguito proposti e non avendo a disposizione determinati macchinari, essi sono stati ridotti all'essenziale, pur svolgendo il loro compito.

7.2.1. giunto tipo 1

Il giunto che collega le due colonne in chiave è quello che subisce maggiori semplificazioni morfologiche rispetto alla versione stampata in 3D. Il pezzo si presenta come una doppia piastra rettangolare le cui facce sono perfettamente piane e parallele, al contrario del giunto stampato in 3D. Quest'ultimo presentava, infatti, un profilo leggermente angolare, atto ad assecondare l'andamento parabolico dell'arco.

Inoltre, si è deciso di aumentare la lunghezza del giunto da 20 cm a 30, in modo da agganciare una superficie maggiore della colonna di bambù, la larghezza rimane, invece, di 10 cm.

A sinistra; profilo del giunto stampato in 3D; a destra profilo del giunto in legno

Figura 101

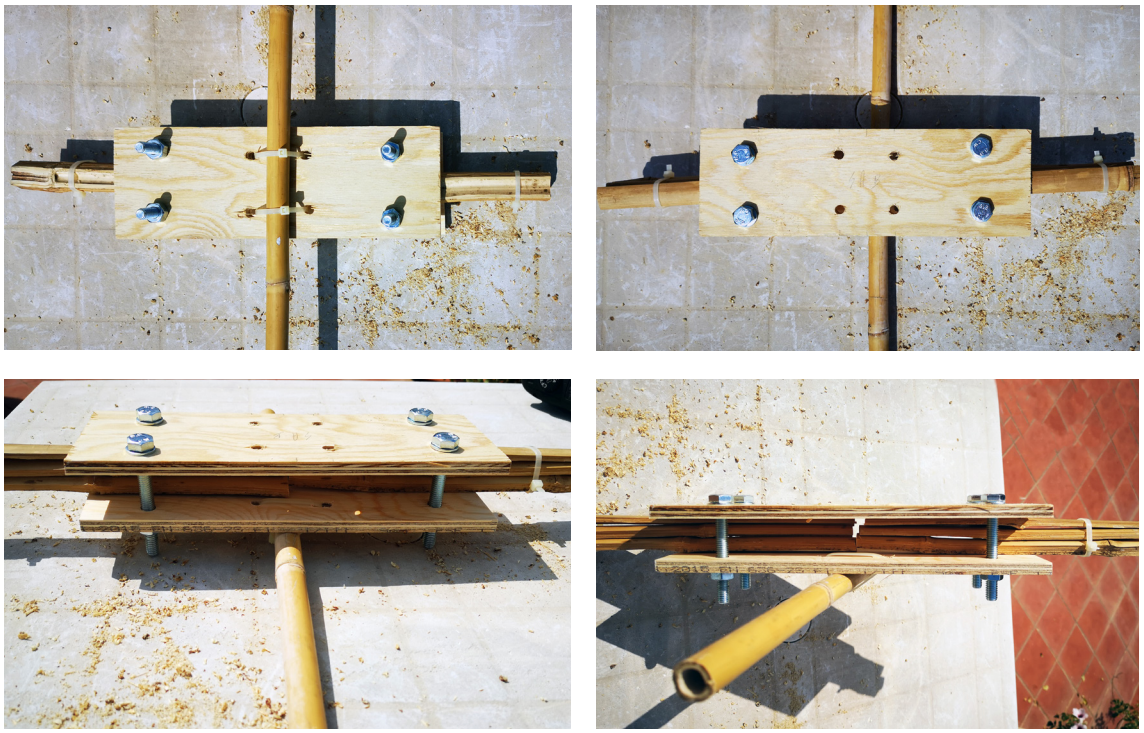


Foto del giunto assemblato

7.2.2. giunto tipo 2

Il giunto di tipo due realizzato in legno, al contrario del precedente, risulta molto simile al prototipo stampato in 3D.

Si differenzia per il fatto che non è stato possibile realizzare la concavità interna delle due piastre che faceva da "culla" per le canne, e inoltre, l'anello che serviva per agganciare i controventi è formato da una vite con occhiello in acciaio che viene avvitata al pezzo.

Le dimensioni rimangono le medesime, cioè un quadrato con lato di 10 cm.

A sinistra; profilo del giunto stampato in 3D; a destra profilo del giunto in legno

Figura 102

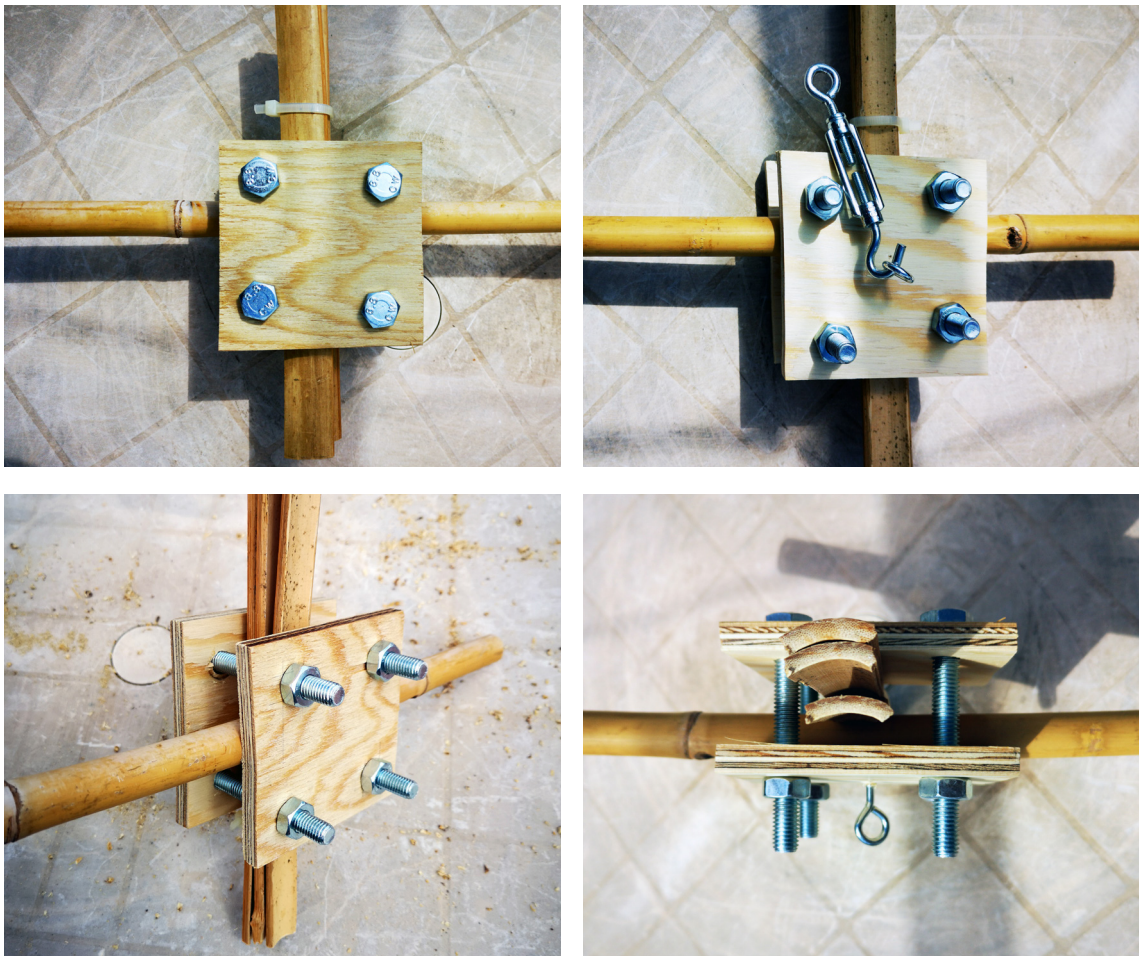


Foto del giunto assemblato

Capitolo 8 Realizzazione del modello in scala 1:1

Una volta completate tutte le simulazioni digitali, sono passato alla realizzazione di una serie di test reali, sia sui singoli archi che sul modulo tipo della serra progettata.

L'esecuzione dei test è stata svolta presso il laboratorio Lastin del Politecnico di Torino, con la collaborazione dei docenti Lacirignola A. e Carbonaro C.

8.1 Premesse

A causa dell'emergenza sanitaria COVID 19, il bambù acquistato, su cui sono state svolte le prove di resistenza meccanica in laboratorio (vedi capitolo 2), è rimasto stoccato per alcuni mesi all'esterno in una zona semi-coperta. Pertanto, essendo il materiale privo di opportuno trattamento, ha subito un parziale degrado a causa dell'umidità e della pioggia con cui è entrato a contatto, vedendone alterate in negativo le proprietà meccaniche. Infatti, come detto al paragrafo 2.5.1., all'aumentare dell'umidità presente nel materiale diminuisce la sua resistenza meccanica. Inoltre, i fenomeni di degrado di questa tipologia, nonché i rischi di attacco da parte di termiti e tarli, sono più accentuati nelle strisce rispetto ai culmi interi che hanno una minore superficie esposta all'esterno.

Per evitare questi degradi nel materiale sarebbe stato necessario depositarlo in un luogo completamente coperto, asciutto e a temperatura stabile.

Sarebbe stato opportuno procedere con una nuova analisi delle proprietà meccaniche a seguito del degrado del materiale, oppure con un nuovo processo di essiccazione dello stesso, ma per questioni di tempistica non è stato possibile farlo.

Figura 103

Un altro aspetto da considerare è che il modulo della serra è stato realizzato e testato appoggiandolo su una pavimentazione tramite un sistema di ancoraggio rigido, al contrario di come si prevede di utilizzarlo, ovvero infisso al terreno tramite sistemi di viti autofilettanti o paletti come in figura a lato.

Restano, quindi, da tenere in considerazione le possibili differenze nel comportamento della struttura dovute a questi fattori.

8.2 Processo di realizzazione

Il lavoro svolto sui modelli reali è stato suddiviso in una serie di passaggi necessari prima di arrivare alle prove sul modulo di serra precedentemente studiato.

8.2.1 Selezione

La prima fase è stata di selezione del materiale.

Come accennato in precedenza, infatti, alcune strisce di bambù presentavano fenomeni di degrado, quali tracce di muffa, splittaggio e/o fessurazione che non permetteva il loro utilizzo. È stato necessario fare un'attenta analisi visiva di ogni striscia, al fine di scartare quelle che presentavano danneggiamenti, ma anche quelle la cui geometria, in termini di larghezza, spessore e regolarità non soddisfacevano i requisiti prescelti.

In base a questi fattori si è deciso di dividere il campione di 50 strisce in 3 categorie:

-Ottimo stato (9 strisce)

-Discreto stato (25 strisce)

-Inutilizzabili (16 strisce)

Il fatto che circa il 32% del bambù fosse da evitare per l'impiego fa comprendere quanto sia importante la fase di conservazione al fine di evitare sprechi di materiale. Resta da valutare la possibilità che alcuni di questi fenomeni di degrado possano essere dovuti ai processi iniziali di essiccazione o allo stesso trasporto delle canne.

Figura 104

Classificazione delle strisce

8.2.2 Realizzazione centina

Quando si devono realizzare strutture aventi forme curve particolari come gli archi, soprattutto con un materiale così flessibile, è necessario avere una linea guida fisica da seguire.

In particolare, le singole strisce presentano una curvatura naturale diversa tra di loro, soprattutto dovuto alla disposizione irregolare dei nodi, rendendo l'uso di una centina necessario per uniformare la colonna intera quando si utilizza la tecnica del BBS Boundle Bamboo Split.

In un contesto come quello agricolo, realizzare il tracciato dell'arco da utilizzare come linea guida, fissando dei paletti nel terreno, risulta il metodo più semplice, veloce ed efficace.

Figura 105

Processo di realizzazione tramite BBS;
Fonte: Bamboo Architectonic: Experimental Studies using Bundled-Bamboo-Split (BBS), Anastasia Maurina, Budianastas Prastyatama

Nel mio caso, non avendo questa possibilità, ho deciso di optare per la realizzazione di una struttura rigida, composta da listelli in legno di scarto, della forma e dimensione di metà arco a cui fissare dei chiodi lungo la curvatura.

Figura 106

A sinistra: centina per la semicolonna;
a destra: dettaglio dei chiodi che fungono da binari

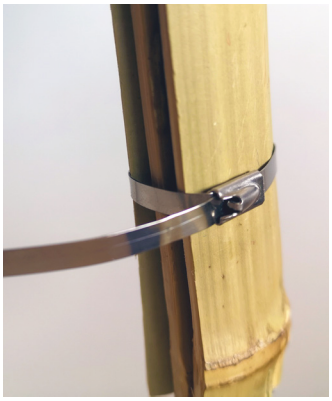
8.2.3 Realizzazione delle semi colonne

Il passaggio successivo è stato la realizzazione del primo arco composto da due strisce di bambù. Esse, dopo essere state tagliate della lunghezza desiderata (3,85 m) e facendo attenzione a tagliarle in prossimità di un nodo, sono state posizionate lungo la centina. Per tutti gli archi realizzati la direzione dei fasci di canne è stata alternata, così come la loro concavità; ad es., una colonna composta da quattro strisce è stata realizzata accoppiando due cime con due basi. Ciò permette teoricamente di avere una media della sezione e delle proprietà meccaniche che, come riportato in precedenza, variano lungo il culmo.

Posizionate le strisce sulla centina, esse vengono unite tra loro tramite fascette metalliche stringenti. Questo sistema risulta più veloce ed efficace rispetto ad altri metodi quali la legatura e la chiodatura. In particolare, nella legatura la corda con il tempo tende ad allentarsi e necessita di una buona manualità e conoscenza dei nodi. La chiodatura, invece, è la tecnica più resistente, ma forando col chiodo il bambù si innescano facilmente meccanismi di fessurazione, splittaggio e conseguente perdita col tempo di resistenza meccanica. Le fascette sono state posizionate ad una distanza di circa 50 cm l'una dall'altra lungo la colonna, cercando di farle combaciare in prossimità di un nodo come suggerito dalla norma ISO 22156, al fine di diminuire i possibili scorrimenti.

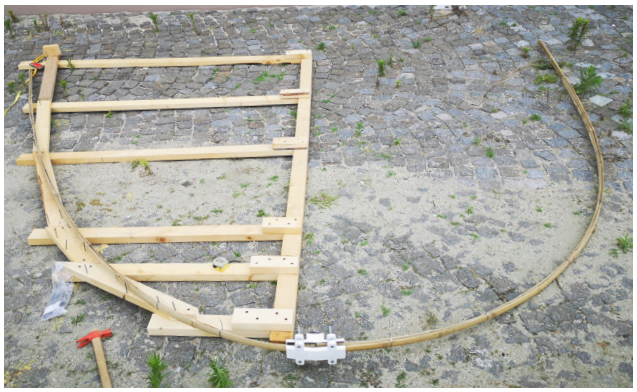
Dopo essere state realizzate, le due semicolonne sono state unite tra loro in chiave tramite il giunto di tipo 1.

Figura 107



Fascetta di tipo metallico

Figura 108



Formazione arco a due strisce

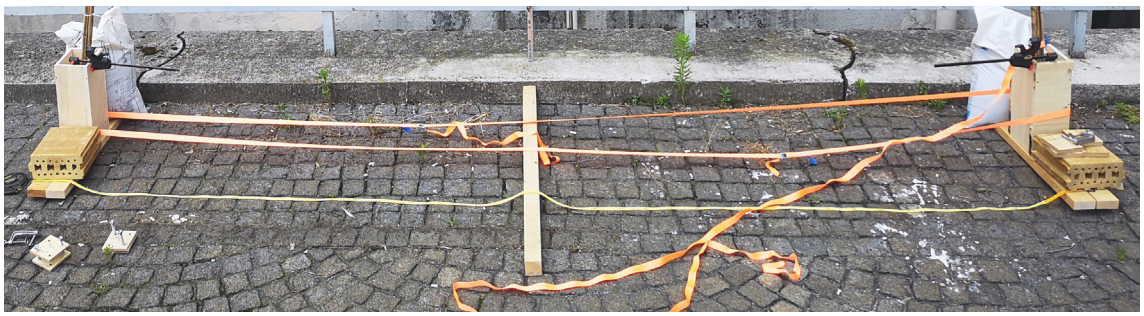
8.2.4. Sistema di fondazione

Per poter studiare il comportamento degli archi è stato necessario realizzare un sistema di vincolo a terra che eliminasse il rischio di ribaltamento dell'arco.

Inizialmente avevo deciso di realizzare dei supporti in legno separati, composti da una scatola in cui inserire le singole basi delle colonne, poi bloccati tramite pesi e uniti da una corda che contrastasse le spinte orizzontali (fig. 109).

Dopo aver fissato il primo arco alla suddetta base con dei morsetti, il sistema si è dimostrato immediatamente inadatto. Infatti, l'arco era soggetto ad importanti fenomeni di momento e torsione delle colonne all'interno dello scatolame. Questi fenomeni si sono accentuati durante le prime prove di carico realizzate.

Figura 109



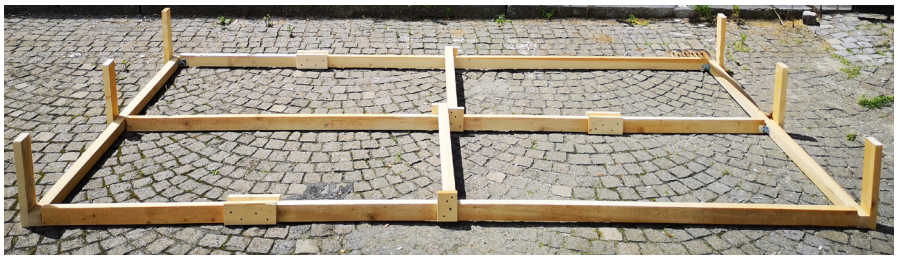
Sistema di vincolo con basi singole

Ho deciso, dunque, di realizzare un supporto più rigido, che bloccasse maggiormente gli archi su cui poter svolgere le singole prove di carico e che successivamente fungesse da base per il modulo di serra finale.

La struttura, anch'essa realizzata con legno di scarto, si configura come un telaio unico da cui sporgono in verticale sei "piedi" che servono come aggancio per le basi delle colonne tramite un sistema di morsetti metallici.

Il sistema così composto ha ridotto i problemi precedenti.

Figura 110



A sinistra: secondo sistema di vincolo a telaio; a destra: dettaglio dei morsetti

8.3. Analisi sui singoli archi

Il passaggio successivo è stato valutare il comportamento e la resistenza dei singoli archi, valutandone le differenze dovute all'aumentare del numero di strisce di cui erano composti.

Si procede effettuando delle analisi di carico-spostamento simili a quelle effettuate su Sap2000, ovvero applicando progressivamente cinque carichi puntuali (2,5 kg di incremento per ogni step) e simmetrici alla struttura, valutandone lo spostamento del punto di colmo tramite una barra metrica di 300 cm posta in prossimità dell'asse baricentrico dell'arco. Per una questione tempistica si procede con l'analisi delle seguenti sezioni:

-arco a 2 strisce;

-arco a 4 strisce;

-arco a 6 strisce;

-arco composto da 5+7 strisce.

Le analisi sugli archi a 2 e 4 strisce vengono ripetute due volte poiché, come detto, viene sostituito il sistema di ancoraggio.

8.3.1 Analisi arco a due strisce

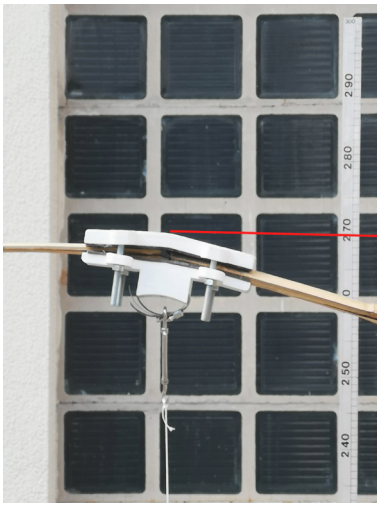
Il primo arco analizzato è quello a due strisce, che una volta assemblato sulla centina viene trasportato e fissato al primo sistema di vincolo sviluppato.

Si nota immediatamente che, pur subendo solo il carico dovuto al peso proprio, esso si deforma vistosamente perdendo la geometria impostata precedentemente. Ciò può essere dovuto ad una serie di fattori: la snellezza dell'elemento, lo spostamento e la rotazione che subiva all'interno delle scatole di ancoraggio.

L'analisi viene interrotta dopo l'aggiunta di circa 2,5 kg dovuti ai ganci metallici che servivano per agganciare i secchi su cui poter inserire il carico.

In quel momento l'arco aveva subito un abbassamento di 30 cm.

Figura 111

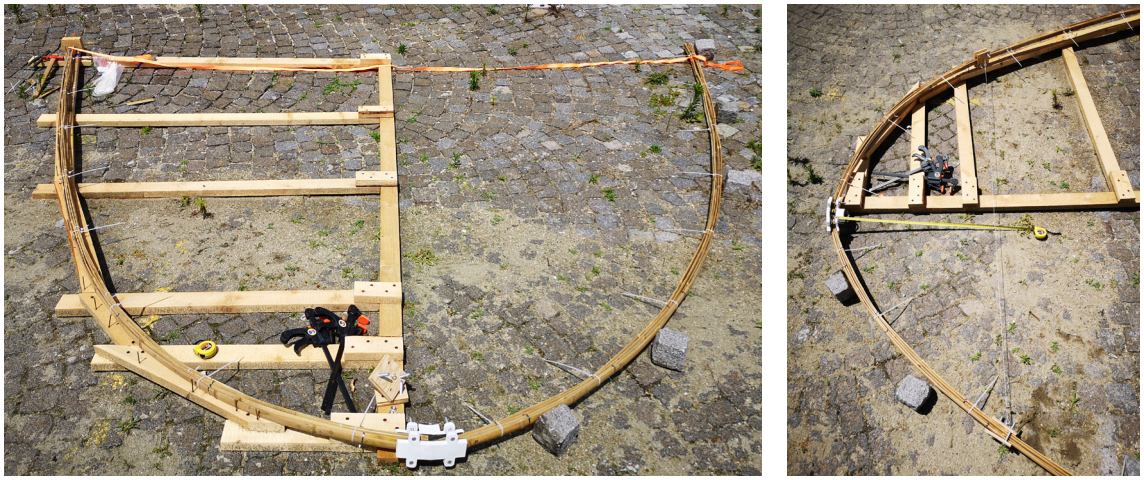


Abbassamento dell'arco privo di carichi

8.3.2. Analisi arco a quattro strisce

Si decide di passare all'analisi sull'arco a quattro strisce, decidendo di inserire una catena in acciaio (Ø 1,5 mm) a 80 cm dalla linea di colmo per poter limitare la deformazione geometrica subita in precedenza. Da questo momento tutte le successive analisi sono state effettuate con l'aggiunta della catena.

Figura 112



A sinistra: formazione arco a 4 strisce; a destra: aggiunta della catena

Durante il posizionamento dell'arco sui supporti, il giunto di tipo 1 realizzato in PLA ha ceduto, rompendosi probabilmente a causa della spinta dovuta all'elasticità delle colonne di bambù che tendono a ritornare lungo la loro naturale linea retta. Questo fenomeno era prevedibile non avendo avuto la possibilità di testare precedentemente la resistenza del pezzo e dunque di regolare la quantità di riempimento estrusa dalla stampante 3D (si ricorda che all'aumento del materiale estruso aumenta la resistenza e che il pezzo era stato stampato con il 40% di riempimento). Vi è dunque ampio margine di miglioramento da questo punto di vista, potendo lavorare sia su questo fattore, sia irrigidendo la geometria del pezzo nei punti maggiormente sollecitati. Si suggerisce, per eventuali studi futuri, di procedere con un'analisi agli elementi finiti per valutare le reali sollecitazioni a cui è sottoposto il pezzo.

Figura 113

A sinistra: rottura del giunto durante il posizionamento; a destra: analisi dei danni

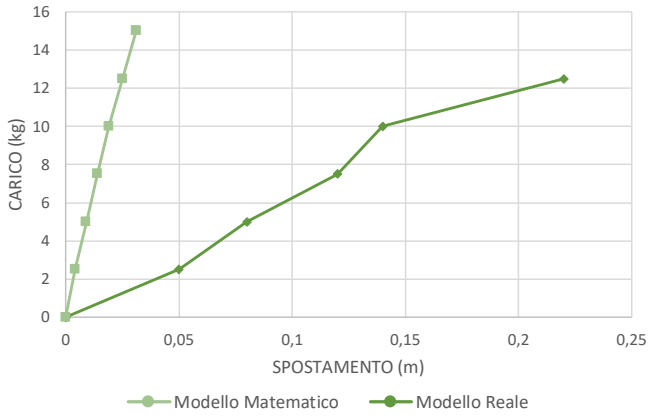
Ho sostituito il pezzo rovinato con il giunto in legno illustrato al capitolo 7.2.1.

Pur con l'aggiunta della catena l'arco, una volta posizionato, assume una configurazione geometrica leggermente differente ed asimmetrica rispetto a quella imposta.

Ho deciso di proseguire con la prova di carico che restituisce i seguenti valori che vengono comparati con gli stessi estrapolati dai test su software.

Tab 34

Step	Carico	Spostamento Reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0	0
2	2,5	0,02	0,004
3	5,0	0,03	0,009
4	7,5	0,05	0,014
5	10,0	0,09	0,019
6	12,5	0,11	0,025
7	15,0	0,19	0,031
8	15,0	0,25	0,031



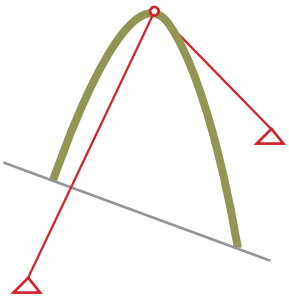
L'analisi viene interrotta poiché al successivo incremento di carico la struttura sarebbe arrivata al collasso. L'arco assume una deformata vistosamente asimmetrica, probabilmente per motivi di eccentricità dei carichi e per gli spostamenti delle basi delle colonne che avvenivano all'interno delle scatole usate come base.

Figura 114

A sinistra: configurazione dell'arco con il solo carico di partenza (2,5 kg dovuto ai secchi); a destra: ultima deformata con un carico di 15 kg.

Per aumentare la precisione delle prove si decide, come detto, di modificare il sistema di appoggio a terra, abbandonando il sistema di vincolo singolo e ripetendo le prove sui primi due archi. Inoltre, vengono aggiunte due corde in direzione ortogonale all'asse dell'arco, fissate in chiave e al suolo in modo da limitare i fenomeni di ribaltamento e valutare solo lo spostamento solo sull'asse Z.

Figura 115



Sistema di tiranti per evitare il ribaltamento

8.3.3. Seconda analisi arco a due strisce

Dopo aver realizzato un nuovo arco a due strisce, esso è stato agganciato al sistema a telaio che lo mantiene stabile limitando lo spostamento, la torsione e la rotazione delle colonne.

Una volta posizionato, anche in questo caso, l'arco risulta troppo esile e flessibile rispetto alla lunghezza libera di inflessione per mantenere la sua configurazione. Infatti l'abbassamento della linea di culmo è di 6 cm per la sola forza peso che cresce fino a 14 cm con l'aggiunta di 2,5 kg (peso dei secchi) ed arriva a 28 cm con 5 kg di carico. L'analisi viene interrotta a questo step.

Con un ulteriore incremento di peso le colonne non si sarebbero rotte ma piegate

al punto da far poggiare al suolo i carichi, falsando la prova.

Figura 116

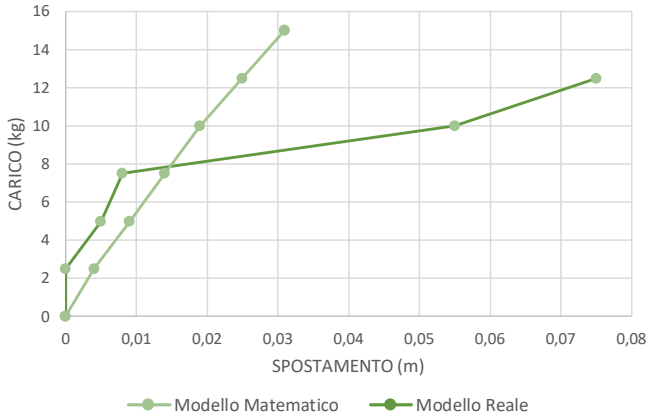
Deformata allo step 3 con 5 kg di carico

8.3.4. Seconda analisi arco a quattro strisce

Procedo analogamente anche per l'arco a quattro strisce, per il quale si ricavano i seguenti valori che vengono messi in relazione con quelli matematici.

Tab 35

Step	Carico	Spostamento Reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0	0
2	2,5	0	0,004
3	5,0	0,005	0,009
4	7,5	0,008	0,014
5	10,0	0,055	0,019
6	12,5	0,075	0,025
7	15,0	collasso	0,031



L'analisi viene interrotta al raggiungimento dei 15 kg. L'arco subisce, infatti, una vistosa deformazione asimmetrica arrivando al collasso a causa dell'eccessivo momento che agisce in chiave e che innesca un meccanismo di rotazione e torsione delle due colonne all'interno del giunto.

Questo meccanismo, che produce uno spostamento orizzontale, può essere stato accentuato dall'anisotropia nella sezione dei fasci o ad una piccola eccentricità nei carichi.

Figura 117

Deformata allo step 6 con 10 kg di carico

Figura 118

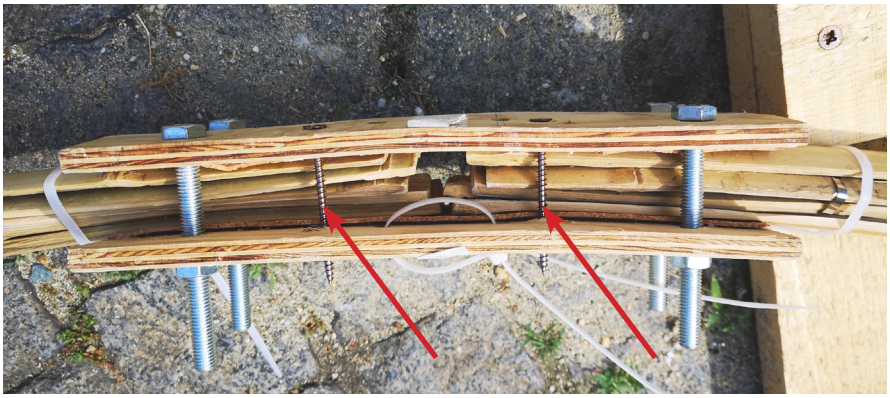
Collasso dell'arco al raggiungimento dei 15 kg di carico

8.3.5. Analisi arco a sei strisce

Prima di procedere con le ulteriori analisi, per limitare questo fenomeno di rotazione nel giunto e per praticità, ho deciso di aggiungere un ulteriore vincolo

composto da quattro viti autofilettanti in linea con i bulloni, come nella figura 119. Quest'aggiunta, in un evoluzione del giunto, sembra necessaria; essa può essere fatta sempre tramite bulloni filettati raddoppiando l'attuale numero presente.

Figura 119



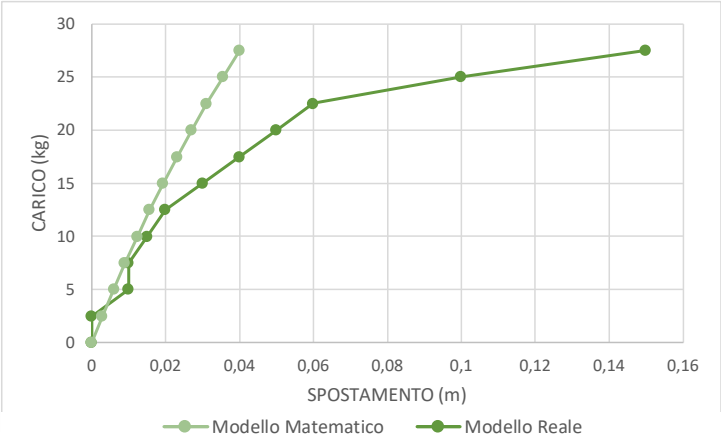
Aggiunta delle viti di bloccaggio

Eseguita questa modifica procedo al montaggio dell'arco a sei strisce e al suo posizionamento alla base (una volta montato l'arco, la linea di colmo risulta circa 2 cm più in alto rispetto ai 300 cm di altezza predefiniti).

Procedendo con l'analisi di carico-spostamento si registrano i seguenti valori.

Tab 36

Step	Carico	Spostamento reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0	0,000
2	2,5	0	0,003
3	5,0	0,005	0,006
4	7,5	0,005	0,009
5	10,0	0,010	0,012
6	12,5	0,020	0,016
7	15,0	0,030	0,019
8	17,5	0,040	0,023
9	20,0	0,050	0,027
10	22,5	0,060	0,031
11	25,0	0,010	0,036
12	27,5	0,150	0,040
13	28,0	instabilità	0,041



In questo caso l'analisi viene interrotta poiché al successivo incremento di carico l'arco si sarebbe ribaltato. Ciò a causa di fenomeni di torsione delle colonne rispetto all'asse su cui giace l'arco. In questo modo la funicolare dei carichi non giace più all'interno della sezione rendendo la struttura instabile. Nelle analisi svolte su software questo meccanismo non era riscontrabile, data la mancanza di imperfezioni e l'applicazione del carico perfettamente perpendicolare.

Questo fenomeno sembra essere dovuto anche alla snellezza delle colonne e allo scorrimento parziale delle strisce tra loro.

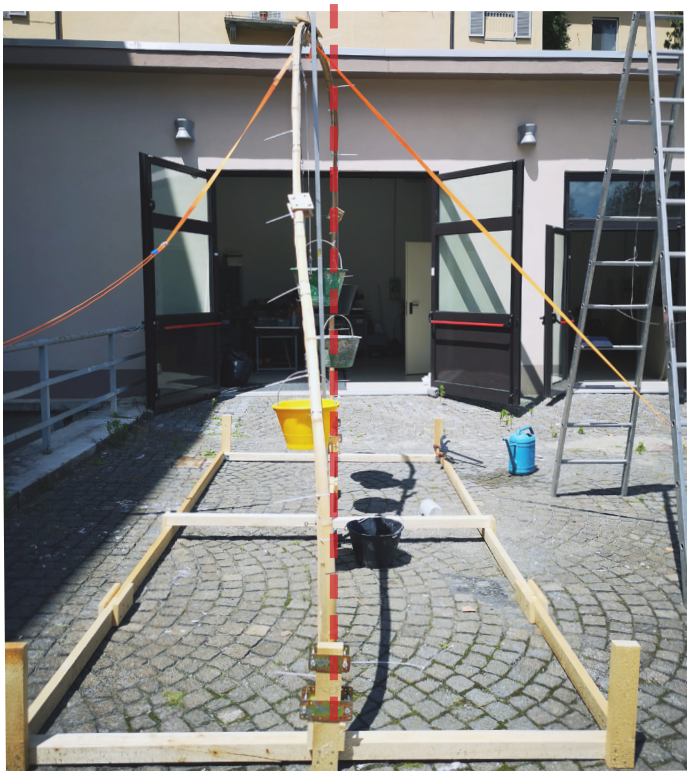
Infatti, all'aumentare del numero di strisce, stringendole alla base della struttura di fondazione tramite delle piastre metalliche, esse tendono a slittare parallelamente tra loro fino a posizionarsi nella configurazione più stabile. Ciò avviene a causa di una serie di fattori quali: la geometria curva delle lamelle, le differenze dimensionali e la presenza dei nodi. Il tutto non permette un accoppiamento delle strisce perfettamente parallelo.

Questo fenomeno si è presentato anche durante le successive prove e sul modello finale di serra. Esso produce una leggera torsione delle colonne (si veda fig. 120) che sotto sforzo si accentua fino a portare all'instabilità dell'arco.

Figura 120

Scorrimento delle lamelle lungo l'asse della colonna

Figura 121



Torsione delle colonne rispetto al proprio asse (linea tratteggiata in rosso) con carico di 27,5 kg

8.3.6. Analisi arco misto 7+5 strisce

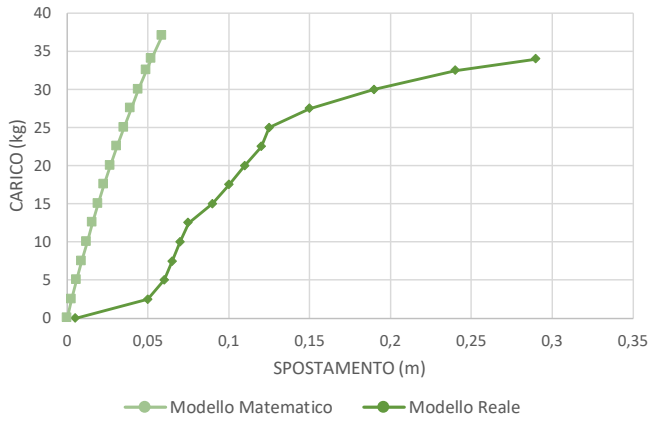
L'ultimo arco analizzato è stato quello composto da sette strisce dalla base fino ai 2 metri e da cinque strisce per i successivi 1,85 m.

Anche in questo caso l'arco, una volta posizionato, non si configura perfettamente nella geometria voluta, raggiungendo i 3 metri di altezza, ma la sua linea di colmo raggiunge i 2,95 m.

L'analisi ha restituito i valori della tabella 37 che sono messi in relazione con quelli estrapolati da software, così come i loro rispettivi diagrammi:

Tab 37

Step	Carico	Spostamento reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0,005	0
2	2,5	0,05	0,002
3	5,0	0,06	0,005
4	7,5	0,065	0,009
5	10,0	0,07	0,012
6	12,5	0,07	0,015
7	15,0	0,09	0,019
8	17,5	0,10	0,022
9	20,0	0,11	0,026
10	22,5	0,12	0,030
11	25,0	0,12	0,035
12	27,5	0,15	0,039
13	30,0	0,19	0,044
14	32,5	0,24	0,049
15	34,0	0,29	0,052
16	37,0	//	0,058



L'analisi viene interrotta poiché l'arco ha subito una deformazione asimmetrica, come nel caso dell'arco a quattro strisce, tale da non permettere un ulteriore incremento di carico. I motivi di tale fenomeno rimangono gli stessi precedentemente elencati. Questo fenomeno inizia allo step 12 che sembra coincidere con la fine del comportamento elastico lineare dell'arco.

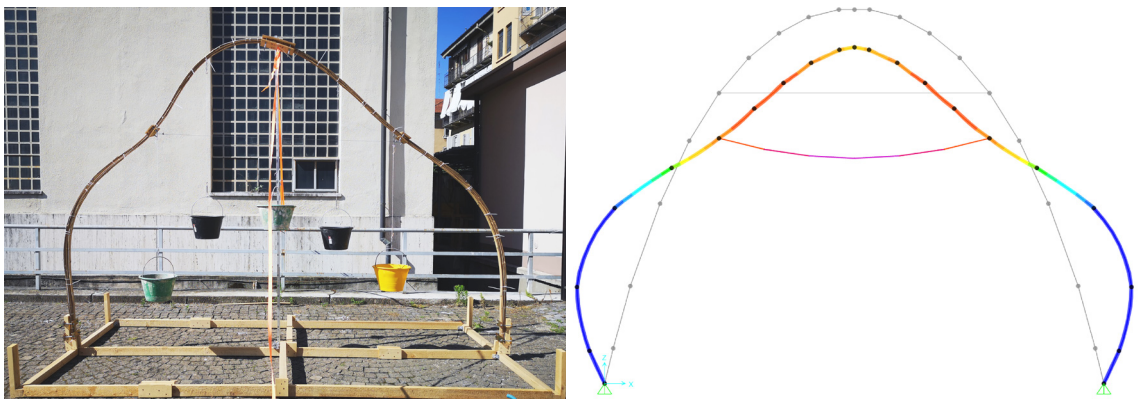
A questo step si è registrato uno spostamento di 15 cm con un carico di 27,5 kg. Nell'analisi svolta su software, lo stesso abbassamento è stato registrato per un carico di 65,7 kg, ovvero un rapporto del 58% superiore.

Precedentemente, infatti, la deformata assunta dalla struttura era differente e coincideva maggiormente con quella che estrapolata dal software. Ciò fa presupporre che se l'arco non avesse manifestato questa asimmetria sarebbe stato possibile incrementare ulteriormente il carico ultimo.

Figura 122

Configurazione iniziale dell'arco composto (7+5)

Figura 123



Deformate allo step 12
A sinistra: modello reale; a destra: modello matematico

Figura 124

Collasso allo step 16 (37 kg di carico)

8.4. Realizzazione del modulo di serra

Per la realizzazione del modulo finale ho deciso di apportare delle accortezze di metodo nella realizzazione degli archi.

In particolare, ho deciso di realizzare le colonne come elementi rettilinei all'interno del laboratorio Lastin, potendo così semplificare la messa in opera e aumentare la precisione geometrica utilizzando strumenti come i morsetti fissi. In questo modo è stato possibile anche disporre meglio le strisce tra loro e comprimerle maggiormente durante la legatura con fascette.

Le fascette utilizzate sono in nylon 6.6 (300x4,8 mm e hanno una resistenza a trazione di 24 kg) vista la lunghezza non sufficiente di quelle in acciaio in mio possesso, ma che restano da preferire.

Inoltre, al fine di limitare lo scorrimento delle strisce si decide di realizzare la legatura ogni 30 cm rispetto ai 50 precedenti. Anche questo aspetto potrebbe essere tema di future indagini, valutando le differenze di resistenza e comportamento degli archi dovute al passo della legatura e al tipo di materiale utilizzato per le stesse.

Figura 125

A sinistra: fase di realizzazione di una colonna;
a destra: risultato finale.

Una volta terminati tutti e sei i fasci, si è proceduto alla piegatura tramite centina degli archi, fissando le colonne con il giunto di colmo e aggiungendo la catena agganciata al giunto di tipo 2.

Figura 126

Archi finali.

Si procede posizionando gli archi e fissandoli alla base come in precedenza.

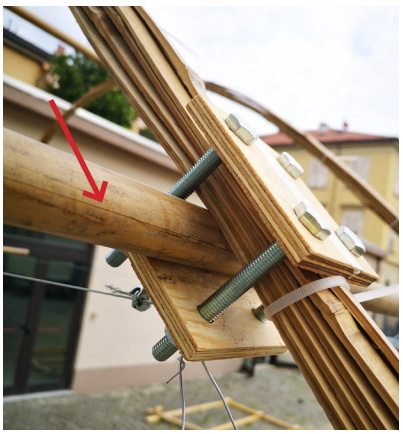
Lo step successivo è stato quello di realizzare i correnti longitudinali che collegano i tre archi tagliando tre culmi interi della lunghezza di 2,5 m.

I due correnti laterali vengono posizionati a 2,3 m da terra tra le piastre che compongono il giunto di tipo 2 poggiandoli direttamente al fascio, mentre il terzo che collega i punti di chiave degli archi, viene stretto al giunto di tipo 1 tramite fascette.

Grazie ai passanti longitudinali gli archi mantengono una distanza precisa di un metro tra di loro dalla base alla cima.

Serrando il giunto di tipo 2, tra la colonna e il culmo intero, quest'ultimo in un'occasione si è fessurato, necessitando la sua sostituzione (figura a lato).

Figura 127



Fessurazione del culmo dovuto allo schiacciamento

Ciò è avvenuto poiché si è formato uno stato tensionale che sottopone il culmo ad un momento flettente trasversale che può raggiungere il suo valore massimo (1.4 Mpa secondo la normativa colombiana NSR-10). Questo meccanismo di rottura è frequente nel bambù, poiché avendo una sezione cava e una disposizione delle fibre parallela alla direzione del culmo, la sua resistenza allo schiacciamento laterale risulta uno dei suoi punti deboli.

Infine, si procede ad irrigidire maggiormente la struttura tramite l'inserimento dei controventi a "X" in acciaio, orizzontali e verticali, fissati e regolati tramite tensori anch'essi in acciaio.

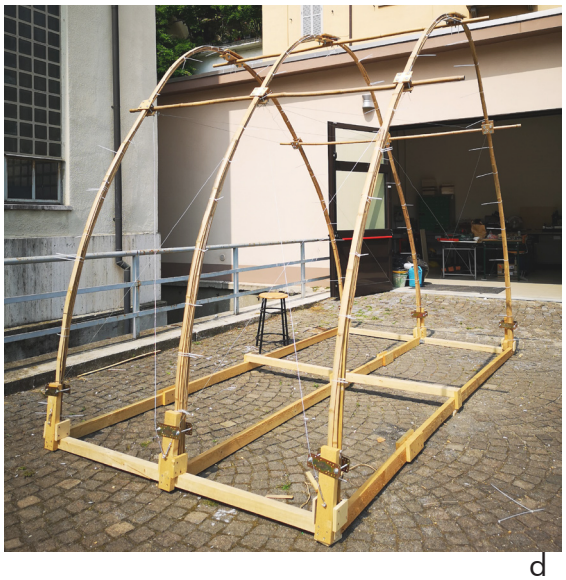
Dopo una serie di aggiustamenti e regolazioni, il risultato finale è il seguente, illustrato tramite documentazione fotografica.

Figura 128

a

b

c



d

Viste complete del modulo

Figura 129

a

b

c

Foto di dettagli del modulo

L'ultimo passaggio è stato testare la resistenza e il comportamento della struttura in termini di carico-spostamento, analogamente a quanto svolto al capitolo 6.1.

8.4.1. Analisi modello 1

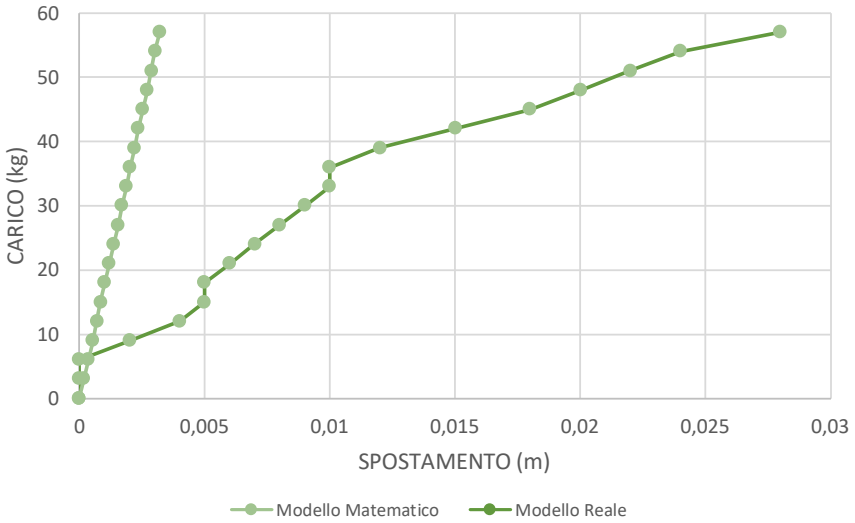
La prima prova di carico è stata svolta applicando progressivamente sei carichi puntuali, due per ogni arco, posizionati sul giunto di tipo 2 come in foto.

Figura 130

Anche in questo caso l'incremento avviene con uno step di 0,5 kg per punto di pressione, per un totale di 3 kg per step ed è stato valutato lo spostamento del punto di colmo dell'arco di mezzo.

Tab 38

Step	Carico	Spostamento reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0	0
2	3	0,0002	0,0002
3	6	0,0003	0,0003
4	9	0,0005	0,0005
5	12	0,0007	0,0007
6	15	0,0008	0,0008
7	18	0,0010	0,0010
8	21	0,0012	0,0012
9	24	0,0014	0,0014
10	27	0,0015	0,0015
11	30	0,0017	0,0017
12	33	0,0019	0,0019
13	36	0,0020	0,0020
14	39	0,0022	0,0022
15	42	0,0023	0,0023
16	45	0,0025	0,0025
17	48	0,0027	0,0027
18	51	0,0029	0,0029
19	54	0,0030	0,0030
20	57	0,0032	0,0032



Questa prima analisi è stata interrotta prima che la struttura mostrasse segni di cedimento, dopo un abbassamento di 3 cm circa, poiché i secchi che contenevano l'acqua usata come carico avevano raggiunto la loro capienza.

Alla rimozione dei carichi la struttura ritorna esattamente nella configurazione di partenza a dimostrazione del fatto che stesse lavorando solo in campo elastico.

Decido, dunque, di ricominciare la prova partendo da un carico iniziale di 30 kg dovuto all'applicazione di sei pesi da 5 kg l'uno più 3 kg dovuti ai secchi per provare a portare la struttura al collasso.

Per velocità viene raddoppiato l'incremento di carico per step passando da 3 kg a 6 kg.

Figura 131

Applicazione del carico tramite secchi d'acqua più il peso da 5 kg

L'arco centrale dopo l'applicazione dei pesi e dei secchi presenta una deformazione verticale iniziale di 0,029 m.

Anche in questo caso l'analisi viene interrotta prima del collasso della struttura per il raggiungimento del carico massimo applicabile ma la deformata che assume la struttura è molto simile a quella risultante dalle analisi su software.

Sarebbe necessario in futuro poter svolgere questa prova con un tenditore a cricchetto collegato ad un dinamometro in modo da poter arrivare al carico finale con maggiore precisione.

Applicando un carico quasi perfettamente simmetrico e verticale, la struttura subisce uno schiacciamento e abbassamento di ogni suo punto tale da non far lavorare i controventi che non risultano in tensione.

Lo stesso avveniva durante le simulazioni su Sap2000 (si veda fig. 89).

Di seguito si riportano i valori tabellari per il modulo reale e quello estrapolato da software con relativo grafico.

Tab 38

Step	Cari-co	Spostamento reale	Spostamento matematico
	(kg)	(m)	(m)
1	0	0	0,0000
2	33	0,009	0,0019
3	39	0,012	0,0022
4	45	0,014	0,0025
5	51	0,017	0,0029
6	57	0,020	0,0032
7	63	0,021	0,0035
8	69	0,026	0,0038
9	75	0,030	0,0042
10	81	0,034	0,0045
11	87	0,038	0,0048

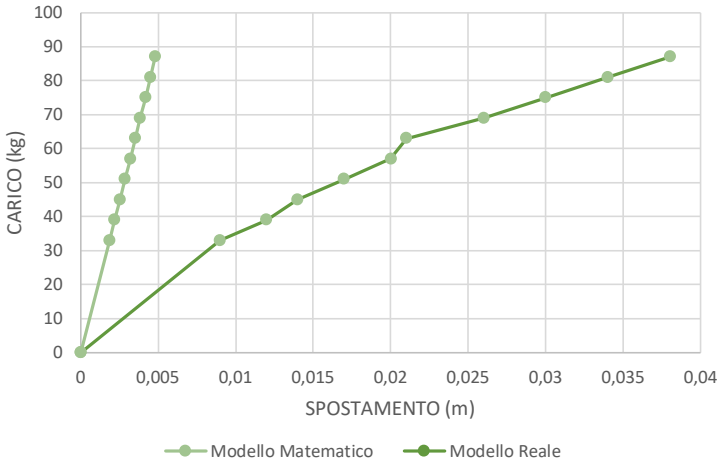


Figura 132

Deformata della struttura allo step 11, carico di 87 kg.

Per evitare questo tipo di deformazione potrebbe essere utile sostituire le catene degli archi con un culmo rigido che lavori anche a compressione che limiterebbe lo schiacciamento dei singoli archi e della struttura lungo l'asse Z.

In questo caso bisognerebbe applicare un nuovo tipo di giunto che permetta il collegamento di questo nuovo elemento in maniera analoga a quanto avviene per i passanti longitudinali. In seguito si esporrà l'ipotesi del suddetto elemento.

Un altro fenomeno osservato quando la struttura era a pieno carico è stato una leggera inclinazione degli archi, soprattutto nella parte sommitale, rispetto all'asse su cui giacevano. Similmente a quanto avvenuto durante le analisi sui singoli

archi, il motivo può essere dovuto ad un'eccentricità nei carichi, alle differenze geometriche e dimensionali delle colonne, al sistema di aggancio alla base che ha permesso delle lievi rotazioni o ancora allo scorrimento delle lamelle che provoca torsione.

Alla rimozione dei carichi la struttura ritorna alla configurazione indeformata di partenza.

Figura 133

Vista laterale allo step 11, è osservabile il fenomeno di ribaltamento degli archi

8.4.2. Analisi modello 2

La seconda prova effettuata, anch'essa in maniera simile a come sviluppata su software, avviene applicando sei carichi concentrati, questa volta agganciati al giunto in chiave (fig. 134) sempre valutando lo spostamento dell'arco centrale.

Come in precedenza, viene applicato un carico iniziale di 33 kg per poter portare la struttura al carico massimo.

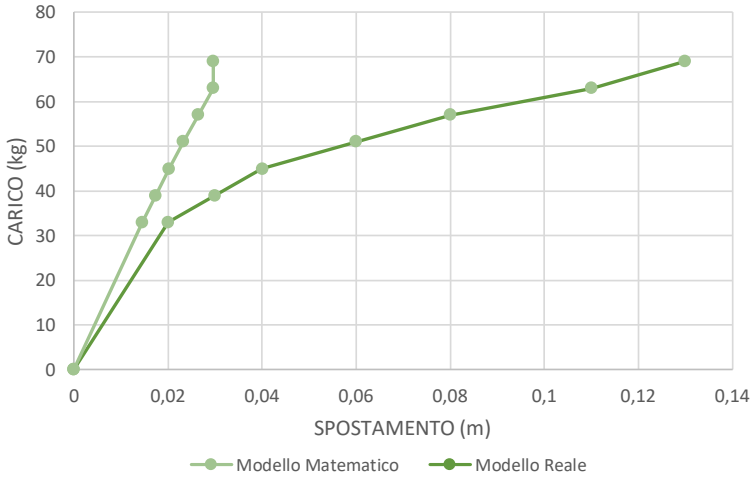
Figura 134

Applicazione dei carichi in chiave

Si ricavano i seguenti valori prima che la struttura collassi:

Tab 39

Step	Carico	Spostamento reale	Spostamento matematico
	(Kg)	(m)	(m)
1	0	0	0,000
2	33	0,02	0,014
3	39	0,03	0,017
4	45	0,04	0,020
5	51	0,06	0,023
6	57	0,08	0,026
7	63	0,11	0,030
8	69	0,13	0,035
9	69	collasso	0,035



Anche in questo caso l'andamento che assume la struttura è riconducibile a quello assunto dal modello digitale, ma a differenza di quest'ultimo, in cui la deformazione era perfettamente simmetrica, in questo caso le imperfezioni iniziali degli archi vengono fortemente accentuate. Ciò produce un'asimmetria rispetto all'asse verticale degli archi per cui se una delle due colonne tende ad abbassarsi, l'altra si "ingobba" alzandosi (fig. 135).

Il collasso di tutta la struttura avviene però per il fenomeno di ribaltamento laterale, precedentemente descritto, in particolare dell'ultimo arco esterno verso cui la struttura era sbilanciata. Il cedimento è avvenuto improvvisamente, spaccando le fascette che bloccavano il passante longitudinale centrale sul giunto di tipo 1.

Le fascette in nylon, per quanto versatili e veloci da montare, si rivelano un punto debole; è da preferire, in questo caso, l'uso delle fascette metalliche con vite che danno la possibilità di stringerle a piacimento e permettono la reversibilità del sistema.

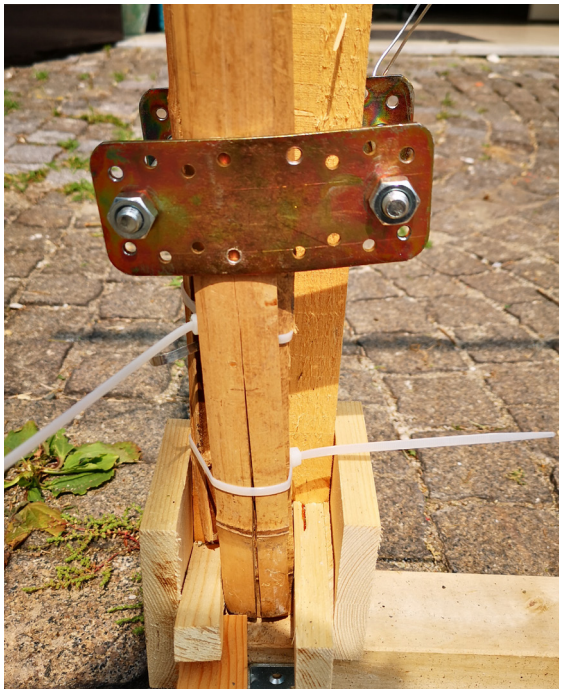
Non avendo avuto la possibilità di realizzare dei nuovi archi e un nuovo modulo, un altro aspetto che andrebbe considerato è il fatto che la stessa struttura ha subito precedentemente due test di carico. Per quanto essa abbia lavorato apparentemente in campo elastico, ciò può avere indebolito il sistema.

Infine, a seguito del collasso del modulo, si sono verificate anche delle fessurazioni longitudinali su alcune strisce che compongono le colonne. Anche in questo caso ciò è avvenuto in prossimità dei nodi di collegamento con gli elementi longitudinali e alle basi.

Figura 135

Deformata della struttura allo step 8, prima del collasso, carico di 69 kg.

Figura 136



Fenomeni di fessurazione nel materiale

8.5. Sviluppi e considerazioni

A seguito dei test effettuati risultano evidenti una serie di elementi che possono essere migliorati al fine di rendere la struttura maggiormente resistente ai carichi e alle sollecitazioni.

8.5.1 Nuovi giunti e nuovo modulo

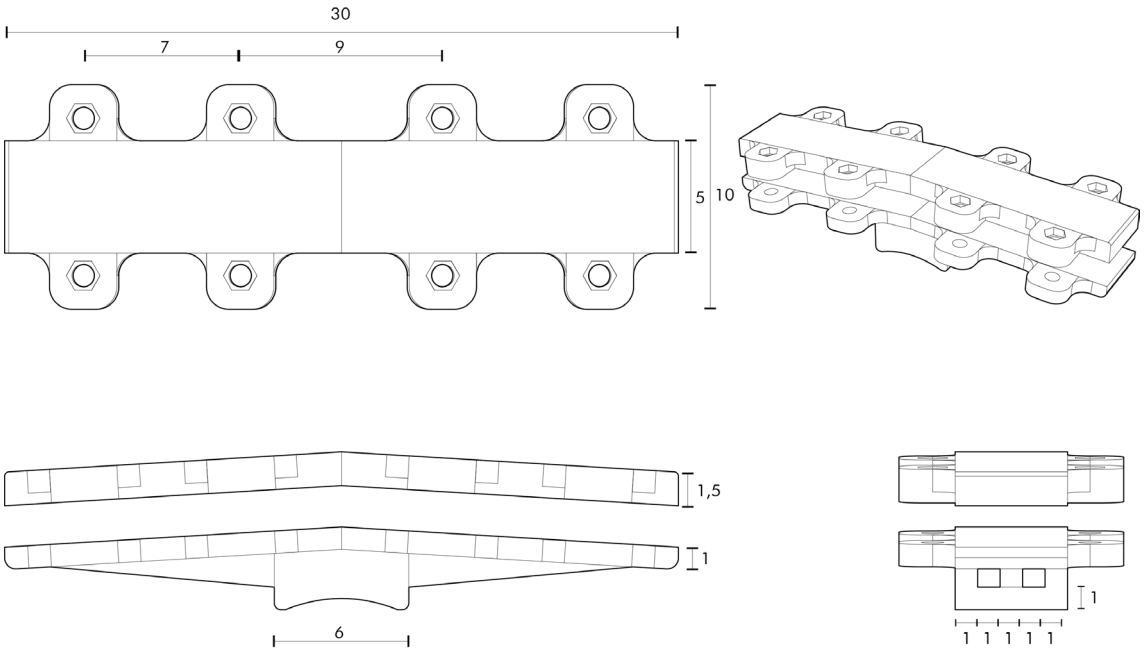
Visti i meccanismi di rotazione e torsione delle colonne che si sono innescati durante i test sui singoli archi e sul modello finale, si rende necessario ripensare al giunto in chiave.

Decido di aumentarne la lunghezza lasciando invariata la larghezza e la geometria generale; vengono però aggiunti altre quattro "culle" per i nuovi bulloni.

Infine, analizzando il meccanismo che ha portato a rottura il giunto durante i test sugli archi, si irrobustisce la sezione attraverso l'aggiunta di una "mensola" trasversale che assorba il momento flettente applicato alle ali del giunto.

Il risultato ipotizzato è il seguente:

Figura 138

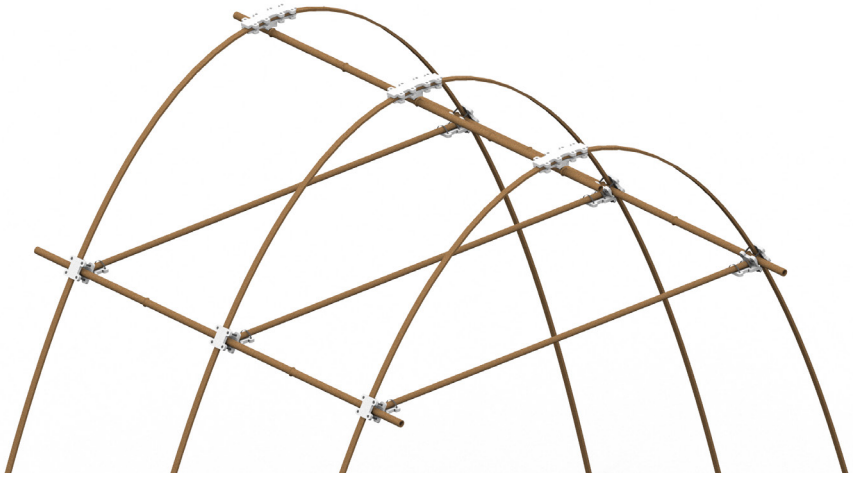


Planimetria, prospetti e assonometria nuova versione del giunto 1

Come anticipato, si suggerisce di sviluppare un'analisi agli elementi finiti per valutare la reale resistenza del pezzo sotto sforzo.

Decido, inoltre, di apportare delle modifiche anche al giunto di tipo 2, permettendogli di collegare un nuovo culmo, giacente lungo l'asse dell'arco, insieme alle colonne e ai traversi che irrigidisca maggiormente la struttura.
Infatti, come si è notato durante i test reali sul modulo, i controventi non risultavano in tensione a causa dello schiacciamento degli archi e non lavorando a compressione rendono necessario un elemento rigido come un culmo intero.
Il giunto e la struttura assumono la seguente conformazione.

Figura 139



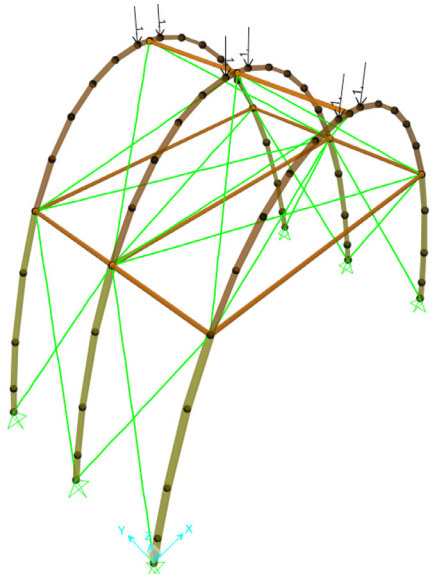
Vista assonometrica

Figura 140

Render dell'evoluzione del giunto 2

Procedo analizzando il nuovo modulo tramite analisi non lineare su Sap2000 come avvenuto in precedenza per il test 2 (paragrafo 6.1.2), ovvero applicando progressivamente un carico puntuale su sei punti fino all'abbassamento della linea di colmo dell'arco centrale di -0,1 m avvenuta per step (10).

Figura 141



Conformazione del nuovo modulo e punti di applicazione dei carichi

Tab 40

Step	Carico	Spostamento
	kg	m
1	0	0
2	0,83	0,005
3	2,28	0,015
4	3,52	0,025
5	4,59	0,035
6	5,51	0,045
7	6,13	0,052
8	6,86	0,062
9	7,52	0,072
10	8,10	0,082
11	8,62	0,100

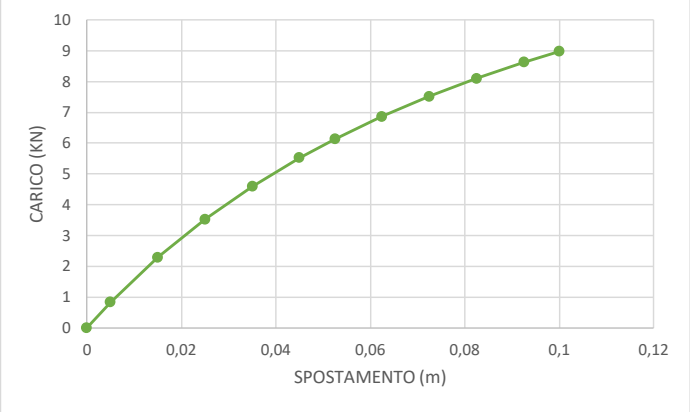
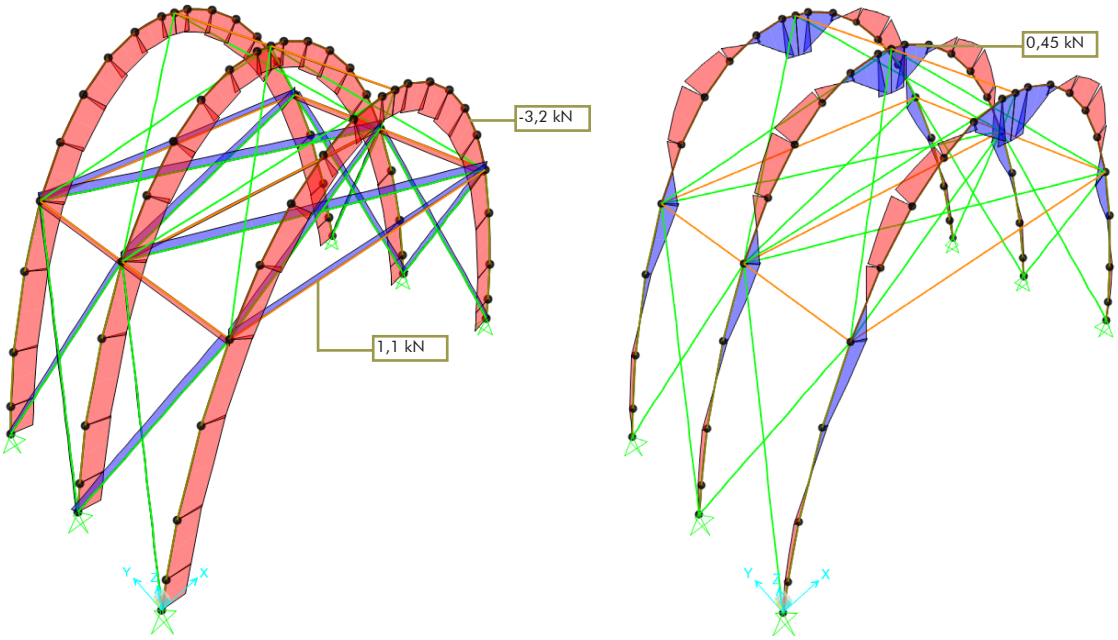


Figura 142



A sinistra: diagramma degli sforzi assiali con valore massimo,
in negativo gli sforzi di compressione, in positivo di trazione;
A destra: diagramma del momento con valore massimo

Si eseguono le verifiche a pressoflessione e flessocompressione che risultano entrambe soddisfatte:

$$\frac{3,2}{15,9} + \frac{0,45}{15\,(1\text{-}1,5 \cdot 3,2/597,9)} = 0,51 < 1$$

$$\frac{1,1}{21,68} + \frac{0,45}{15} = 0,09 < 1$$

Figura 143

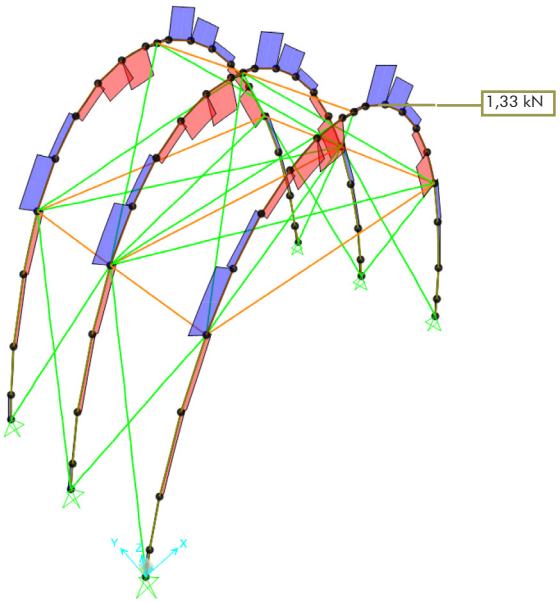


Diagramma di taglio con valore massimo

Figura 144

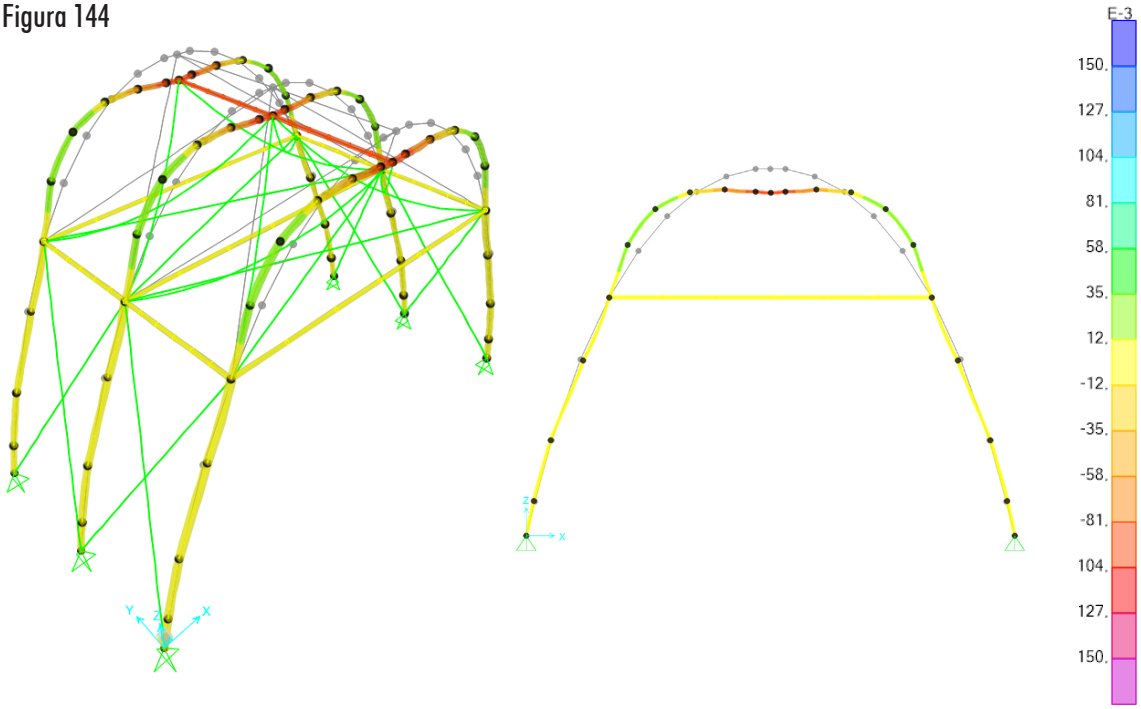


Diagramma di taglio con valore massimo

8.5.2 Scorrimento delle strisce

Un altro aspetto fondamentale che ha portato la struttura a non rispondere alle sollecitazioni come per il modello digitale è stato lo scorrimento delle strisce lungo l'asse delle colonne e anche trasversalmente come spiegato al paragrafo 8.3.5.

Per quanto le fascette, sia metalliche che in plastica, stringessero saldamente le lamelle e solo in una occasione una di quelle in plastica si è rotta (probabilmente per difetto di fabbrica), sono stati notati questi fenomeni.

In questo modo le singole strisce rispondono ai carichi quasi singolarmente e la sezione non risulta monolitica, come avviene per i test su software.

È un aspetto da tenere in considerazione per poter applicare un fattore correttivo durante i test matematici che permetta di avere un risultato maggiormente approssimabile al comportamento reale.

Sarebbe stato possibile estrapolare questo coefficiente tramite test in laboratorio valutando la resistenza allo scorrimento provocata dalle fascette applicando una forza di trazione su dei provini e misurando lo scorrimento rispetto al carico.

In questo modo sarebbe stato possibile valutare il passo della legatura ottimale e valutare eventuali differenze dovute al materiale scelto (fascette di plastica o

metalliche).

A causa della chiusura dell'Università non è stato possibile effettuare la suddetta prova.

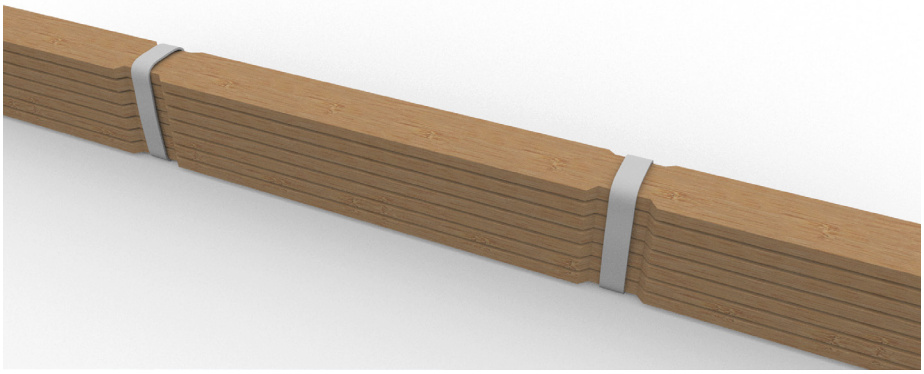
Si suggerisce, inoltre di attuare una serie di accorgimenti tecnici, quali:

-Ridurre la curvatura limando le lamelle fino a raggiungere una sezione più rettangolare e piatta.

-Inserire alla base un sistema di vincolo rigido, simile alle piastre stringenti che bloccavano le colonne alla struttura, ma in direzione ortogonale alla sezione, in modo da impedire la torsione dovuta allo scorrimento.

-Un'altra strada percorribile sarebbe, dopo aver curvato le colonne, incidere lateralmente i fasci in modo da realizzare una rientranza nella sezione su cui posizionare la legatura in modo che non possa scorrere rispetto a quella posizione.

Figura 145



Render esplicativo della tecnica di incisione per la fasciatura

Questa lavorazione nelle colonne aumenterebbe la possibilità che i fasci lavorino insieme come un elemento monolitico, ma resta da considerare il maggior costo di realizzazione e gli effetti che potrebbero derivare da questa incisione nel bambù.

8.5.3 Durabilità del materiale

La durabilità del bambù è attualmente uno dei limiti maggiori per il suo utilizzo. Inoltre, rispetto ad un culmo intero, utilizzando le strisce la superficie di struttura esposta all'esterno è maggiore.

Durante la scelta di acquisto del materiale si era deciso di non fargli subire alcun trattamento atto a preservarne la durata e l'integrità poiché si ipotizzava di poter svolgere dopo poco tempo le prove sul modello reale.

Nell'ottica di sviluppare un prodotto commerciabile è fondamentale, invece, considerare che la struttura è stata progettata per avere una vita nominale di almeno 5 anni.

Durante questo periodo la serra subirà inevitabilmente fenomeni di condensa, e sbalzi di temperatura, potrebbe entrare a contatto con l'acqua durante l'irrigazione delle piante o rischiare di subire attacchi da parte di funghi e insetti, compromettendone la durata e la resistenza.

Diventa necessario far subire alle strisce un trattamento di protezione che crei uno strato impermeabile. A questo scopo esistono svariati metodi da poter applicare; se ne elencano brevemente alcuni:

-Di tipo tradizionale: economici ma di cui non è stata verificata scientificamente l'efficacia (affumicamento, immersione, con il fango, cottura...);

- Chimici: tecniche di immersione in acqua e sostane quali boro, rame e cromo (2,5% per ciascun componente).

Quest'ultimo tipo di trattamento è fortemente indicato per le strisce, poiché la sezione interna, che sarebbe a contatto con il composto, è particolarmente assorbente. Invece in un culmo intero l'assorbimento avverrebbe solo in parte.

Va considerato, però, che i metodi di trattamento chimico hanno delle conseguenze: fanno aumentare inevitabilmente il costo del prodotto (anche del 30%) e diventa più difficile smaltirli poiché i culmi trattati perdono la loro completa biodegradabilità e di conseguenza va evitato di contaminare l'aria e le falde acquifere.

Conclusione

In conclusione, il bambù e il modello di serra progettato risultano adatti allo scopo, resta da valutare, però, un altro aspetto che incide fortemente nella scelta di un prodotto come questo, ovvero il costo al metro quadro rispetto ai modelli tradizionali (dal preziario della Regione Piemonte: 25 euro al mq per la struttura di una serra a tunnel composta da tubolari zincati e correnti laterali).

Sotto questa voce, aldilà del prezzo del materiale che può variare notevolmente in base al luogo di provenienza, incidono i trattamenti protettivi che dovrebbero subire le strisce, la piallatura, l'eventuale incisione per accogliere le fascette stringenti, nonché il costo finale dei giunti.

Anche la fase di assemblaggio dei fasci che formano le colonne inciderà sul costo, poiché è un lavoro che necessita di un'adeguata maestria da parte del lavoratore in azienda. Di conseguenza però, al fruitore è affidato solo il compito di assemblare i pezzi finiti (colonne, giunti, traversi, controventi, pali di fondazione e telo) come per i modelli attualmente in commercio.

In questo modo si limita l'errore dovuto all'inesperienza e si velocizza la fase di montaggio.

Restano comunque da considerare i benefici rispetto ai costi che l'uso di un materiale come il bambù, utilizzato in un approccio più industrializzato e meno tradizionale, apporterebbe in termini di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Il tutto tenendo in considerazione i tempi brevissimi di rigenerazione di questo materiale e dunque il suo facile approvvigionamento ed utilizzo se si ampliasse la filiera interna nazionale.

Bibliografia

Libri:

-Allwood J., Cullen J., *Sustainable Materials – with Both Eyes Open: Future Buildings, Vehicles, Products and Equipment, Made Efficiently and Made with Less,* New Material, UIT Cambridge Ltd, Cambridge, 2011.

-Arce O.A., *Fundamentals of the design of bamboo structures,* Eindhoven Technische Universiteit, Eindhoven, 1993.

-Cardenas Laverde M. *Il bambù come materiale da costruzione,* Sistemi editoriali Se, Napoli, 2008.

-Comi C., Corradi dell'Acqua L., *Introduzione alla meccanica strutturale*, Mc Graw Hill Education, 2016.

-Cucco F. *Lezioni di statica*, Grafill, Bologna, 2009.

-Harries K., *Nonconventional and vernacular construction materials. Characterisation, Propertiers and Apllication*, edited by Kent A. Harries, Bhavna Sharma, Woodhead, 2006.

-Huy B., Thamg T. Long, *A manual for Bamboo forest biomass and carbon assessment,* INBAR, technical report No. 40, 2019.

-Janssen J. J.A, *Design and building with bamboo*, Editor Arun Kumar, 2000.

-Janssen J.J.A, *Mechnial Propies of Bambo (Forestry Seces)*, Kluwer Accademic ublishers, Boston, 1991.

-Klaus D., Il 31, *Bambus-Bamboo, Bamboo as a building material*, 1985.

-Lobovikov M., Paudel S., Piazza M., Ren H., Wu J., *Food and Agriculture Organisation of the United Nations- FAO*, World Bamboo Resources. Non-Wood Forest Products, Rome, 2007.

-Lopez O. H., *Bamboo. The gift of gods*, O. Hidalgo-Lopez, 2003.

-Mansur A., Frederick A. Kamke, *Bamboo as a construction material: strength analysis of parallel strand lumber from Calcutta bamboo (Dendrocalamus strictus)*, Department of Bio-composite Technology, Universiti Teknologi MARA and Department of Wood Science and Engineering, Oregon State University, 2005.

-Minke G., *Building with Bamboo. Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Birkhäuser Verlag, Basilea, 2012.

-Muttoni A., *L'arte delle strutture, introduzione al funzionamento delle strutture in architettura*, Mendrisio Academy Press, 2006.

-Panippa C., Bamboo: *An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites.* Journal

of Materials Science Research; vol. 2, No.2, Canadian Center of Science and Education, 2013.

-Van Der Lugt P., King C. *Bamboo in the Circular Economy, The potential of bamboo in a zero-waste, low-carbon future*, INBAR, 2019.

-Van Lengen J., *Manual do arquiteto descalco,* Editore: Livraria do arquiteto, Bogota, 2004.

Documenti di lavoro:

-Ahmad M., Kamke F.A. *Bamboo as a construction material: strength analysis of parallel strand lumber*, in atti del convegno, Department of Bio-composite Technology, Faculty of Applied Sciences, University Technology MARA, Rio de Janeiro, 11-15 2015.

-Buckingham K., Henley G. *Bamboo and Climate Change Mitigation,* in "Technical Report" · January 2010.

-Chiacchiera P., Ghirardotti D. *An investigation of bamboo-strip constructions built according to Yona Friedman's manuals* in "Conscrution Materials", March 2019.

-Cyril Okhio Ph.D., C.Eng., Jeroen W., Yemeserach T. Mekonnen, *An Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Bamboo and Cane*, in "International Journal of Polymer Analysis and Characterization", January 2013

-Deog-Jae H., Sangyoup K., *Fatigue Analysis of Greenhouse Structure under Wind Load and Self-Weight* in "Applied sciences", 2017.

-Dinie A., Mohd A., Mohd A., Mohd H., Mohd W., Hussin1, Mohamed A. I., Han-Seung Lee, Nor H., Abdul S. L. *Mechanical properties of different bamboo species,* in "MATEC Web of Conferences", Universiti Teknologi Malaysia, January 2017.

-Esti Asih Nurdiah, *The Potential of Bamboo as Building Material in Organic Shaped Buildings*, in Procedia, Urban Planning and Architecture Design for Sustainable Development, 2015.

-Fabiani M. *Proprietà fisiche e meccaniche di bambù di origine italiana,* Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, ed Architettura, Università Politecnica delle Marche, Italia, 2019.

-Gonzalez-Lezcano R., Hormigos-Jimenez S., Ros-García J.M., *Structural Behaviour Benefits of a Hybrid Steel-bamboo Emergency House*, in "Journal of Green Engineering", 2018.

-I-Chih Chen, June-Hao Hou, *Design with bamboo bend. Bridging natural material and computational design*, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, 2016.

-Imanishi N., Hinoki S., Muraoka M., Tateyama R., U-Ichi abe, Kensuke H. and Ikeda H., *Bamboo concrete shells an Adaptable Construction Method Using Onsite Materials in a Remote Location*, atti

del convegno, Keio University, Japan, 2017.

-Lorenzo R., Chuhee Lee, Juan G. Oliva-Salinas, *BIM Bamboo: a digital design framework for bamboo culms* in ICE, publishing, Department of Civil, Environmental and geomatic engineering, University College London, London, UK 2016.

-Maurina A., *Curved Bamboo Structural Element*, Conference Paper, July 2015.

-Maurina A., *Application of Bundled Bamboo Split as Structural Elements* in "Resilient Building Design and Material for Future", Conference Paper, 2015.

-Maurina A., *Bamboo Architectonic: Experimental Studies using Bundled-Bamboo-Split (BBS)* in "International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology" Vol. 7 n.3, 2016.

-Moreira L.E., Da Silva F.J., *Design and Mechanical Tests of Bamboo Masts*, in "Key Engineering Materials", June 2012.

-Sassu M., De Falco A., Giresini L., Puppio M. L., *Structural Solutions for Low-Cost Bamboo Frames: Experimental Tests and Constructive Assessments*, 2016.

-Sharma B., Gatóo A., Bock M., Ramage M. *Engineered bamboo for structural applications*, in "Costruction and building Materials" Department of Architecture, University of Cambridge, UK, 2015.

-Ubolsook P. *Structural Analysis of Bamboo Trusses Structure in Greenhouse*, in "International Conference on Environmental Science and Technology ", 2011.

-Vahanvati M., *The Challenge of connecting bamboo*, World Bamboo Congress, Korea 2015.

-Xiaobing Yu, *Bamboo: Structure and Culture. Utilizing bamboo in the industrial context with reference to its structural and cultural dimensions*, VDM Verlag, 2008.

Sitografia:

-http://architetturaclimatica.blogspot.com/2013/11/serre.html (consultato il 23/10/2019).

-http://www.scienzaegoverno.org/content/5-materiali-di-copertura-innovativi-nelle-serre (consultato il 26/09/2019).

-https://novagricoltura.edagricole.it/frutticoltura-e-orticoltura/serre-e-pacciamature-la-carica-dei-materiali-plastici-innovativi/ (consultato il 26/09/2019).

https://www.guaduabamboo.com/guadua/comparing-mechanical-properties-of-bamboo-guadua-vs-moso (consultato il 1/01/2019).

https://www.echocommunity.org/resources/93e069b6-88dc-40ce-8bd7-d541ddf00b6f (consultato il 30/10/2019)

https://en.wikipedia.org/wiki/United_Nations_REDD_Programme (consultato il 11/11/2019)

https://sustainabledevelopment.un.org/sdg13 (consultato il 11/11/2019)

https://www.inbar.int (consultato il 11/11/2019)

https://en.wikipedia.org/wiki/Bonn_Challenge (consultato il 9/12/2019)

https://www.zerottonove.it/bambu-architettura-ingegneria-e-natura/ (consultato il 13/12/2019)

http://www.piergiorgioodifreddi.it/wpcontent/uploads/2015/12/ODIFREDDI_maggio2016.pdf (consultato il 17/12/2019)

https://docplayer.it/44574470-La-catenaria-nella-realta.html (consultato il 17/12/2019)

https://www.royalacademy.org.uk/art-artists/work-of-art/st-pauls-cathedral-church-geometrical-section-of-the-dome-transepts-and-x (consultato il 16/12/2019)

http://gernotminke.gernotminke.de/projects/ (consultato il 26/12/2019)

https://medium.com/@emma.sharp/hatch-the-wonders-of-bamboo-structures-in-hong-kong-a01f85a907e7 (consultato il 15/01/2020)

https://archnet.org/sites/15659/media_contents/113381 (consultato il 16/01/2020)

https://www.archdaily.com/131747/shanghai-houtan-park-turenscape (consultato il 20/01/2020)

Tesi

-Cruz E., Valcàrcel M., *Innovaciòn tecnològica desde las villas. Una propuesta de recualificacòn edilicia no convencional dentro de la villa 15 de Buenos Aires*, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Departamento de Sociología, La Plata, 2008.

-Damigella D. *HAITI Sperimentazione di un blocco a matrice cementizia fibrorinforzato con bambù per il mercato delle costruzioni haitiano*. Politecnico di Torino, 2019.

-Denittis M. *Analisi sperimentale e numerica di un telaio in Guadua Angustifolia Kunth caricato orizzontalmente: il bambù come possibile alternativa ecosostenibile ai tradizionali materiali da costruzione*. Università degli Studi di Bologna, 2019.

-Greco S. *Il bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per prospettive sostenibili*. Università degli studi di Bologna, 2017.

-Jackebed Leão França J., *Costruzioni contemporanee in bambù: Le connessioni dei culmi tramite corda*. Politecnico di Torino, Settembre 2018.

-Laroque P. *Design of a low cost bamboo footbridge*, Department of Civil and Environmental Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering In

Civil and Environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology, 2017.

-Laroque P., *Design of a low cost bamboo footbridge*, Ecole Speciale des Travaux Publics, Paris, 2017.

-Macigni S., *Analisi strutturale di strutture in bambù: il caso della Iglesia sin Religión*, Università di 2013.

-N. Mordà, P. Macías, M. Stroscia, P. Bajzelj, Do Mo, *Il Bambù: una scelta di "Ecologia Strutturale"* Politecnico di Torino.

-Phanratanamala S., *The Study of Design and Structural Potential of Bamboo Practical Joints and Frame Truss System*, Pilot Project of 'Kashiihama House for All' 2013.

-Proverbio F., Ronchi I., Urbani I. - *Progetto di un centro culturale multifunzionale sostenibile, caratterizzato dall'utilizzo innovativo di materiali tradizionali,* Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura, Politecnico di Milano, 2014.

-Toderi S. *Architettura e risorse locali: il caso di una Spice Processing Unit a Buttala, Sri Lanka*. Università di Bologna, Anno accademico 2016/17.

-Torrelli M., *Nuovi materiali: L'acciaio vegetale: il bambù ad uso strutturale*. Università agli studi di Bologna, 2019.

-Virgilio P. *Esplorazioni delle geometrie funicolari e antifunicolari attraverso la statica grafica enterattiva*, Politecnico di Torino, Luglio 2018.

Normativa:

-Reglamento Colombiano De Construccion Sismo Resistente NSR-10, Titulo G. Estgructuras de madera y estructuras de Guadua, 1997.

-Norma Técnica E.100 Bambù, 2012.

-Propiedades Físico Mecánicas Bambú NTC 5525, 2018.

-BS EN 13031-1-2019, Greenhouse - Design and construction.

-BS EN 26891-1-1991, Timber structures, Joints made with mechanical fasteners.

-CNR-DT 207/2008

-ISO 22156-2004, Bamboo - Structural design.

-ISO 22157-2004, Bamboo - Determination of physical and mechanical properties (parte 1 e 2).

-UNI EN 1991-1-3-2004, Carichi da neve.

-UNI EN 1991-1-4-2005, Azioni del vento.

RINGRAZIAMENTI

ALLA MIA FAMIGLIA,

A CHI C'È STATO SEMPRE,

A CHI SE NE ANDATO,

A CHI MI HA SUPPORTATO,

A CHI NON HA CREDUTO IN ME,

A CHI NON HA MAI SMESSO DI FARLO

AGLI AFFETTI PERSI E A QUELLI TROVATI,

AGLI AMICI DI UNA VITA,

A QUELLI INCONTRATI LUNGO IL PERCORSO,

A QUELLI CHE VERRANNO,

E A ME.